



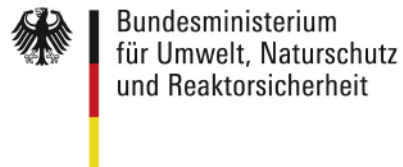
# Strukturelle und aerodynamische Auslegung eines Rotorblattes mit Active Flow Control (AFC)-Elementen in modularer Hybridbauweise

## Abschlussbericht

**ZE:** TEMBRA GmbH & Co. KG  
Warschauer Str. 38 • 10243 Berlin- Germany  
Tel: +49 (0)30. 2000 339-0 / Fax: +49 (0)30. 2000 339-99  
[www.tembra.com](http://www.tembra.com)

Förderkennzeichen:	Projektlaufzeit:	
<b>0325274</b>	<b>01.04.2011 - 30.09.2013</b>	
Kurzbeschreibung:	Datum:	Seitenzahl:
<b>AFC-Rotorblatt in modularer Hybridbauweise</b>	<b>20.02.2014</b>	<b>86</b>

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0325274 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## INHALT

1	EINLEITUNG UND AUSGANGSDARSTELLUNG.....	5
1.1	Aufgabenstellung .....	5
1.1.1	Gesamtziele.....	5
1.1.2	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele .....	6
1.2	Voraussetzungen für die Durchführung.....	7
1.3	Wissenschaftlicher und technischer Ausgangsstand.....	7
1.3.1	Flexible Hinterkante – Bekannte Konzepte und ähnliche Vorhaben.....	9
1.3.2	Eingehende Patentrecherche .....	10
1.3.3	Verwendete Fachliteratur, Patente sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste .....	11
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	13
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	14
1.5.1	Smart Blade GmbH .....	14
1.5.2	Technische Universität Berlin .....	14
1.5.3	EUROS GmbH.....	15
1.5.4	DEWI-OCC Offshore and Certification Centre .....	16
1.5.5	Weitere Stellen der Zusammenarbeit.....	16
2	EINGEHENDE DARSTELLUNGEN.....	17
2.1	Erzielte Ergebnisse im Einzelnen .....	17
2.1.1	Untersuchungen zu Aerodynamischen und Strukturell-/Fertigungstechnischen Aspekten des Hybridblattes .....	17
2.1.2	Aerodynamische Auslegung der Flexible Hinterkante.....	30
2.1.3	Mechanische Auslegung der Flexiblen Hinterkante.....	37
2.1.4	2D Windkanalmessungen .....	51
2.1.5	Weiterentwicklung neuer Hinterkantenkonzepte .....	67
2.1.6	Bau eines Demonstratormodells .....	72
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	81
2.3	Nutzen und Verwertbarkeit.....	82
2.3.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten.....	82
2.3.2	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolge.....	82
2.3.3	Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit.....	82
2.4	Patentanmeldung.....	83
2.5	Fortschritte an anderen Stellen .....	84
2.5.1	Flexible Hinterkante .....	84

2.6	Veröffentlichungen .....	85
2.6.1	Website.....	85
2.6.2	Präsentation Messestand Husum Wind 2012 .....	85
2.6.3	Euromech .....	85
2.6.4	FIZ-Jahrbuch .....	85
2.6.5	DEWEK Präsentation .....	86
2.6.6	Präsentation auf der IQPC Konferenz .....	86
2.6.7	Bewerbung Innovationspreis Berlin Brandenburg .....	86
2.6.8	Artikel Windblatt.....	86

## VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

AFC .....	Active Flow Control
CRTEF .....	Controllable Rubber Trailing Edge Flap
FEA .....	Finite Elemente Analyse
FGL .....	Formgedächtnislegierungen
FHK .....	Flexible Hinterkante
PAM .....	Pneumatischer Muskel
TED .....	Trailing Edge Device
TPE .....	Thermoplastisches Elastomer
WEA .....	Windenergieanlage

( weitere, bekannte oder gebräuchliche Abkürzungen sind darüber hinaus hier nicht vollständig aufgeführt)

## **1 EINLEITUNG UND AUSGANGSDARSTELLUNG**

### **1.1 Aufgabenstellung**

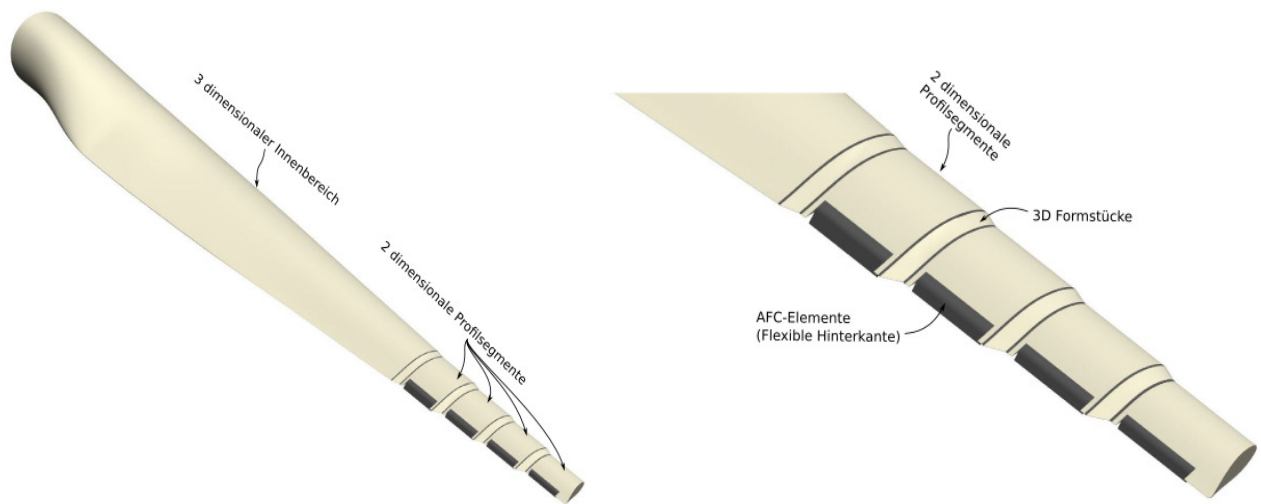
#### **1.1.1 Gesamtziele**

Um die Windenergie in den kommenden Jahren noch konkurrenzfähiger zu machen, müssen die Kosten pro produzierte Kilowattstunde weiter sinken. Die in den jeweils technisch-wirtschaftlichen Grenzen machbare Maximierung des Rotordurchmessers trägt dazu bei. Allerdings müssen auch die Herstellungskosten reduziert und die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Windenergieanlage (WEA) und deren Komponenten erhöht werden. Ein großer Kostenpunkt einer WEA ist das Rotorsystem, bestehend aus den Rotorblättern, der Nabe und der Blattverstellung (Pitch).

Windeinflüsse wie Böen, Turbulenzen, Turmschatten und Bodengrenzschicht sowie das Blatteigengewicht erzeugen dynamische Belastungen die mit steigender Anlagengröße hauptverantwortlich für die Dimensionierung der Bauteile gegen Materialermüdung sind. Um diese kurzzeitigen Belastungen zu reduzieren und dennoch hohe Leistungen aus dem Wind zu gewinnen, könnten Elemente zur aktiven Strömungsbeeinflussung (Active Flow Control, AFC) in das Rotorblatt integriert werden. Eine spezielle Art hiervon stellen flexible Hinterkanten (FHK), ähnlich den beweglichen Klappen aus der Luftfahrt, dar. Mit diesen Elementen könnten die aerodynamischen Kräfte zu jedem Zeitpunkt und an verschiedenen Positionen des Rotorblattes besonders effektiv geregelt werden. Die für die Struktur schädlichen Ermüdungsbelastungen würden reduziert und das Rotorsystem kann mit weniger Materialeinsatz gefertigt werden. Damit sinken auch die Lasten auf andere Strukturen wie Gondel und Turm und die Turbine wird insgesamt kosteneffizienter.

Wird die Auslenkung der Hinterkante darüber hinaus zur Leistungsregelung genutzt, kann das üblicherweise hierfür verwendete Pitchsystem maßgeblich entlastet werden. Die klassischen Pitchsysteme leiden oft unter hohem Verschleiß und die Wartung der Lager, Verzahnungen und Antriebe ist mit großem finanziellem und zeitlichem Aufwand verbunden. Zudem stellt das Versagen von Pitchantrieben einen der Hauptgründe von schweren Anlagenhavarien dar. Eine Alternative durch AFC-Elemente bietet den Vorteil einer schnelleren und präziseren Regelung, da nicht die gesamte Blattmasse bewegt werden muss und die Regelung im Außenbereich des Blattes stattfinden kann, wo auch der Großteil der Leistung gewonnen wird.

Auf Grund der komplexen dreidimensionalen Verwindung und Verjüngung der Rotortblattkontur stellt sich die Integration der flexiblen Hinterkante geometrisch und konstruktiv zunächst als Herausforderung dar. Zudem wird ein kostengünstiges und einfach zu wartendes bzw. austauschbares AFC-System benötigt.



**Abbildung 1: Hybridblatt mit vier zweidimensionalen Profildsegmenten und integrierten AFC-Elementen Flexible Hinterkante**

Ein Rotorblatt in hybrider Bauweise, mit geometrisch einfach gestalteten, zweidimensional ausgeprägten Profildsegmenten im Außenbereich sowie einem herkömmlich gestalteten Innenbereich würde Vorteile in mehrerlei Hinsicht mit sich bringen: AFC-Elemente könnten im Blattaußenbereich als Module integriert werden und eine einfache Schnittstelle zur Rotorblattstruktur besitzen. Die Segmentierung erlaubt die Anwendung automatisierter Fertigungsverfahren und bietet gegenüber der klassischen Bauweise somit das Potenzial einer kostengünstigeren Herstellung, wenn z.B. Extrusions- bzw. Pultrusionsprofile zum Einsatz kommen. Zusätzlich kann die aerodynamische Effizienz des Blattes gesteigert werden, wenn der Blattinnenbereich mit dem herkömmlichen Verfahren aus Negativformen, zusammen mit verdrehten Segmenten im Außenbereich zu einer höheren Verwindung für das Gesamtblatt führt. Nicht zuletzt kann bei einer Unterteilung des Blattes auch der aufwendige Transport großer Rotorblätter vereinfacht werden, was die Zahl der verwertbaren Standorte erhöht.

### 1.1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Zusammengefasst hatte das Projekt folgende Ziele in zwei Themenbereichen:

Einerseits sollte eine zuverlässige und robuste konstruktive Umsetzung einer Flexiblen Hinterkante auf der Basis von aus der Praxis und bisherigen Forschungsergebnissen abgeleiteten Anforderungen entwickelt werden. Dabei standen die praxisnahe Anwendbarkeit und eine zuverlässige Systemintegration im Vordergrund. Die Entwicklung und Tests von Konzepten sowie entsprechenden Funktionsmodellen sollten in den Bau und die Vermessung eines möglichst realitätsnahen Prototypen im Windkanal münden.

Weiterhin sollte das zugehörige, bzgl. Herstellung, Wartung, Transport und Betrieb optimierte Rotorblatt (Hybridblatt) mit modularem Integrationskonzept aerodynamisch wie strukturell ausgearbeitet werden. Schwerpunkte sollten dabei auf die Auswahl und Bewertung verschiedener Segmentierungskonfigurationen sowie deren Umsetzbarkeit in fertigungstechnischer wie struktureller Hinsicht gelegt werden.

Die Untersuchungen und Entwürfe sollten zunächst für eine kleine WEA (250kW Leistung, ca. 28m Rotordurchmesser) durchgeführt werden, was den Bau einer Testanlage mit der entwickelten FHK in einem Anschlussprojekt vorbereiten sollte. (Dieser erste Praxistest würde aus Gründen der Risiko- und Kostenkontrolle nicht an einer Multimegawattanlage durchgeführt werden.) Damit wären dann die bisher überwiegend im Windkanal gewonnenen Daten, Betriebsstrategien und Simulationen zum Lastreduzierungs- und Leistungsregelungspotenzial von FHK mit realen Beobachtungen abgleichbar. Bei der Projektdurchführung und Auslegung sollte jedoch die Megawatt-Größenordnung stets bei der Auswahl und Bewertung von Lösungen berücksichtigt werden.

## 1.2 Voraussetzungen für die Durchführung

TEMBRA ist eine GmbH in der Hand von aktiv mitarbeitenden Gesellschaftern, welche seit Jahrzehnten am Standort Berlin die Entwicklung in der Windenergie mitgestalten. TEMBRA bietet als Ingenieursdienstleister die Entwicklung und Konstruktion von modernen Megawatt-Windenergieanlagen, vom Fundament bis zum Rotor, von Konzeptfindung bis zur Inbetriebnahme, an. Die Kernmannschaft erarbeitete die Konstruktion mehrerer, in sehr großen Stückzahlen errichtete Anlagen. Zuletzt wurden von TEMBRA zwei 2MW-Anlagen, eine 2,5MW-Anlage, sowie eine 3MW-Anlage für Kunden in China, Korea und Deutschland entwickelt. Auch an einer 6MW-Offshore-Anlage wurde bereits gearbeitet.

Motiviert durch Untersuchungen auf dem Gebiet der aktiven Strömungskontrolle seiner Partner, Smart Blade GmbH und dem Fachgebiet für Experimentelle Strömungsmechanik der TU-Berlin, hat TEMBRA das Konzept zum vorliegenden Forschungsprojekt entwickelt und beantragt. Auch eine gemeinsame Veröffentlichung zum Thema trug hierzu bei:

*Active aerodynamic control of wind turbine blades with high deflection flexible flaps; 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition AIAA 2010-644.*

Für die Bearbeitung des Projekts wurden bei TEMBRA zwei Neueinstellungen getätigt, so dass insgesamt fünf der 19 angestellten Ingenieure an der Durchführung arbeiten konnten. Im Netzwerk Smart Blade und TU-Berlin standen weitere zwei Ingenieure, bei TEMBRA noch drei Abschlussarbeiten zur Hilfe.

## 1.3 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangsstand

Die Strömungsbeeinflussung mittels aktiver Elemente am Rotorblatt ist ein wesentlicher Schwerpunkt der derzeitigen Aerodynamik-Forschung im Bereich WEA. Viele Institute und auch einzelne Industrieunternehmen beschäftigen sich mit der Problematik, geeignete Mechanismen zur Strömungskontrolle zu untersuchen sowie dazu geeignete Regelkonzepte zu entwickeln. Alle davon fokussieren sich auf die Umsetzung einer Flexiblen Hinterkante, da die Regelung in diesem Teil des Profils besonders effizient ist.

Zunächst sollen einige **grundsätzliche Methoden zur Strömungsbeeinflussung mittels einer aktiven Profilhinterkante** diskutiert werden. Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten:

- ◆ Klassische (starre) Klappensysteme in verschiedener Ausführung (einfach, mehrfach, geteilt)
- ◆ Gurney Flaps und Micro Tabs
- ◆ Flexible Flaps

Eine umfassendere Übersicht über Active Flow Control Elemente bzgl. Windenergieanlagen erschien von G. Pechlivanoglou (Ingenieur bei Smart Blade GmbH) auf der „ASME IGIT Turbo Expo 2011“ unter dem Titel „Performance Optimaziation of Wind Turbine Rotors with Active Flow Control“.

Die **klassischen Klappensystem** mit fester, mechanischer Struktur sind mit eines der ältesten Konzepte zur Strömungsbeeinflussung. Der Einsatz in der Luftfahrtindustrie ist seit langem Standard. Landeklappen- und Hochauftriebssysteme werden benutzt um die Auftriebswirkung auch bei langsamen Start- und Landevorgängen aufrecht zu erhalten.

Die Implementierung solcher starren Klappensysteme in Rotorblätter von Windenergieanlagen ist nicht ohne weiteres übertragbar. Durch die mit Rotation wechselnde Belastung und die un stetige Natur des Windes, treten sehr viel dynamischere Kräfte als am Flugzeug auf. Die Firma „ZOND“ entwickelte 1995 die 500kW Anlage „Z-40 Bladerunner“ in zwei Versionen. Neben einer Version, die mit einem klassischen Full Span Pitchsystem ausgerüstet war, kam bei der zweiten Version zum ersten Mal ein mechanisches Klappensystem zum Einsatz, das als aerodynamisches Bremssystem und zur Leistungsregulierung genutzt wurde. Nach ausgiebigen Prototypentest und einer ersten Produktionsreihe zeigten sich allerdings bei allen mit Klappen ausgerüsteten Turbinen Probleme. Da für die Befestigung der Klappen metallische Aufhängungen verwendet wurden, hatte die Rotorblätter stark unter Blitzeinschlägen zu leiden. Die Produktion der Klappenversion wurde deshalb nach den ersten Jahren eingestellt [1].

Eine weitere Möglichkeit zur Strömungskontrolle an Rotorblatt-Hinterkanten sind die so genannten **Micro-Tabs** oder **Gurney-Flaps**. Diese wesentlich kleineren Elemente erhöhen den maximalen Auftrieb, aber auch den Widerstand des aerodynamischen Profils. In der Flugzeugforschung wird im Rahmen des europäischen AWIATOR Projekts stark an einer so genannten Mini-TED (Trailing Edge Device) geforscht [2]. Die Anwendung im Bereich der Windenergieanlagen wird vor allem von Prof. Van Dam an der University of California, Davis untersucht [3]. Auch eine Verwendung als aktive Micro-Klappe wird in Betracht gezogen. Die kleinere Bauform der Klappe erlaubt sehr schnelle Reaktionszeiten. Damit sind die Elemente vor allem für eine lokale und schnelle Lastregelung am Rotorblatt geeignet um auf stark fluktuierende Windböen zu reagieren. Die geringe Abmaße macht eine Integration in das Blatt zwar einfacher, allerdings kann damit keine Leistungsregulierung der Anlage vorgenommen werden. Smart Blade GmbH untersuchte ebenfalls den Einsatz solcher Systeme zur Lastreduzierung und präsentierte auf der EWEC 2011 ein Paper mit dem Titel „Experimental Investigation of Dynamic Load Control Strategies using Micro Flaps at the Trailing Edge of Wind Turbine Blades“ zu diesem Thema.



### 1.3.1 Flexible Hinterkante – Bekannte Konzepte und ähnliche Vorhaben

Neben einigen in der Luftfahrt bzw. im Flugzeugbau erforschten Konzepten zu flexiblen Hinterkantenstrukturen, wie:

- ◆ dem „Fingerkonzept“ des DLR mit aktiver, formvariabler Rippenstruktur und überzogener Außenhaut [5],
- ◆ dem „Gürtelrippenkonzept“ für Tragflächen mit veränderlicher Wölbung (DLR, TU Berlin) [6],
- ◆ dem mechanisch-hydraulische System von EADS [7],
- ◆ dem „Gleitgelenkkonzept“ von SAAB [8],
- ◆ dem gezahnte Rippenmechanismus von Boeing [9],
- ◆ dem FGL (Formgedächtnislegierung) Konzept von NASA und DARPA [6],

zählen im Bereich für Windenergieanlagen folgende Akteure zu den führenden Forschungszentren im Hinblick auf diesen Bereich:

- ◆ Technical University of Denmark (DTU, vormals Risø), Dänemark
- ◆ Delft University Wind Energy Research Institute (DUWind), Niederlande
- ◆ Energy research Centre of the Netherlands (ECN), Niederlande
- ◆ National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA
- ◆ Firma Vestas, Dänemark
- ◆ Firma Flexsys, USA

Vor allem DTU beschäftigte sich seit 2004 mit der Erforschung einer durch Piezoelemente aktuierten FHK im Zuge des „ADAPWING“ und „ADAPWING 2“ Projekts. In mehreren Windkanalversuchen und Simulationen wurde das System auf seine Fähigkeit zur Lastreduzierung hin untersucht. Auch DUWind hat sich in Zusammenarbeit mit DTU den piezo-aktuierten Hinterkantenklappen gewidmet [12], jedoch auch Konzepte mit Formgedächtnislegierungen (FGL) untersucht. In einer Kollaboration von DTU und dem WEA-Hersteller Vestas wurden in 2010 und 2011 die ersten Feldversuche einer veränderlichen Hinterkante durchgeführt (225kW WEA, „ATEF“-Projekt). Dabei hat sich das piezo-aktuierte Konzept als nicht praktikabel und zuverlässig genug erwiesen, weshalb sich DTU nun auf das bereits seit 2009 bestehenden Konzept einer mit Druckluft befüllbaren Vollgummihinterkante „Controllable Rubber Trailing Edge Flap (CRTEF)“ konzentriert [13]. Windkanalversuche wurden auch hier bereits durchgeführt und in einem Förderprojekt mit Industriepartnern wird derzeit versucht, die Technologie zur Anwendungsreife zu bringen.

In Europa hatten Forschungsinstitute und Industrie zuletzt ihre Aktivitäten im großen EU Förderprojekt „UpWind“ formiert. Das Projekt hatte die Entwicklung großer 8-10MW Anlagen zum Ziel und beinhaltet eine Vielzahl von Disziplinen. Eines der Arbeitspakete beschäftigt sich darin mit der Entwicklung „smarter“ Rotorblätter. Innerhalb des Arbeitspaket „Rotor blades and rotor control“ sollten dabei Lösungen zur Lastreduzierung und Stabilitätserhöhung durch aerodynamisch wirkende Elemente gefunden werden [15].

Von amerikanischer Seite sind NREL und das „Sandia National Laboratories“ zu erwähnen. Mithilfe der von NREL entwickelten Simulationssoftware, wurden Bestrebungen der amerikanischen Firma „Flexsys“ zur Entwicklung einer flexiblen Hinterkante unterstützt. Eine erste Simulation zeigt ein Potential zur Reduzierung der Lastzyklen an der Rotornabe [14]. Über konstruktive Details zur Beurteilung der realen Anwendbarkeit dieses Konzepts sind keine Informationen verfügbar.

### **1.3.2 Eingehende Patentrecherche**

Für das Konzept der flexiblen Hinterkante an Rotoren von Windenergieanlagen, wurde Eingangs eine Patentrecherche durchgeführt. Dabei wurde überprüft welche Schutzrechte für die Umsetzung des Vorhabens Relevanz zeigen, um spätere Entwicklungen davon unabhängig zu gestalten bzw. keine Rechte zu verletzen oder eigene geltend machen zu können.

Das Konzept einer flexiblen Hinterkante am Tragflügel, welche mittels Aktuatorik ausgelenkt wird, unterliegt prinzipiell keinen Schutzrechten Anderer. Dies liegt in der Existenz früherer, bereits abgelaufener Patente begründet. So wurde die Idee der flexiblen Hinterkante als eine Weiterentwicklung des adaptiven Flügelkonzepts bereits 1919 von H.F. Parker vorgeschlagen [4]. Das Konzept im Allgemeinen zählt somit zum Stand der Technik und eine Anmeldung auf Schutzrechte nur im Detail möglich. Der Versuch von Risø, ein Patent auf eine flexible Hinterkante anzumelden scheiterte [17]. Im dazu gehörigen *International Search Report* wurde die Ablehnung der Schutzrechtvergabe mit dem Verweis auf die Patente von Littman [18], Buter [19] und Gruensfelder [20] verwiesen. Aus diesen Patenten geht hervor, dass das Konzept flexibler Blattgeometrien, und somit auch das Konzept einer aktuierten flexiblen Hinterkante, zum Stand der Technik gehört.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass es großen Bedarf an weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Bereich der aktiven Strömungskontrolle an WEAs gibt. Keines der bis dato entwickelten oder umgesetzten Konzepte für Flexible Hinterkanten hat es über das Stadium von Windkanalversuchen bzw. das Prototypenstadium hinaus geschafft, technisch zu überzeugen um in einer industriellen Anwendung erfolgreich umgesetzt werden zu können.

Die bisherigen Entwicklungen haben aus der Perspektive der WEA-Praxis gesehen folgende Schwächen:

- ◆ Mechanisch aufwendige Konzepte aus der Luftfahrt genügen den Anforderungen an Robustheit und Zuverlässigkeit nicht
- ◆ FGL besitzen eine hohe Reaktionsträgheit und benötigen bspw. Wärmequellen und –senken
- ◆ Piezoelektrische Elemente erscheinen auf Grund der Blitzschlaggefährdung ungeeignet
- ◆ die mit Druckluft befüllten Vollgummistrukturen von DTU („CRTEF“) lassen einen immensen Druckluft- und somit Energieverbrauch erwarten, welcher die Vorteile der FHK-Technologie durch Leistungseinbußen verwässert

### 1.3.3 Verwendete Fachliteratur, Patente sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

#### 1.3.3.1 Literatur

- [1] GE Energy (2011): URL: <http://www.gepower.com>, Zugriff am: 17.01.2011.
- [2] K. Richter, H. Rosemann (2002): *Experimental Investigation of Trailing-Edge Devices at Transonic Speeds*. In: *The Aeronautical Journal*, Vol. 106, No. 1058, S. 185-193.
- [3] C.P. Van Dam (UC Davis) (1999): *Gurney flap experiments on airfoil and wings*. In: *Journal of Aircraft*, Volume 36, S. 484–486.
- [5] H.P. Monner (DLR) (2001): *Erzielung einer optimierten Tragflügelverwölbung durch den Einsatz formvariabler Klappenstrukturen*. In: *Aerospace Science and Technology*, Volume 5, Issue 7, S. 445-455.
- [6] F. Campanile (DLR), Stefan Anders (TU Berlin) (2005): *Aerodynamic and aeroelastic amplification in adaptive belt-rib airfoils*. In: *Aerospace Science and Technology*, Volume 9, Issue 1, S. 55-63.
- [10] J.N. Kudva u.a. (1997): *Design, fabrication, and testing of the DARPA/Wright Lab 'smart wing' wind tunnel model*. In: Proceedings 38th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit.
- [11] P.B Andersen u.a. (2006): *Load alleviation on wind turbine blades using variable airfoil geometry*. In: Proceedings 2006 EWEA Wind Energy Conference and Exhibition 2006, Athens (GR).
- [12] J.W. van Wingerden u.a. (2008): *On the Proof of Concept of a Smart Wind Turbine Rotor Blade for Load Alleviation*. In: *Wind Energy*, Volume 11, S. 265-280.
- [13]: Risø (2010): *Successful wind tunnel test of controllable rubber trailing edge flap for wind turbine blades*. URL: [http://www.bigscience.dk/da/sitecore/content/risoe\\_dk/home/news\\_archives/news/2010/0210\\_gum\\_mibagkant.aspx?sc\\_lang=en](http://www.bigscience.dk/da/sitecore/content/risoe_dk/home/news_archives/news/2010/0210_gum_mibagkant.aspx?sc_lang=en) , Zugriff am: 17.01.2011.
- [14] Dale E. Berg (2009): *Active Aerodynamic Blade Load Control Impacts on Utility-Scale Wind Turbines*. In: Proceedings AWEA Windpower Conference & Exhibition 2009, Chicago (USA).
- [15] UpWind (2010): *Work Package 1B3 Rotor blades and rotor control*. URL: <http://www.upwind.eu/Paginas/Work%20packages/1B3%20Rotor%20blades%20and%20rotor%20control.aspx>, Zugriff am: 17.01.2011.
- [16] G. Pechlivanoglou, J. Wagner (2010): *Active aerodynamic control of wind turbine blades with high deflection flexible flaps*. In: Proceedings 48<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting 2010, Orlando, Florida.

### 1.3.3.2 Patente

[4] Patent: *Variable camber rib for aeroplane wings*. Inventor: H.F. Parker, Pat. No. US1341758.

[7] Patent: *Mechanism for at least regionally adjusting the curvature of airfoil wings*. Inventor: J.Perez, Pat. No. US6644599.

[8] Patent: *Segmented flap with variable camber for aircraft wing*. Inventor: P. Berry, Pat. No. US6123297.

[9] Patent: *Variable camber flap and seal*. Inventor: S.T. Brown, Pat. No. US4427169.

[17] Patent: *Control of power, loads, and/or stability of a horizontal axis wind turbine by use of variable blade geometry control*. Inventor: C. D. Bak, Pat. No. WO2004/088130.

[18] Patent: *Airplane wing, aileron, and airplane rudder*. Inventor: Z. Littman, Pat. No. US2333482.

[19] Patent: *Profile*. Inventor: A. Buter, Pat. No. US6419187.

[20] Patent: *Leading edge for an aircraft*, Inventor: C. A. Gruensfelder, Pat. No. US6213433.

### 1.3.3.3 Datenbanken

EPO – European Patent Office	<a href="http://www.epo.org">www.epo.org</a>
UpWind Project	<a href="http://www.upwind.eu">www.upwind.eu</a>
NREL SANDIA DOE databases	<a href="http://wind.nrel.gov/">http://wind.nrel.gov/</a> <a href="http://windpower.sandia.gov/">http://windpower.sandia.gov/</a> <a href="https://www.osti.gov/opennet/">https://www.osti.gov/opennet/</a>
DTU database	<a href="http://orbit.dtu.dk/en/">http://orbit.dtu.dk/en/</a>
Wiley Online Library	<a href="http://onlinelibrary.wiley.com/">http://onlinelibrary.wiley.com/</a>
IOP Science	<a href="http://iopscience.iop.org">http://iopscience.iop.org</a>
Science Direct	<a href="http://www.sciencedirect.com">www.sciencedirect.com</a>

## **1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben wurde eingangs in fünf Arbeitspakete und entsprechende Meilensteine unterteilt, deren Priorisierung und Detailtiefe im Projektverlauf dem Wissenszuwachs entsprechend jedoch noch angepasst wurden. Zunächst waren diese, mit den entsprechenden Unteraufgaben:

### AP 1 – Simulation Segmentierungskonfigurationen

- ◆ Modellierung verschiedener Konfigurationen
- ◆ Aerodynamische Berechnung der Konfigurationen
- ◆ Redesign und Aerodynamische Berechnung

### AP 2 – Aerodynamische Auslegung der Blattsegmente

- ◆ Entwicklung Flügelprofil mit flexibler Hinterkante
- ◆ CFD-Validierung flexible Hinterkante
- ◆ Aeroakustische Untersuchung des Profils mit FHK

### AP 3 – Mechanische Auslegung FHK

- Erarbeitung mechanische Grundkonzepte
- Konstruktive Auslegung FHK
- Prototypenbau FHK
- Experimentelle Untersuchung der Mechanik FHK

### AP 4 – Experimentelle Aerodynamische Untersuchung

- ◆ Prototypenbau 2D-Segment
- ◆ Windkanalmessungen 2D-Segment mit FHK
- ◆ Datenauswertung und Dokumentation Aerodynamik

### AP 5 – Strukturauslegung Gesamtblatt

- ◆ Bestimmung der Ausgangslasten
- ◆ Tragholmdesign
- ◆ Konstruktion 2D-Segmente
- ◆ FE-Berechnung des Rotorblattassemblys
- ◆ Lastrechnung Referenzanlage mit Hybridblättern

Von diesen Arbeitspaketen sollten AP1 und AP 3 parallel beginnen. Weiterhin konnten AP 1 und AP 2 zusammen mit den Ergebnissen in AP 4 münden. AP 5 war nach ersten Untersuchungen von AP 1 parallel zum Gesamtprojekt bearbeitbar.

Zur Projektmitte hin ließen die Ergebnisse eine Änderung des Arbeitsplans erforderlich werden, welcher die Streichung der Weiterbearbeitung des Ansatzes des segmentierten Hybridblattes und eine Fokussierung auf die Weiterentwicklung eines vielversprechenden Ansatzes einer flexiblen Hinterkante inkl. Integrationskonzept beinhaltete.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Folgende FE-Partner konnten Eingang gewonnen und in das Projekt eingebunden werden:

### **1.5.1 Smart Blade GmbH**

#### *Profil:*

Die Smart Blade GmbH wurde im Jahr 2009 gegründet mit der Zielsetzung innovative Lösungen im Bereich Rotorblätter für Windkraftanlagen zu erarbeiten. Die Gesellschafter von Smart Blade blicken auf jahrzehntelange Erfahrungen im Windkraftbereich zurück. Smart Blade hat mit bereits vier Patentanmeldungen sein innovatives Potential unter Beweis gestellt. Die Firma arbeitet eng mit Prof. Dr. -Ing. C. O. Paschereit vom Hermann-Föttinger Institut der Technischen Universität in Berlin zusammen und hat Erfahrungen mit Versuchen am dort befindlichen Großwindkanal für die nötigen aerodynamischen Vermessungen. Bei Smart Blade arbeiten neben den vier Gesellschaftern zwei Entwicklungsingenieure, sowie regelmäßig Diplomanden. Zudem wurde eine Promotion im Bereich aerodynamischer Innovationen von Rotorblättern betreut.

#### *Referenzen:*

Siemens (Deutschland), Suzlon (Indien), Pendry Artlab (Deutschland), Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik (IFAM), Accentis

#### *Aufgaben:*

Smart Blade führte die aerodynamischen Simulationen zum Hybridblatt sowie von Blattsegmenten mit flexibler Hinterkante durch. Die Vorbereitung und Durchführung der experimentellen Untersuchungen in Windkanalversuchen sowie deren Auswertung fiel ebenso in den Aufgabenbereich von Smart Blade, wie die beratende Unterstützung bei der Entwicklung der flexiblen Hinterkante.

### **1.5.2 Technische Universität Berlin**

Prof. Dr. -Ing. C. O. Paschereit  
Fachgebiet Experimentelle Strömungsmechanik / Hermann-Föttinger Institut (HFI)

#### *Profil:*

Das Fachgebiet kann auf eine langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der turbulenten Strömungen und deren aktiver und passiver Kontrolle zurückblicken. Dies ist dokumentiert in über 200 Publikationen und ca. 70 Patenten. Dazu gehören auch Best Paper Awards und der ERC Advanced Grant. Neben der von der DFG geförderten Grundlagenforschung arbeitet das

Fachgebiet auch erfolgreich an anwendungsnahen Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit Partnern aus der Industrie.

Ein Schwerpunkt bildete in den letzten Jahren die Anwendung dieser Kompetenz auf Rotorblätter von Windenergieanlagen. Dabei wurden innovative Strömungskontrollmethoden experimentell und numerisch entwickelt.

*Aufgaben:*

Das Hermann Föttinger Institut an der TU-Berlin stellte im Rahmen des AP 4 den Windkanal für die experimentellen Untersuchungen und die nötige Messtechnik zur Verfügung.

### **1.5.3 EUROS GmbH**

*Profil:*

Die Firma EUROS Entwicklungsgesellschaft für Windkraftanlagen mbH wurde im Jahr 1996 gegründet. Von Beginn an haben sich die Ingenieure auf die Entwicklung leistungsoptimierter Rotorblätter für Windkraftanlagen mit mehr als 600 KW spezialisiert. Bis heute wurden mehr als 20 verschiedene Blatttypen entwickelt. In 1999 wurde in Ustron, Polen ein Fertigungsstandort eröffnet, der für die Produktion der von EUROS entwickelten Rotorblätter zuständig ist. Seitdem wurden unterschiedlichste Blätter für Windkraftanlagen von 200 KW bis 5 MW hergestellt. An diesem Standort können pro Jahr Rotorblätter für Turbinen mit 120 MW installierter Leistung produziert werden. Im Jahre 2008 wurde ein weiterer Produktionsstandort in Polen eröffnet, mit dem die Produktionskapazität vervierfacht werden soll.

