

# Zustandsüberwachung im maritimen Umfeld – Erprobung einer flexiblen Stabilisierungsflosse auf einem Einsatzschiff der Bundespolizei

Christoph HEINZE<sup>1</sup>, Markus KINTSCHER<sup>2</sup>, Peter WIERACH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Hamburg  
Sportallee 54a, 22335 Hamburg, christoph.heinze@dlr.de

<sup>2</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Braunschweig

**Kurzfassung.** Rollbewegungen eines Schiffs aufgrund von Wind und Seegang haben nicht nur negative Auswirkungen auf das Wohlbefinden von Besatzung und Passagieren, sondern können auch Manöver erschweren. Gegen diese unerwünschten Bewegungen arbeiten Systeme zur Schiffsstabilisierung nach unterschiedlichen Wirkprinzipien. So erzeugen beispielsweise Schlingerkiele zusätzlichen Widerstand gegen das Rollen, während Schlingertanks als Tilger gegen Eigenschwingungen eingesetzt werden. Dagegen nutzen drehbare Flossensysteme den hydrodynamischen Auftrieb eines Körpers in der Strömung und sind damit sehr effektiv solange das Schiff Fahrt macht.

Neuere Flossentypen ermöglichen einen Kompromiss aus Stabilisierungsleistung im Vor-Anker- und In-Fahrt-Betrieb. Für eine höhere Effizienz in beiden Betriebsarten wurde eine solche Flosse im Rahmen eines geförderten BMBF-Verbundprojektes von den Partnern SKF Blohm + Voss Industries, BaltiCo GmbH und DLR weiterentwickelt. Um diese zu erreichen, wird eine speziell abgestimmte flexible Hinterkante mit einem Kern aus Glasfaserverbundmaterial eingesetzt. Neben den maritimen Umgebungsbedingungen stellen die geforderten Einsatzzeiten von mindestens 20 Jahren und eine entsprechend hohe Lastspielzahl große Anforderungen an eine serienreife Entwicklung. Eine konsequente Zustandsüberwachung würde es ermöglichen, das Langzeitverhalten und den Ermüdungszustand des flexiblen Segments zu bestimmen, als Voraussetzung für eine vorbeugende Wartung und Instandhaltung. Dazu sind, neben kontinuierlicher Messung und Auswertung, parallel Versuche zum Ermüdungsverhalten des gewählten Materials nötig.

Zur Validierung des Flossenkonzepts wurde ein solches Flossenpaar mit integrierten Sensoren an Bord des Einsatzschiffs BP26 Eschwege der Bundespolizei verbaut und mehrere Monate erprobt. Hochdynamische Strömungsbedingungen sorgen dafür, dass die Lasten, denen die Flosse ausgesetzt ist, bei der Konzipierung nur abgeschätzt werden konnten. Folglich war es kaum möglich, die Biegesteifigkeit des flexiblen Elements von vornherein exakt einzustellen. Die verteilte Dehnungsmessung, auf der die Zustandsüberwachung basiert, ermöglichte es, die Verformung im Betrieb zu bestimmen und die Weiterentwicklung des Flossenprototyps zu unterstützen.

## Einleitung

Während des Fahrbetriebes führen Schiffe unter dem Einfluss der Seewasserströmung und der Windverhältnisse mehr oder weniger ständig schwingende, zum Teil ganz unregelmäßige Bewegungen aus. Ursache hierfür ist die Lagerung des Schiffskörpers mit insgesamt sechs Freiheitsgraden in Kombination mit den einwirkenden chaotischen Wellenkräften unterschiedlicher Wirkungslinien. Eine stabile Schwimmlage ist jedoch von grundlegender Bedeutung für den reibungslosen Schiffsbetrieb und nicht zuletzt für einen gesundheitlich verträglichen Aufenthalt an Bord. Zur Reduzierung dieser Bewegung werden Schiffe mit Stabilisatoren unterschiedlichster Bauart ausgestattet. Ein sogenannter Festflossen-Stabilisator besteht aus einem oder mehreren Flossenpaaren, die an den Außenwänden des Schiffes unterhalb der Wasserlinie angebracht sind. Beginnt ein Schiff zu rollen, erzeugen die Flossen gezielt ein aufrichtendes Kräftepaar, d.h., sie bewegen sich entgegen der Wellenbewegung. Solche aktive Flossensysteme nutzen den hydrodynamischen Auftrieb eines Körpers in der Strömung und sind damit sehr effektiv solange das Schiff Fahrt macht. Über die Betriebsart „In-Fahrt“ hinaus besteht der Wunsch auch bei wenig Fahrt oder vor Anker diese unerwünschten Schiffsbewegungen reduzieren zu können. Neuere Flossentypen ermöglichen daher einen Kompromiss aus Stabilisierungsleistung im Vor-Anker- und In-Fahrt-Betrieb.