Im Berliner Entwicklungsbüro sind etwa 30 Mitarbeiter beschäftigt, in der Fertigung in Polen etwa 200 Mitarbeiter.

EUROS ist ein unabhängiger Rotorblatthersteller, der für viele verschiedene Turbinenhersteller Rotorblätter entwickelt und liefert. Neben dem Design und der Herstellung von Rotorblättern, bietet EUROS, als einziger Rotorblatthersteller, auch Lizenzen und Technologie-Transfer für entfernte Märkte an.

*Referenzen:*

WinWind, ScanWind, Multibrid, Fuji Heavy Industries, Fuhrländer

*Aufgaben:*

Euros begleitete das Projekt beratend bezüglich der fertigungstechnischen Fragestellungen in Bezug auf die Rotorblattsegmentierung sowie die strukturelle Einbindung der Hinterkante.

#### **1.5.4 DEWI-OCC Offshore and Certification Centre**

*Aufgaben:*

DEWI-OCC sollte das Projekt bezüglich der zertifizierungsrelevanten Fragestellungen beratend begleiten. Es stellte sich jedoch früh heraus, dass eine Berücksichtigung von neuartigen, Lastbeeinflussenden Elementen am Rotorblatt in Zertifizierungsrichtlinien erst in wesentlich späteren Technologieentwicklungsphasen bearbeitet werden kann.

#### **1.5.5 Weitere Stellen der Zusammenarbeit**

Während der Entwicklung wurden wichtige Impulse und Beiträge gegeben durch Experten der Firmen **FESTO**, **Thomas Technik**, **Technoforn**, **Röchling**, **Fast Part**, **Jäger Gummi und Kunststoff GmbH** sowie von **Prof. Frank Kameier (FH Düsseldorf)**.



## 2 EINGEHENDE DARSTELLUNGEN

### 2.1 Erzielte Ergebnisse im Einzelnen

In diesem Abschnitt sollen die Arbeitsschritte und Zwischenergebnisse des Projektverlaufs eingehend dargestellt werden. Zunächst werden die Untersuchungen und Ergebnisse auf dem Gebiet Hybridblatt geschlossen abgehandelt, wonach der komplette Entwicklungsfortschritt der flexiblen Hinterkante dokumentiert werden soll.

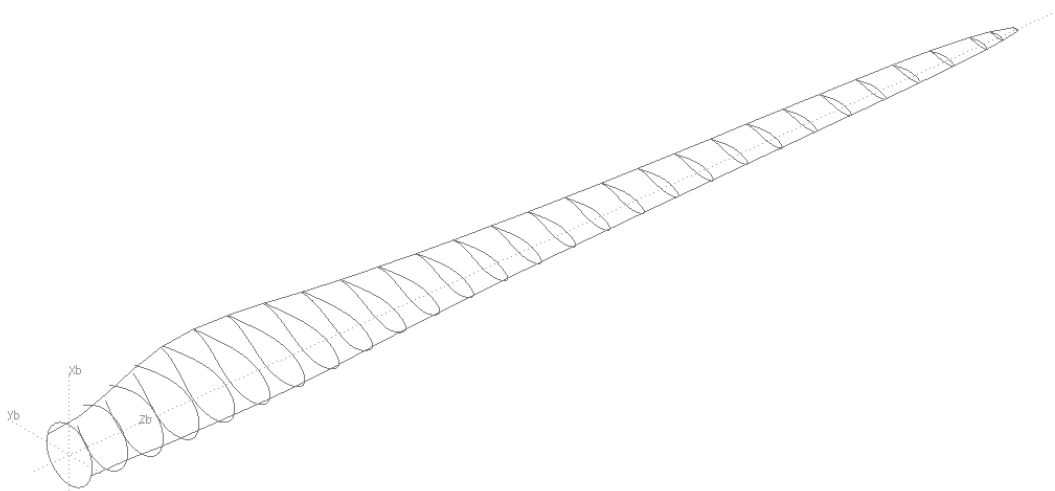
#### 2.1.1 Untersuchungen zu Aerodynamischen und Strukturell-/Fertigungstechnischen Aspekten des Hybridblattes

##### 2.1.1.1 Untersuchung von Segmentierungskonfigurationen

Wie in AP 1 definiert, wurde zunächst der Einfluss verschiedener Segmentierungskonfigurationen auf die Performance des Rotorblatts in aerodynamischen Simulationen untersucht. Hierbei sollte eine Orientierung für den Einfluss von Länge, Anzahl und Verwindung der 2D Profilsegmente auf die Effizienz des Rotorblatts und einer Referenzanlage gewonnen werden.

#### Referenzbildung

Um eine Grundlage zu schaffen auf der die verschiedenen Konfigurationen verglichen werden können, wurde ein Referenzblatt entworfen. Das Blatt stellt ein typisches Rotorblatt der 250kW-Klasse dar. Das Blatt hat eine Länge von 13,5m und wurde für ein konventionelles Herstellungsverfahren durch Handlaminieren/Vakuumverfahren in Negativschalen ausgelegt. Abbildung 2 zeigt die Geometrie des Referenzblattes.



**Abbildung 2: Geometrie des Referenzblattes**

Das Blatt hat im Innenbereich eine durch den Herstellungsprozess limitierte Verwindung von ca. 15°. Es kommen übliche aerodynamische Profile, mit einem Dickenverhältnis von 18% bis 40%,

zum Einsatz. Das jeweilige aerodynamische Verhalten der verwendeten Profile wurde mit Hilfe einer numerischen 2D-Panelmethode ermittelt und anhand von Messdaten validiert.

Um weiterhin die verschiedenen Blattkonzepte anhand ihres Betriebsverhaltens zu vergleichen wurde eine Referenzanlage zu Grunde gelegt. Die Kenndaten der Anlage sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Kenndaten der Referenzanlage**

WEA der 250kW-Klasse	
Nennleistung	250kW
Rotordurchmesser	28m
Nabenhöhe	40m
Leistungsregelung	Pitch
Drehzahlführung	variabel
Drehzahl minimal	$n_{min}=27rpm$
Drehzahl maximal	$n_{max}=54rpm$
Einschaltgeschwindigkeit	$v_{ein}=3ms$
Ausschaltgeschwindigkeit	$v_{aus}=20ms$
Blattanzahl	3

Für den Referenzstandort wurde eine mittlere Jahreswindgeschwindigkeit von 5,0m/s in einer Nabenhöhe von 40m angenommen. Dies entspricht einem Standort im Binnenland (IEC Windklasse III).

### Vergleich von Konfigurationen

Hinsichtlich der Ertragsausbeute, hat die Segmentierung des Rotorblatts bei einer pitch-geregelten Anlage nur Auswirkung auf den Betriebsbereich unterhalb Nennleistung. Für Windgeschwindigkeiten oberhalb Nennwindgeschwindigkeit bestehen keine Unterschiede hinsichtlich des Wirkungsgrads (im Gegensatz zu den auftretenden Lasten). Daher wird der Verlust sich bei Schwachwind-Standorten deutlicher bemerkbar machen.

Die untersuchten Konzepte unterscheiden sich hinsichtlich dem Ort des Beginns der Segmentierung, der Anzahl und Länge der 2D-Segmente und der Profilausführung. Es wurden acht verschiedene Konfigurationen untersucht. Die Ergebnisse entstammen einer BEM (Blade Element Momentum) Berechnung. Dieser simple Ansatz dient lediglich einer ersten

Grobabschätzung. Bei der Segmentierung muss ein Kompromiss zwischen Ertragsverlust, Lasterhöhung und Fertigungskosten gefunden werden. Dabei gilt, dass bei einer hohen Anzahl an 2D-Segmenten:

1. ein höherer aerodynamischer Wirkungsgrad erreicht wird,
2. sich die maximalen Lasten auf das Blatt erhöhen und
3. die Fertigungskosten steigen.

Bei der Auslegung gilt es daher zu berücksichtigen, so wenig Profile wie möglich zu verwenden und gleichzeitig die Ertragsausbeute und die strukturelle Mehrbelastung gering zu halten.

Für den Vergleich sollten folgende Parameter herangezogen und ermittelt werden:

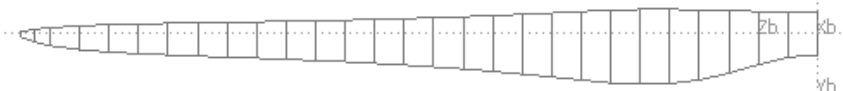
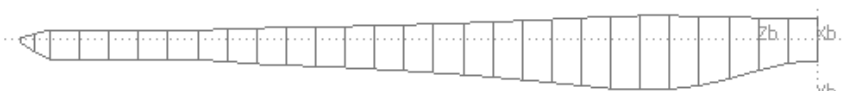
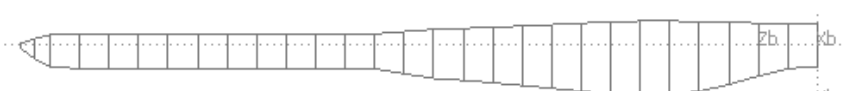


- ♦ **Leistungsbeiwert  $c_{p_{max}}$** : Der maximale Leistungsbeiwert des Rotors als Maß für die aerodynamische Güte
- ♦ **Blattwurzelbiegemoment  $M_b$  in kNm**: Das Blattwurzelbiegemoment bei Erreichen der Nennleistung als Maß für die strukturelle Belastung des Rotorblatts. Hierbei gilt zu beachten, dass nur die aerodynamischen Lasten berücksichtigt werden
- ♦ **Ertrag  $E$  in kWh**: Der Ertrag an einem Referenzstandort mit einer Windhäufigkeitsverteilung nach Rayleigh ( $k=2$ ,  $v_{mean}=50\text{m/s}$ )

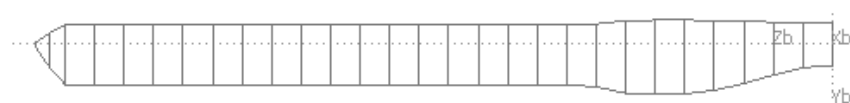
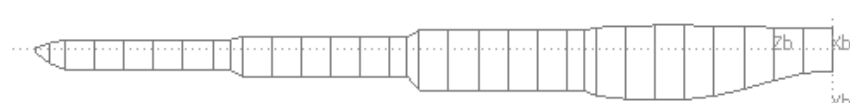
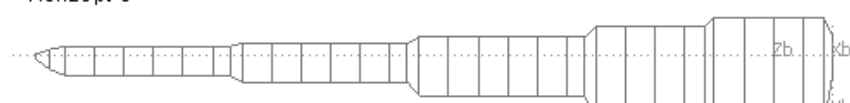
Zusätzlich wurden zur Veranschaulichung aus dem Ertrag  $E$  die folgenden Werte abgeleitet:

- ♦ **Ertragsverlust  $\eta$  in %**: Jährlicher Ertragsverlust gegenüber dem Referenzrotorblatt
- ♦ **Ertragsverlust in €**: Jährlicher Ertragsverlust gegenüber dem Referenzblatt bei einer angenommenen Einspeisevergütung von 0,07ct/kWh

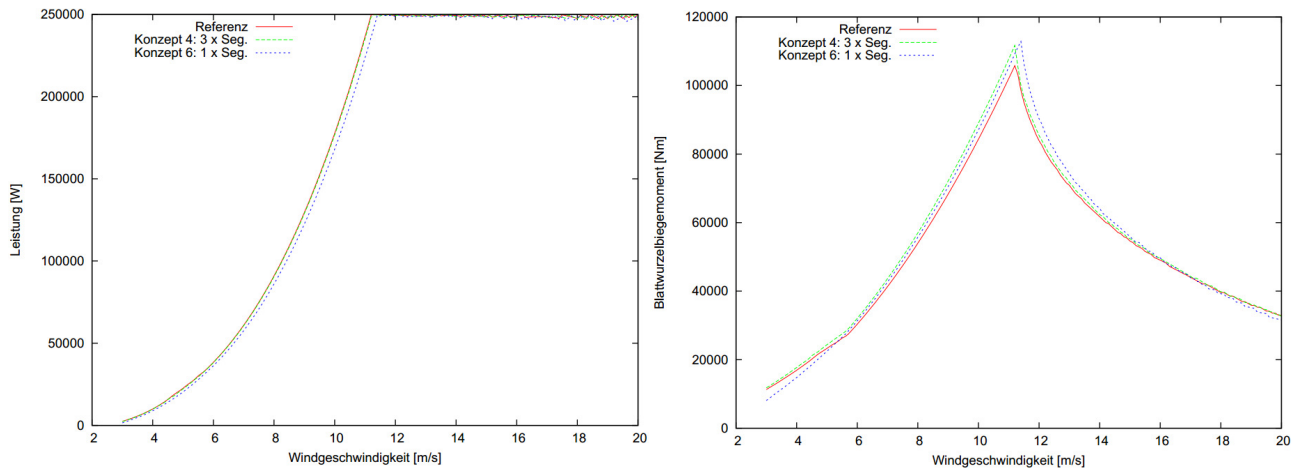
Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die Untersuchten Segmentierungskonfigurationen sowie die ermittelten Ergebnisse der Untersuchung.

**Tabelle 2: Rotorblattgeometrien und Simulationsergebnisse der verschiedenen Konzepte**

Konzept	Beschreibung	Ergebnis
1	Referenzblatt mit einer Länge von 13,5m, optimale Gesamtgeometrie	$c_{p_{max}}=0,490$ $M_b=103kNm$ $E = 346.700kWh$ Jahresertrag 24.300€
Konzept 1		
2	Segmentblatt mit 1 Segment über 22% der Rotorblattlänge	$c_{p_{max}}=0,482$ $M_b=111kNm$ $E = 345.000kWh$ $\eta=-0,5\%$ Verlust pro Jahr: -120€
Konzept 2		
3	Segmentblatt mit 1 Segment über 44% der Rotorblattlänge	$c_{p_{max}}=0,475$ $M_b=110kNm$ $E = 342.600kWh$ $\eta=-1,2\%$ Verlust pro Jahr: -280€
Konzept 3		
4	Segmentblatt mit 1 Segment über 66% der Rotorblattlänge, kleine Profiltiefe	$c_{p_{max}}=0,470$ $M_b=109kNm$ $E = 335.500kWh$ $\eta=-3,2\%$ Verlust pro Jahr: -800€
Konzept 4		
5	Segmentblatt m. 1 Segment über 66% der Blattlänge, große Profiltiefe, dickes Profil	$c_{p_{max}}=0,410$ $M_b=108kNm$ $E = 291.400kWh$ $\eta=-16\%$ Verlust pro Jahr: -3.300€
Konzept 5		

6	Segmentblatt m. 1 Segment über 66% der Blattlänge, große Profiltiefe, schlankes Profil	$c_{p_{max}}=0,452$
Konzept 5		$M_b = 112 kNm$
		$E = 327.460 kWh$
		$\eta = -5,6\%$
		Verlust pro Jahr: -1.300€
7	Segmentblatt mit 3 Segmenten ab $r=35\%R$ , 3D-Wurzelbereich	$c_{p_{max}}=0,480$
Konzept 7		$M_b = 111 kNm$
		$E = 344.337 kWh$
		$\eta = -0,7\%$
		Verlust pro Jahr: -160€
8	Segmentblatt mit 5 Segmenten ohne 3D- Wurzelbereich	$c_{p_{max}}=0,493$
Konzept 8		$M_b = 100 kNm$
		$E = 355.100 kWh$
		$\eta = +2,4\%$
		Verlust pro Jahr: +600€

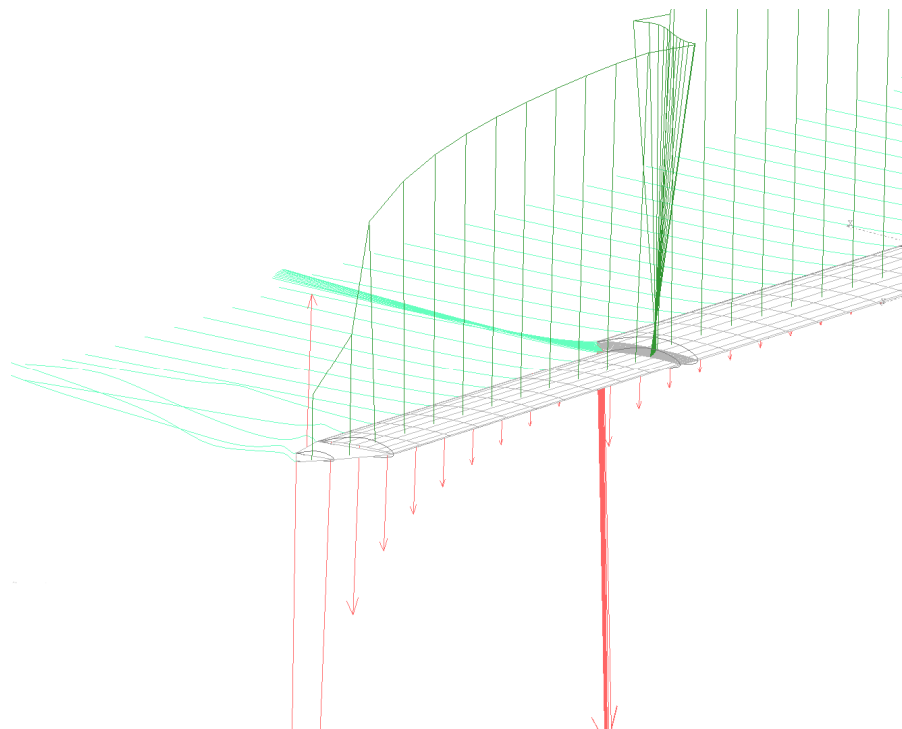
Als weiterführende Konzepte wurden Konzept Nr. 7 (3 Segmente mit einem konventionell gestalteten Innenbereich von 34%) und Konzept Nr. 4/5/6 (1 Segment mit einem konventionell gestalteten Innenbereich von 34%) vorgeschlagen. Ebenfalls kommt ein Konzept mit zwei Segmenten in Betracht. Hinsichtlich Profilwahl und Profiltiefe der Konzepte muss eine weiterführende strukturelle Betrachtung und eine iterative Anpassung der Segmentgeometrie erfolgen. Die Leistungskurve, sowie das Blattwurzelbiegemoment der ausgewählten Konzepte im Vergleich zur Referenzanlage zeigen Abbildung 3.



**Abbildung 3: Leistungskurven und Blattwurzelbiegemomente für ausgewählte Konzepte**

### Untersuchung des Übergangsbereiches

Der Einfluss der Übergangsegmente hinsichtlich der aerodynamischen Leistungseinbußen wurde anhand einer CFD (3D-Panel)Methode durchgeführt. Der zu erwartende Verlust durch die unterschiedlichen Strömungsbedingungen vor und hinter dem Segment (Wirbelbildung und Verringerung des effektiven Anstellwinkels) kann als gering eingestuft werden. Als Richtwert für die Übergänge wurden mind. 3% der Segmentlänge vorgeschlagen. Abbildung 4 zeigt eine Simulation des äußeren Übergangs.



**Abbildung 4: CFD-Simulation des Übergangselements**

Wie gezeigt werden konnte, muss auf aerodynamischer Seite bei einer Unterteilung in 2D Profilssegmente mit geringen Effizienzverlusten sowie erhöhten Geräuschemissionen gerechnet werden. Eine Unterteilung bzw. Segmentierung des Rotorblattes stellt jedoch maßgeblich bezüglich Transport und Fertigung Vorteile und Einsparungen in Aussicht.

Gestaltgebung, struktureller Aufbau, Materialauswahl und Fertigungsverfahren sind bei den hochbelasteten und auf Leichtbau optimierten Rotorblättern eng miteinander verknüpft. Für die Machbarkeit einer Rotorblattsegmentierung mussten somit zunächst auch Recherchen bzw. Untersuchungen zu den anvisierten neuen Herstellungsverfahren und Verbindungstechniken der Segmente durchgeführt werden.

### **2.1.1.2 Untersuchungen zu Struktur und Fertigungsverfahren des Hybridblattes**

#### **Möglichkeiten bei Faserverbund-Herstellungsverfahren**

Zunächst wurden verschiedene automatisierten Verfahren einer Überprüfung auf Anwendbarkeit für die Fertigung von Einzelkomponenten des Hybridblatts, wie Segmenten und Holmen, unterzogen. Hierbei kamen die Verfahren Pultrusion, Faserwickeln, Pullwinding sowie Automatisiertes Faser- und Tape-Legeverfahren (AFP, ATL) in Betracht. Es wurde Verbindung zu aufgenommen zu den Firmen *Röchling (Haren)*<sup>1</sup>, *Thomas Technik (Bremervörde)*<sup>2</sup>, *Fiber Work (Königs Wusterhausen)*<sup>3</sup>, *ADETE (Kaiserslautern)*<sup>4</sup> sowie *Fiberline (Dänemark)*<sup>5</sup>. Dabei wurde das angedachte Konzept vorgestellt und ein Austausch begonnen. Gleichzeitig sollten so Partner für die spätere Kooperation bei der Prototypenentwicklung des späteren Hybridblatts gewonnen werden.

Die Grundvoraussetzungen für die Umsetzung diverser Konzepte schienen gegeben, nachdem beispielsweise die Fa. Thomas bereits ein Verfahren der Radius-Pultrusion vorstellen konnte (um bspw. Auch tordierte Profile zu fertigen) und die Fa. Röchling bereits Erfahrungen mit pultrudierten Rotorblattprofilen aufwies (siehe Abbildung 5). Beide Firmen waren offen für eine Zusammenarbeit.

---

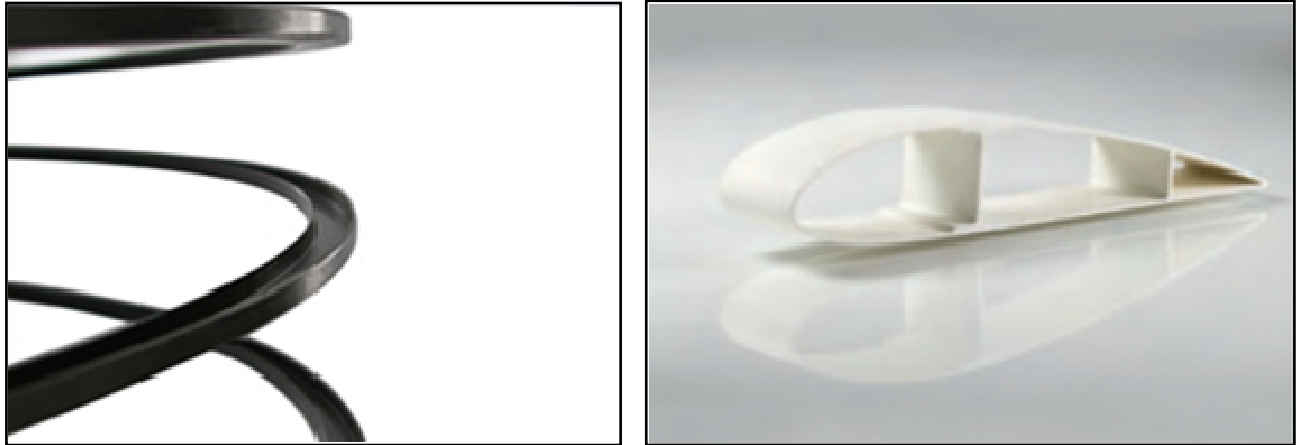
<sup>1</sup> [www.roechling.de](http://www.roechling.de)

<sup>2</sup> [www.thomas-technik.de](http://www.thomas-technik.de)

<sup>3</sup> [www.fiber-work.com](http://www.fiber-work.com)

<sup>4</sup> [www.adete.com](http://www.adete.com)

<sup>5</sup> [www.fiberline.com](http://www.fiberline.com)



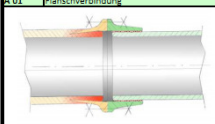
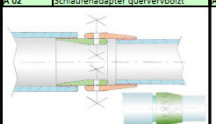
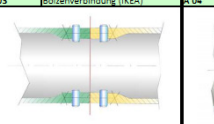
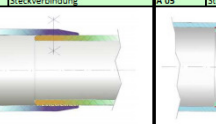
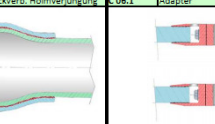

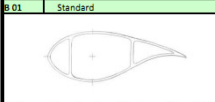
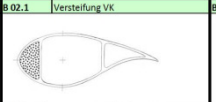
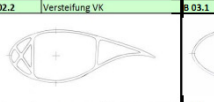
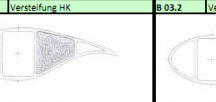
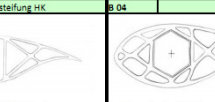
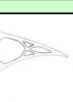
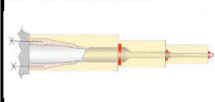

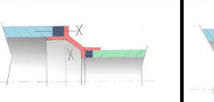
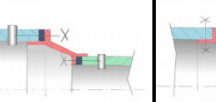
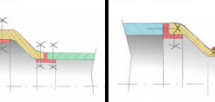
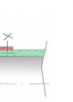

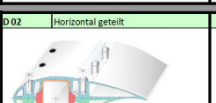


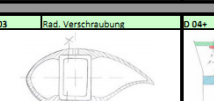
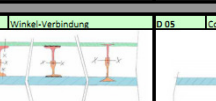

**Abbildung 5, links: Radius-Pultrusion (Fa. Thomas); re.: pultrudiertes Rotorblattprofil (Fa. Röchling)**

### **Strukturelle Konzepte für Blattteilung und Segmentierung**

Mit ersten Kenntnissen über Möglichkeiten und Grenzen von Herstellungsverfahren, konnten im Folgenden Konzepte für die technische Umsetzung der Teilung der Blattstruktur gesammelt werden. Als Ausgangsbasis wurde ein methodisch geordneter „Morphologischer Kasten“ erarbeitet, in welchem Lösungsvarianten für Funktionsbereiche des Segmentierten Rotorblattes systematisch zusammengetragen wurden. Ein Auszug der Varianten siehe Tabelle 3.



**Tabelle 3: Morphologischer Kasten Blattsegmentierung, Ausschnitt**

Element	Variante					
A Holm-Verbindung	A.01 Flanschverbindung	A.02 Schlaufenadapter querverbolzt	A.03 Bolzenverbindung (IKEA)	A.04 Steckverbindung	A.05 Steckverb. Holmverlängerung	C.06.1 Adapter
						
	Flanschadapter aus Metall/FVK werden einlaminiert/verklebt. Axiale Verschraubung	Adapterhüllen für Bolzenaufnahme (Schlaufenanschluss einlaminiert) werden verklebt. Radiales Verbolzen.	Holmsegmente werden axial über Bolzenverbindung verschraubt. Faseranordnung und Wandstärke entsprechen der Beanspruchung/Flächenpressung.	Steckverbindung der Holmsegmente in axialen Querschnitt. Verklebung oder radiale Verschraubung der Elemente	Sich verjüngender Holm. Steckverbindung verklebt.	Elemente werden axial mit Bolzenverbindung über geklebte Metallelemente verschraubt.
B Profil-Versteifung	B.01 Standard	B.02.1 Versteifung VK	B.02.2 Versteifung VK	B.03.1 Versteifung HK	B.03.2 Versteifung HK	B.04
						
	Profilquerschnitt mit zwei vertikalen Stegen. Exzentrisität der Stege als integrierter "Holmkasten" oder asymmetrische Holmaufnahme.	Profilquerschnitt mit zwei vertikalen Stegen. Schaumkern-Versteifung in Nase.	Profilquerschnitt mit zwei vertikalen Stegen. Struktur-Versteifung in Nase.	Profilquerschnitt mit Struktur-/Steganordnung Holmaufnahme. Schaumkern-Versteifung in Hinterteil.	Profilquerschnitt mit Struktur-/Steganordnung als Holmaufnahme. Struktur-Versteifung in Hinterteil.	Profilquerschnitt mit Strukturordnung als Holmaufnahme. Biologisch motivierte Struktur-Optimierung.
C Verbindung Profil- Profil	C.01 Ax-Verspannung über Holm	C.02 Ax-Vorspannung über Zugseile	C.04.1 Adapter	C.04.2 Adapter	C.05.1 Adapter	C.05.2 Adapter
						
	Profilsegmente werden über Nabe und Holm mit Muttern oder anderen Spannmitteln verspannt.	Profilsegmente werden über Stahlseile mit Blatttrabe verspannt.	Profilsegmente werden axial über Zwischenstück aus Metall/ FVK verschraubt. Einlaminierte Gewindebohrung. Bstl. Gummipuffer um Klaffen zu vermeiden.	Profilsegmente werden axial über Zwischenstück aus Metall/ FVK verschraubt. Bolzenaufnahme/Schlaufenverbindung. Bstl. Gummipuffer um Klaffen zu vermeiden.	Profilsegmente und Zwischenstück werden radial über Metallrahmen verschraubt. Zwischenstück aus FVK. Bstl. Gummipuffer um Klaffen zu vermeiden.	Profilsegmente werden axial. Zwischenstück radial mit Metallrahmen verschraubt. Zwischenstück aus FVK. Bstl. Gummipuffer um Klaffen zu vermeiden.
D Verbindung Profil- Holm	D.01 Vertikal geteilt	D.02 Horizontal geteilt				
						
	Profilsegment (ist zweigeteilt (Nase/Hinterteil). Verschrauben, Verkleben, Klippmechanismus, Schnappverbindung	Profilsegment (ist zweigeteilt (Ober-/Unterteil). Verschrauben, Verkleben, Klippmechanismus, Schnappverbindung				
E aerodyn Verkleb- d. Teilung	D.01 2D-Übergang	D.02 3D-Übergang	D.03 Rad. Verschraubung	D.04+ Winkel-Verbindung	D.05 Cover-Schale	
						
	Beinhaltet axiale Profilkonturänderung, Twist und Taper. >> 2D-Profillemente	Beinhaltet keine axiale Veränderung des Profilquerschnittes. >> 3D-Profillemente	AerodynCover geteilt und wird radial mit Holm verschraubt/verklebt. Variante durch unterschiedliche Teilung.	AerodynCover wird über Metall/FVK Winkel mit Holm verbunden. Variationen: Verschraubt/ Verklebt/ Einlaminiert.	AerodynCover-Schale wird mit Profil-/ AerodynCover-Segmenten verbunden.	

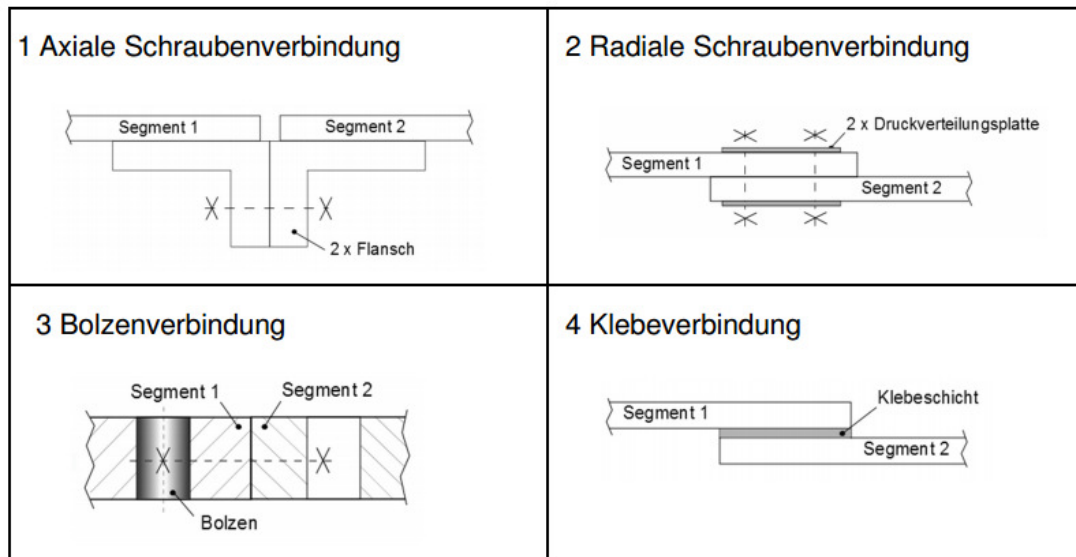
Auf dieser Basis wurden im Folgenden fertigungsbezogene Einzelheiten des strukturellen Aufbaus von Profilsegmenten und tragender Rotorblattstruktur mit den o.g. Herstellern diskutiert.

Mit inzwischen von der Fa. Smart Blade ermittelten charakteristischen aerodynamischen wie strukturellen Lasten (siehe Abschnitt 2.1.2.1) konnten weiter auch die Varianten der Verbindungstechniken eingehend analysiert werden.

### Untersuchung von Verbindungsvarianten

Die erarbeiteten Verbindungsmöglichkeiten wurden auf vier Grundvarianten reduzieren, welche für die Verbindung von zwei Segmentabschnitten eines Rotorblatts in Frage kommen (siehe Abbildung 6). Hierbei wurde als verbindende Struktur des Blattes der Holm als Kastenkonstruktion mit zwei Gurten und seitlichen Stegen zugrundegelegt. Das Grundkonzept sieht die Befestigung von aerodynamischen Schalen als 2D-Segmente und Übergangselemente (Fertigungsverfahren z.B. Pultrusion, Faserwickeln, Pullwinding) auf diesem lasttragenden Holm vor (Fertigungsverfahren Pultrusion oder Pullwinding; mit dem 3D Wurzelsegment verklebt oder als Subkomponente mit diesem gefertigt). Darüber hinaus entwickelte andere Konzepte aus

Tabelle 3, hätten auf Grund deren Komplexität und Neuheit wesentlich umfassendere Untersuchungen benötigt als im Rahmen des Projekts möglich gewesen wären.



**Abbildung 6: Untersuchte Verbindungsvarianten der Holmwandungen**

Da die Machbarkeit und Effizienz der Verbindung (Festigkeit, Zusatzgewicht, Montage) abhängig von der genauen Gestaltung sind, wurden die Verbindungsvarianten in einer Studie eingehend an einer definierten Trennungslage untersucht. Hierzu wurden Geometrie und Lasten des Referenzrotorblatts analysiert und die Teilungsposition bei 34% (4,5m) der Länge festgelegt. Wird das Blatt an dieser Stelle geteilt, ist noch mit einer guten aerodynamischen Effizienz des Gesamtblatts zu rechnen (siehe Kap. 2.1.1.1) und auch die Schnittlasten machen weniger als 50% der maximalen Lasten an der Blattwurzel aus.

In der Studie wurden die jeweiligen Verbindungskonzepte am entsprechenden Blattschnitt (940mm Profiltiefe, 253mm Profildicke) konstruktiv entworfen (siehe Abbildung 7) und mit üblichen analytischen Methoden und Simulationen ausgelegt. Die geometrischen Details der Verbindungselemente wurden nach den jew. Konstruktionsrichtlinien der Grundverbindungsarten gestaltet und in einer Parameterstudie die Auswirkungen einer Vergrößerung des Holmquerschnitts (Vergrößerung des Abstand der Stege = Holmbreite) innerhalb des existierenden Profils untersucht (siehe Abbildung 8).

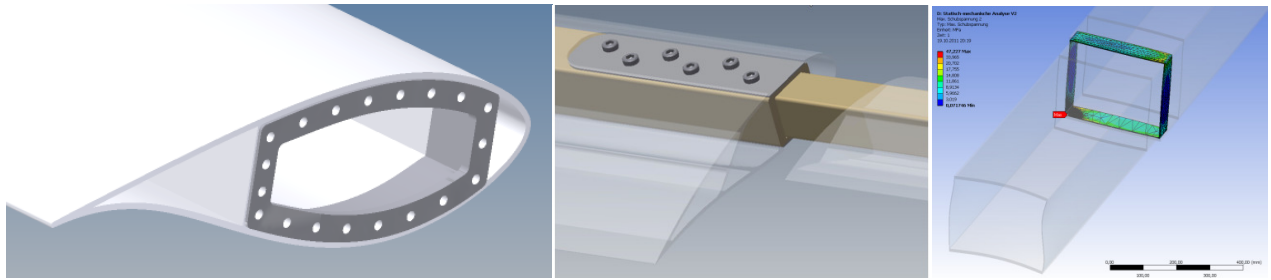


Abbildung 7: links – Beispiel eingeklebter Flansch für axiale Schraubenverbindung;  
 mitte – Beispiel radiale Schraubenverbindung mit Druckverteilungsplatten;  
 rechts – Beispiel Simulation Klebeverbindung



Abbildung 8: Variationen der Holmbreite bei der Untersuchung der Verbindungen

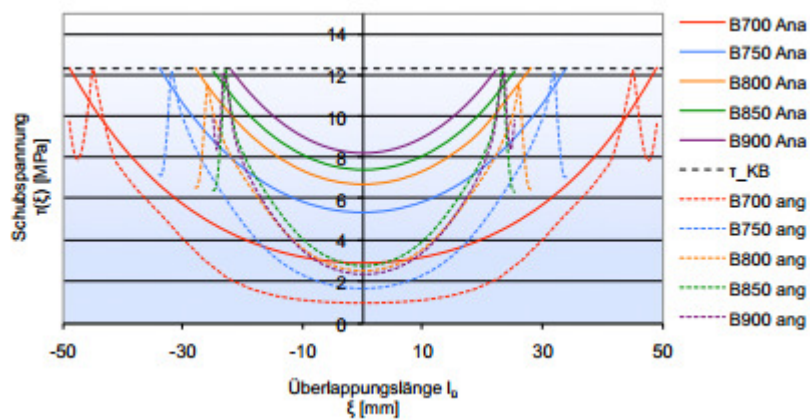
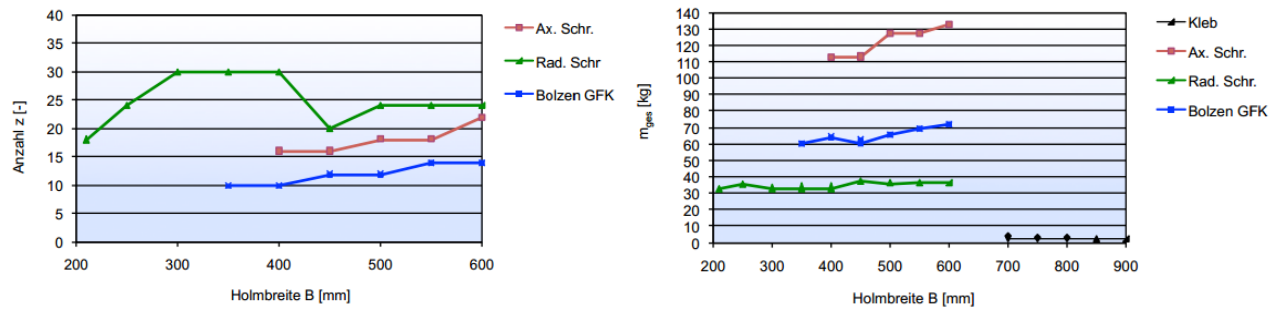


Abbildung 9: Verklebung - Beispielhafte Schubspannungsverläufe der Anpassung am Gurt



**Abbildung 10: Vergleich von Anzahl der Verbindungselemente und Gesamtgewicht der versch. Verbindungsvariationen**

Wie in Abbildung 10 ersichtlich, wurden die ermittelten Ergebnisse für verschiedene Holmbreiten hinsichtlich Elementanzahl und Gesamtgewicht der Verbindung verglichen. Der Bereich strukturiert sich in drei Abschnitte:

#### Geringe Holmbreiten:

Bei geringen Holmbreiten von 210mm bis 350mm Holmbreite (entspricht 22,3 - 37,2% Profiltiefe am Teilungsquerschnitt) besteht die einzige Verbindungsmöglichkeit in der Verwendung des Konzeptes der radialen Schraubenverbindung. Für axiale und Bolzenverbindungen konnten bei entsprechender Platzierung der Verbindungselemente für diese geringen Holmbreiten keine entsprechenden statischen Sicherheiten erreicht werden. Demzufolge muss auch die relativ hohe Schraubenanzahl der radialen Verbindung von max. 30 akzeptiert werden (Montageaufwand).

#### Mittlere Holmbreiten:

Bei mittleren Holmbreiten von 350mm bis 600mm Holmbreite (entspricht 37,2 - 63,8% Profiltiefe am Teilungsquerschnitt) kann zwischen den drei Verbindungskonzepten mit Schraubenverbindung gewählt werden.

Die axiale Schraubenverbindung ist wegen der nötigen Verwendung eines Stahlflansches und dem daraus resultierenden hohen Gewichts nicht empfehlenswert, da sich das lokale Mehrgewicht negativ auf die Dynamik des Blattes auswirkt und zu einem relativ großen Ungleichgewicht der Massenverteilung führt.

Eine Alternative bietet die Bolzenverbindung, die mit einem mittleren Gewicht, und einer geringen Anzahl an Verbindungselementen in Bezug auf die Montagefreundlichkeit überzeugt.

Wegen des großen Einflusses des Gewichtes ist in diesem Holmbreitenbereich die Verwendung der radialen Schraubenverbindung zu bevorzugen, auch unter der bewussten Inkaufnahme einer höheren Schraubenanzahl mit entsprechendem Montageaufwand.

#### Große Holmbreiten:

Bei großen Holmbreiten von 700mm bis 900mm (entspricht 74,5 - 95,7% Profiltiefe am Teilungsquerschnitt) wurde allein die Klebeverbindung simuliert und ausgewertet. Dies liegt an

den großen Abweichungen der Berechnungsgrundlage des verwendeten Modells bei der Berechnung der Schraubverbindungen (quadratischer Flansch) zur realen Profilgeometrie des Referenzblattes. Die Klebeverbindung liefert jedoch ausschließlich bei diesen großen Holmbreiten Ergebnisse, welche den Sicherheitsanforderungen genügen. Im Vergleich zu den verschraubten Verbindungskonzepten kann durch den geringen zusätzlichen Materialeinsatz festgehalten werden, dass die Klebeverbindung die Verbindungsmöglichkeit mit dem geringsten Gewicht ist. Negativ zu werten ist jedoch die anspruchsvolle Montage am Errichtungsort der WEA. Hier müssten die klimatischen Bedingungen einen bestimmten Rahmen erfüllen (ggf. Aufbau eines Montagezeltes) und es entstehen erhöhte Arbeitsschutzanforderungen, da Umgang mit Gefahrstoffen besteht. In jedem Falle steht die Komplexität der Demontage der Klebeverbindung in keinem Verhältnis zum einfachen und sicheren Lösen einer Schraubenverbindung.

### **Ergebnisse Hybridblatt**

Die Ergebnisse der Studie zu den Verbindungskonzepten geben einen Eindruck über die Realisierbarkeit der Segmentierung eines Rotorblattes für Windkraftanlagen.

Eine strukturelle Teilung des Rotorblattes, wie es für die Vereinfachung des Transports erforderlich wäre, geht mit aufwendigen Verbindungen einher. Unter Berücksichtigung des Gesamtgewichtes, der Haltbarkeit und der Montagefreundlichkeit erscheint hier eine radiale Schraubenverbindung als weiter zu verfolgendes Konzept gefunden. Ein Hybridblatt mit einer integrierten strukturellen Verbindung der Elemente erscheint anhand der Ergebnisse dieser Arbeit realisierbar, jedoch kann sich die Gesamtsteifigkeit eines mehrsegmentigen Rotorblattes als kritisch erweisen. Voraussichtlich würde sich die Eigenfrequenz des Blattes durch eine erhöhte Elastizität durch die Verbindungsstrukturen und der pultrudierten Blattsegmente vermindern. Es kann auch angenommen werden, dass das Gewicht des Blattes stark ansteigt. Das veränderte dynamische Verhalten des Blattes kann im Betrieb zu Problemen mit Eigenerregungen und im schlimmsten Falle Turmschlag oder Versagen der Verbindungen bewirken. Zum Zeitpunkt einer konkreten Blattauslegung müssten weit tiefer gehende Untersuchungen erfolgen um auch die Auswirkungen der Teilung auf die Blattsteifigkeit, das Gewicht und somit das dynamische Verhalten der Struktur erfassen, und einen Betrieb sicherstellen zu können. Besteht das segmentierte Rotorblatt aus mehreren Elementen, so verkompliziert sich nicht nur der Montageaufwand. Werden große Blattlängen betrachtet, wird das Problem des Transportes zu einem wichtigen Parameter, in dessen Zusammenhang eine einfache Teilung des Rotorblattes in zwei Segmente sicherlich sinnvoll ist.

Was die Seite der Fertigung angeht, konnte abschließend zu folgendem Schluss gekommen werden: Die Verfahren Pultrusion und somit auch Pullwinding lassen sich für beispielhafte 2D-Segmentquerschnitte, welche mit den Herstellern ausgetauscht wurden, nur bis zu Größen von 1,3m herstellen. Der Außenbereich eines Rotorblattes einer 250kW Anlage liegt darunter, jedoch hat eine 5MW WEA im Blattspitzenbereich eine Profiltiefe von mindestens 2m. Dies lässt die Anwendbarkeit des 2D-Segment-Konzepts für Multimegawattanlagen, auf welche die vorrangig in diesem Projekt verfolgten AFC-Elemente abzielen, fraglich erscheinen. Weiterhin sind beim Pultrusionsverfahren die Faserrichtungen schlechter kontrollierbar, die Matrixeigenschaften auf Grund der schnellen Härtung schlechter und die Integration von versteifenden Sandwich-Schaumkernen in die großen Flächenschalen sogar als nicht machbar von den Herstellern beurteilt worden. Aus all diesen Gründen ist mit einem erheblich höheren Materialaufwand und

somit Gewicht zu rechnen, um die gleiche Belastungsfähigkeit der Struktur zu erreichen, wie bei einem herkömmlichen Blatt. Der Faktor Gewicht stellt zusätzlich ein selbstverstärkendes Element dar, da bei langen Blättern das Eigengewicht einen großen Belastungsfaktor darstellt.

### 2.1.2 Aerodynamische Auslegung der Flexible Hinterkante

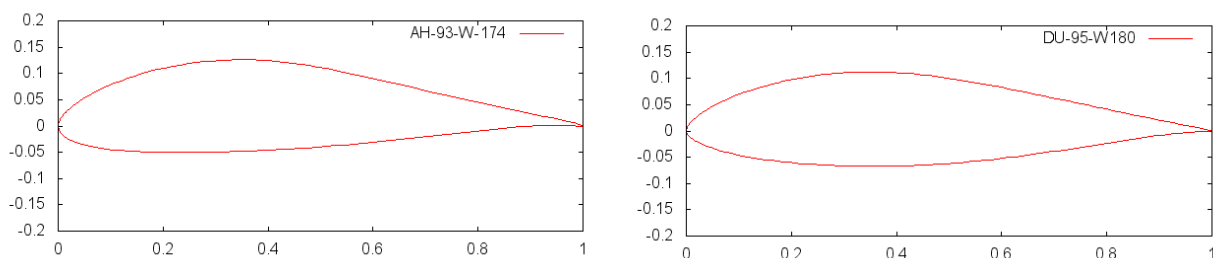
Im Folgenden wird die aerodynamische Auslegung und die sich daraus ergebenden Anforderungen an die strukturelle Auslegung der Flexiblen Hinterkante beschrieben.

Das Arbeitspaket hatte die Aufgabe eine geeignete Geometrie des Hinterkanten-Profiles zu ermitteln. Dazu zählen neben der 2D-Profilgeometrie auch die Bestimmung der optimalen Hinterkantentiefe und Hinterkantenauslenkung. Um das aerodynamische Verhalten verschiedener Profilgeometrien zu untersuchen, wurde in einer ersten Parameterstudie eine Vielzahl von Simulationen mit Hilfe von XFOIL durchgeführt. Die Evaluation der aerodynamischen Kennwerte mittels des in Industrie und Wissenschaft weit verbreitenden 2D Panel-Codes, hat den Vorteil einer hohen Recheneffizienz. So können in kürzester Zeit verschiedenste FHK-Geometrien voruntersucht werden, um eine geeignete Auswahl an Konfigurationen einzukreisen.

In einer weiteren Untersuchung wurden diese Konzepte dann mittels detaillierter CFD Simulation untersucht. So können auch etwaige Ablöseeffekte im Hinterkantenbereich besser erfasst werden als mit dem vereinfachten Panel-Code.

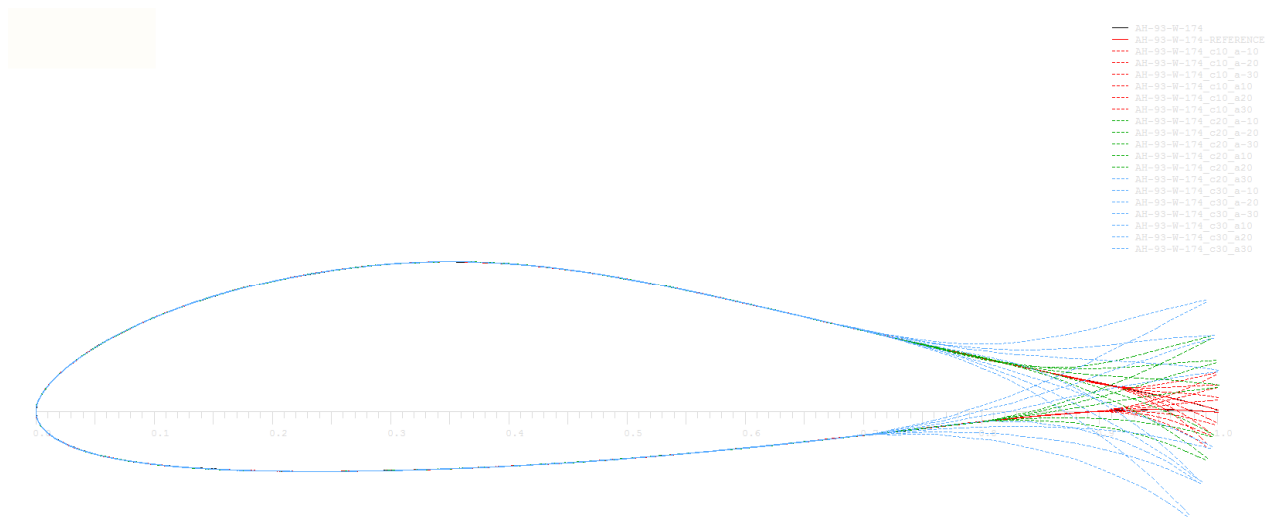
Für die Simulation wurden zwei in der Windindustrie gängige Profile ausgewählt. Zum einen das AH-93-W-174 (Profilserie: Althaus) und eine modifizierte Form des DU-95-W-180 (Profilserie: Delft University). Letzteres erfuh eine Modifikation der Profilgeometrie der Druckseite. Wichtig in diesem Zusammenhang ist vor allem der S-Schlag auf der Profilunterseite. Im Normalbetrieb erhöht dieser den Auftrieb zwar, für eine Nutzung als Hinterkante ist dieser allerdings störend, da er das Verhalten negativer FHK-Ausschlägen negativ beeinflusst.

Abbildung 11 zeigt die beiden untersuchten Profilkonturen.



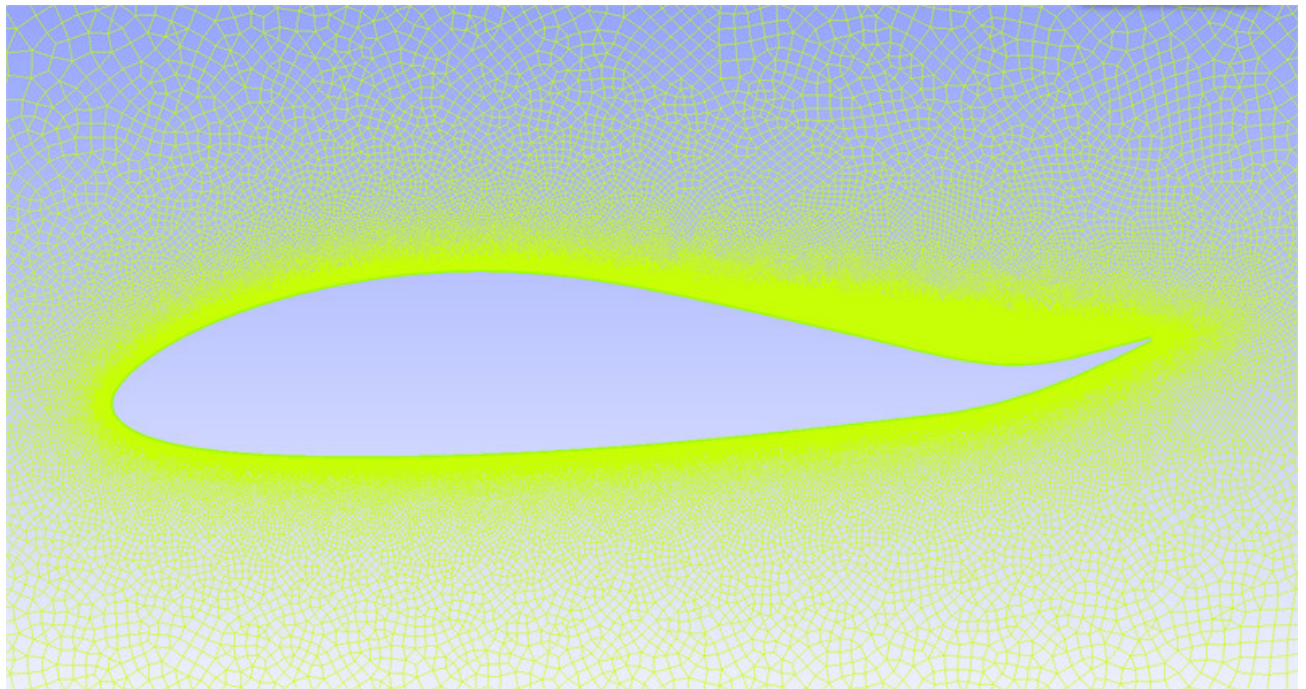
**Abbildung 11: Untersuchte Profilgeometrien als Ausgangsbasis der FHK-Profilgeometrie**

Für beide Profile wurden jeweils 3 FHK-Tiefen (15%, 25% und 35% der Profiltiefe) bei einer Auslenkung von je  $-30^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  FHK-Auslenkung untersucht. Für die insgesamt 42 Simulationen wurden die aerodynamischen Profilpolaren für einen Anstellwinkelbereich von  $-15^\circ$  bis  $+20^\circ$  berechnet. Die verschiedenen Konfiguration für das Althausprofil sind exemplarisch in sind in Abbildung 12 zu sehen.



**Abbildung 12: Verschieden FHK-Geometrien des Althaus Profils**

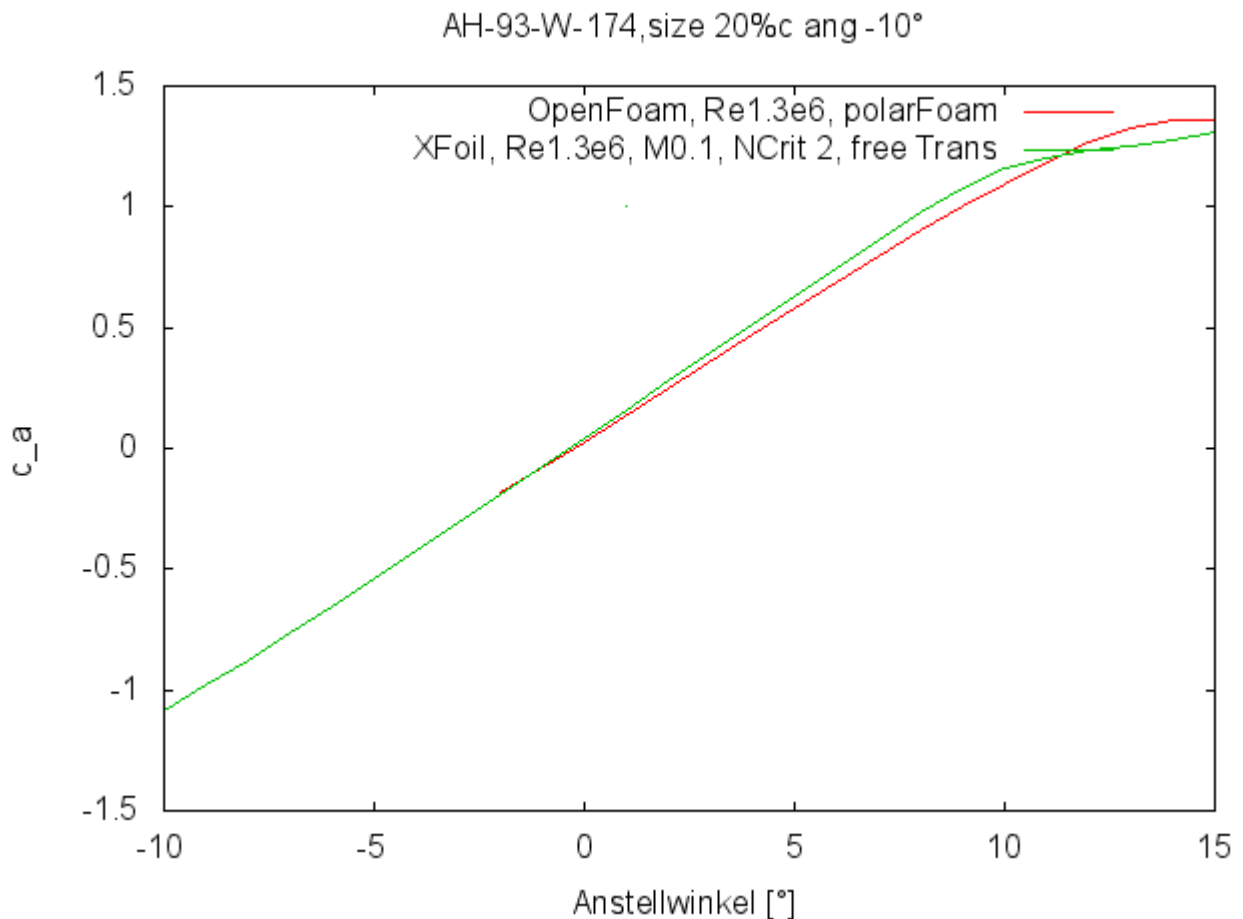
Die Polaren wurden für alle FHK-Positionen zuerst mit einer Panel-Methode berechnet. Zur Validierung der Ergebnisse wurden CFD-Simulationen mit OpenFoam erstellt. Dabei wurden ebenfalls alle Hinterkanten-Konfigurationen berechnet. Für die RANS-Simulation wurde ein Hybridgitter (strukturiertes Grenzschichtgitter/ unstrukturiertes Fernfeldgitter) mit einer Zellenzahl von ca. einer Million verwendet. Exemplarisch ist ein Gitter in Abbildung 13 zu sehen.



**Abbildung 13: Hybridgitter für CFD Simulation**

Die gewonnenen Ergebnisse umfassen die aerodynamischen Leistungskurven, die sog. Profilpolaren. Sie stellen das Verhältnis zwischen Auftrieb/Widerstand mit dem Anstellwinkel her. Anhand dieser Beiwerte kann die Performance der FHK abgeschätzt werden.

Abbildung 14 zeigt exemplarisch die Auftriebspolare des Althaus-Profiles mit nach oben ausgelenkter Hinterkante.



**Abbildung 14: Profilpolaren des Althaus Profils mit -10° Auslenkung einer 20% tiefen FHK. Berechnung mittels XFoil und OpenFoam.**

Die Wichtigkeit der genauen Bestimmung der Profilpolaren liegt darin begründet, dass diese mit eine der wichtigsten Eingabeparameter für weitere Lastberechnungen der gesamten Anlage sind. Aus den Lastberechnungen erfolgen in einem nächsten Schritt dann die Belastungen die sich auf das Rotorblatt ergeben. Durch eine Erhöhung des Moments durch die Hinterkante wirkt eine größere strukturelle Belastung auf das Blatt, was in der strukturellen Auslegung berücksichtigt werden muss.



### 2.1.2.1 Lastsimulation

Zum einen wurden aeroelastische Simulationen durchgeführt um die Extrem- und Betriebslasten der Referenzanlage zu ermitteln. Diese wurden benötigt um Verbindustechniken der Blattsegmentierung sowie die strukturelle Anbindung der FHK an das Rotorblatt zu untersuchen.

Zum anderen wurde das Betriebs- und Regelverhalten der FHK untersucht, um das Potential zur Lastreduzierung sowie zur Leistungsregelung zu bestimmen. Mittels dieser Art von Simulation, kann das gesamte Betriebsverhalten der Anlage abgebildet werden.

Die aero-elastische Lastsimulationen wurden mit FAST durchgeführt. Dieser Programmcode stammt von der amerikanischen NREL und ist frei verfügbar. Damit konnte eine Beschreibung der flexiblen Hinterkante in den Quellcode eingearbeitet werden. Um dies zu gewährleisten, wurde das aerodynamische Verhalten der Hinterkante aus den statischen Simulationen um weitere dynamische Effekte erweitert. Ein PID Regler, steuert die Hinterkante während der Laufzeit, um das Blattwurzelbiegemoment zu glätten.

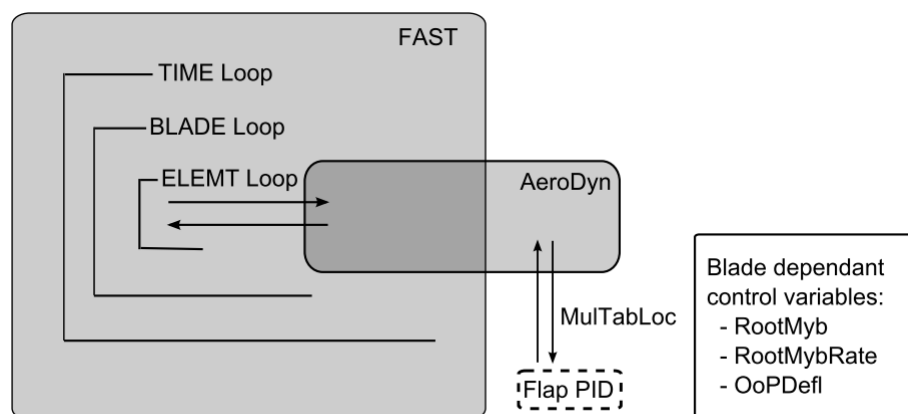
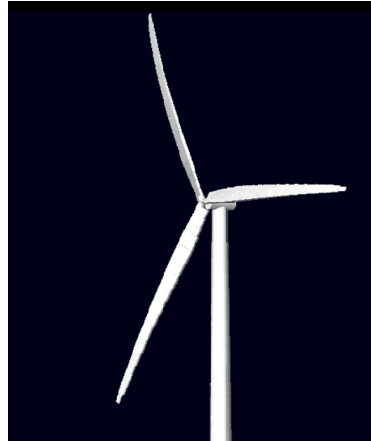


Abbildung 15: Implementierung der Hinterkante in die FAST/AeroDyn-Umgebung

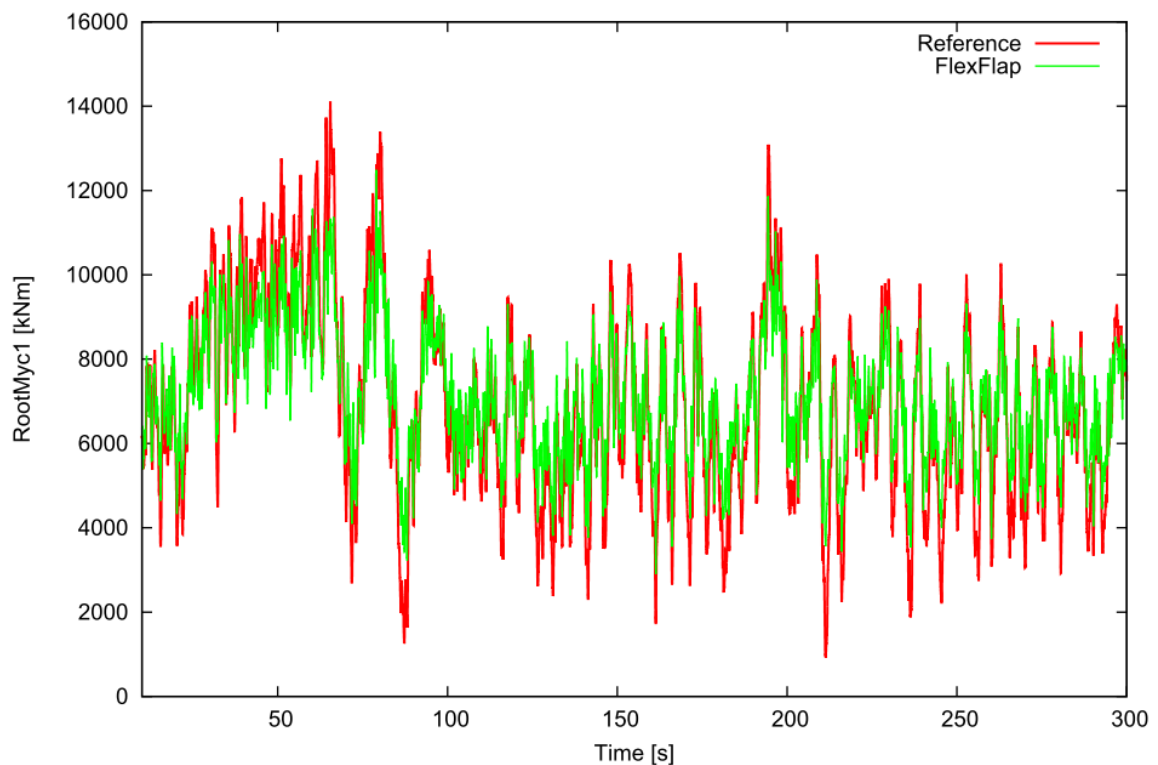
Da die Turbinen- und Blattfreiheitsgrade in FAST beschränkt sind, wird für vereinzelte Lastfälle ein Mehrkörpermodell der Anlage in ADAMS simuliert (Abbildung 16).



**Abbildung 16: ADAMS Simulation der Referenzanlage**

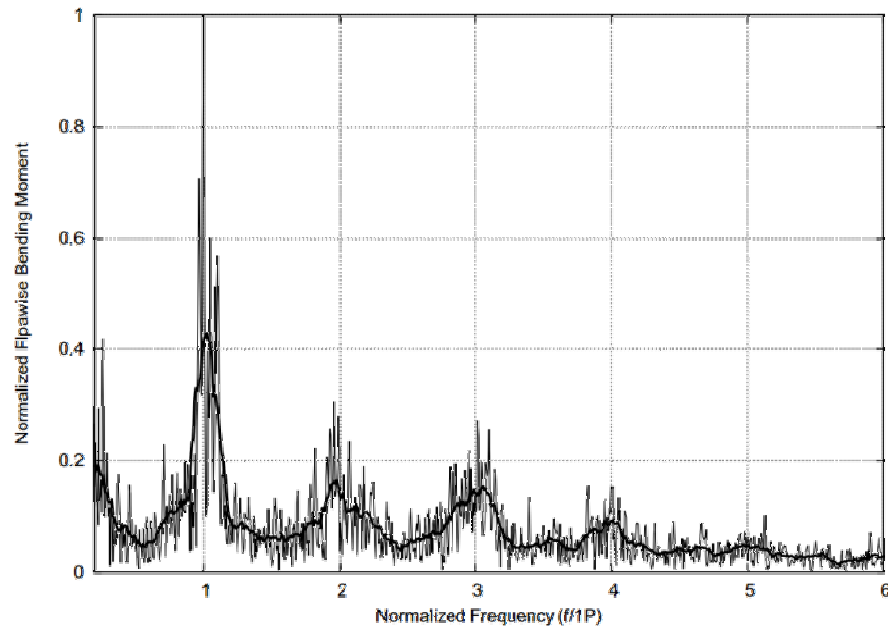
Durch die generell hohe Effizienz dieser Simulationen ist man in der Lage, Regelstrategien der Hinterkante in Zusammenarbeit mit der restlichen Turbinenregelung (Drehzahl, Pitch) für den gesamten Betriebsbereich der Anlage zu untersuchen.

Exemplarisch sei auf Abbildung 17 verwiesen. Dort ist der zeitliche Verlauf des Wurzelbiegemoments mit und ohne flexible Hinterkante aus einer ADAMS-Simulation zu sehen. Deutlich zu sehen ist die Reduzierung des Moments durch die gezielte Regelung der FHK.



**Abbildung 17: Blattwurzelbiegemoment für Anlagenbetrieb unter Standardbedingungen mit und ohne flexibler Hinterkante**

Im Hinblick auf den dynamischen Windkanaltest wurden auch mehrere Regelstrategien getestet. Darunter zählen auch die lokalen Anstellwinkel an ausgewählten Profildsegmenten zu nutzen und diese Anstelle des Blattwurzelbiegemoments als Kontrollgröße des PID Reglers zu verwenden. Dabei sei auf Abbildung 18 verwiesen, in dem deutlich wird, der hauptsächliche Lastanteil des Blattwurzelbiegemoments aus den 1P, 2P und den 3P Frequenzen stammt. Eine FHK, die in der Lage ist eine solch hohe Betriebsfrequenz aufzubringen, wäre damit ideal für den Einsatz zur Lastreduzierung an der WKA.