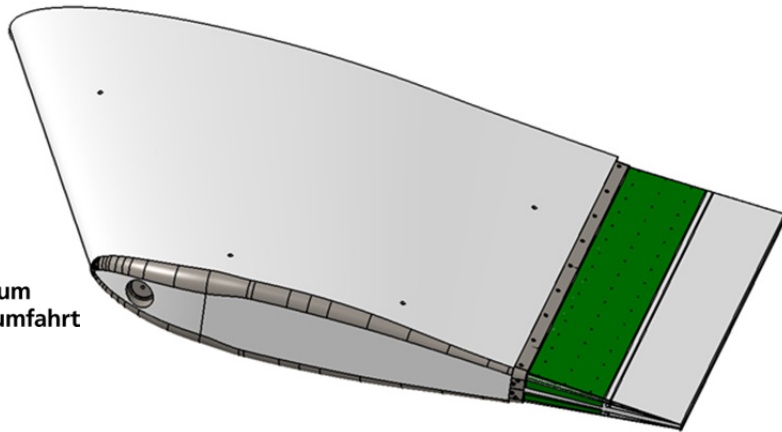
## Projektübersicht

Um den Wirkungsgrad in beiden Betriebsarten zu erhöhen, wurde eine Flosse im Rahmen des geförderten BMBF-Verbundprojektes NEWA von den Partnern SKF Blohm + Voss Industries, BaltiCo GmbH und dem DLR entwickelt (Abbildung 2). Unter der Leitung von SKF Blohm + Voss Industries und in enger Abstimmung mit der Bundespolizei und der Firma BaltiCo lag der Arbeitsschwerpunkt des DLR auf der Entwicklung der Strukturkonzepte und Materialsysteme für die Umsetzung der formadaptiven Flossenhinterkante. Ein weiterer Schwerpunkt bestand in der Entwicklung eines Systems zur Überwachung des Strukturzustands in Echtzeit. In verschiedenen Simulationsrechnungen wurden Konzepte auf ihre Realisierbarkeit hin überprüft und in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern bewertet. Nachdem diverse aktive Konzepte zur Veränderung der Flossenhinterkante untersucht wurden, wurde aufgrund der einfachen Realisierbarkeit und Robustheit eine passive Hinterkante entwickelt.



SKF Blohm + Voss Industries:	Projektleitung, Gesamtentwicklung der Stabilisatorflosse, Antrieb
Bundespolizei:	Versuchsträger Eschwege, Einbau und Test

**Abbildung 1:** Die Eschwege. Schiff der Bundespolizei als Versuchsträger. Projektpartner SKF Blohm + Voss Industries und die Bundespolizei.



BaltiCo:	Entwurf und Fertigung des Hauptflossenkörpers, Fertigung des flexiblen Elements
DLR:	Entwurf des flexiblen Elements sowie Struktur und Materialtests, OCM-System

**Abbildung 2:** CAD-Modell der Stabilisierungsflosse mit flexibler Hinterkante. Projektpartner BaltiCo und DLR.

Die Herausforderung bestand nun darin eine Hinterkante zu entwickeln, die einerseits eine maßgeschneiderte Steifigkeit besitzt, so dass sie in bestimmten Lastfällen eine hohe Flexibilität aufweist und unter den Wasserlasten zu einer großen Verformung ohne Schädigung der Struktur in der Lage ist und andererseits in einem großen Betriebsbereich eine definierte Steifigkeit besitzt, damit ein hoher Wirkungsgrad bei der Stabilisierung „vor-Anker“ erreicht werden kann. Um dies zu erreichen, wurde eine Hinterkante mit einem Kern aus Glasfaserverbundmaterial und einer äußeren Kontur aus PE-Schaum sowie PU-Haut eingesetzt. Entwurfsbegleitend wurden die Struktureigenschaften fortlaufend in einem Versuchsstand zur Zeitfestigkeit bewertet und verschiedene Varianten der Technologie untersucht (Abbildung 3).

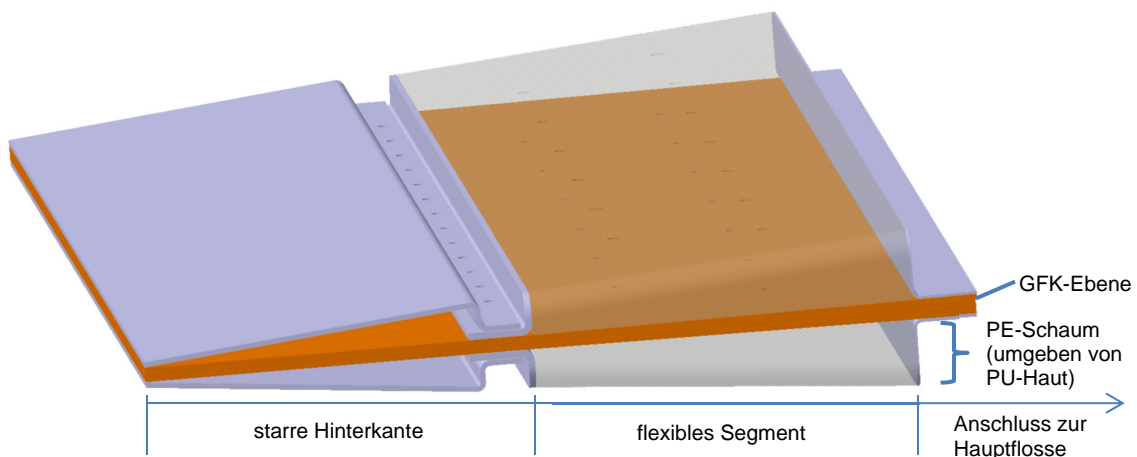


**Abbildung 3:** Untersuchung der Zeitfestigkeit der flexiblen Flossen hinterkante im Originalmaßstab.

Zur Validierung des Flossenkonzepts wurde ein solches Flossenpaar mit integrierten Sensoren von der Firma BaltiCo gefertigt und an Bord des Einsatzschiffs *BP26 Eschwege* der Bundespolizei verbaut und mehrere Monate erfolgreich erprobt (Abbildung 1).

## Konzept Zustandsüberwachung

Das flexible Element der NEWA-Stabilisierungsflosse erlaubt gegenüber herkömmlichen Systemen einen effizienteren Einsatz in den beiden Betriebszuständen Vor-Anker und In-Fahrt. Gleichzeitig stellen die auftretenden Lasten und Salzwasserumgebung besondere Herausforderungen an das Bauteil. Bei einem Serienmodell ist eine Lebenszeit von 20 Jahren bei einer Lastspielzahl im Bereich von  $5 \cdot 10^7$  vorgesehen. Unter diesen Bedingungen ist das Langzeitverhalten der meisten Materialien nicht vorhersehbar. Daher wurde ein Konzept zur Überwachung der Stabilisierungsflosse erstellt. Ein solches OCM-System (Online Condition Monitoring) soll kontinuierlich Informationen zum Status der Struktur liefern und eine Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer in Abhängigkeit der bisherigen Nutzung erlauben. Dabei stellt das flexible Segment durch die hohen Verformungen den am stärksten beanspruchten Teil dar. Ein Überwachungssystem muss demnach Aussagen zum Zustand dieses Bereiches treffen können. Als tragendes Element ist die Mittelebene aus GFK von besonderem Interesse (Abbildung 4). Eine Überwachung der PU-Haut, um etwa ein Reißen oder Verspröden festzustellen, erfordert andere Maßnahmen, die hier nicht im Detail behandelt werden sollen. Möglich wären integrierte feine Kanäle, die mit einem Fluid bei leichtem Überdruck gefüllt sind, ähnlich dem comparative vacuum monitoring [1]. Aufgrund der hohen Lebenszeit ist außerdem ein möglichst simpler und damit robuster Aufbau des Messsystems vorzuziehen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass Salzwasser in die Flosse eindringt, da Dichtheit nur zum Schiff hin sichergestellt sein muss. Das innerhalb der Flosse verbaute System muss folglich auch salzwasserresistent sein.