**Abbildung 18: Frequenzspektrum der Blattwurzelbiegebelastung**

### 2.1.2.2 Ergebnisse der aerodynamischen Profil- und Lastsimulationen

Die Ergebnisse der Parameterstudie zum aerodynamischen Profilverhalten sowie der Lastsimulationen zur Reduzierung der Blattbelastung sowie Leistungsregelung mittels PID geregelter FHK zeigen folgendes:

Die Untersuchung des AFC-Systems bezüglich der Leistungsregulierung der Anlage zeigt, dass es kritisch ist die Anlage ohne das klassische Pitchsystem zu betreiben. Dies hat mehrere Gründe:

- ◆ Um eine aerodynamische Wirksamkeit zu erreichen, mit der die Anlage über den kompletten Betriebsbereich in ihrer Leistung geregelt werden kann, müssten die Hinterkantenelemente mindestens 30–40% der Flügeltiefe einnehmen. Die AFC-Elemente müssten auch über einen weiten Teil des Rotorblatts ausgedehnt werden. Diese beeinflussen die Lasten (erhöhte Momente) und Struktur (weniger Bauraum) des bestehenden Rotorblatts negativ. Zudem kann das Sicherheitssystem der Anlage (Anlagennotstopp) nicht allein durch die Hinterkante realisiert werden.
- ◆ Die dynamischen Lasten auf das Rotorblatt steigen mit Vergrößerung der auslenkbaren Hinterkante. Die zusätzlichen Lasten müssen durch eine Strukturanpassung des Rotorblatts ausgeglichen werden. Für die tragende Struktur steht zudem weniger Bauraum zu Verfügung,

da die flexible Hinterkante einen großen Teil der Blattstruktur einnimmt. Hinzu kommt, dass durch einen Wegfall des Pitchsystems zusätzliche dynamische Lasten aus den Strömungsabrissen an der Blatthinterkante auftreten.

- ◆ Die Wahrung der Aufgaben des Sicherheitssystems (Anlagennotstopp) können nicht allein durch die Hinterkantenelemente übernommen werden. Die Einführung anderer Systeme (z.B. Spoiler) erhöht allerdings die Komplexität des Gesamtsystems, so dass eine Beibehaltung des erprobten Pitchsystem derzeit die sicherste Alternative scheint.
- ◆ Anstatt einer Eliminierung des Pitchsystems wird eine Arbeitsteilung zwischen Pitchsystem und flexibler Hinterkante vorgeschlagen. Die wesentlich kleiner dimensionierten AFC-Elemente werden somit zur „Feinregelung“ der Anlagenleistung (partielle Leistungsregelung) genutzt, wobei das Pitchsystem die „grobe“ Regelungen, sowie den Anlagenstopp übernimmt. Dadurch kann der Verschleiß der Pitchlager reduziert werden und die Lebensdauer des Systems steigt.
- ◆ Das pneumatische Gesamtsystem zur Druckluftversorgung derart großer Hinterkanten, ist mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand was die Dimensionierung des Versorgungssystems angeht verbunden.
- ◆ Die flexible Hinterkante kann weiterhin zur Lastreduzierung eingesetzt werden, welche trotz der kleineren Baugröße effizient bleibt. Eine Arbeitsteilung bezüglich der Lastregelung zwischen Pitchsystem und flexibler Hinterkante ist im Zuge eines „Cyclic-Pitch-Systems“ ebenfalls denkbar. Hierzu wird eine Regelung der niederfrequenten Blattlasten durch den Pitch erzielt, während die Hinterkante die hohen Frequenzen des Lastspektrums abdeckt.

Zusammenfassend wird angeraten die Größe der Hinterkante auf ca. **20-25% der Flügeltiefe** und einer Gesamtauslenkung auf maximal **+/-20°** zu reduzieren. Dadurch kann eine hohe Aktuatorgeschwindigkeit erreicht werden mit der eine effiziente Lastregelung zur Senkung der Ermüdungsbelastungen möglich ist (Abbildung 19).

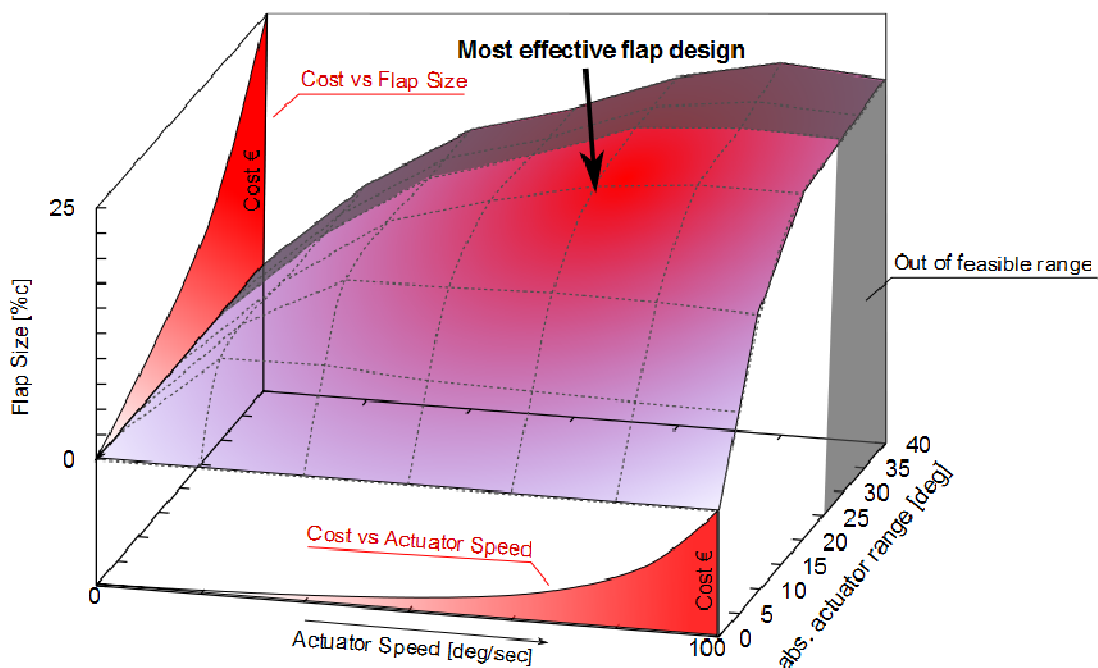


Abbildung 19: Effiziente FHK Geschwindigkeit und Auslenkung

Die Konzentration auf die Lastreduzierung durch die flexible Hinterkante rückt damit in den Mittelpunkt der Untersuchung. Die Entwicklung eines solchen Systems, stellt weiterhin ein Meilenstein in Industrie und Forschung dar.

Für dieses Projekt und die eventuelle spätere Konzeption einer Testanlage wird für die Leistungsregulierung der WEA am Pitchsystem festgehalten. Das Pitchsystem übernimmt zudem weiterhin den Anlagennotstopp. Dadurch kann der Verschleiß der Pitchlager drastisch reduziert werden und Kosten und Lebensdauer des Systems bewegen sich in vorteilhaftere Regionen. Eine fail-safe Stellung der flexiblen Hinterkante ist für das Sicherheitskonzept der Anlage nicht mehr zentral von Bedeutung.

### **2.1.3 Mechanische Auslegung der Flexiblen Hinterkante**

#### **2.1.3.1 Anforderungen an die Flexible Hinterkante**

Der technische Entwurf von Systemen für die Anwendung in der Windenergie ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Gerade das Rotorblatt ist einer Vielzahl von Einflüssen ausgesetzt. So sind Massen- und Beschleunigungskräfte, ein großer Temperaturbereich, UV-Einstrahlung, Blitzschlag sowie alle Formen von Feuchtigkeit und Eis, Sand und Staub, welche zu Korrosion und Erosion führen, von den Komponenten während ihrem Betrieb unter den Auslegungslasten über Jahrzehnte schadlos zu ertragen um eine zuverlässige Funktion sicherzustellen. Da die Anlagen zudem weit verteilt in teils abgelegenen Regionen stehen und die Rotorblätter nur aufwendig zu erreichen sind, sind die Inspektions- und Wartungsintervalle mit durchschnittlich zwei Jahren sehr groß.

Die Anforderungen an ein System zur Strömungsbeeinflussung, genauer einer flexiblen Hinterkante, lassen sich nach diesen Feststellungen, sowie eingehenden aerodynamischen Analysen (Abschnitt 2.1.1) wie folgt formulieren:

#### Effektiv

- ♦ 20 bis 30% Profiltiefe (zur effektiven Last- und ggf. partiellen Leistungsregelung)
- ♦ hohe Auslenkung bzw. Krümmung der Hinterkante
- ♦ Aktuierungsgeschwindigkeit min. 1P-Frequenz (einfache Rotordrehzahl, wünschenswert sogar 3P)

#### Zuverlässig

- ♦ Wartungsintervalle maximieren
- ♦ ausfallsicher (fail-safe, stabiler Systemzustand bei Ausfall einer Systemkomponente)
- ♦ geringe Anzahl beweglicher Teile (mgl. verschleißfrei)
- ♦ widerstandsfähig gegenüber Blitzschlag, Erosion, Korrosion (Metallteile vermeiden) und UV-Strahlung

#### Leicht

- ♦ Lastzuwachs aus Zusatzmasse minimieren

#### Kompakt

- ♦ einfach und schnell zu warten (ggf. modular)
- ♦ geringer Eingriff in / Einfluss auf bestehende Blattstruktur

Preiswert

- ◆ Fertigungsverfahren wie Extrusion, oder Assemblierung aus Halbzeugen
- ◆ Erprobte und zuverlässige / leicht auszuwechselnde Serienbauteile

Die Entwicklung eines erfolgversprechenden Konzepts einer flexiblen Hinterkante konnte in verschiedene Funktionsbereiche aufgeteilt werden. Hierbei waren der Entwurf der flexiblen Struktur und deren Gestaltung wie Materialwahl, sowie die Findung einer entsprechenden Lösung für die Aktuierung des Systems zu erfüllen. Dies sollte über den Projektzeitraum mit entsprechenden Funktionsmodellen und Prototypen zu einem maximal tauglichen System führen.

### 2.1.3.2 Vorauswahl Aktuatorik

Bei der Wahl der Aktuatorik wurde auf ein pneumatisches System gesetzt, da dies unter den Entsprechenden Anforderungen das größte Potenzial versprach. Dafür sprechen das geringe Gewicht sowie die Fehlertoleranz bei Leckage. Gegen andere Systeme lassen sich die Blitzschlaggefahr (elektrische Aktuierung) oder im Rotorblatt unerwünschte Medien (Hydraulik) vorbringen. Eine Zusammenfassung der Auswahl nach den wichtigsten Anforderungen ist in Tabelle 4 dargestellt.

**Tabelle 4: Übersicht Auswahltabelle für Aktuierungssystem**

	Elektrische Aktuatoren	Hydraulik	Pneumatik
<b>Leistungsgewicht</b>	+	++ (Mikrohydraulik)	++ (Pneumatischer Muskel)
<b>Sicher gegenüber Blitzschlag</b>	-	+	++
<b>Bemerkung</b>	/	- (Leckage von Hydraulikflüssigkeit)	/

Als vielversprechend wurde zudem zunächst der Einsatz eines Pneumatischen Muskels (pneumatic artificial muscle, PAM) beurteilt (siehe Abbildung 20). Die Vorteile des PAM (keine beweglichen/verschiebbaren Teile, geringe Masse und hohes Leistungsgewicht), sowie die Verfügbarkeit als Standard-Zukaufkomponente schienen optimal für die anvisierte Aufgabe bei der Aktuierung der flexiblen Hinterkante am Rotorblatt zu sein. Der für den Muskel erforderliche Antagonist (PAM ist nur einfachwirkender Zugaktuator), wäre auf verschiedene Weisen durch

elastische, auch in die Struktur integrierte Elemente, wie Federn, umsetzbar. Im späteren Projektverlauf wurde das Thema der Aktuatorwahl noch weitergehend betrachtet.



Abbildung 20: Pneumatische Muskel („Fluidic Muscle“) der Fa. Festo (Quelle: Festo)

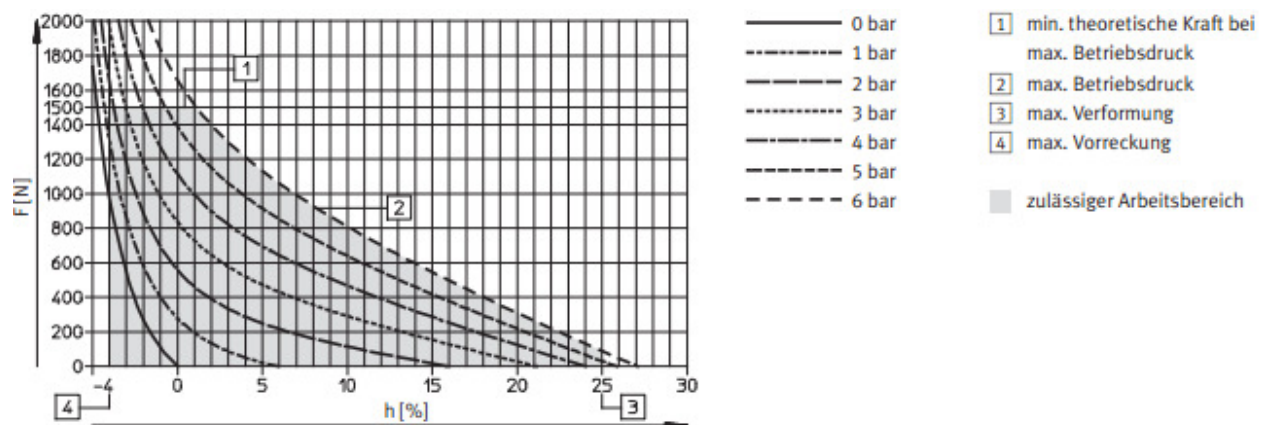
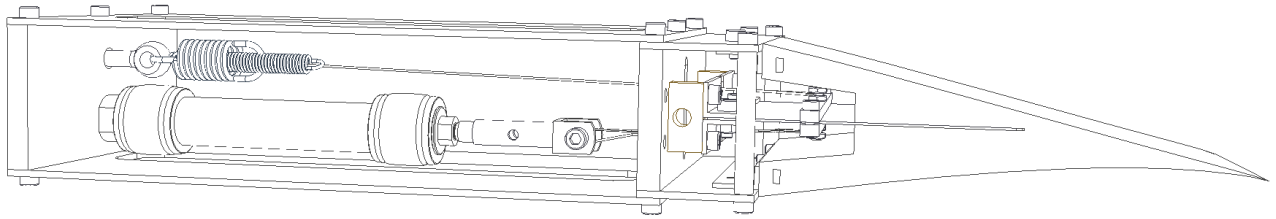


Abbildung 21: Kraft-Weg-Diagramm eines "Fluidic Muscle, Typ DMSF-20" (Quelle: Festo)

### 2.1.3.3 Überprüfen von Konzepten mit Funktionsmodellen

Ein erstes Funktionsmodell in welchem das Zusammenwirken einer flexiblen Struktur und eines PAM untersucht werden sollte wurde gebaut. Es bestand aus einem Vollgummikörper als Hinterkante, in welchen ein Biegeblech eingegossen wurde. Durch eine Verspannung oberhalb und unterhalb des Bleches mit einer Feder und einem PAM, konnte dies verbogen werden. Siehe Abbildung 22.



**Abbildung 22: Funktionsmodell Konzept Gummikörper-Biegeblech**

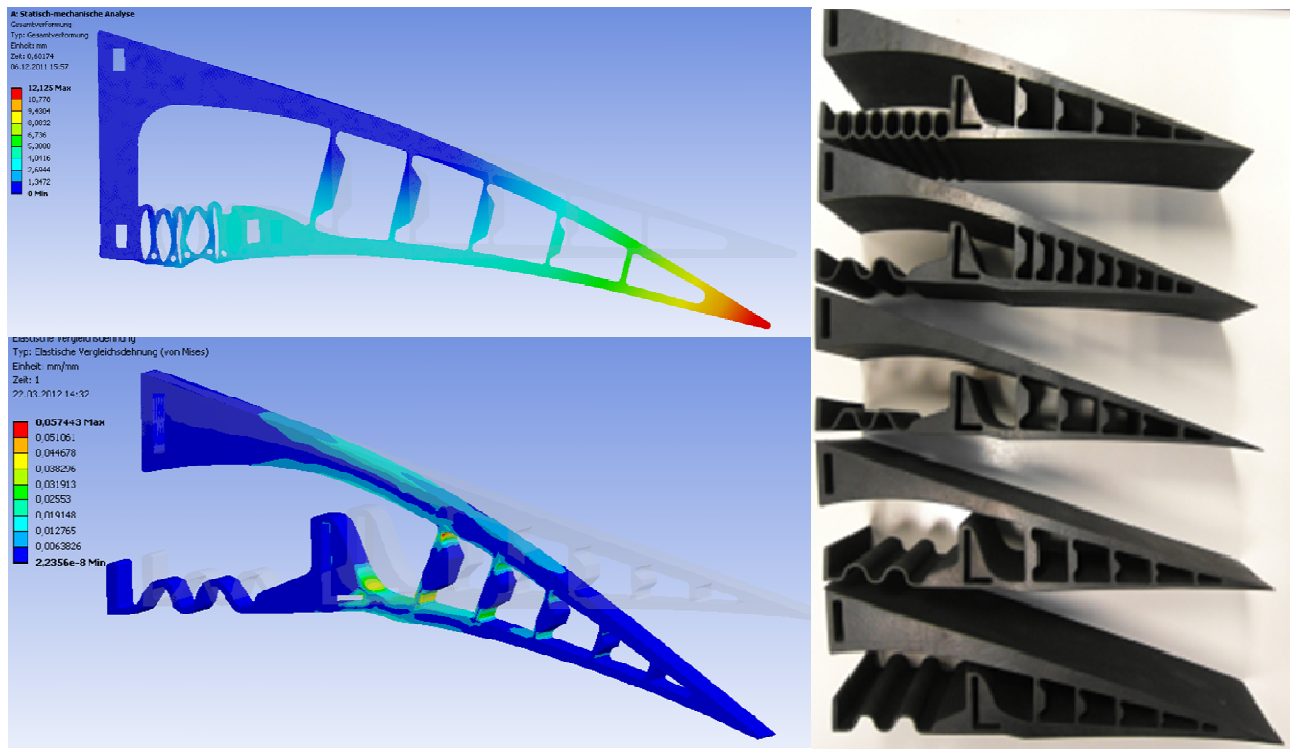
Leider blieb die Wirksamkeit hinter den Erwartungen zurück. Die Hinterkante zeigte bei voller Aktuierung des Muskels nicht die gewünschte Gesamtauslenkung und Formgebung, was auch mit einem Gewichts- und Verformungsoptimierten Gummiteil nicht wesentlich verbessert werden konnte.

Nach dieser Erfahrung wurde das Grundkonzept für die Ausführung der Hinterkante gefunden, welches bis zum Ende des Projekts beibehalten werden konnte.

Die Struktur besteht aus einem flexiblen Werkstoff (Elastomer), welcher durch entsprechende Formgebung (Ausschnitte / Verrippungen der Wände) und Aktuierung an einer Seite des Profils in Richtung Ober- und Unterseite des Profils verformt werden kann. Eine Öffnung der Dreiecksförmigen Kontur ist dabei unumgänglich, da die sonst über die Wandungen vom Werkstoff zu ertragenden Dehnungen schnell an die Grenzen der Ermüdungsfestigkeit selbst der flexibelsten Werkstoffe stoßen. Die Öffnung kann an der Hinterkante oder an der Unterseite erfolgen, bedarf jedoch einer Abdichtung gegen Medien von außen um die innenliegende Aktorik zu schützen. Vor der Herstellung von Prototypen führten auch Computersimulationen mit einer nichtlinearen Finite Elemente Analyse (FEA) zu diesen Einsichten. Mit Hilfe der FEA konnte auch das Verhalten der komplex wirkenden Strukturkinematik verdeutlicht werden und die Festlegung von geometrischen Abmessungen sowie die Auswahl vielversprechender Varianten erfolgen (siehe Abbildung 23).

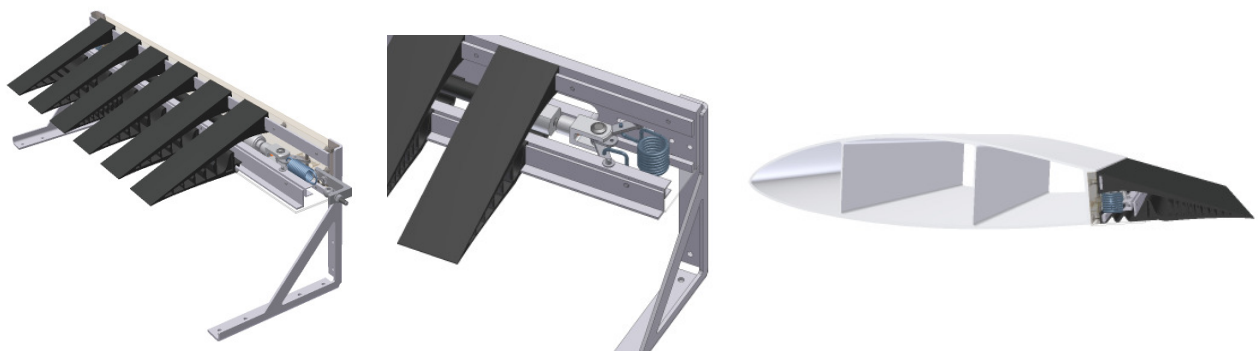
Für die untersuchten Strukturvariationen wurde der Elastomerwerkstoff EPDM (Ethylene-Propylene-Diene-Monomer) ausgewählt, da er eine große elastische Verformbarkeit und eine sehr hohe Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse bietet. Im Wasserstrahlschneidverfahren wurden mehrere Probestücke gefertigt, um unterschiedliche Ausprägungen der inneren Rippenstruktur (Dicke, Anzahl, Winkel), Deckschichtwandstärke sowie Dichtstruktur auf der Unterseite praktisch zu überprüfen. Auch die ermüdungsfesten Spannungs- bzw. Dehnungskennwerte lassen eine Betriebsfeste Auslegung der Hinterkantenkörper zu (Die aus der Simulation berechneten Spannungen und Dehnungen liegen unter den für das Material bei der angenommenen Lastwechselzahl ertragbaren Werten).





**Abbildung 23: FEA Untersuchungen des neuen Strukturkonzeptes und Prototypen in verschiedenen Variantenkombinationen**

Für die Aktuierung des neuen Hinterkantenkonzeptes wurde zusätzlich ein Versuchsstand entworfen. Dieser sollte nicht nur den Vergleich der Varianten der neuen Struktur ermöglichen, sondern stellte auch ein Funktionsmodell einer Aktuierungsmechanik dar, welche in Hinblick auf die Kompaktheit der Baugruppe eine sehr vorteilhafte Lösung darstellte: Die gesamte Mechanik, basierend auf einem Pneumatischen Muskel als Aktuator, einer Kraftumlenkung durch eine Scherenkinematik und Zugfedern für die Ausfallsichere Rückstellung der Hinterkante, befand sich innerhalb des flexiblen Elements. (siehe Abbildung 24).



**Abbildung 24: Prototypen Versuchsstand mit Detailansicht der Scherenkinematik und der perspektivischen Anbringung des Aktuierungskonzeptes an einer Rotorblattstruktur**

An einer Basisplatte, welche die Schnittstelle zum Rotorblattsegment darstellt, sind verschiedene Funktionsflächen zur Aufnahme der Hinterkantenkörper, sowie Elemente der Verstellmechanik eingebracht. Kernstück ist der Aktuator, ein Pneumatischer Muskel der Fa. FESTO mit einem Membrandurchmesser von 10 mm und einer Nennlänge von 360 mm. Dieser entwickelt bei 8 bar Luftdruck, abhängig von der Kontraktion, bis zu 400 N Zugkraft. Um der Anforderung eines kompakten Systems gerecht zu werden, ist dieser längs zum Rotorblatt, in der Basis des flexiblen Hinterkantenkörpers untergebracht. Die zur Bewegung der Hinterkante erforderliche Bewegungsrichtung liegt quer dazu, weshalb eine Umlenkung der Bewegungs- und Krafrichtung erfolgen musste. Dies geschieht über eine Hebel- oder Scherenkinematik, siehe Abbildung 24 und Abbildung 25. Da der Pneumatische Muskel nur Zugkräfte erzeugen kann, benötigt er für die Rückstellung einen Antagonisten. Zudem muss ein sicherer Zustand der Hinterkante bei Ausfall des Pneumatiksystems erreicht werden (fail-safe), weshalb zwei Konzepte mit mechanischen Federn am Versuchsstand umgesetzt und überprüft wurden.

Zudem wurde der Versuchsstand so konzipiert, dass verschiedene Strukturvarianten der Hinterkantenkörper daran montiert und vergleichend deren Performance beobachtet werden konnte. Diese wurden aus EPDM, einem sehr beständigen Elastomerwerkstoff, gefertigt und unterschieden sich in Detailausprägung der inneren Rippenstruktur (Dicke, Anzahl), Deckschichtwandstärke sowie Dichtstruktur auf der Unterseite.

Die Steuerung des Aufbaus und das Anfahren verschiedener Positionen erfolgten durch Befüllen des Pneumatischen Muskels über ein Proportional-Druckregelventil.



**Abbildung 25: Prototypen-Versuchsstand - Variationen der flexiblen Hinterkantenstruktur und Auslenkung nach unten sowie oben**

Die Untersuchungen am fertiggestellten Versuchsstand ließen folgende Schlussfolgerungen zu:

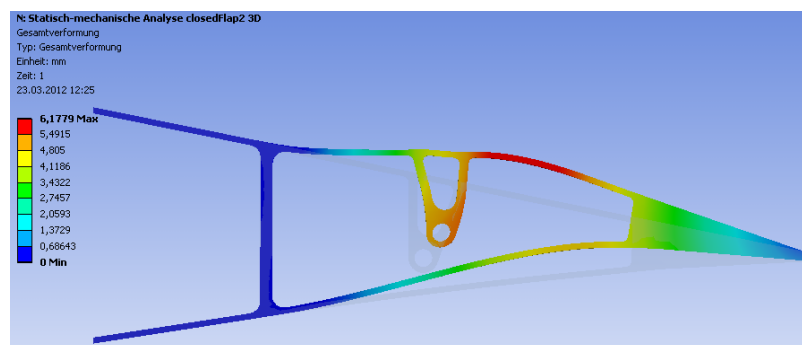
- ♦ Die Stellgeschwindigkeit in Aufwärts- wie Abwärtsrichtung ist ausreichend, um Laständerungen aus niederfrequent wechselnden Windkräften in der Größenordnung der Rotordrehzahl der anvisierten 250kW-Anlage ausregeln zu können (ca. 0,9 Hz).
- ♦ Die Stellkraft des Aktuators in Zusammenhang mit der Dimensionierung der Hebelmechanik ist nicht optimal. Die Mechanik ist in der Lage, die sieben Hinterkantenkörper mit jeweils 50 mm Längenabdeckung (zusammen 58% der Gesamtlänge des Aufbaus) in ausreichendem Maße zu bewegen (+20°, -25° Auslenkung). Zugfeder und Schenkelfeder sorgen beide für eine zuverlässige Rückstellung, wobei die Zugfedern eine Blockierung der fail-safe Position ermöglichen und daher favorisiert werden. Werden jedoch die höhere Steifigkeit einer Vollkörper-Struktur sowie die im Betrieb zusätzlich von außen angreifenden aerodynamische Lasten berücksichtigt, könnten bei maximaler Aktuator-Druckbeaufschlagung nur geringe Auslenkungen erzielt werden. Der Einsatz kürzerer Muskeln zur Erhöhung der Muskelanzahl und somit verfügbaren Kraft pro Längeneinheit, ginge auf Grund des geringeren Stellwegs des Muskels und der erforderlichen Neudimensionierung der Hebelmechanik mit einer Vergrößerung des Gesamtaufbaus und Verschlechterung der Kräftecharakteristik einher.

- ♦ Die Abdichtung des beweglichen Spalts der Hinterkantenkörper an der Unterseite mit einer Verkleidung erwies sich als problematisch. Die vielgelenkige Hebelmechanik weist ein hohes Gesamtspiel an der entstehenden Dichtfuge zwischen Verkleidung und Hinterkantenkörpern auf und kann eine sichere und verschleißfreie Abdichtung nicht gewährleisten.
- ♦ Die Stabilität und Symmetrie des Mechanismus birgt Verbesserungspotenzial. Am Rotortblatt einwirkende Zentrifugalkräfte können den Muskel beschleunigen und zu unerwünschten Auslenkungsformen (Verwindung) der flexiblen Hinterkante führen.

#### 2.1.3.4 Untersuchung einer geschlossenen Struktur

Alternativ zur Umsetzung des Hinterkantenkörpers als einseitig geöffnete Struktur (welche zuvor mit dünneren Materialfalten abgedichtet werden musste), wurde auch die Möglichkeit einer geschlossenen Struktur untersucht.

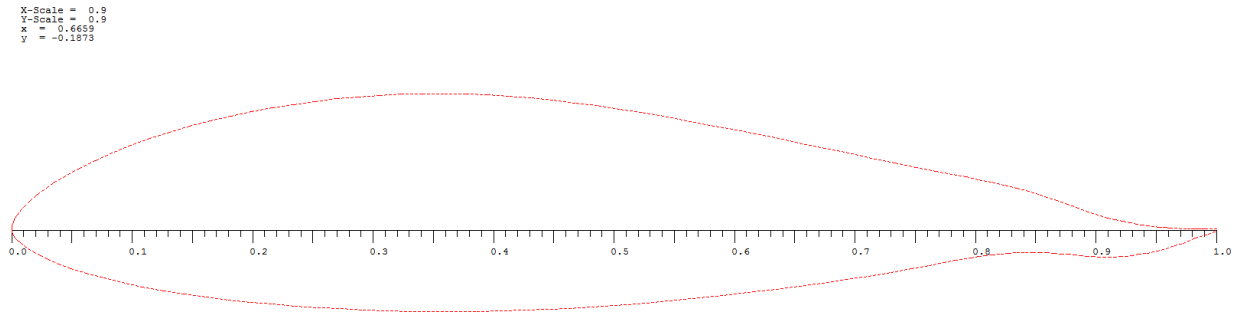
Dabei wurde auch die Kunststoffgruppe der weniger nachgiebigen Thermoplaste als Werkstoff untersucht. Diese können auf Grund der höheren Steifigkeit beim Entwurf mit dünneren Wandstärken und geringerem Gewicht überzeugen. Die Struktur fällt durch das geschlossene Prinzip insgesamt steifer aus und die Hinterkante könnte so weniger abhängig von den Windlasten agieren. Bei einem Thermoplast-Design sind jedoch für gedehnte Bereiche auf Grund der wesentlich geringeren ermüdungsfest ertragbaren Dehnungen, größere Elemente (Rippen und Rippengelenke) vorzusehen, was eine Übertragung einer „verschlankten“ Struktur der Elastomer-Lösung auf ein Thermoplast-Design nicht möglich macht. Als Lösung wurde ein Konzept einer vollständig geschlossenen Hinterkante aus einem zähen und ermüdungsfesten PP (Polypropylen) entwickelt, welches ohne Rippengelenke auskommt und mittig aktuiert wird (siehe Abbildung 26).



**Abbildung 26: Flexible Hinterkante als geschlossene Struktur in Thermoplast**

Die Geometrieänderung besitzt aus aerodynamischem Blickwinkel zunächst offensichtliche Nachteile (Gefahr der geometrieinduzierten Ablösung, geringe Änderung im Abströmwinkel). Die sich mit dem Konzept ergebende Profilgeometrie wurde jedoch in einer CFD Simulation auf die aerodynamische Wirksamkeit überprüft, um die Anwendbarkeit dennoch zu prüfen und gegen den Vorteil auf konstruktiver Seite abwägen zu können. Die simulierte Profilform mit einer Auslenkung der Hinterkante ist in Abbildung 27 dargestellt.

Letztendlich ließen die Ergebnisse jedoch darauf schließen, dass die Kontrollautorität zur Lastregelung mit einer Veränderung des Auftriebskoeffizienten von **Fehler!** zu gering ist und auf diese Weise keine im Rahmen der Aufgabenstellung ausreichend hohe Leistungs- oder Lastregelung an der WEA verwirklicht werden könnte.



**Abbildung 27: Formänderung der Hinterkante durch Konzept mit geschlossener Struktur**

### 2.1.3.5 Eingehende Betrachtungen zur Aktuatorwahl

Bevor die Weiterentwicklung der Hinterkantenstruktur in 2.1.3.6 weiter beschrieben wird, soll auf die damit verknüpfte nähere Auswahl des Aktuators eingegangen werden. Wie am Prototypen-Versuchsstand in Abschnitt 2.1.3.3 sichtbar wurde, konnte das Konzept des längs angebrachten Pneumatischen Muskels keine zufriedenstellende Gesamtfunktion erzielen.

#### **Auslegungstool Flexible Hinterkante an der WEA**

Um die Aktuatorauswahl und –bewertung hinsichtlich zu verwendender Konfiguration, Anzahl, Platzierung und nicht zuletzt auch dem zu erwartenden Energieverbrauch zu ermöglichen, wurde parallel zu den ersten Experimenten ein Berechnungsprogramm erstellt und im weiteren Projektverlauf stetig erweitert. Hierbei konnten verschiedene Turbinengrößen (250kW, 2MW, 5MW), verschiedene Größen der flexiblen Hinterkante (20% / 30% Profiltiefe), verschiedene Betriebsmodi der Hinterkante (1P, 2P, 3P Rotorfrequenzen) sowie gewünschte Auslenkungen der FHK als Stellparameter gesetzt werden. Zusammen mit teils experimentell, teils simulativ ermittelten strukturellen Eigenschaften des jew. Konzepts der Flexiblen Hinterkante sowie aus Simulationen gewonnenen erwarteten aerodynamischen Kräften auf die Hinterkante, konnten so Parameterstudien durchgeführt werden, welche eine Vielzahl von Rückschlüssen auf die reale Anwendbarkeit geben konnten.

Das Konzept des längs zur Hinterkante angebrachten Muskels mit der Umlenkung per Scherenkinematik ließ sich auch anhand dieses Berechnungsprogramms als nicht effizient genug nachweisen. Da die Verwendung einer Mechanik vor dem Hintergrund der Anforderungen an ein Verschleißfreies System ohnehin einen Kompromiss dargestellt hat, wurde die direkte Ausnutzung der Aktuatorkraft durch eine Anordnung quer zur Hinterkante weiter verfolgt. Somit musste der Vorteil der maximalen Kompaktheit zugunsten der Effizienz, Zuverlässigkeit und minimaler

Teileanzahl aufgegeben werden und stattdessen durch die Länge der Aktuatoren ein Eingriff in die Blattstruktur in Kauf genommen werden.

Im Austausch mit der Fa. FESTO wurde im weiteren Verlauf die Einsetzbarkeit der Pneumatischen Muskeln (PAM, siehe Abbildung 20) für die Bedingungen im Rotorblatt näher betrachtet. Dabei wurden vor allem die Lebensdauer sowie der Luftverbrauch (Energieverbrauch) des Muskels in die Untersuchungen einbezogen.