**Abbildung 4:** Schwanzflosse, bestehend aus flexiblem und starrem Segment (ohne äußere Verkleidung)

In Tabelle 1 werden verschiedene Verfahren zur Zustandsüberwachung der GFK-Ebene verglichen. Randbedingungen und Messaufgabe sprechen für ein Load Monitoring-System, da hier vor allem der Langzeiteinsatz und somit Ermüdungsverhalten von Interesse ist. Zusätzlich lässt sich die Messaufgabe auf wenige kritische Bereiche reduzieren in denen die größten Wechselbeanspruchungen zu erwarten sind. Ist genügend Erfahrung mit dem neuen Bauteil vorhanden, kann auch vollständig auf zusätzliche Sensoren verzichtet werden. Dann ist es möglich auf Basis der Betriebsparameter, wie Fahrgeschwindigkeit und Flossenauslenkung, Rückschlüsse auf die Lasten im Bauteil zu schließen.

Die auftretenden Belastungen können über Dehnungsmessung bestimmt werden. Dafür kommen drei Sensortypen in Frage, die in Tabelle 2 verglichen werden. Lichtwellenleiter mit Fiber-Bragg-Grating (FBG) sind für diese Aufgabe besonders prädestiniert. Die verwendeten Glasfasern sind salzwasserresistent und erzeugen keine Materialschwächung bei einer Integration in GFK. Gleichzeitig ertragen FBG deutlich mehr Lastwechsel als herkömmliche Dehnmessstreifen (DMS) [2][3].

Die verteilte Dehnungsmessung erlaubt es die Verformung der gesamten GFK-Ebene zu berechnen. Die gesuchte Materialermüdung lässt sich allerdings nur in Kombination mit aufwändigen Materialtests ermitteln. Sinnvoll ist es hier, die sehr zeitintensiven Ermüdungstests nicht komplett vor dem Einsatz der Flosse durchzuführen, sondern parallel dazu. Außerdem muss eine Korrelation zwischen den Materialermüdungstest mit definierter Amplitude und der statistisch verteilten realen Belastung gefunden werden. Zählverfahren, wie die Rainflow-Zählung, erlauben es die für eine Materialschädigung relevanten Lastzyklen in einem gemessenen Signale zu ermitteln [4].

**Tabelle 1:** Vergleich von Verfahren zur Zustandsüberwachung

Verfahren	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
<b>Eigen-schwingungs-analyse</b>	Eigenschwingungen liefern Rückschlüsse auf Zustand	mit wenigen Anregungspunkten Aussagen über gesamte Struktur	keine eindeutige Zuordnung zwischen Ursache & Wirkung (inverses Problem)
<b>Acoustic-emission</b>	Risswachstum, Einschläge und andere Ereignisse erzeugen messbaren Körperschall	passives System; wenige Sensoren	Schallsignale müssen bestimmten Ereignissen zugeordnet werden; Abgrenzung zu anderen Schallquellen (Antrieb etc.)
<b>Lambwellen-basiert</b>	aktiv erzeugte Wellen interagieren mit Schäden und erlauben deren Ortung	Schadensart, Größe, und Position bestimmbar	hoher Entwicklungsaufwand
<b>Load Monitoring</b>	Dehnung in kritischen Bereichen wird aufgezeichnet und darüber Aussagen zur Materialermüdung getroffen	passives System; wenige Sensor; einfache Datenauswertung	Materialverhalten muss in Dauerschwingversuchen bestimmt werden; nur lokale Überwachung
<b>FEM-Modell</b>	Materialbelastung auf Basis von Betriebsparametern mit einem FE-Modell bestimmen	keine zusätzlichen Sensoren nötig	detailliertes, verifiziertes FE-Modell nötig