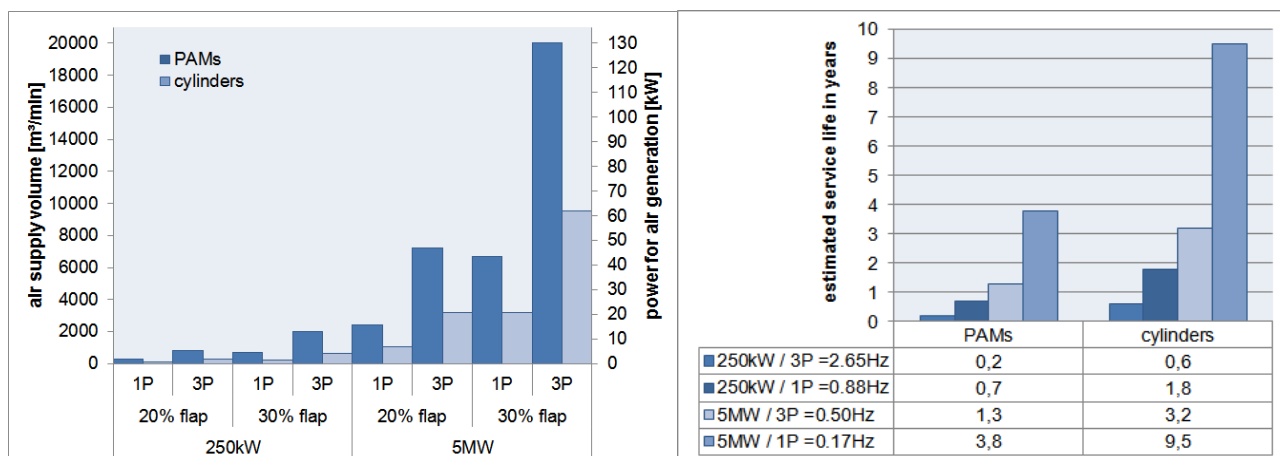
Nach Angaben von Festo liegt die Lebensdauer zwischen 100.000 bis maximal 10 Mio. Schaltzyklen. Die maximale Lebensdauer ist nur durch einen „schonenden Betrieb“ erreichbar. Das bedeutet hauptsächlich die Vermeidung des Betriebs bei Maximaldruck sowie hoher Kontraktion. Beides erhöht die Anzahl bzw. Größe der einzusetzenden Muskeln, da nur ein Bruchteil der theoretisch nutzbaren Leistung verwendet werden kann.

Weiterhin sind die Luftvolumina, welche für die Druckluftversorgung erforderlich sind in einer ersten Abschätzung nicht mehr unerheblich.

Aus den genannten Gründen wurde der Einsatz von Pneumatikzylindern als Alternative überprüft und in einer umfassenden Parameterstudie mit den Pneumatischen Muskeln verglichen. Diese sind auch in metallfreien Ausführungen verfügbar, was den Anforderungen nach Leichtbau und blitzschlagssicherer, also metallfreier Konstruktion nicht widersprechen würde.

Die erwartete Lebensdauer sowie der erforderliche Luftverbrauch mit entsprechendem Energiebedarf für die Druckluftbereitstellung wurden für verschiedene Anlagengrößen wie Hinterkantenkonfigurationen und Betriebsmodi in einer Parameterstudie analysiert.

Für Lebensdauer und Druckluftverbrauch wurde mit Angaben der Fa. FESTO gerechnet, welche jeweils unter guten Bedingungen maximal erzielbare Schaltzyklenzahlen oder Wegstrecken waren. Um den Druckluftenergieverbrauch zu ermitteln, wurden Baureihen von Schraubenkompressoren analysiert. Das System der flexiblen Hinterkante wurde für zwei Anlagengrößen (250kW und 5MW) aufgesetzt deren Blätter zu 30% mit der oben beschriebenen beweglichen Hinterkante ausgestattet werden sollten. Die Profiltiefenüberdeckung der Hinterkante wurde mit jew. 20% und 30% sowie Auslenkungen von +/-15° variiert. Als Betriebsmodi wurden der Betrieb mit einfacher Rotorfrequenz (1P, z.B. Lasten wie Turmschatteneffekt, Schräganströmung und Bodengrenzschicht) sowie dreifacher Rotorfrequenz (3P, eher im Bereich von Böen und anderen aerodynamischen Effekten) in Betracht gezogen. Bei der Leistungsfähigkeit der PAMs musste deren einfachwirkendes Prinzip berücksichtigt werden, weshalb in dieser Untersuchung mit einem um ca. 60% leistungsmindernden Rückstellelement gerechnet werden musste. Zudem wurden Leitungsverluste eines in der Gondel der Turbine untergebrachten Druckluftversorgungssystems und der entsprechend ausgelegten Druckluftleitungen berücksichtigt.



**Abbildung 28: links - ermittelter Druckluft- und Energieverbrauch verschiedener Aktuator- und Systemkonfigurationen; rechts - erwartete Lebensdauern für Pneumatische Muskeln und Pneumatikzylinder bei verschiedenen Betriebsmodi**

Die Resultate der Parameterstudie sind in Abbildung 28 dargestellt.

PAMs zeigen deutliche Nachteile auf Seiten der zu erwartenden Lebensdauer und auch der Energieverbrauch der Druckluftherzeugung ist mit bis zu 5,2% bzw. 2,6% der Anlagennennleistung (250kW bzw. 5MW) verhältnismäßig hoch. Lebensdauer und Luftverbrauch sind für die Druckluftzylinder wesentlich unkritischer und unterscheiden sich im Schnitt um den Faktor 2 von den Werten der PAMs.

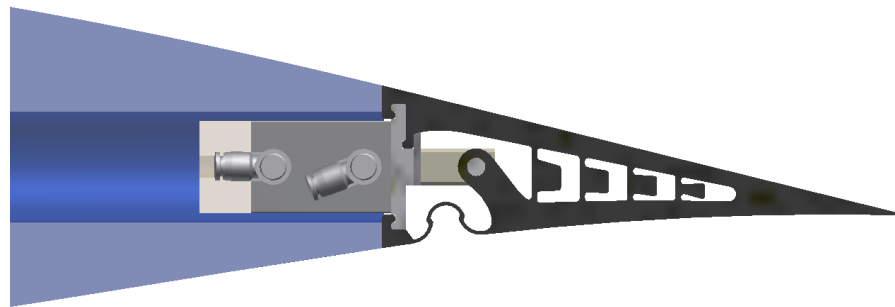
Die Verwendung von Pneumatikzylindern konnte sich letztendlich für die weiterführenden Konzeptversuche sowie die spätere Umsetzung am Windkanalmodell durchsetzen, auch wenn angemerkt werden muss, dass am Rotorblatt der WEA der Aufwand für die Abdichtung des FHK-Systems mit der Verwendung von Zylindern steigen würde. Die Tiefe der Hinterkante wurde zu 20% der Profiltiefe festgesetzt, was auch mit den Ergebnissen aus 2.1.2.2 gut übereinstimmt.

### 2.1.3.6 Abschließende Ausarbeitung der Hinterkantenstruktur

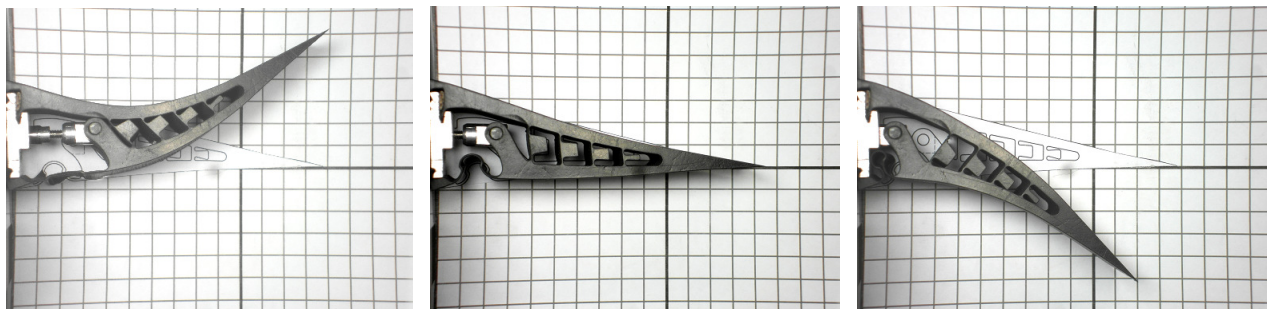
Mit den zuletzt dokumentierten Erfahrungen und Ergebnissen wurde die Entwicklung der Hinterkante unter definierten Randbedingungen durchgeführt.

Aus den an den Hinterkantenkörpern untersuchten Elementvariationen wurden die jeweils vorteilhaften Eigenschaftsausprägungen identifiziert, die entsprechenden Elemente bzw. Geometriemaße kombiniert und ein weiterer Prototyp zur Verifikation hergestellt. Für die Unterseite der Struktur wurde ein Abdichtelement entwickelt, welches die große Relativbewegung zwischen dem am Hinterkantenkörper befindlichen Aktuatorangriffspunkt und feststehendem Profiltail bei weiterhin geschlossener Profilloberfläche ermöglicht. (siehe Abbildung 29) Um die an dieser Stelle erforderliche Dehnung in für den Werkstoff betriebsfest ertragbare Verformung umzuwandeln, wurde eine von der Konstruktion von polymeren Filmgelenken abgeleitete, faltbare Struktur umgesetzt. Die hierbei abhängig von der Auslenkung der Hinterkante auf der Profilaußenseite entstehende Kavität sollte später noch auf strömungstechnische Effekte und im ungünstigsten Fall eine Geräuschentwicklung untersucht werden.

Um auch den Betrieb mittels quer zur Hinterkante angeordneten, festgelegten Aktuator zu testen, wurde ein letztes Funktionsmodell mit einem kompakten Kurzhubzylinder realisiert. Darin wurde auch die Anbindung der Hinterkantenstruktur an den festen Blattkörper ausgestaltet, welche aus einer Folge von jeweils auskonstruierten Konzeptideen hervorging. Das Anschlusskonzept basiert auf der Klemmung des Elastomerteils in einem Nutensystem an einer Anschlussplatte, welche über Spanschrauben vom Blattkörper her auch von außen montierbar wäre. In Abbildung 30 ist der Hinterkantenkörper in seinen maximalen Auslenkungspositionen zu sehen.



**Abbildung 29: Flexible Hinterkante mit perspektivischer Anbindung am Rotorblatt/Windkanalmodell und Kurzhub-Pneumatikzylinder**



**Abbildung 30: Auslenkungsmaxima des Hinterkantenkörpers aus Kombination der vorteilhaften Eigenschaftsausprägungen, mit Prototyp der Anbindung am Windkanalmodell und Aktuierung durch Pneumatikzylinder**

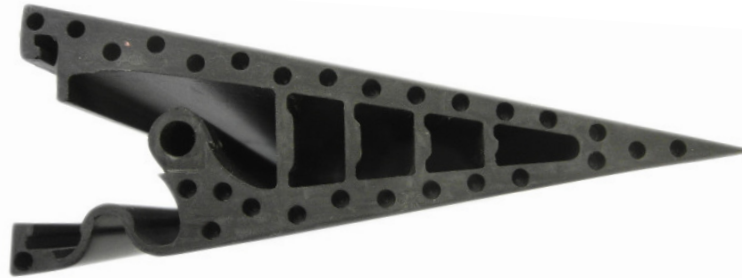
### 2.1.3.7 Prototypenentwicklung für Windkanalmodell

Nach der Feststellung der Eignung der letzten Geometrievariation wurde auch ein inzwischen fertiggestelltes, eigens für die Hinterkante entwickeltes Flügelprofil übernommen und letzte Änderungen an konstruktiven Einzelheiten getätigt. Damit konnte ein Modell der Hinterkante für den geplanten 1,5m langen Prototyp des Windkanalmodells in Auftrag gegeben werden.

Bei der Auswahl aller Konstruktionselemente für die Flexible Hinterkante wurde das Fertigungsverfahren der Extrusion zugrunde gelegt, welches bei einer perspektivischen Serienproduktion zum Einsatz kommen sollte. Das für die bisherigen Prototypen verwendete Material EPDM ist dafür geeignet und bietet zudem die Vorteile der Medien- und UV-



Beständigkeit, der großen elastischen Verformbarkeit und Ermüdungsfestigkeit. Die Herstellung eines Extrusionsbauteils wäre jedoch inklusive der Matrizen- und Prozessentwicklung nur für eine Serienproduktion wirtschaftlich. Somit wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Fast Part ein Prototypenteil der Struktur in mehreren Teilen im Vakuumdruckgussverfahren aus einem Polyurethan-Gießharz (PU) hergestellt. Die mechanischen Eigenschaften des PU und des ursprünglich vorgesehenen EPDM-Extrusionswerkstoffs sind jedoch vergleichbar. Eines der Elemente ist in Abbildung 31 zu sehen.

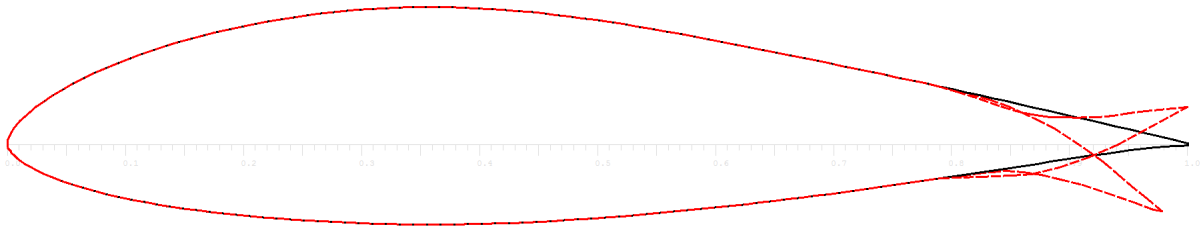


**Abbildung 31: Finale Hinterkante für die Untersuchungen am Windkanalmodell**

Für die Aufgabe der Aktuierung der Hinterkante am Prototypenflügel konnte sich, mit Hilfe des Auslegungstools, für eine Anordnung, Anzahl und Typ von doppelwirkenden Kompaktzylindern entschieden werden. Für die Messungen war die Einstellung von festen Hinterkanten-Auslenkungswinkeln erforderlich. Die Positionierung von Pneumatikzylindern ist jedoch eine technisch anspruchsvolle Aufgabe und wird in der industriellen Praxis selten umgesetzt. Mit Hilfe der Fa. Festo konnte jedoch eine Lösung umgesetzt werden. Hierzu war der Aufbau eines Regelkreises nötig, welcher die Auswertung der Zylinderposition eines magnetisch arbeitenden Positionssensors nutzte um eine Schaltung von vier Schnellschaltventilen anzusteuern. So konnten die Zylinderkolben zwischen zwei Luftpolstern bewegt werden, deren Volumina durch das jeweilige hinzufügen und Ablassen kleinster Mengen von Druckluft verändert wurden. Die hiermit erzielbare Positioniergenauigkeit lag zunächst im mm-Bereich und soll im Zuge der noch durchzuführenden Windkanalversuche genauer bestimmt werden. Für die spätere Anwendung im Rotorblatt sollte der Sensor nicht mehr erforderlich sein.

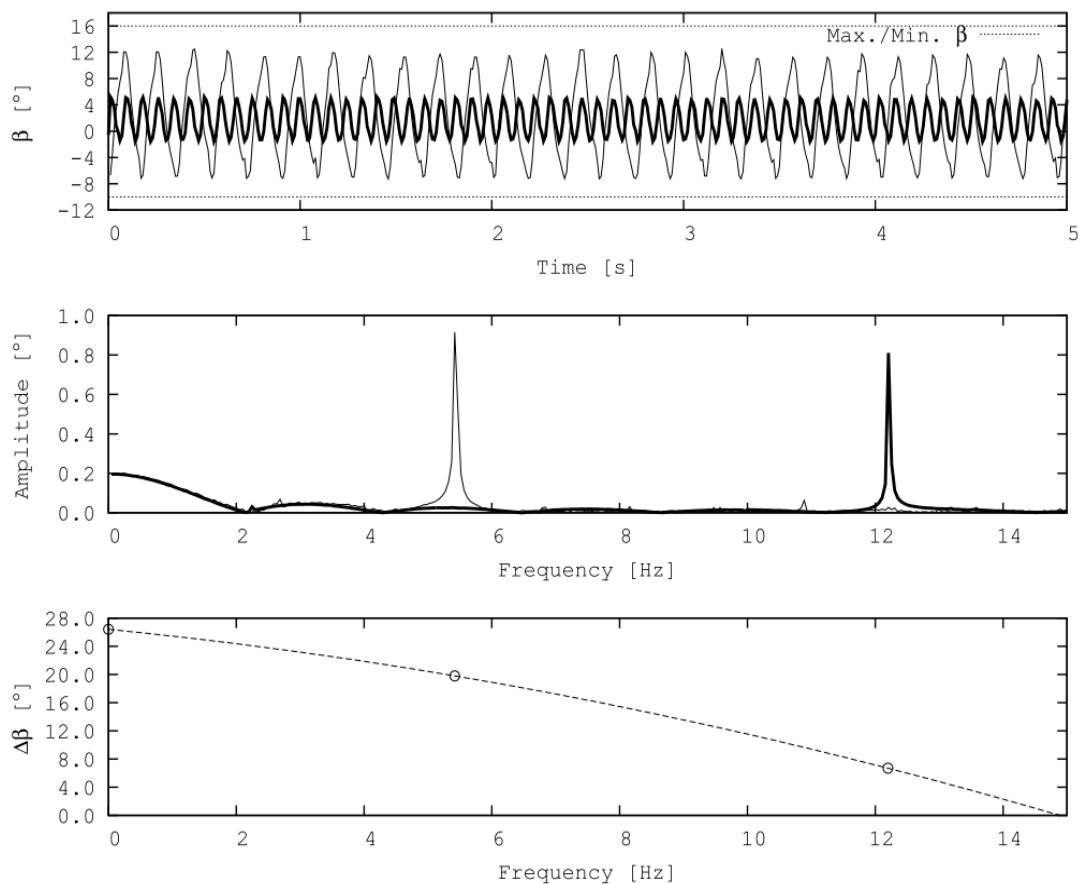
### **Mechanische Performance der FHK**

Mit der für den Windkanalprototyp gebauten Flexiblen Hinterkante waren Maximalauslenkungen von  $\beta_+ = 16^\circ$  in positiver Richtung sowie  $\beta_- = 10^\circ$  in negativer Richtung möglich, was eine Gesamtauslenkung von  $\Delta\beta = 26^\circ$  bedeutet.



**Abbildung 32: Modifiziertes DU-96-W-180 Profil mit Konturen der ausgelenkten FHK**

Abbildung 32 zeigt die Charakteristik der FHK in Bezug auf den Zusammenhang zwischen maximaler Auslenkung und Aktuierungsfrequenz. Mit steigender Aktuierungsfrequenz sinkt die erzielbare Auslenkung. Bei 5Hz / 12Hz sind jeweils noch Auslenkungen von  $\Delta\beta = 19.3^\circ / 6.7^\circ$  realisierbar.



**Abbildung 33: FHK Auslenkungsbereich und Aktuierungsgeschwindigkeiten**

## 2.1.4 2D Windkanalmessungen

Es wurden insgesamt zwei Messkampagnen im Windkanal durchgeführt. Die statischen Tests fand im Juli 2012 statt. Die nachfolgenden dynamischen Messungen wurden Anfang des Jahres 2013 durchgeführt. Im ersten Test wurden die statischen Profilpolaren des Flügelprofils mit integrierter flexibler Hinterkante vermessen. Die gewonnenen Ergebnisse des Windkanaltests dienen zur Vorbereitung der dynamischen Messungen in der zweiten Messkampagne. In diesem Test wurde das dynamische Verhalten der FHK getestet. Dafür wurde die FHK mittels PID Steuerung derart geregelt, dass sie die wechselnden Auftriebskräfte ausgleicht.

Das Profil wurde für den Test im Windkanal des Instituts für Strömungsmechanik und Technische Akustik der TU Berlin entwickelt. Dieser ist in Abbildung 34 zu sehen. Die technischen Daten des Kanals sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

- ◆ Ringkanal mit geschlossener Messstrecke
- ◆ Messquerschnitt: 2m x 1; 4m
- ◆ Länge der Messstrecke: 10m
- ◆ max. Strahlgeschwindigkeit: 50m/s
- ◆ Kontraktion: 6; 25 : 1
- ◆ Arbeitsleistung: 500kW

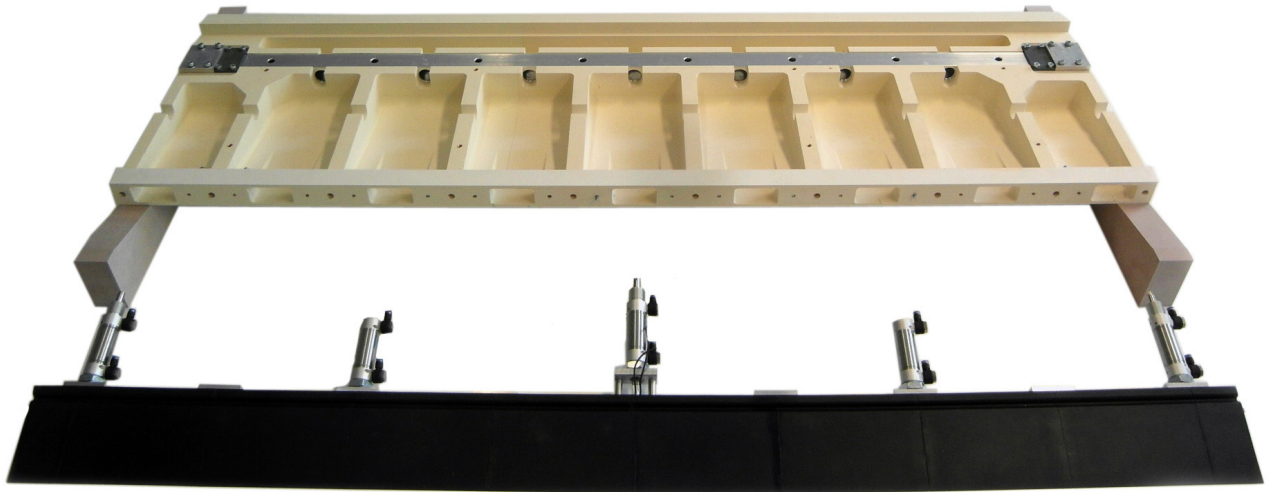


**Abbildung 34: Der große Windkanal am HFI**

### 2.1.4.1 Windkanalmodell

Wie bereits beschrieben kam das modifizierte DU-95-W-180 mit einem reduzierten S-Schlag auf der Druckseite zum Einsatz. Dies ermöglichte mehr Freiheit in der geometrischen Integration der FHK-Einheit.

Für den Einbau im 1544mm langen Windkanalmodell wurde zunächst ein Aufbau mit fünf Pneumatikzylindern gebaut, welche an einer dreiteiligen Anschlussplatte montiert sind. Die Abstützung aller Aktuierungskräfte erfolgte innerhalb dieses Aufbaus, welcher an den mit Bohrungen ausgestatteten Flügel geschraubt wurde (Abbildung 35). Für die Ermittlung der Zylinderposition und der realen Aktuierungskräfte im Betrieb wurde dieser für die Aufnahme eines Positionssensors vorbereitet, sowie mit DMS (Dehnungsmessstreifen) zur experimentellen Spannungsanalyse präpariert (siehe Abbildung 36).

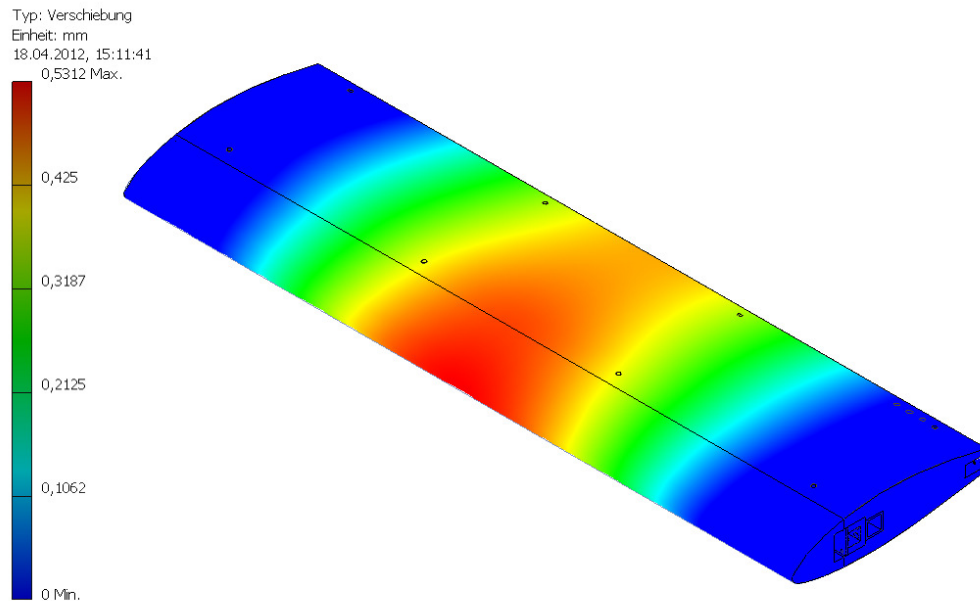


**Abbildung 35: Windkanalmodell mit vormontierter Einheit der Flexiblen Hinterkante**



**Abbildung 36: Messzylinder zur Ermittlung von Zylinderposition und Aktuierungskräften**

Eine Belastungsanalyse für das Modell wurde durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Struktur die im Windkanal entstehenden aerodynamischen Lasten aufnehmen kann. In Abbildung 37 ist die zu erwartende Gesamtverformung des Windkanalmodells zu sehen. Die Struktur ist steif genug um die Messungen nicht durch Verformung der Geometrie zu beeinflussen.



**Abbildung 37: FEM Analyse des Windkanalmodells**

Das Modell wurde für die Messung auf einer 6-Komponenten Messwaage ausgelegt, um die auftretenden aerodynamischen Kräfte zu messen. Die Waage ist als Teil der Messausrüstung am Institut bereits vorhanden und definiert die Schnittstelle zum Flügelprofil. Das Modell hat eine Länge von 1544mm. Um auf eine ausreichend hohe Reynoldszahl ( $1,3e6$ ) zu kommen, wurde eine Flügeltiefe von 600mm gewählt.

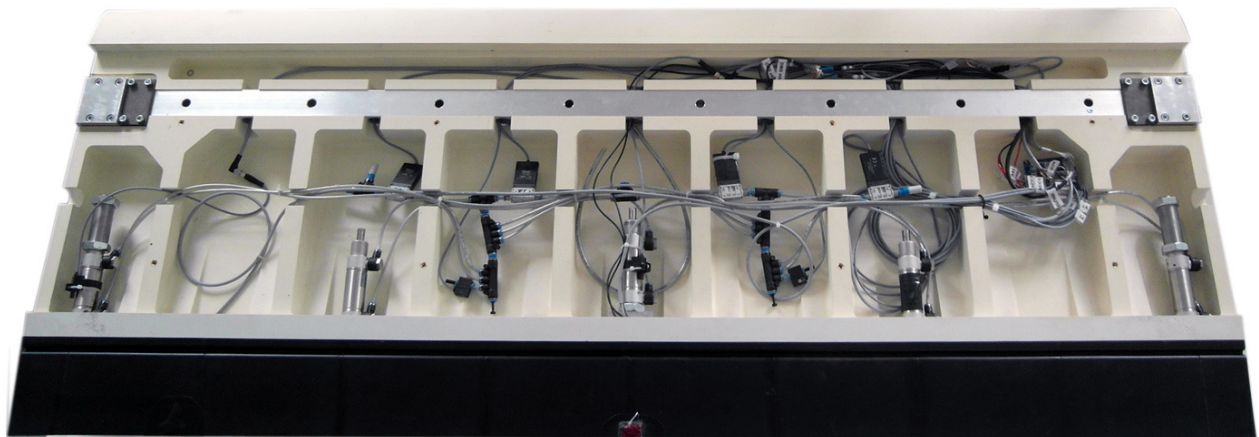
Die Konstruktionsdetails sind in Abbildung 38 und Abbildung 39 zu erkennen. Der Flügel ist modular aufgebaut und besteht im Wesentlichen aus folgenden Elementen:

- ◆ **Hauptprofil:** Das tragende Hauptprofil beinhaltet die Anschlusshalterung zum Windkanal, bietet eine modulare Schnittstelle mit Aussparungen und Bohrungen für verschiedene Hinterkantenkonzepte und Kammern welche Bauraum für verschiedene Komponenten der Steuerung und Messtechnik bieten. Schnittstelle und Kammern sind so dimensioniert, dass sowohl pneumatische Muskeln als auch pneumatische Zylinder integrierbar sind. Als Material kommt ein mit Microballons versehenes PU-Harz als Blockmaterial zum Einsatz. Dies zeichnet sich durch seine hervorragende Bearbeitbarkeit aus und wird deshalb häufig im Urmodellbau verwendet.
- ◆ **Holm:** Lasttragende Aluminiumstruktur zur Festigkeitssteigerung und Kraftübertragung
- ◆ **Hinterkante:** Über die Aussparung können verschiedenen Hinterkantenmodelle integriert werden. Eine solide Referenzhinterkante kann genutzt werden um Referenzdaten für das Profil ohne flexible Hinterkante zu gewinnen.
- ◆ **Deckel:** Zum Verschließen des Hauptprofils

Das zusammengebaute Modell ist in Abbildung 38 mit aktivierter Hinterkante abgebildet.



**Abbildung 38: Windkanalmodell aus Formbauwerkstoff mit flexibler Hinterkante**



**Abbildung 39: Windkanalmodell mit Pneumatiksystem und Sensorik**

Abbildung 39 zeigt ebenfalls den inneren Aufbau des Flügelmodells. Die zum Einsatz kommenden Sensoren sind:

- ◆ 2x DMS auf Messzylinder (Quer- und Längskräfte auf Zylinderkolben)
- ◆ 2x Accelerometer an der Hinterkante zur Bestimmung des Auslenkungswinkels
- ◆ 2x Positionssensoren am Zylinder
- ◆ 2x Temperatursensoren (für Zylinder und Ventil)
- ◆ 2x Drucksensoren für Zug- und Druckkreislauf

Die Steuerung der Hinterkante übernahm dabei ein Microcontroller (MC), der direkt im Flügel verbaut ist. Auf ihm ist der PID Controller implementiert, welcher über die Zylinderpositionssensoren die Ventile ansteuert. Als MC kam ein Arduino-Board zum Einsatz, das mit Hilfe einer seriellen Schnittstelle angesprochen wurde. Damit konnte der MC über einen Computer gesteuert werden (Abbildung 40).

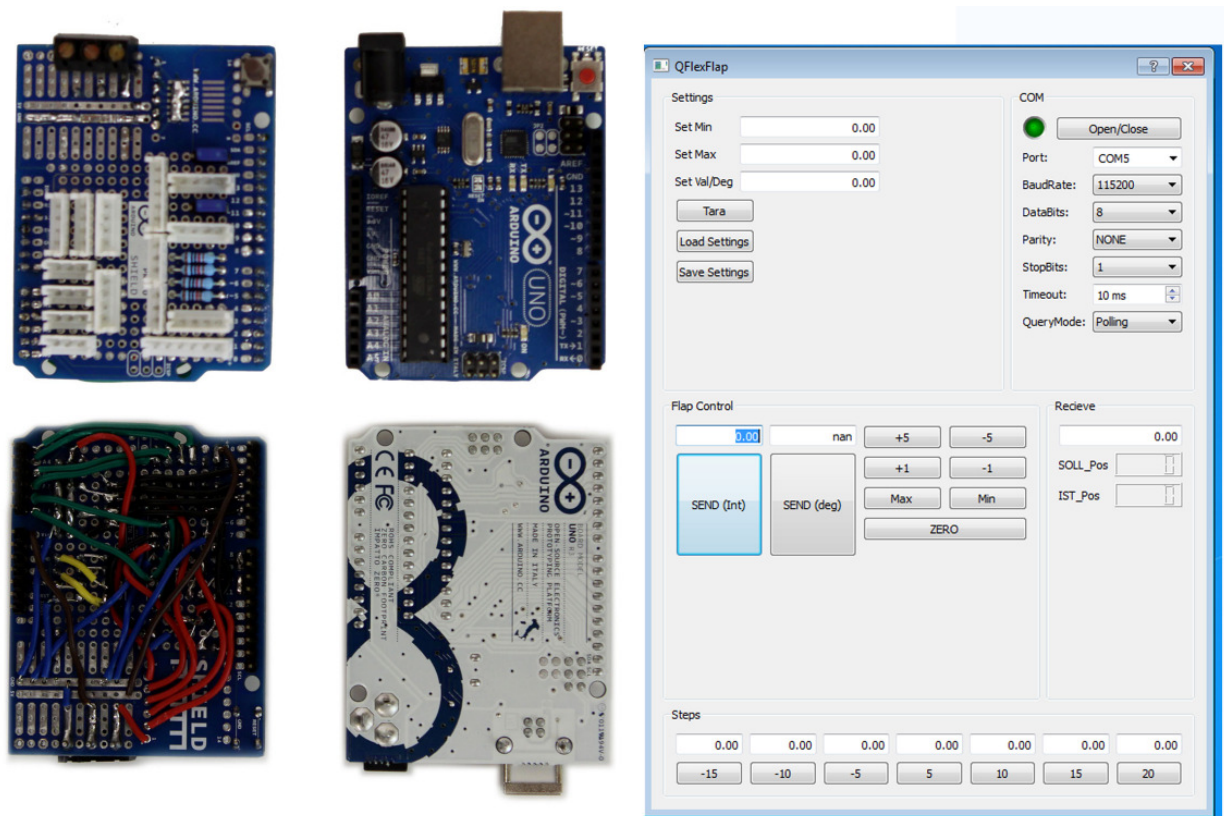


Abbildung 40: Arduino MC-Board und Hinterkanten-Steuerungssoftware

Als Alternative wurde zusätzlich eine manuelle Steuerbox entwickelt. Mit deren Hilfe konnte der Hinterkanten-Winkel verstellt werden und die wichtigsten Regelparmeter verändert werden. Dies ist hilfreich für das Tuning des PID-Reglers. Ein Not-Stop-Schalter wurde eingesetzt, um die Hinterkante im Bedarfsfall unter vollem Druck nach oben auszulenken. Damit ist sichergestellt, dass bei auftretender Resonanz im Windkanal die Strömungssituation so verändert wird, dass es nicht zu gefährlichen Eigenschwingungen der Messwaage kommen kann. Die Steuerbox ist in Abbildung 41 zu sehen.



Abbildung 41: Steuerbox und Not-Aus-Schalter

Alle Signal werden zusätzlich über Messkarten von National Instruments aufgenommen. Eine LabView-Messsoftware wurde entwickelt, um die Messdaten während der Messung aufzuzeichnen.

#### 2.1.4.2 Statischer Windkanaltest: Ergebnisse

Ziel der statischen Windkanalversuche war die Ermittlung der Profilpolaren für verschiedene FHK-Ausschläge. Die Auftriebs- und Widerstandspolaren sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 zu sehen. Durch die Auslenkung der FHK ist man in der Lage den Auftriebswert um einen Betrag von  $\Delta c_l = 0,9$  zu beeinflussen. Der Widerstand des Profils wird, wie deutlich zu sehen, durch die Auslenkung der Hinterkante erhöht.

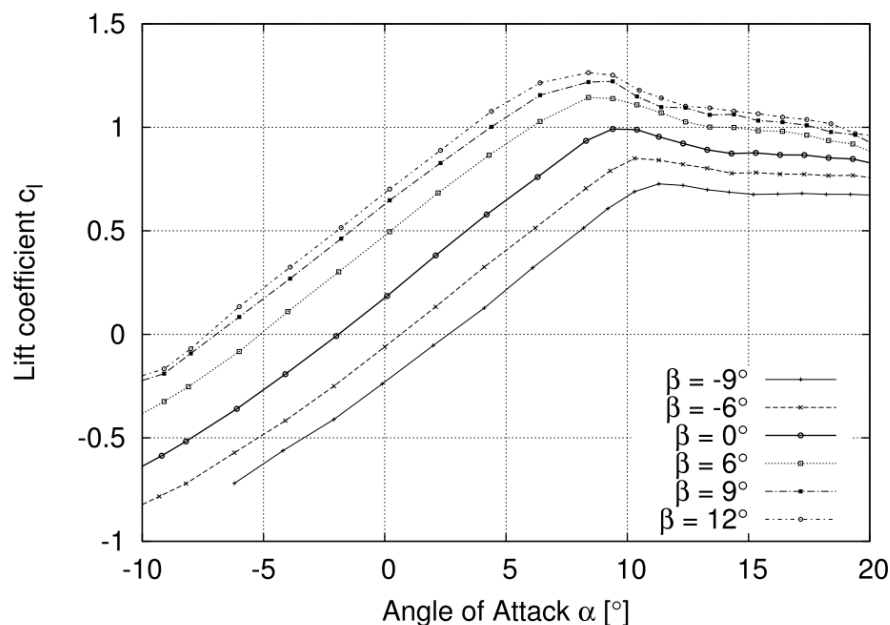
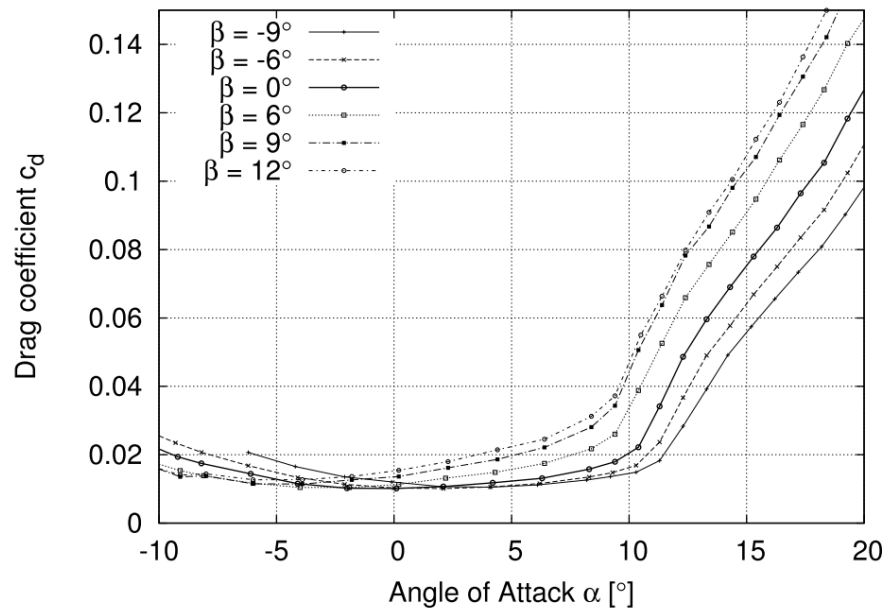


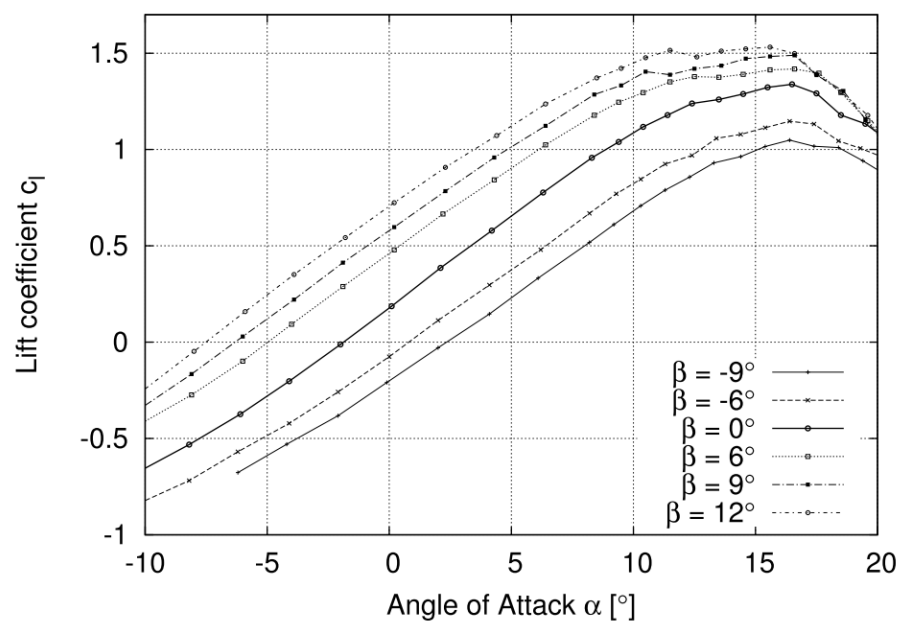
Abbildung 42: Auftriebspolare des Profils für verschiedene FHK Auslenkungen





**Abbildung 43: Widerstandspolare des Profils für verschiedene FHK Auslenkungen**

Neben der Vermessung des reinen Flügelprofils, wurden ebenfalls Messungen mit Turbulenzstreifen, Vortex Generatoren und Profilen mit simulierter Rauigkeit durchgeführt. Die Vortex Generatoren wurden dabei bei 20% Profiltiefe angebracht und verzögern das Einsetzen der Strömungsablösung wie zu erwarten um ca. 5° (Abbildung 44). Allerdings steigt der Profilwiderstand deutlich an, was im Außenbereich des Rotorblatts, wo die sich die FHK befinden würde, nicht wünschenswert ist.



**Abbildung 44: Auftriebspolare des Profils für verschiedene FHK Auslenkungen**

### 2.1.4.3 Dynamische Windkanaltest

Ziel dieser zweiten Windkanalkampagne war es, die Hinterkante unter dynamischen Anströmbedingungen zu testen. Durch veränderliche Anströmung (Windböen) in der Realität an der Windkraftanlage, ändern sich der Anströmwinkel und die Anströmgeschwindigkeit des Flügels und damit dessen Auftrieb und Lasterzeugung. Bei der Rekonstruktion dieser Bedingungen im Windkanal beschränkt man sich auf eine Veränderung des Anströmwinkels, da die dynamische Veränderung der Anströmgeschwindigkeit mit der existierenden Windkanaltechnik nicht realisierbar ist.

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten den Anströmwinkel relativ zum Profil zu ändern. Entweder man verdreht den Flügel (bei konstanter Strömung) oder man lenkt die Strömung ab (bei festem Profil-Anstellwinkel). Da es lange zweifelhaft blieb, ob der bestehende Messaufbau am Institut für die dynamische Verstellung des Anstellwinkels geeignet war, wurde parallel eine Jalousieblende entwickelt, die vor dem Flügel in die Messbox eingebaut wurde (siehe Abbildung 45). Diese besteht aus bis zu 15 Biegeblechen, die über fünf pneumatische Zylinder ausgelenkt werden können. Die zirkulierende Luft im Windkanal wird durch das Vorhandensein der Bleche hinter der Jalousie umgelenkt, wodurch der Flügel einen sich zeitlich ändernden Anströmwinkel sieht. Die Hinterkante soll dabei die Schwankungen im Auftrieb, welcher über eine DMS-Messwaage gemessen wird, ausregeln.

Die einzelnen Biegebleche bestehen aus jeweils drei längs vernieteten Blechen, welche aus Federblechen verschiedener Stärken gefertigt sind. Dadurch erhält man biegestarre Teile an Einspannung und Befestigung der Zugstangen, sowie einen biegeweichen Teil dazwischen, welcher eine Schaufelförmige Verformung der Bleche um ihre Längsachse zulässt. Die pneumatischen Zylinder aktuieren die Zugstangen, welche die Bleche zum Auslenken bringen.



**Abbildung 45: Jalousie-Biegebleche und Verbindung zu den Zugstangen**

Abbildung 46 zeigt das CAD Modell der Jalousie, eingebaut in die Messbox des Windkanals.

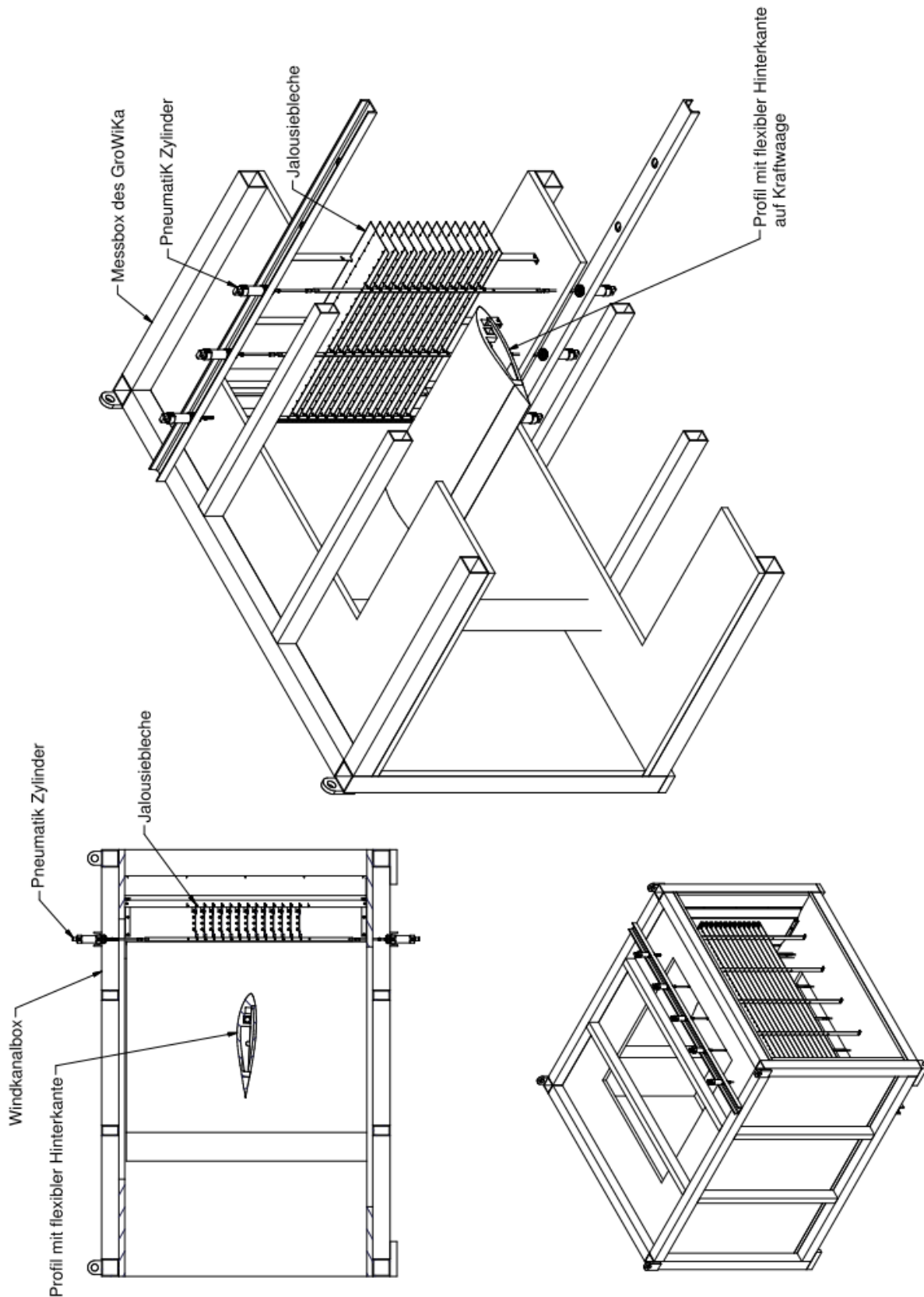
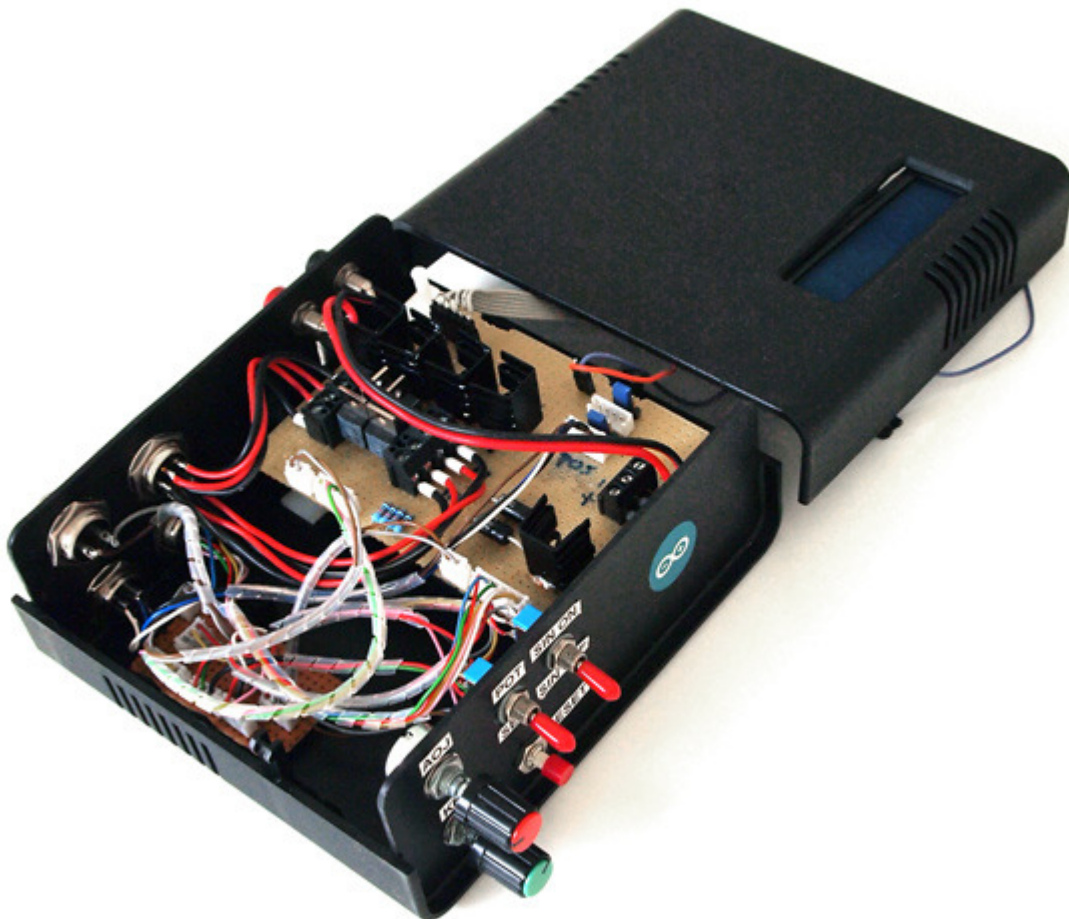


Abbildung 46: Messbox mit Flügelmodell und eingebauter Jalousie

Die Steuerung der pneumatischen Aktuatoren erfolgte äquivalent zu der, die für die flexible Hinterkante genutzt wird. Je zwei Ventile schalten jeweils eine der beiden Kammern der Zylinder. So kann eine ausreichend genaue Positionierung der Bleche gewährleistet werden. Die Steuerung erfolgt über einen selbst entwickelten Hardware-Regler, der entweder manuell oder per serieller Schnittstelle angesprochen werden kann (Abbildung 47).



**Abbildung 47: Hardware-Regler für Jalousie mit manueller und serieller Schnittstelle**

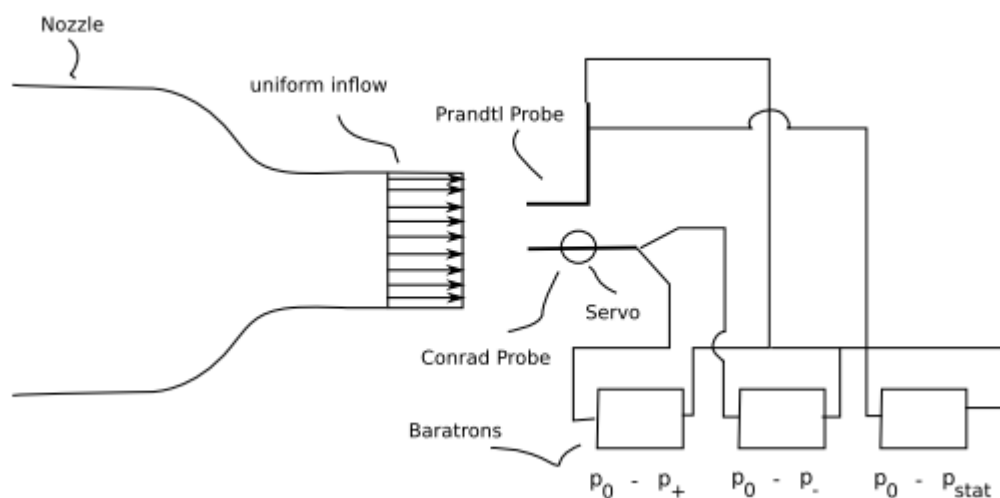
### **Bau und Kalibrierung von Anstellwinkelsensoren für den Windkanalversuch**

Für den dynamischen Windkanalversuch wurden zwei Regelungsstrategien untersucht. Zum einen wurde als Regelsignal eine Auftriebskraftmessung über die 6-Komponentenwaage genutzt, zum anderen kam ein Strömungswinkelsensor zum Einsatz. Dieser ermittelt den lokalen Strömungswinkel. Für die Winkelmessung in einer Ebene, kommt eine 2-Loch-Sonde (Conrad-Sonde) zum Einsatz, die sogar für moderate Anstellwinkel als Strömungsgeschwindigkeitssensor genutzt werden kann. Die genutzte Sonde wurde aus 1,2mm Kanülenrohr hergestellt und ist in Abbildung 48 zu sehen.



**Abbildung 48: Conrad-Sonde zur Ermittlung von Strömungswinkel und –geschwindigkeit**

Der Strömungswinkel wird über je eine Druckmessung der beiden Röhrrchen und Differenzbildung bestimmt. Ausschlaggebend für die Genauigkeit einer solchen Sonde ist eine vorherige Kalibrierung der Sonde. Dafür wurde der sogenannte MoWiKa des HFI mit offener Teststrecke genutzt. Die Sonde wurde an einem Miniatur-Servomotor hinter die Düse montiert, um eine genaue Positionierung zu erzielen. Zusätzlich wurde ein Prandtlrohr genutzt um den dynamischen Druck der Anströmung zu bestimmen. Der statische Druck des Prandtlrohrs wurde ebenfalls als Referenzdruck für die Conrad-Sonde genutzt ( $p_+$  und  $p_-$ ) (siehe Abbildung 49).



**Abbildung 49: Messaufbau zur Kalibrierung der Conrad-Sonde**

Es wurden zwei Möglichkeiten untersucht, die Sonde zu kalibrieren:

Bei der einfacheren der beiden Methoden werden je die Differenz und die Summe der Differenzdrücke mit dem dynamischen Druck normiert. Die Kalibrierkurve dieses Ansatzes ist in Abbildung 50 zu sehen. Der Vorteil dieser Kalibrierung besteht in der einfachen Ableitung eines linearen Zusammenhangs zwischen Differenzdruck und Strömungswinkel.

Bei der detaillierten Kalibrierung geht dieser lineare Zusammenhang verloren. Allerdings erhält man eine größere Genauigkeit. Die Kalibrierkurve, bei der die Differenz der Drücke mit deren Summe normiert wird, ist in Abbildung 51 zu sehen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Aussage über den Strömungswinkel mit einer Genauigkeit von +/- 1° gemacht werden kann.

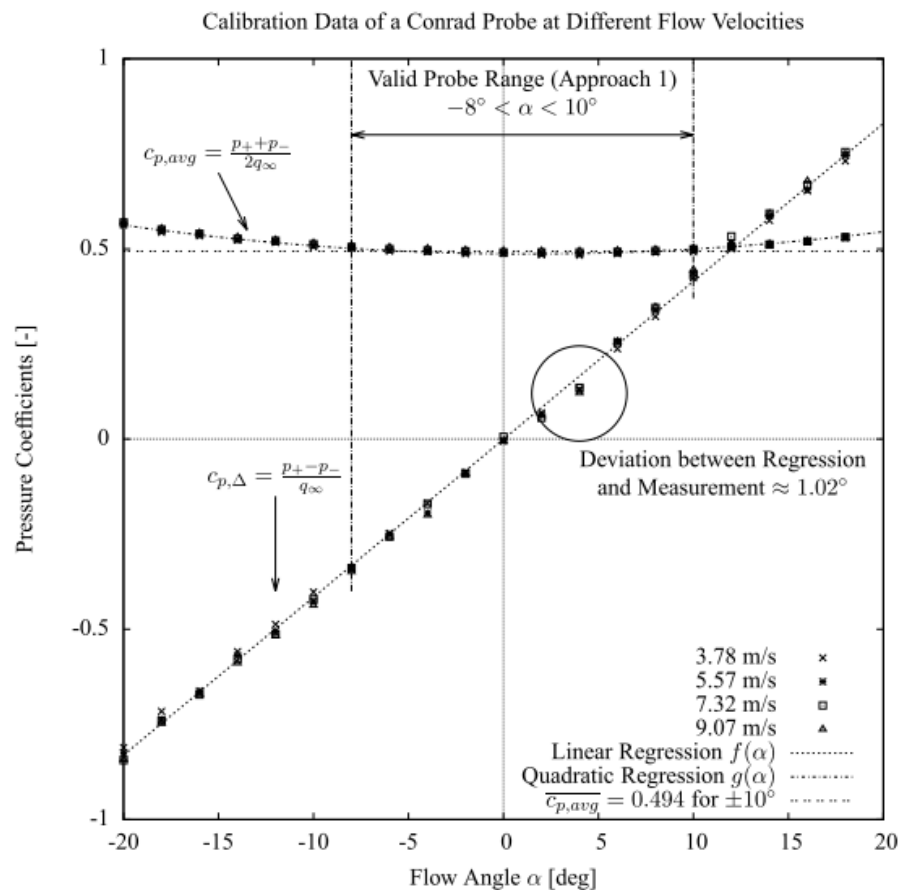


Abbildung 50: Kalibrierkurve der Conrad-Sonde nach vereinfachtem Ansatz

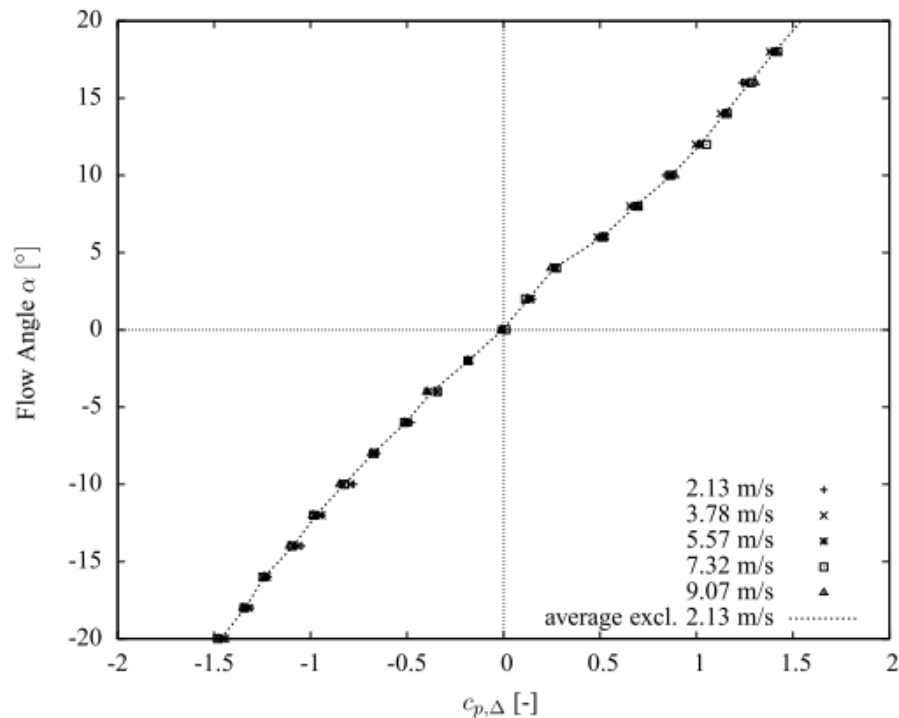


Abbildung 51: Kalibrierkurve der Conrad-Sonde nach detailliertem Ansatz

### Jalousieblende und Anstellwinkelveränderung

Um die Ablenkung der Strömung hinter der Jalousie zu vermessen, wurden ebenfalls die oben beschriebenen Conrad-Sonden benutzt. Die Conrad-Sonde wurde hinter der Jalousie an einer Traverse befestigt. Damit ist man in der Lage die Sonde in vertikaler und horizontaler Richtung zu verfahren, um so das Strömungsprofil in einer Ebene zu vermessen.

Die sich ergebenden Anstellwinkeländerungen hängen dabei im besonderen Maße von der Frequenz der Jalousieblechauslenkung ab. Im statischen Betrieb erhält man dabei Ablenkungen von  $8^\circ$  -  $16^\circ$ . Im dynamischen Betrieb reduziert sich die Ablenkung auf einige wenige Grad (Abbildung 52). Leider stellte sich heraus, dass diese kleinen Ablenkungen, die man im dynamischen Betrieb der Jalousie erhält, nur sehr kleine Änderungen im Auftrieb des Flügelmodells hervorrufen. Das ist damit zu erklären, dass der Strömungszustand hinter der Jalousie niemals in ein Gleichgewicht kommt. Mit anderen Worten, wird so der Einflussbereich der FHK nur zu einem sehr kleinen Teil ausgenutzt. Aus diesem Grund wurde während der Kampagne entschieden, doch den Schrittmotor für die dynamische Anstellwinkeländerung des Flügels zu benutzen. Der Nachteil des Schrittmotors, liegt in der beschränkten Frequenz. Bei maximaler Fahrgeschwindigkeit erhält man eine periodische Änderung der Auftriebskräfte von maximal 0.5Hz bei  $\pm 5^\circ$  Anstellwinkeländerung.

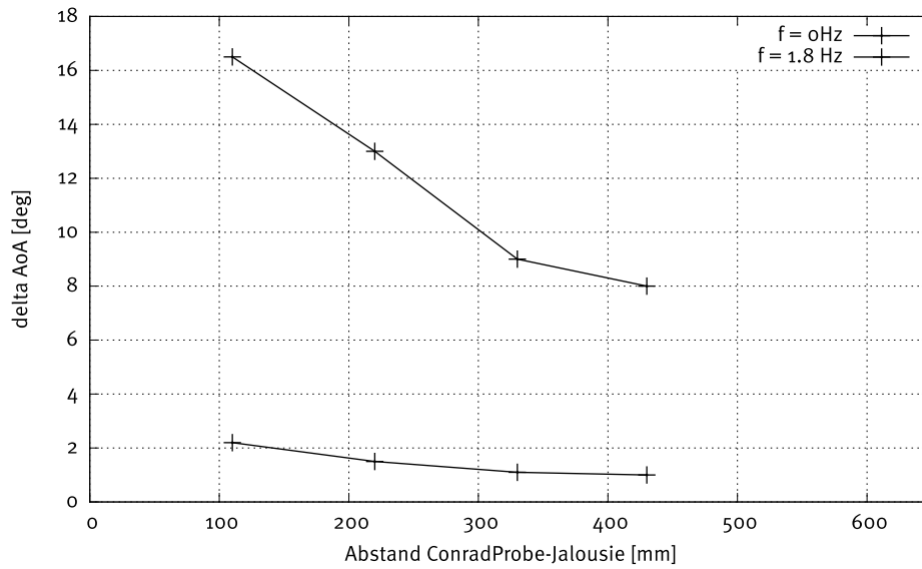


Abbildung 52: Anströmwinkeländerung über verschiedene Positionen hinter der Jalousie für verschiedene Jalousie-Frequenzen

#### Regelungsstrecke und Hinterkantenverhalten

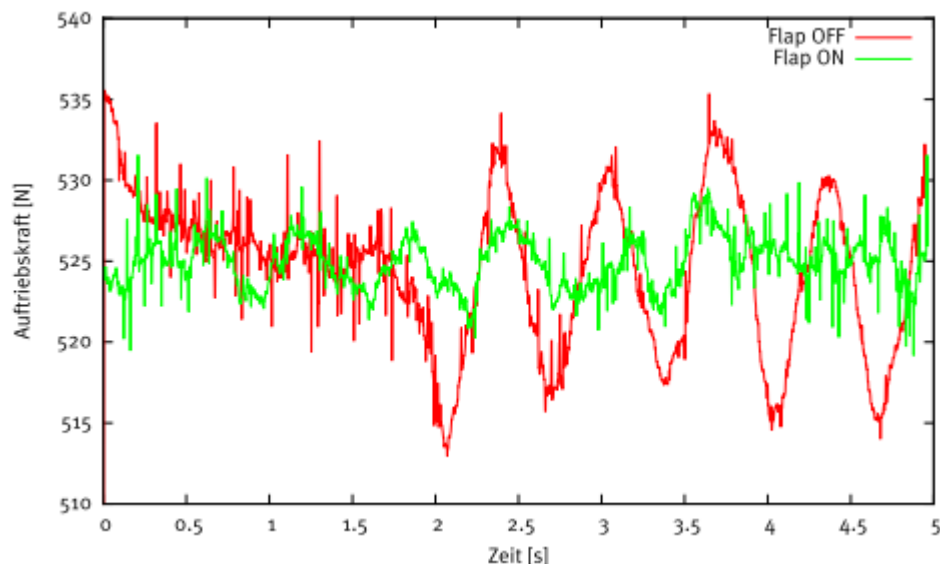
Abbildung 53 zeigt das Profilmodell eingebaut in die Messbox mit davorliegender Jalousieblende.



Abbildung 53: Flügelmodell der flexiblen Hinterkante im Windkanal mit Jalousieblende



Nach dem Einstellen der Verstärkungsfaktoren des PID Reglers, ist es möglich die Auftriebsschwankungen des Flügels zu reduzieren. In Abbildung 54 zu sehen ist exemplarisch ein Zeitschrieb der im Windkanal gemessenen Auftriebskraft. Dabei wurde mithilfe des Schrittmotors zweimal ein identisches Bewegungsmuster abgefahren. In einem Fall mit aktivierter Hinterkante und im anderen ohne Einsatz der Hinterkante (Neutralstellung). Vergleicht man die Standardabweichung des Signals, so reduziert der Einsatz der Hinterkante die Schwankungen der Auftriebskraft um den Mittelwert um ca. 60%. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit den aus der Simulation gewonnenen Ergebnissen. Allerdings kann der Vergleich nicht für den gesamten Frequenzbereich angestellt werden, da der experimentelle Aufbau die maximal im Versuch zu erreichende Frequenz auf ca. 0,5Hz beschränkt. Das volle Potential der Hinterkante kann so nicht ausgeschöpft werden. Um diese Limitation zu umgehen, müsste der Versuchsaufbau drastisch geändert werden. So müsste ein kleineres und leichteres Flügelmodell verwendet werden und ein leistungsfähigerer Servomotor.



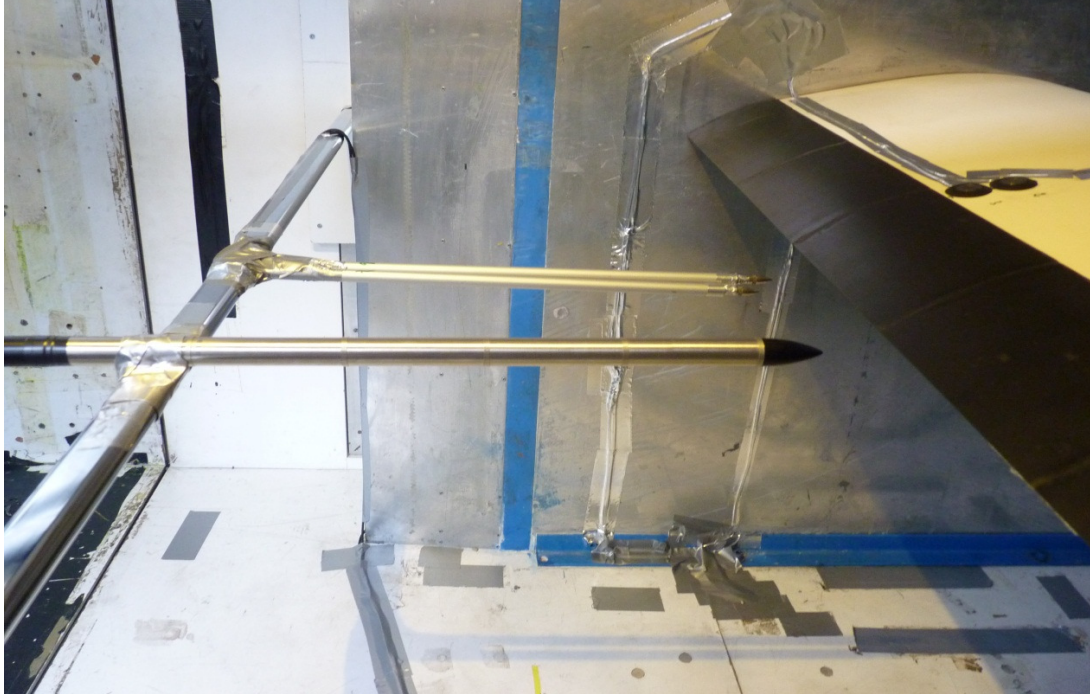
**Abbildung 54: Gemessene Auftriebskraft mit und ohne Aktuation der flexiblen Hinterkante**

### Schalldruckpegelmessung

Es wurden innerhalb der Versuchskampagne ebenfalls akustische Messungen mit Unterstützung von Prof. Kameier von der FH Düsseldorf durchgeführt. Zur Ermittlung der dynamischen Druck- und Schalldruckschwankungen im Windkanal wurden 3 Oberflächen- bzw. Wandmikrofone der Firma Brüel&Kjær Type 4949 und 4949B sowie 1/4" Kondensatormikrofone MK301 mit MV302 und ein 1/2" Kondensatormikrofon 4133 der Firma Brüel & Kjær eingesetzt. Als Windschirme wurden verwendet (Abbildung 55):

- ◆ Nasenkonus Brüel&Kjær Type VA0385
- ◆ Turbulenzschirm Brüel&Kjaer UA 0436

Zur Signalkonditionierung wurde ein Nexus Verstärker 2690 AO S4 der Firma Brüel & Kjær eingesetzt. Die Oberflächenmikrofone wurden auf der Saugseite bei 35%, 70%, 75% Flügeltiefe positioniert.