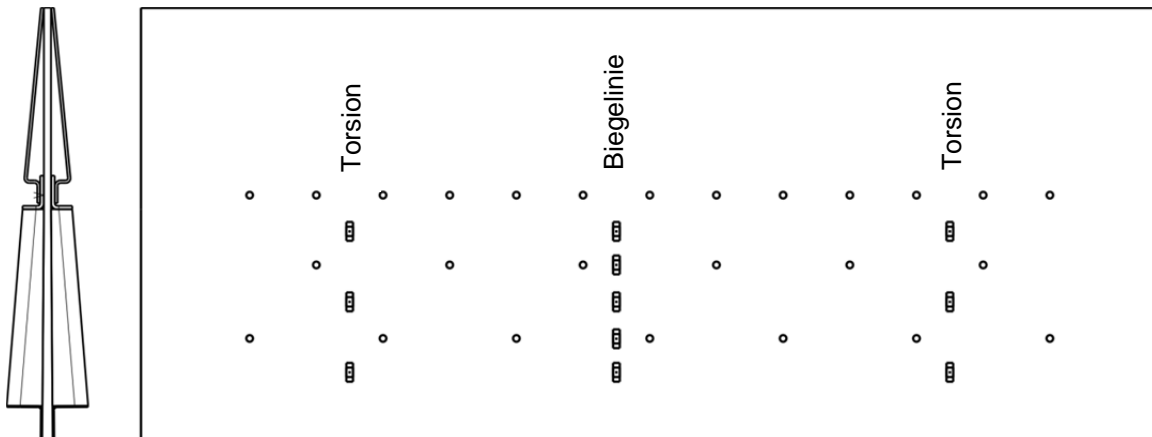
**Tabelle 2:** Vergleich von Sensoren zur Dehnungsmessung

Technologie	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
<b>Dehnmess-streifen (DMS)</b>	Änderung des elektrischen Widerstands bei Dehnung	günstig; ausgereifte Systeme für viele Anwendungen	wenig Systeme im Bereich von $10^8$ Lastspielen
<b>Lichtwellen-leiter mit Fiber-Bragg-Grating (FBG)</b>	Dehnung des Gitters ändert reflektierte Wellenlänge	Strukturkonform in GFK; langlebiger als DMS; korrosions-resistent; kein elektrisches System in der Flosse; mehrere Sensoren in einem Leiter	Temperaturkompensation nötig; neue Technologie
<b>Piezo-elektrische Keramiken (PZT)</b>	Dehnung erzeugt elektrische Spannung	langlebig	nicht geeignet bei Quasi-statischer Belastung

## Zustandsüberwachung im Prototyp

Das zuvor beschriebene Konzept des Überwachungssystems für ein Serienteil wurde für den Einsatz in den Flossen-Prototypen angepasst. In zwei der drei gebauten Flossen wurden während der Fertigung der Glasfaserebene des flexiblen Segments Dehnungssensoren integriert. Im Gegensatz zum ursprünglichen Konzept wurde hier auf Dehnmessstreifen zurückgegriffen, da nur Messwerte über sechs Monate gesammelt werden sollen. Damit genügen auch die weniger langlebigen aber günstigeren DMS den Anforderungen. Hauptaufgabe der Dehnungsmessung im Erprobungszeitraum der Flossen an Bord der *Eschwege* war der Abgleich zwischen Steuergrößen und der tatsächlichen Auslenkung der Schwanzflosse. Die Steifigkeit des flexiblen Elements muss genau abgestimmt sein, damit in den beiden Betriebsarten Vor-Anker und In-Fahrt eine optimale Leistung erzielt werden kann. Allerdings ist die exakte Vorhersage der auf die Flosse einwirkenden dynamischen Lasten und in Folge dessen auch die Verformung der Flosse nur schwer möglich.

Die Verwendung von DMS machte eine genaue Planung ihrer Platzierung nötig, da diese bei zu hohen Dehnungen sehr schnell degradieren. Spezielle DMS, die solche Belastungen länger vertragen, sind entsprechend kostenintensiv. Laut den Ergebnissen aus Finite-Element-Simulationen sind bei einem Winkel der Hinterkante von  $20^\circ$ , welcher der maximal zu erwartende Ausschlag sein sollte, Dehnung von 7000 bis 9000  $\mu\text{m}/\text{m}$  auf der Oberfläche der GFK-Mittelebene zu erwarten. Standard-DMS überstehen laut Herstellerangaben bei diesen Dehnungsniveaus keine zehn Lastzyklen. Über den Versuchszeitraum von sechs Monaten kann bei einer durchschnittlichen Periodendauer von 7s mit etwa 2 Millionen Lastzyklen gerechnet werden. Erst bei Dehnungspegeln im Bereich von 1500  $\mu\text{m}/\text{m}$  erreichen nahezu alle DMS-Varianten Lastwechselzahlen von  $10^6$  und höher. Der Einsatz von geschichteten Kompositen, wie etwa GFK, ermöglicht auch eine Integration der DMS. Bei einem Abstand von einer Lage (0,8mm) von der neutralen Faser liegen die Dehnungen bei akzeptablen 800 bis 1400  $\mu\text{m}/\text{m}$ .