**Abbildung 55: Versuchsaufbau für Schalldruckpegelmessung der flexiblen Hinterkante**

Der Schalldruck wurde dabei für verschiedene Flügelstellwinkel und verschiedene FHK-Auslenkungen gemessen. Beispielhaft sei auf Abbildung 56 verwiesen. Die Messung mit dem Turbulenzschirm zeigt eine Erhöhung/Verminderung des Schalldrucks gegenüber der FHK-Neutralstellung um ca. +5dB/-5dB für die FHK-Auslenkung nach oben/unten. Die Änderungen wirken sich in einem Frequenzbereich bis ca. 200Hz aus.

— Turbulenzschirm (tembra\_berlin/Flap\_oben(1,6V)10grad\_20m\_s\_2200\_min\_nr6) Lp= 104.8dB Lp(A)= 96.0dB  
 — Turbulenzschirm (tembra\_berlin/Flap\_3(3,1V)10grad\_20m\_s\_2200\_min\_nr9) Lp= 110.1dB Lp(A)= 97.1dB  
 — Turbulenzschirm (tembra\_berlin/Flap\_4(4,1V)10grad\_20m\_s\_2200\_min\_nr1) Lp= 116.1dB Lp(A)= 99.5dB

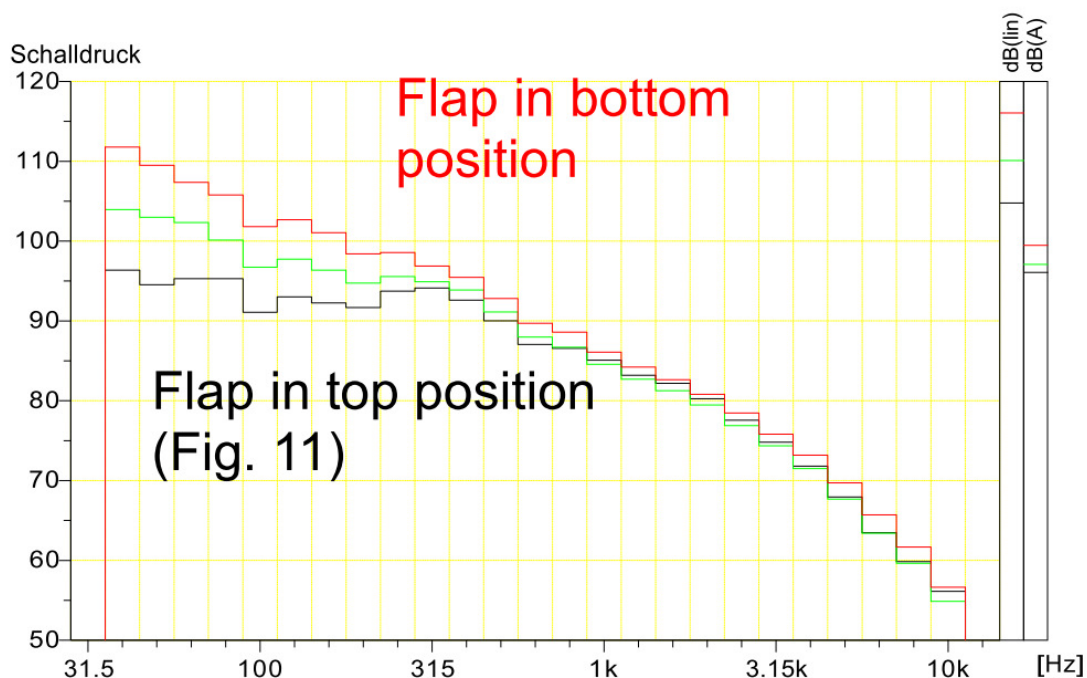


Abbildung 56: Schalldruckpegel für verschiedene FHK Positionen bei 20m/s und 10° Anstellwinkel

### 2.1.5 Weiterentwicklung neuer Hinterkantenkonzepte

Nach erfolgreicher Entwicklung eines FHK Modells für den Windkanaltest entstand die Notwendigkeit nach verbesserten und für Realbedingungen geeigneteren Umsetzungsmöglichkeiten der FHK zu suchen. Durch die kontinuierliche Arbeit am Thema und Gewinnung ergänzender Informationen zum Vermögen spezieller Materialien, Verfahren und Strukturen, die Aufgaben der Flexiblen Hinterkante zu erfüllen, sind weitere Konzepte für die Umsetzung einer funktionalen und zuverlässigen Konstruktion zudem erfolgversprechend geworden. Draus entstand ein neues Konzept, welches zum einen eine Optimierung im Bereich von Material, Struktur und Gewicht betrifft. Zum anderen wird das Aktuatorprinzip geändert und eine integrierte Lösung mit wesentlich kompakterer Bauweise angestrebt. Es wurde ein Prototyp eines Funktionsmodells angefertigt, dessen Wirkungsweise in Abbildung 57 gezeigt ist.

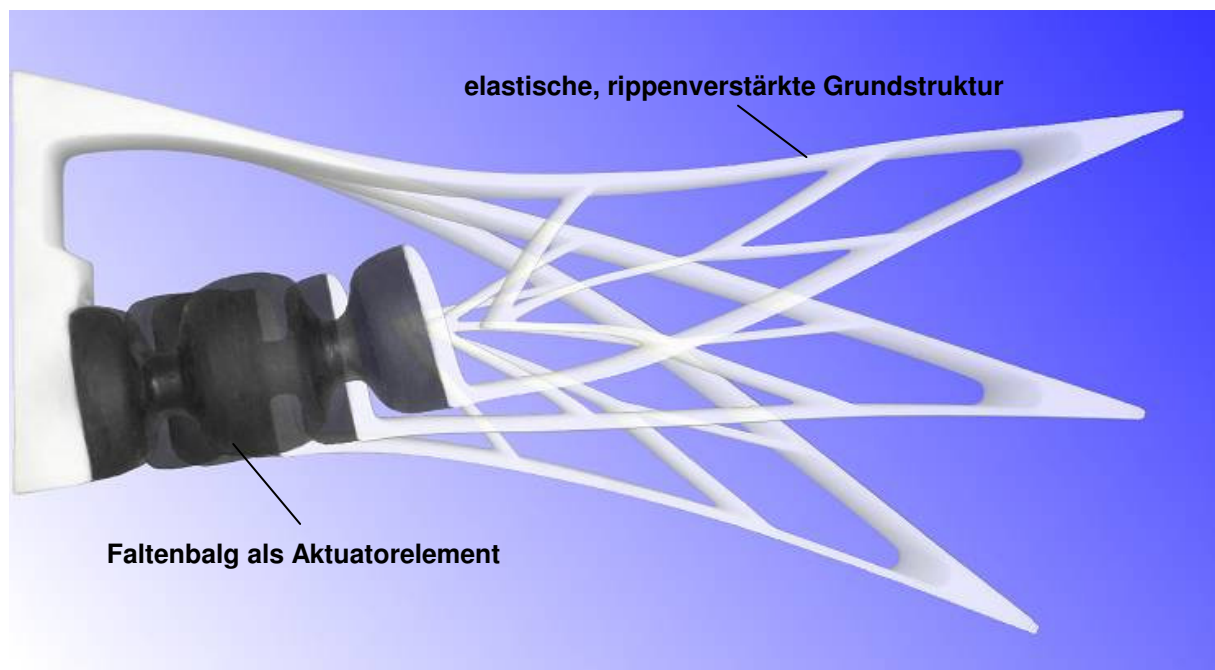


Abbildung 57: Neues Hinterkantenkonzept mit thermoplastischer Struktur und Balgaktuator

Material- und Strukturwahl betreffend, wurde die Anwendung eines thermoplastischen Kunststoffes, welcher höhere Steifigkeiten und damit einen geringeren Materialeinsatz bedeutet, neu beurteilt. Möglichkeiten einen derartigen Werkstoff mit entsprechenden Verfahren (Coextrusion) kraftschlüssig an einen flexibleren, Elastomeren Werkstoff anzubinden wurden in die Neuentwicklung einbezogen. Zudem dient die vorgebogene Struktur gleichzeitig als Energiespeicher für den agonistisch wirkenden Aktuator.

Den Aktuator betreffend, wurde der bisherige Grundsatz, bei der Wahl von Aktuatoren auf Serienprodukte der Automatisierungstechnik zurückzugreifen, zurückgestellt. Diese Initiale Beschränkung wurde vor allem aus Gründen der späteren kurzfristigen Verfügbarkeit und somit der potentiell verbesserten Wartungssituation, sowie der vorausgesetzten Ausgereiftheit der Produkte gesetzt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die am Markt verfügbaren Produkte für die Anwendung in der flexiblen Hinterkante in der existierenden Form nicht optimal für die Anforderungen geeignet sind und Weiterentwicklungen in Zusammenarbeit mit den Herstellern erforderlich wären (z.B. bzgl. Ansprechverhalten, Lebensdauer und Materialwahl). Da für diesen Schritt ohnehin die intensive Einbeziehung eines Aktuatorherstellers erforderlich ist, wurden für einen neuen Pneumatischen Aktuator in diesem Bereich bekannte Prinzipien angewendet und mit den speziellen geometrischen Anforderungen kombiniert. Es wird davon ausgegangen, dass der entworfene Balgaktuator in Zusammenarbeit mit einem Spezialisten auf diesem Feld zu einer optimalen Funktion und Zuverlässigkeit entwickelt werden kann.

Die weiterentwickelte flexible Hinterkante ist als eine zusammengefügte elastische Struktur entwickelt. Diese besteht aus zwei Elementen: der konturgestaltenden, annähernd dreiecksförmigen Grundstruktur, welche mit einer inneren Verrippung stabilisiert ist, sowie dem Aktuatorelement in Form eines Faltenbalgs (siehe Abbildung 58).

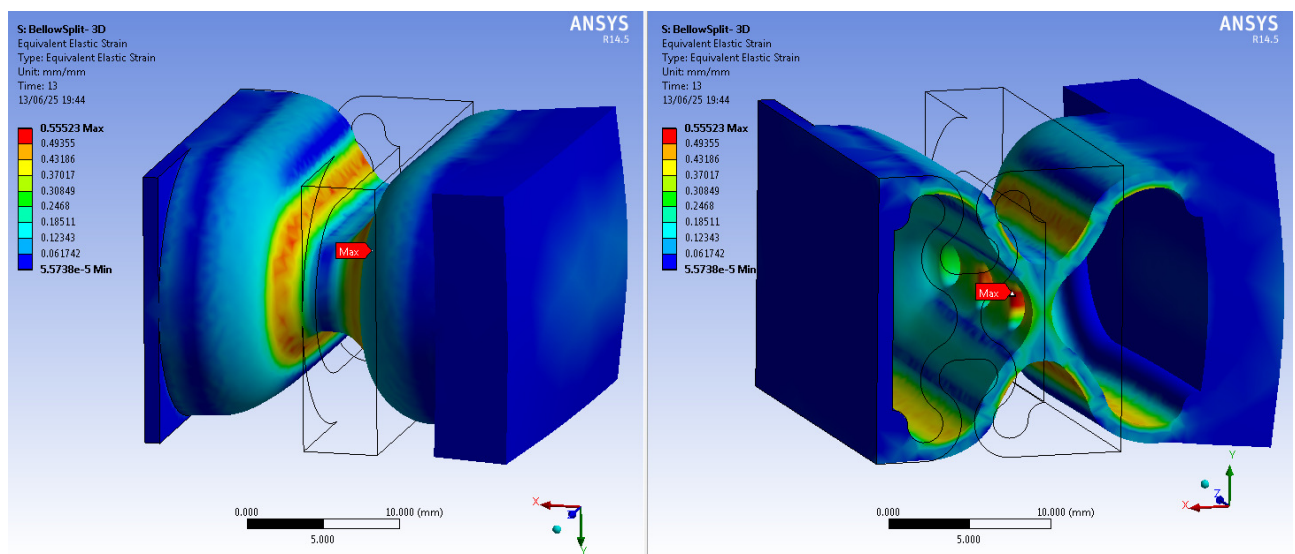


**Abbildung 58: Aufbau und Darstellung des Auslenkungsbereichs an einem experimentellen Funktionsmodell der flexiblen Hinterkante**

Die elastische Grundstruktur bildet maßgeblich die Form der Hinterkante und besteht aus einer fest mit dem Profil verbundenen Oberseite, welche sich an der Spitze wiederum mit der Unterseite verbindet. Da diese Struktur gleichzeitig flexibel sein soll um die Formveränderung zu realisieren, aber auch die von außen angreifenden aerodynamischen Kräfte sicher tragen können muss, wurden die biegsamen Wände im Innern mit einer Verrippung versehen. Hier können verschiedene bionisch inspirierte Ausgestaltungen umgesetzt werden, welche sich z.B. von den Schwanzflossen von Fischen oder den Federn eines Vogels ableiten lassen. Eine Ausführung, wie in Abbildung 58 dargestellt, beruht auf dem Aufbau der Vogelfeder und unterstützt die Verschiebung und Durchbiegung der Wandungen mit einer Zug- und Druckbelasteten Verzweigung.

Das Aktuatorelement wird durch einen gummielastischen Faltenbalg gebildet, welcher sich bei Beaufschlagung mit Druckluft ausdehnt und die nach unten vorgeformte Hinterkantengrundstruktur nach oben auslenkt. Hierbei werden eine neutrale Position und eine maximale Auslenkung nach oben erreicht. Der Balg gestaltet den Verlauf der Profilaußenkontur und liegt in der Hüllkurve des zugrundeliegenden aerodynamischen Profils. Die Anordnung auf der Profilunterseite ist vorteilhaft, da hier ein Überdruck der Strömung vorliegt und nicht mit einer Strömungsablösung durch die Faltung zu rechnen ist. Zudem wird die Abdichtung des Innenraums gegenüber der Umgebung realisiert, um den Innenraum gegen Umwelteinflüsse wie Regen, Schnee, Eis und Schmutz zu schützen.

Die Herstellung der Elemente aus Kunststoff kann mit billigen Verfahren, wie der Extrusion, bzw. Gussverfahren und Kleben, geschehen, was die Herstellungskosten minimiert. Der Energieverbrauch wurde gegenüber dem ersten Modell der Hinterkante ebenfalls minimiert indem die Wandstärken und Verformungseigenschaften der Elemente mittels Simulationen und Prototypen optimiert wurden (siehe Abbildung 59). Dank dem kleinen Füllvolumen und Betriebsdruck des Balgs und der leichten Grundstruktur können sehr schnelle Bewegungen realisiert werden.



**Abbildung 59: nichtlineare FEM-Simulation des über Innendruck verformten Balgelements**

Die Lebensdauer der Funktionsmodelle beträgt derzeit  $5 \cdot 10^3$  Zyklen und ist durch die Verklebung der im Vakuumgussverfahren hergestellten PU-Prototypenteile begrenzt. Bei einer Serienfertigung im Extrusionsverfahren sind andere Ausgestaltungen des Balgs möglich, welche ohne derartige Verklebungen auskommen.

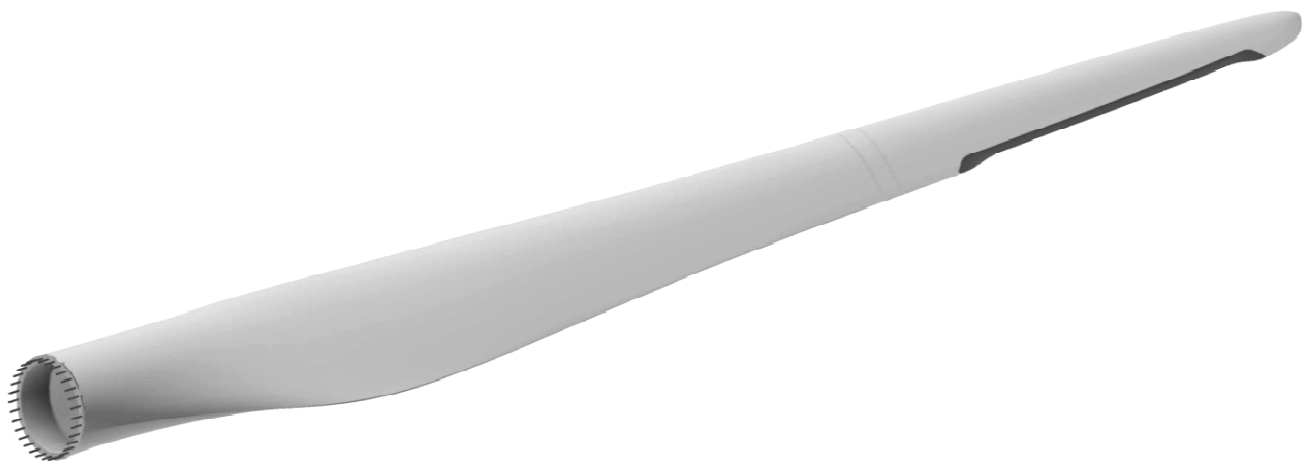
In einem weiteren Schritt wurde dieses Konzept genutzt um eine 75cm lange Hinterkante in ein Demonstratormodell zu integrieren (siehe 2.1.6).

#### **2.1.5.1 Integrationskonzepte**

Im Projektverlauf wurde die Möglichkeit betrachtet, dass ein 2D-Blattsegment zur einfachen Integration der Hinterkante in das Rotorblatt nicht zwangsläufig nötig ist, da sich die FHK nur gering verwinden muss und über eine variable Profiltiefenabdeckung verfügen kann. In Zusammenarbeit mit der Firma EUROS sollten mehrere Integrationskonzepte einer FHK als Hinterkantenmodul (HKM) untersucht werden. Die Integration wurde in zwei Ebenen aufgeteilt werden: Eine globale Integration des HKM in das Rotorblatt (Abbildung 60) und eine lokale Integration (Befestigung) des HKM. Abschließend wurden hierfür folgende Randbedingungen an eine Rotorblattstruktur formuliert:

##### **Randbedingungen für Globale Integration:**

- ◆ Positionierung im Blattaußenbereich über 30% des Blattradius (soweit zur Spitze wie geometrische/strukturelle Randbedingungen es zulassen)
- ◆ HKM besitzt aus fertigungstechnischen Gründen über die gesamte Länge einen konstanten Querschnitt mit fester Tiefe und Höhe an der Schnittstelle zum Rotorblattprofil
- ◆ HKM überdeckt über den angewendeten Bereich im Mittel 20% der Profiltiefe
- ◆ Beginn und Ende der Hinterkante werden mit flexiblen, nicht aktuierten Übergangselementen mit der steifen Hinterkante des Rotorblattes verbunden (über eine Länge von ca. 1,5-fachem der Hinterkantentiefe). An der Blattspitze ist alternativ eine flexible Verlängerung / eine auslaufende Kante anwendbar.



**Abbildung 60: Ansicht der Positionierung der Hinterkante an einem Referenzblatt (Globale Integration)**

Die Anforderungen an die Profilgeometrie sind dabei vielseitig. Das HKM konstanten Querschnitts besitzt an der Anschlussstelle eine feste Höhe und feste Winkel der Saug- und Druckseite zum Blatt. Zur stetigen Anbindung an die Blattgeometrie sind folgende Anforderungen an die Profilschnitte im Bereich der Hinterkante zu erfüllen (jeweils für eine Blatt-Neukonstruktion oder die Benutzung einer bestehenden Geometrie formuliert):

1. Profilform

- ◆ *Neukonstruktion:* Alle Blattprofile im Bereich der Hinterkante sollten zwischen ca. 70 bis 85% der Profiltiefe auf Saug- und Druckseite aus Geraden in einem festen Winkel zueinander bestehen. Nur dann können die gesamt-Profiltiefe sowie die Stetigkeit von Profil - Saug- und Druckseite beibehalten werden.
- ◆ *Bestehend. Design:* Es sollte o.g. Anforderungen so nahe wie möglich gekommen werden. In einem 3D Abschnitt eines Blattes muss eine (ggf. gekrümmte) Ebene konstanter Höhe gefunden werden, an welcher die Winkel zu den Tangenten an Saug- und Druckseite möglichst wenig variieren.

2. Auffädung der Profile

- ◆ *Neukonstruktion:* Die Profile des Blattes sollten im Flap-Bereich so aufgefädelt werden, dass die Blatthinterkante nahezu eine Gerade in der y-z-Ebene ergibt.
- ◆ *Bestehend. Design:* Eine Auswölbung des HKM sollte gering wie möglich ausfallen.

3. Verdrillung Rotorblatt

- ◆ *Neukonstruktion:* Alternativ kann die Verdrillung über die Aerodynamik der HK realisiert werden. Der Strukturelle Twist wird konstant gehalten und die Flap erhält verschiedene voreingestellte Ausschläge über die Blattlänge.
- ◆ *Bestehend. Design:* Der Twist des Blattes im Bereich der Flap liegt bei einem untersuchten Referenzblatt bei weniger als 2°. Es wird angenommen, dass der elastische Körper des HKM eine Verdrillung problemlos toleriert. Für eventuelle Befestigungsplatten ist dies noch zu prüfen.

## **Randbedingungen für die lokale Integration**

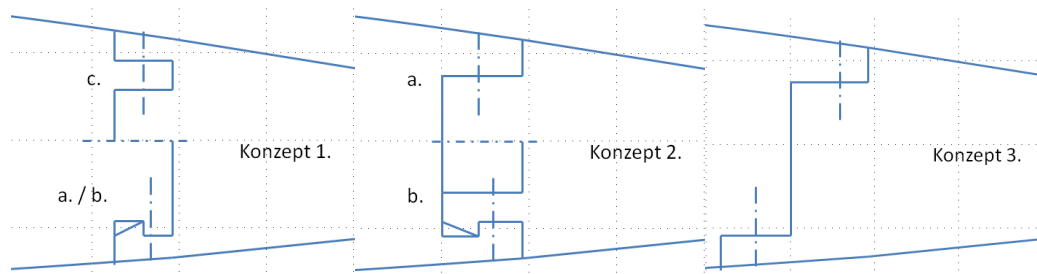
Die Anforderungen an die lokale Verbindung der Hinterkante zum Rotorblatt ergeben sich aus wartungstechnischen und strukturellen Gründen. Zum einen muss sie lösbar und von außen zu bedienen sein und zum anderen muss sie in der Lage sein, die entstehenden Lasten aufzunehmen. Die Belastung ergibt sich dabei hauptsächlich aus dem aerodynamischen Moment um die Blattlängsachse und die Fliehkräfte der FHK Einheit.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden wurden mehrere Konzeptvorschläge untersucht und bewertet (siehe Abbildung 61) die im Folgenden kurz beschrieben werden:

1. Überlappung HKM auf Blatthinterkante

- a. Einfache Überlappung mit Befestigungselementen (Schrauben, Passschrauben, Keile, Nieten, ...)
- b. Schnappverbindung, gesichert mit Befestigungselementen (Schrauben, Keile, Nieten, ...)
- c. Anschlusselemente ragen aus Blatthinterkante
- d. Spannverschluss

2. Überlappung Blatthinterkante auf HKM
  - a. Einfache Überlappung mit Befestigungselementen (Schrauben, Passschrauben, Keile, Nieten, ...)
  - b. Schnappverbindung, mit Befestigungselementen (Schrauben, Keile, Nieten, ...) gesichert
  - c. Exzenterverbinder / Exzenterspanner
  - d. Keilspanner
  - e. Spannverschluss
3. Z-Überlappung Blatt – HKM
  - a. Einfache Überlappung
  - b. Schnappverbindung
  - c. Spannverschluss



**Abbildung 61: Konzeptvarianten Schnittstelle Blatt – HKM (Lokale Integration)**

### 2.1.6 Bau eines Demonstratormodells

Um die neue Hinterkantentechnologie sowie das entwickelte Integrationskonzept einem Test zur Anwendbarkeit zu unterziehen, sowie die Ergebnisse der Öffentlichkeit anschaulich präsentieren zu können, wurde ein Demonstratormodell einer Rotorblattspitze mit integrierter Hinterkantentechnologie gebaut.

Bezüglich der Befestigung der Hinterkante wurde sich für das Konzept der gesicherten Schnappverbindung entschieden (Konzeptvorschlag 2b), da dieses den besten Kompromiss bezüglich den Kriterien geringer Eingriff in bestehende Rotorblattfertigung, Neutralität gegenüber Fertigungstoleranzen, einfache Montage und Demontage sowie Berücksichtigung materialspezifischer und struktureller Eigenschaften verspricht. Die Integration der Befestigungsschnittstelle in die herkömmliche Rotorblattstruktur ist über verschiedene strukturelle und fertigungstechnisch zu bewertende Konzepte möglich (siehe Abbildung 62). Diese wurden von der Fa. EUROS analysiert und ein finales Konzept am realen Demonstratormodell wurde umgesetzt.



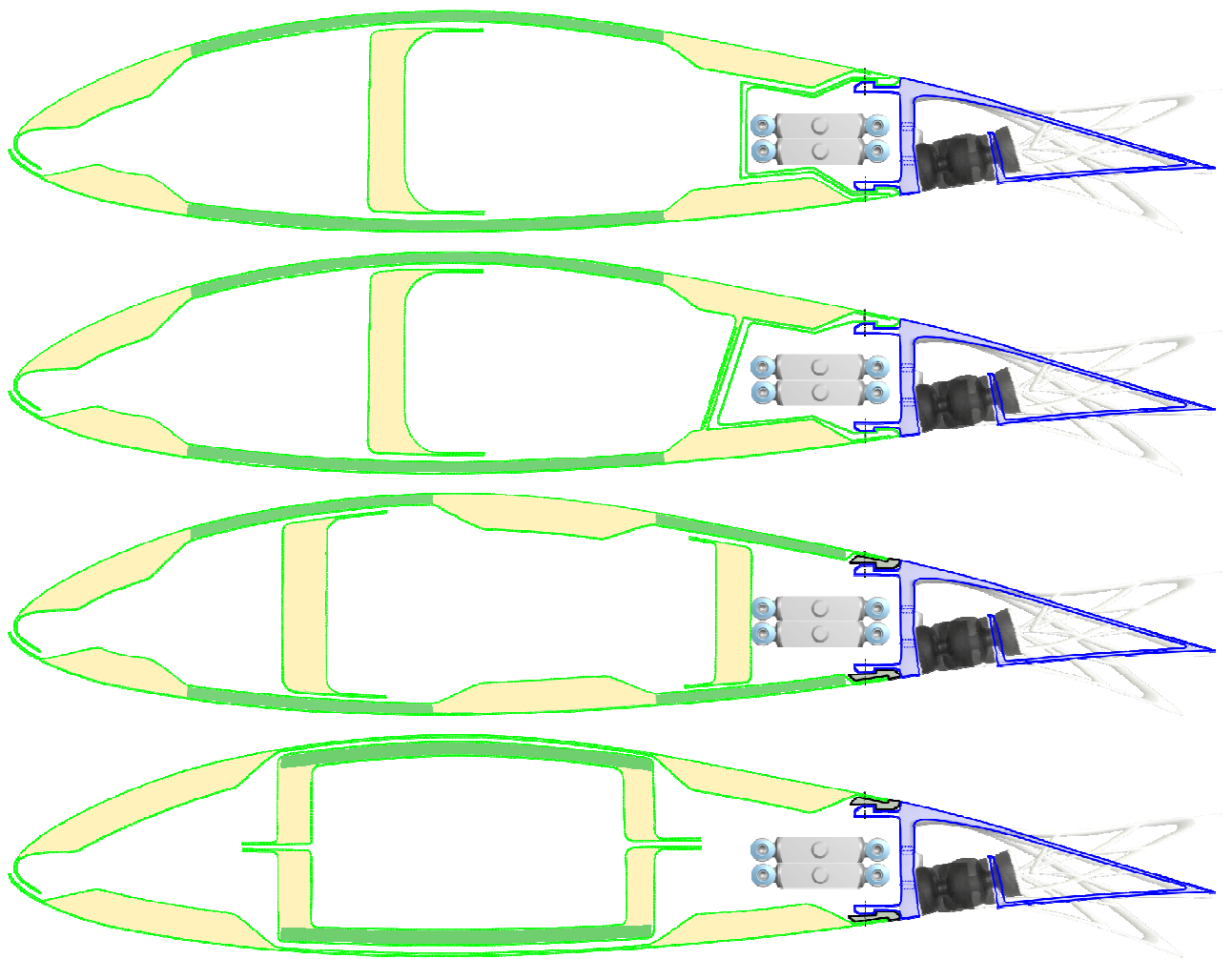


Abbildung 62: Strukturelle und fertigungstechnische Konzepte zur Integration der Hinterkanten-Befestigungsschnittstelle

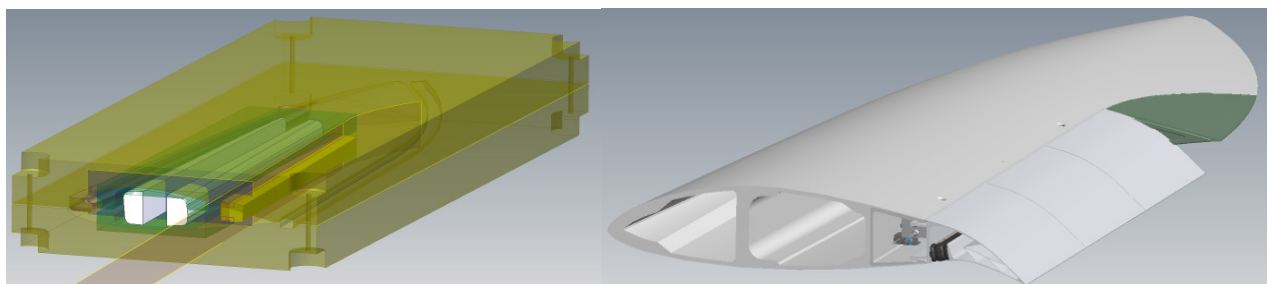


Abbildung 63: Negativformen der Blattschalen und CAD Modell des FHK Demonstrators

Es wurde sich für das erste abgebildete Konzept in Abbildung 62 entschieden. Die Hinterkante wird über eine gesicherte Schnappverbindung am Rotorblatt befestigt. Ein zusätzlich gefertigter Kanal wird beim Rotorblattbau eingesetzt. Dieser enthält die Hinterschnitte für Schnapphaken der FHK und übernimmt ebenfalls die strukturverstärkende Funktion eines Hinterkantenstegs und schließt die Rotorblattgeometrie.

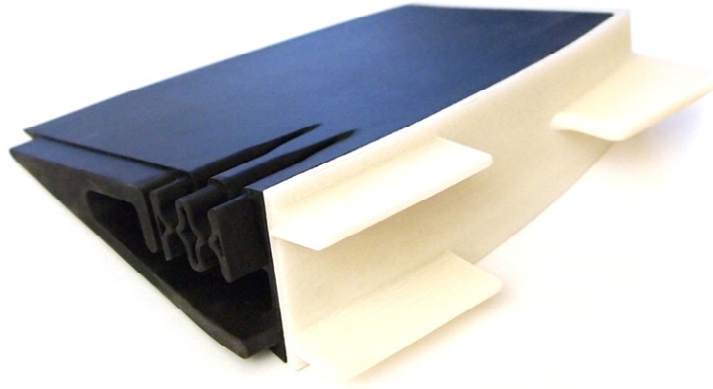
#### **2.1.6.1 Fertigung der Hinterkanten**

Für den Demonstrator wurde die Hinterkante in drei Einzelteilen mittels SLS Verfahren (Selektives Laser Sintern) hergestellt (Abbildung 64). Anschließend wurden die Teile miteinander verklebt. Die Teilung hat ihren Grund lediglich in der Größenlimitierung des verwendeten Rapidprototyping-Verfahrens. Für eine zukünftige Produktion bietet sich das Extrusionsverfahren an.



**Abbildung 64: Mittels SLS-Verfahren hergestelltes Hinterkantenelement**

Der Übergang der 2D extrudierten Hinterkante zur Rotorblattgeometrie wurde über ein gegossenes Übergangselement aus PU realisiert. Dieses wurde anschließend mit einem gedruckten Adapter verklebt (Abbildung 65). Damit ist man in der Lage das gesamte Element in einer Aufnahmeöffnung im Rotorblatt zu verschrauben (Abbildung 69). Die Hinterkantenelemente werden mit dem Übergangselement fest verklebt.



**Abbildung 65: Übergangselement mit Adapterstück**

Der Balgaktuator für den Demonstrator wurde im Extrusionsverfahren hergestellt. Als Material kam ein thermoplastisches Elastomer (TPE) zum Einsatz. Der Mittelsteg des Balgs wurde anschließend durchbohrt, um eine Druckluftzufuhr in alle drei Kammern des Balgs zu ermöglichen. Der Balgaktuator ist in Abbildung 66 zu sehen. Zum Abdichten der offenen Enden wurden PU-Endstücke hergestellt.



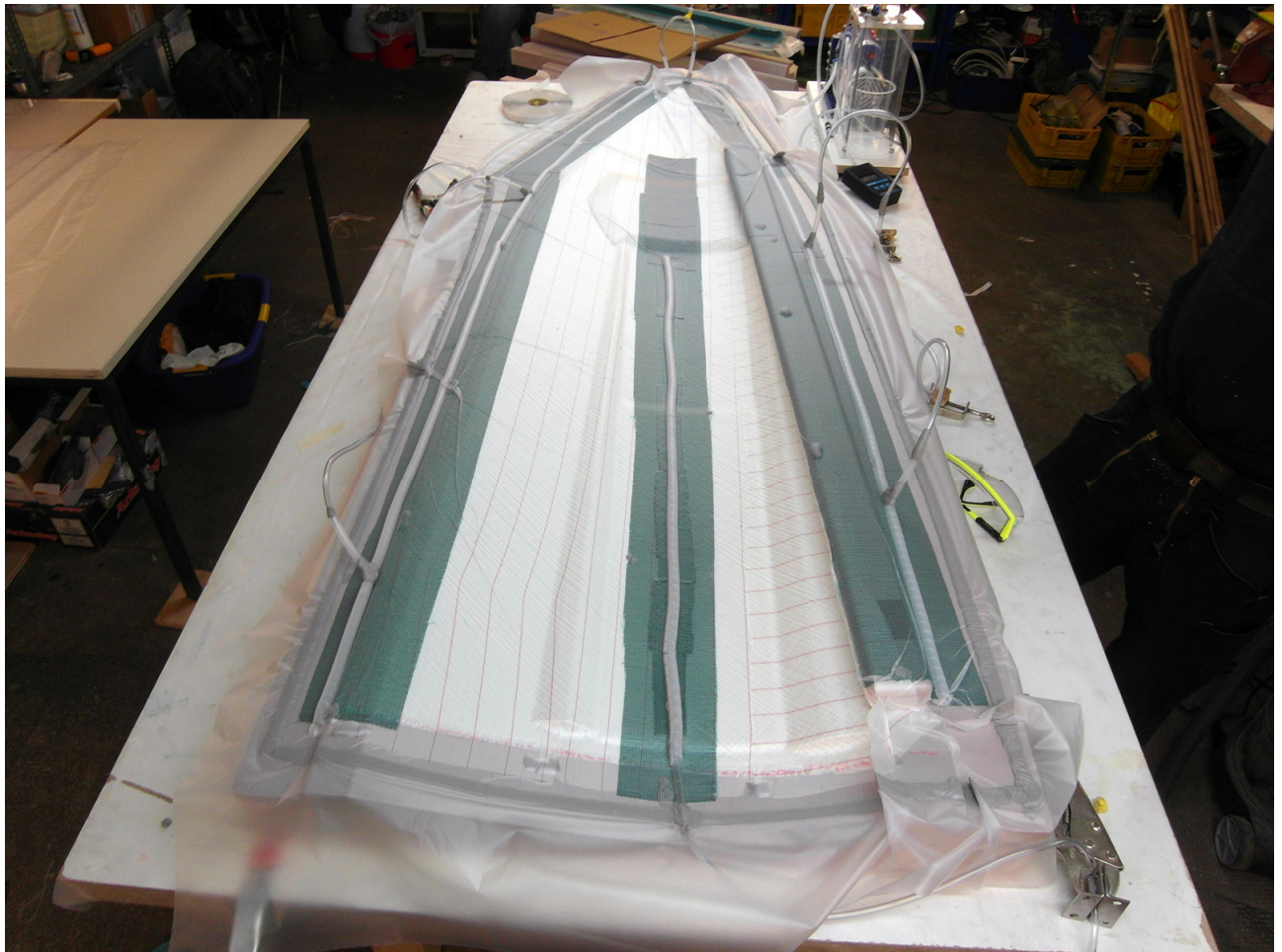
**Abbildung 66: Extrudierter Balgaktuator aus TPE**

Anschließend wurden die Hinterkante, der Balgaktuator, die Endstücke und das Übergangselement miteinander zu einer Einheit druckdicht verklebt, die nachträglich in das Rotorblatt eingesetzt werden kann. Für eine zukünftige Fertigung, könnten Hinterkante und Balgaktuator zusammen in einem Schritt extrudiert werden. Da die Initiale Einrichtung dieses Fertigungsprozesses mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist, wurden die FHK-Elemente und der Aktuator im Zuge dieses Projekts getrennt gefertigt.

### 2.1.6.2 Bau der Rotorblattspitze

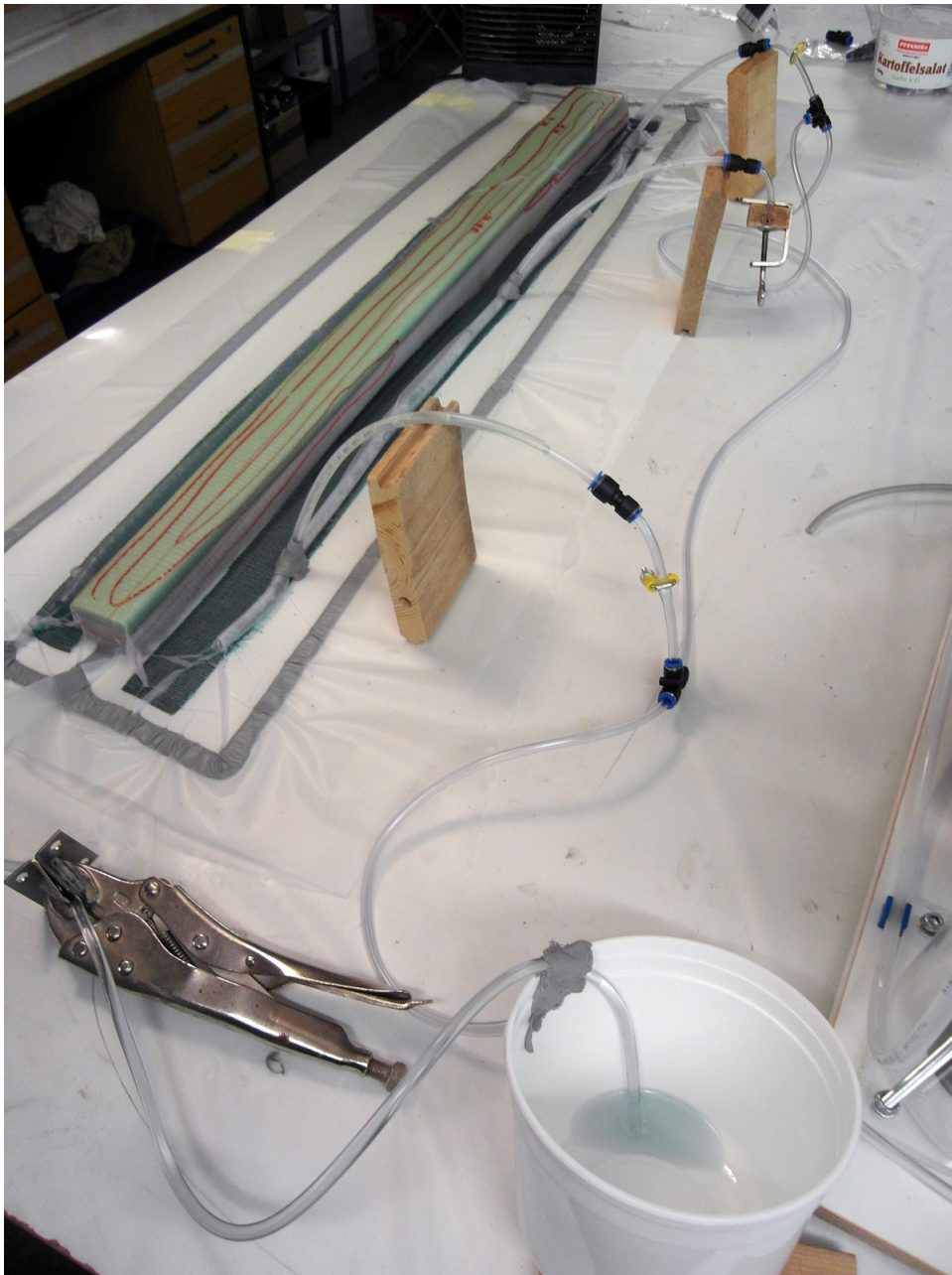
Um ein realistisches Demonstratormodell zu erhalten wurde eine Rotorblattspitze eines 250kW Blattes nachgebaut. Die Fertigung des Demonstrators lehnt sich an den konventionellen Herstellungsprozess moderner Rotorblätter an. Dadurch soll die technische Umsetzbarkeit des Konzepts verdeutlicht werden. Das Blatt besteht aus zwei Schalen, die in Verbindung mit einem Steg miteinander verklebt werden. Dazu wurden zwei Negativformen hergestellt (siehe Abbildung 63) sowie weitere Formteile für die Einzelteile der Hinterkante. Das Herstellungsverfahren der Einzelteile beruht auf dem Vakuuminfusionsverfahren.

Zuerst wurden die beiden Blatthälften hergestellt. Abbildung 67 zeigt den Infusionsprozess der oberen Blattschale. Der Harzzuleitung befindet sich längs in der Schalenmitte, die Absaugung erfolgt verteilt über die Außenränder der Form.



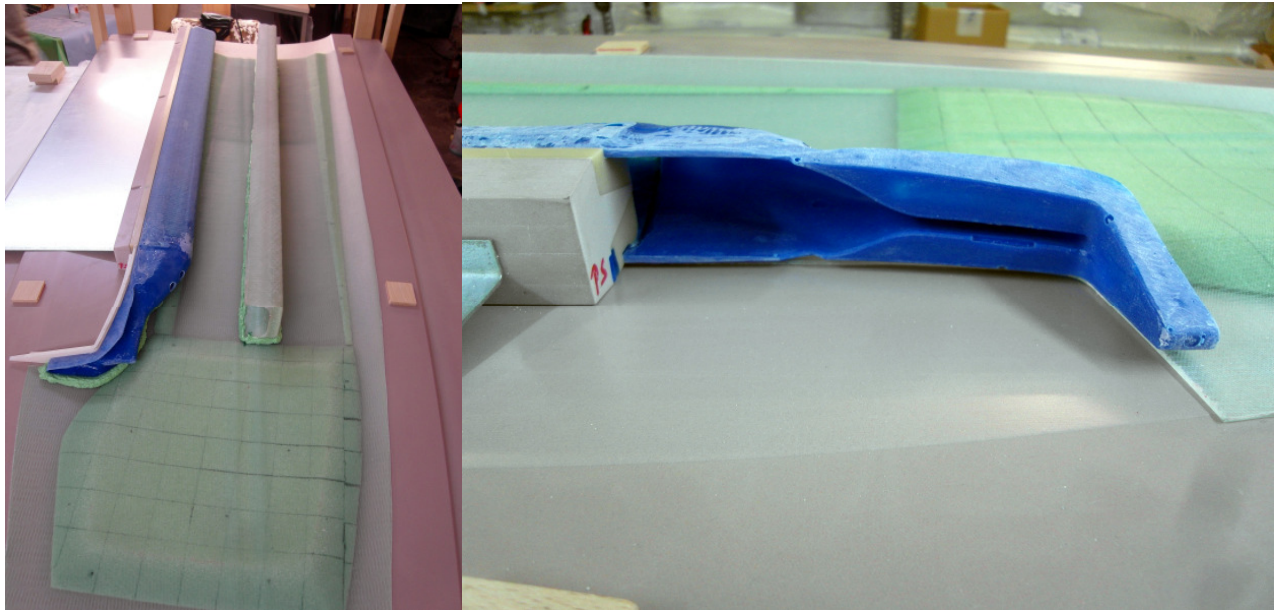
**Abbildung 67: Vakuuminfusion der Saugseite**

Der C-Förmige Steg wurde ebenfalls Vakuuminfusioniert (Abbildung 68).



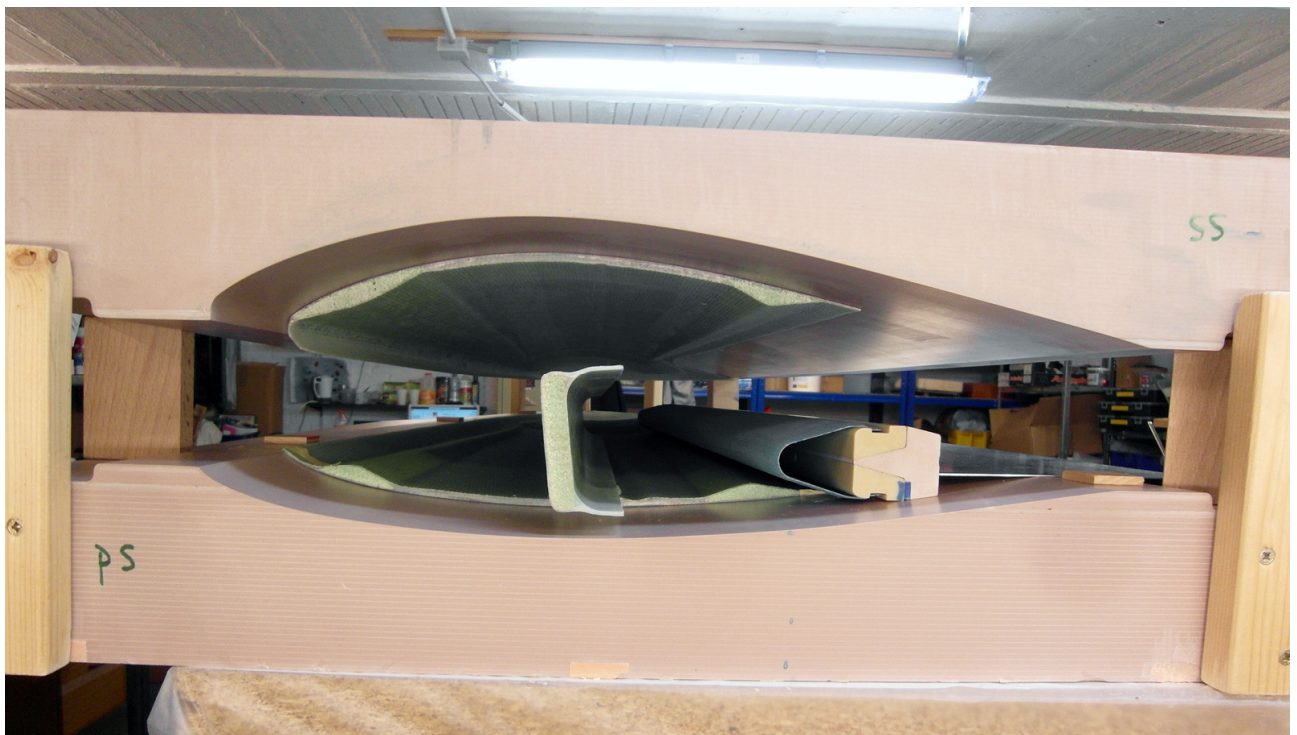
**Abbildung 68: Fertigung des C-Stegs**

Der Aufnahmekanal und das Endstück zur Befestigung des Übergangelements sind in Abbildung 69 dargestellt.



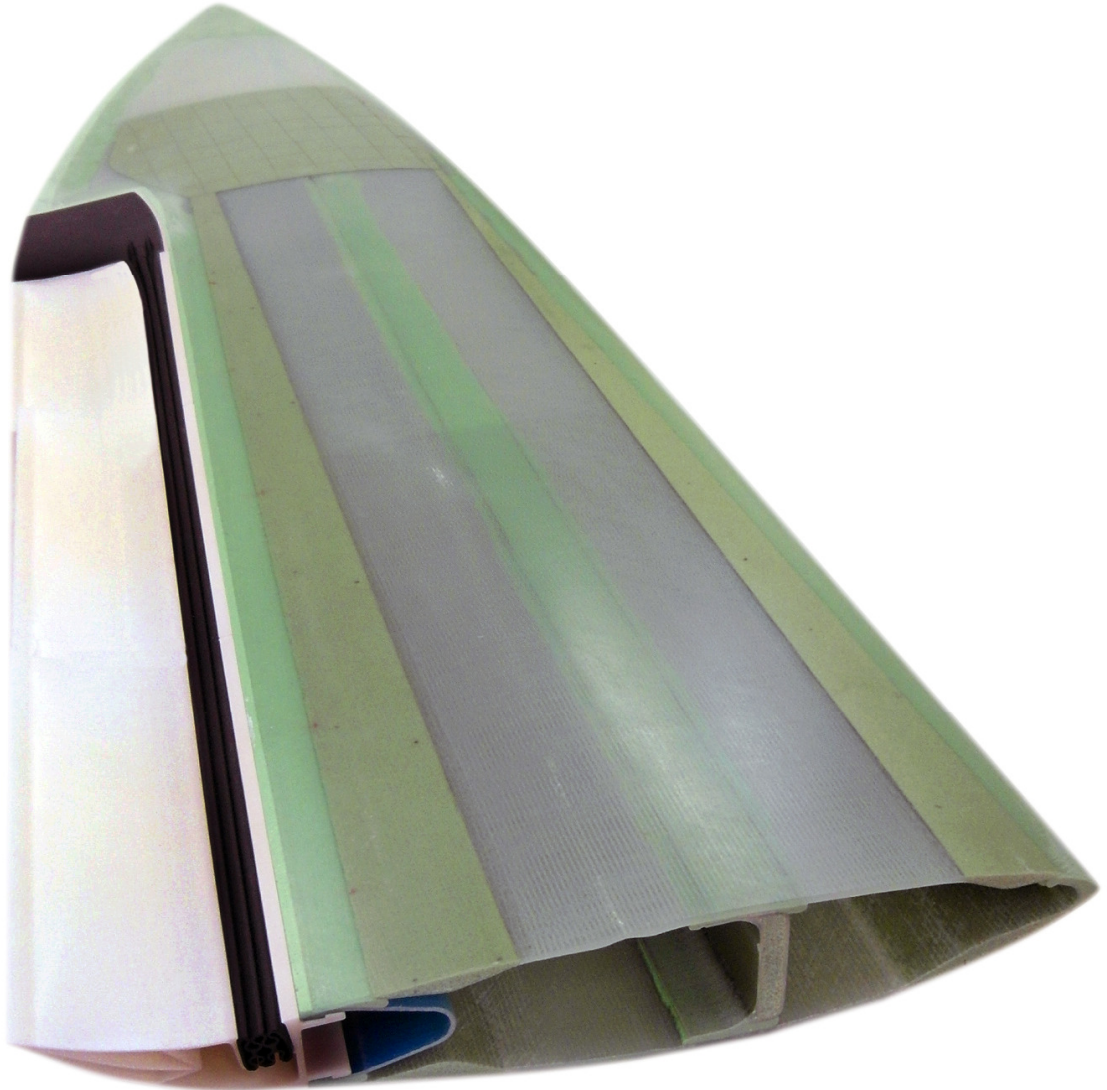
**Abbildung 69: Aufnahmeöffnung für das Übergangselement**

Abbildung 70 zeigt die Positionierung der Einzelteile in den Schalen vor der Verklebung.

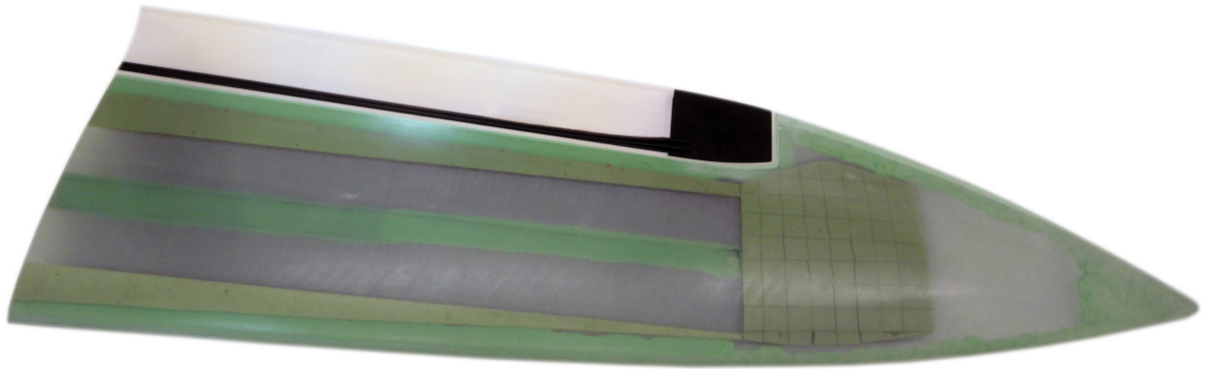


**Abbildung 70: Einzelteilausrichtung vor dem Verkleben**

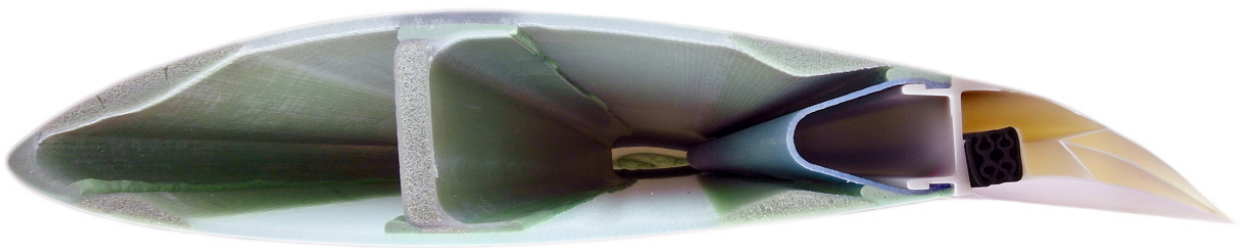
Im Anschluss wurde die Hinterkante in die Rotorblattspitze integriert und mit den pneumatischen Ventilanschlüssen versehen. Der fertiggestellte Demonstrator mit montierter Hinterkante ist in Abbildung Abbildung 71 bis Abbildung 73 zu sehen.



**Abbildung 71: Druckseite des Blattdemonstrator mit Profilschnitt**



**Abbildung 72: Gesamtansicht der Blattspitze**



**Abbildung 73: Schnittansicht des Demonstrators, mit Aufnahmekanal (blau),  
Hinterkantenelement und Balgaktuator**



## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zu den wichtigsten Positionen sind zu zählen:

Pos.	Dienstleistung / Gegenstand / Gerät	Kosten in €
1	<b>Tembra GmbH Personalkosten</b> Projektbezogene und zuwendungsfähige Personalkosten	791.000,00 €
2	<b>Smart Blade GmbH</b> F+E Unterauftrag: Durchführung der Windkanalmessung und aerodynamische Simulationen	140.000,00 €
3	<b>TU Berlin Windkanaltest</b> Windkanalmiete für Versuche im GroWiKa des FHI	50.000,00 €
4	<b>Material: Statischer Windkanaltest und Testmodell</b> Windkanaltestmodell der Flexible Hinterkante und Messaufbau für statischen Windkanaltest	17.000,00 €
5	<b>Material: Dynamischer Windkanalversuch</b> Messaufbau dynamischer Windkanaltest	16.000,00 €
6	<b>Material: Blattdemonstrator</b> Blattdemonstrator für neu entwickeltes FHK Konzept	13.000,00 €

## 2.3 Nutzen und Verwertbarkeit

Das vorgeschlagene Konzept des Rotorblatts mit integrierter FHK bietet eine umfassende und intelligente Lösung der Problematik in Zusammenhang mit immer größer werdenden Rotorblättern. Letztlich entscheidend über den wirtschaftlichen Erfolg eines solchen Systems sind die Kosten pro erzeugter Kilowattstunde. Gelingt es das Konzept bei geringeren Life Time Kosten und hoher Wartungsfreundlichkeit zu verwirklichen, so wird der Markt sich dafür öffnen.

### 2.3.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die entwickelten Konzepte zur FHK und deren Implementierung in Rotorblätter nach konventioneller Bauart wurden bis zum Bau und der Erprobung eines Blatt demonstrators gebracht. Die Akzeptanz des Marktes lässt sich nun über die erfolgreiche Demonstration eines Prototypen weiter gewinnen. Um ein serienreifes Produkt zu vermarkten, bedarf es weiterer Untersuchungen an der realen Windkraftanlage.

### 2.3.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolge

Die Firma Tembra hat im Rahmen dieses Projektes ihre Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen weiter intensivieren können. Der bereits bestehende Kontakt zur Technischen Universität Berlin und der Fachhochschule Düsseldorf wurde durch die Zusammenarbeit im Zuge des Projekts weiter intensiviert.

### 2.3.3 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Tembra hat bereits eine Projektskizze mit dem Thema "Teststand zur Validierung einer Flexiblen Hinterkante am Rotorblatt" (AZ – 41V6786) für ein Nachfolgeprojekt eingereicht. Im Zuge dieses Projekts soll eine Kleinwindkraftanlage (bis 250kW) mit dem Prototyp der FHK ausgerüstet werden. Eine Zusammenfassung der Projektskizze ist im Folgenden gegeben:

*„Um die Grenzen der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit großer Windenergieanlagen weiter zu verschieben, wird die Notwendigkeit der Implementierung lastreduzierender Regelungselemente immer deutlicher. Neben der Einzelblattregelung sind Elemente zur aktiven Strömungsbeeinflussung (sog. Active Flow Control, kurz AFC, -Elemente) in der Diskussion oder bereits in Entwicklung. Diese sind bereits aus der Luftfahrt bekannt und wurden in jüngerer Vergangenheit auch für den Einsatz an WEAs intensiv hinsichtlich ihrer aerodynamischen Eigenschaften untersucht. Als Element mit dem größten Potenzial hat sich das Konzept der Flexiblen Hinterkante erwiesen.*

*Die im zweidimensionalen Strömungsfeld (Windkanal) gewonnenen Erkenntnisse können jedoch bisher nur begrenzt zur genauen Vorhersage der tatsächlich eintretenden Lastreduzierung an der WEA verwendet werden. Hauptproblematik stellen hierbei noch fehlende Methoden und Simulationsmöglichkeiten für die dynamischen Strömungseffekte im Zusammenspiel der Flexiblen Hinterkante (FHK) mit dem komplexen Anlagenverhalten unter definierten Regelungsstrategien dar. Ebenso sind viele für eine genaue Simulation erforderliche Randbedingungen und*

*Systemeigenschaften noch im Unklaren. So existieren verschiedene Konzepte für die Wahl von Art und Anbringungsort entsprechender Sensoren für die Steuerung der Elemente. Hier muss eine optimale Wahl in Bezug auf reale Anwendbarkeit sowie auch des regelungstechnisch damit zu erzielende Ergebnisses erfolgen. Zudem sind für Entwurf und Erprobung verschiedener Reglerstrategien wichtige Systemeigenschaften, welche bei einer konstruktiven Realisierung von FHK-Elementen an einer WEA auftreten, noch unbekannt. Die praktische Umsetzung derartiger Elemente am Rotorblatt einer WEA erfolgt schließlich unter anderen Bedingungen als bei einer Realisierung zur experimentellen Untersuchung des Strömungsverhaltens im Windkanal oder bei der Anwendung im Umfeld von Luft- und Raumfahrt.*

*Hieraus resultiert der Ansatz von Tembra, die Flexible Hinterkante unter realen Bedingungen im Feld weiter zu erforschen um Lücken für die Theorie zu schließen und somit langfristig die praktische Anwendung zu forcieren. Die Vorarbeiten dazu, die Entwicklung eines funktionalen Systems einer flexiblen Hinterkante und deren Integration in ein Rotorblatt, werden aktuell mit dem Förderprojekt „Strukturelle und aerodynamische Auslegung eines Rotorblattes mit Active Flow Control (AFC)-Elementen in modularer Hybridbauweise“ geleistet.“*

## 2.4 Patentanmeldung

Im Zuge der FHK Entwicklung ist aus dem laufenden Projekt heraus eine Schutzrechtsanmeldung eingereicht worden. Die Erfindung läuft unter der Beschreibung „**Formvariable, fluidisch aktuierte Hinterkante an Rotorblättern**“ mit dem Aktenzeichen **10 2013 006 166.0**. Die Erfindung wurde am 03.04.2013 angemeldet, das voraussichtliche Veröffentlichungsdatum ist der 09.10.2014. Aus der Patentanmeldung entnommen, folgt eine kurze Beschreibung der Erfindung:

### Beschreibung

Die Erfindung richtet sich auf eine formvariable, fluidisch aktuierte Hinterkante an aerodynamischen Profilen von Rotorblättern von Windenergieanlagen, ausgestattet mit einem fluidischen Aktuator, welcher durch seine Vereinigung von aktulierender und abdichtender Funktion eine besonders vorteilhafte aerodynamische, kompakte, robuste, geschützte, fertigungsoptimierte und zuverlässige Konstruktion selbiger ermöglicht.

### Aufgabe

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine vorzugsweise pneumatisch betriebene verstellbare Hinterkante zur veränderlichen Beeinflussung der Auftriebseigenschaften eines aerodynamischen Profils eines Rotorblattes an einer Windenergieanlage zu finden, welche unter anderem die Nachteile des Stands der Technik vermeidet. Insbesondere soll dabei eine modular integrierbare, also kompakte, robuste, wartungsarme und kostengünstig herzustellende und zu betreibende formvariable Hinterkante angegeben werden.

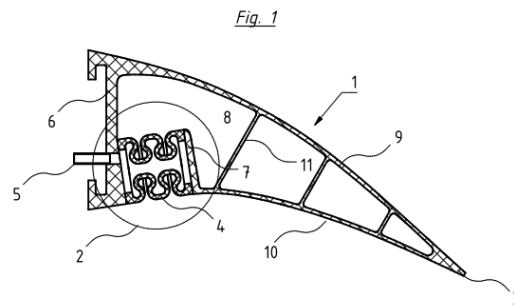


Abbildung 74: Patentzeichnung zu „Formvariable, fluidisch aktuierte Hinterkante an Rotorblättern“

## 2.5 Fortschritte an anderen Stellen

### 2.5.1 Flexible Hinterkante

Es sind bei den ähnlichen internationalen Forschungsunterfangen weitere Fortschritte gemacht worden, welche bis zu experimentellen Untersuchungen vergleichbarer AFC-Systeme an Testanlagen reichen sollen. Konkrete wissenschaftliche Veröffentlichungen darüber wurden jedoch bisher nicht veröffentlicht.

Es gibt weiterhin aktuelle Entwicklungen auf diesem Gebiet der großen ausländischen Forschungseinrichtungen:

- ♦ **Risø DTU (Dänemark):** Die Entwicklung einer pneumatisch betriebenen Gummihinterkante (CRTEF) wurde in Windkanalversuchen untersucht. Ein Prototyp ist derzeit in Planung, allerdings sind dazu erst wenige Ergebnisse öffentlich.
- ♦ **TU Delft (Niederlande):** Entwicklungen zu SMA (Smart-Material-Actuators) und Micro Tabs. Letztere zeigen als Alternative zu Hinterkantenklappen eine Problematik bezüglich der Reaktionsverzögerung im Auftrieb.
- ♦ **NREL/Sandia (USA):** Sandia Smart Rotor als Prototypen-Testanlage mit je drei Aktiven Hinterkanten pro Blatt ist in Betrieb genommen worden. Dazu sind ebenfalls wenig Informationen verfügbar, aber es scheint sich dabei um eine starre Hinterkante mit mechanischem Gelenk zu handeln.
- ♦ **DLR / IWES / ForWind:** Das vom BMU geförderte Verbundprojekt "Entwicklung und Konstruktion intelligenter Rotorblätter - Smart Blades" (Förderkennz.: 0325601A/B/C/D) untersucht im Allgemeinen die Machbarkeit und den Einsatz von Smart Blades für den Windenergiesektor. Darunter fällt neben passiven Methoden auch die Erforschung von Rotorblättern mit aktiver Hinterkante.

Alle gezeigten Ergebnisse fokussieren die Funktionsuntersuchung einer FHK (im Experiment und Simulation). Die Einbeziehung des Gesamtsystems und die Frage nach der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit bleiben weiterhin unbeantwortet und sind Teil der wissenschaftlichen Forschung.

## 2.6 Veröffentlichungen

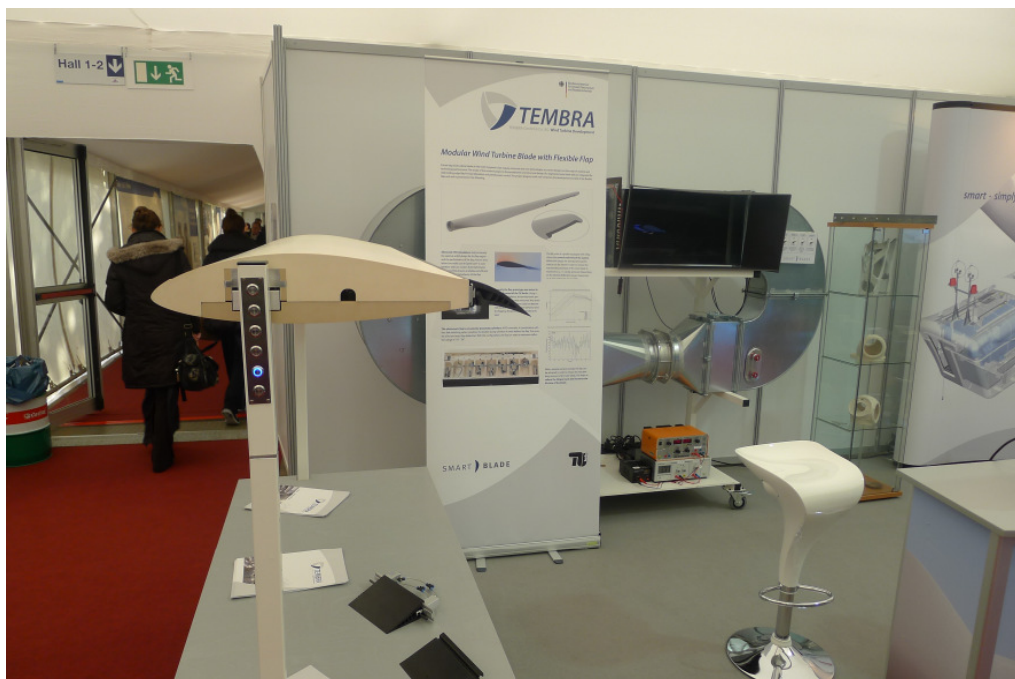
### 2.6.1 Website

Eine Projektzusammenfassung findet sich auf der Tembra Website:

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

### 2.6.2 Präsentation Messestand Husum Wind 2012

Tembra hat das Windkanaltestmodell auf der Husum Wind 2012 auf seinem Messestand ausgestellt (Abbildung 75).



**Abbildung 75: Tembra Messestand auf der Husum Wind 2012**

### 2.6.3 Euromech

Tembra hat am Euromech Colloquium 528 in Oldenburg vom 22-24 Februar 2012 teilgenommen. Dort wurde weiterhin das große Interesse der Forschung und Wirtschaft an der Entwicklung einer Methode zur aktiven Strömungsbeeinflussung am Rotorblatt deutlich.

### 2.6.4 FIZ-Jahrbuch

Eine ausführliche Projektbeschreibung wurde im FIZ Forschungsjahrbuch 2011 sowie 2012 veröffentlicht.

### **2.6.5 DEWEK Präsentation**

Der Entwicklungsstand der FHK bis einschließlich der statischen Windkanaltests wurden auf der DEWEK 2012 in Bremen präsentiert. Das Paper trägt den Titel " Development of a Flexible Trailing Edge Flap and System Integration Concept for Wind Turbine Blades".

### **2.6.6 Präsentation auf der IQPC Konferenz**

Zwischenergebnisse des Projektes, bezogen auf die Entwicklung der Flexiblen Hinterkante, wurden auf der IQPC Konferenz „Advances in Rotor Blades for Wind Turbines“ in Bremen am 25-27.02.2013 unter dem Präsentationstitel „A Flexible Trailing Edge for Active Flow Control on Wind Turbine Blades“ vorgestellt.

### **2.6.7 Bewerbung Innovationspreis Berlin Brandenburg**

Mit der Entwicklung der flexiblen Hinterkante, hat sich die Firma Tembra für den Innovationspreis Berlin Brandenburg 2013 beworben. Das Ziel des Preises, ist die Förderung, Präsentation und Würdigung zukunfts- und marktfähiger Entwicklungen (<http://www.innovationspreis.de/home.html>).

### **2.6.8 Artikel Windblatt**

Im Zuge eines Artikels über die aktuellen Entwicklungen bei Tembra, ist im WIND-KRAFT Journal & Natürliche Energien (Ausgabe 2/2013 33. Jahrgang) eine Zusammenfassung der neu entwickelten und zum Patent angemeldeten FHK erschienen.