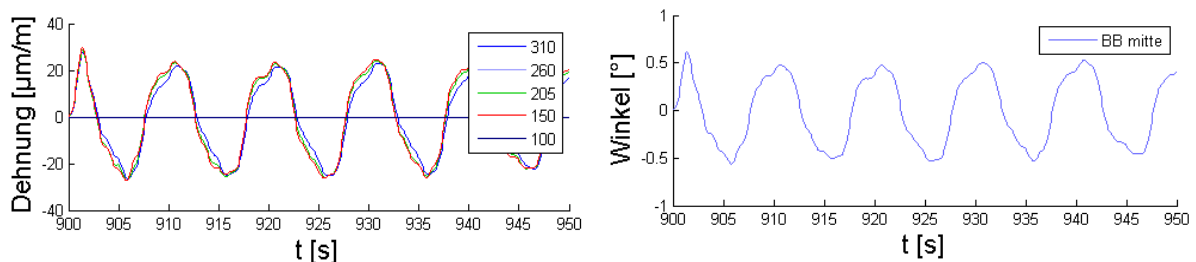
**Abbildung 5:** Position der 11 Messstellen innerhalb der GFK-Mittelebene und Benennung der Hauptfunktion jeder Sensorreihe. Kreise markieren Bohrungen zur Verbindung der PU-Außenhaut auf beiden Seiten des flexiblen Flossenteils.

Pro Flosse sind 22 DMS in drei Reihen integriert, die auch eine eventuelle Torsion der Flosse erkennen lassen (Abbildung 5). Pro Messstelle sind jeweils zwei DMS vorhanden, welche in gleichem Abstand ober- und unterhalb der neutralen Faser platziert sind. Dadurch können, im Gegensatz zu einem einzelnen DMS, reine Längsdehnungen herausgerechnet werden. Für die Berechnung der Biegelinie und damit der Auslenkung der starren Hinterkante werden nur Biegedehnungen benötigt. Längsdehnungen können sowohl durch Temperaturdehnungen entstehen, als auch durch die Folge von Nullpunktdrift bei Degradation der DMS sein. Bei der verwendeten Halbbrücken-Schaltung löschen sich

Längsdehnungen automatisch gegenseitig aus. Alle Leitungen der DMS verlaufen vom Ende der Flossen quer durch die Hauptflosse und den Flossenschaft in den jeweiligen Stabilisatorraum, in dem sich neben Flossensteuerung und -antrieb auch die Messhardware befindet. Bei der Verlegung der Kabel innerhalb der Flosse musste darauf geachtet werden, dass Lötverbinden versiegelt und Steckverbindungen wasserdicht ausgelegt werden, da ein Eindringen von Salzwasser in die Flosse nicht ausgeschlossen werden kann. Entscheidend ist der Punkt der Kabeldurchführung in den Schiffsrumpf, da hier sowohl Dichtheit sichergestellt als auch die  $\pm 60^\circ$  Verdrehwinkel ausgeglichen werden muss. Eine technisch aufwändige und kostspielige Lösung sind Unterwasser-Drehverbinder. Alternativ wurden die Kabel an beiden Enden in einer Bohrung innerhalb des Schafts der Flossenaufhängung fest eingespannt. Die Länge von einem Meter ermöglicht eine gleichmäßige Verdrehung und reduziert die Beanspruchung für die Leiter weit unter ein bedenkliches Niveau.

Im Verlauf der Messkampagne musste der Verlust einiger Messstellen festgestellt werden, wobei ein Versagen der Lötverbindungen am wahrscheinlichsten ist. Die Verkabelung auf der Oberfläche der GFK-Ebene muss auch deren Verformung folgen. Während die Kabel solche Belastungen aushalten können, sind die gelöteten Verbindungen anfällig für Wechsellasten. Wichtiger ist jedoch die Korrosion durch Meerwasser. Die Kollision einer Flosse mit Treibgut hat zwar die Funktionstüchtigkeit der Flosse nicht direkt eingeschränkt, jedoch drang vermehrt Salzwasser ein. Trotz Vorsichtsmaßnahmen zum Schutz der Lötstellen konzentrieren sich die Ausfälle auf den Zeitraum nach diesem Ereignis. Durch die Auslegung des Systems auf Redundanz und da ein Großteil der Messstellen als Viertelbrücke weiter betrieben werden konnte, blieben die Messungen beider Flossen verwertbar.

Vor der eigentlichen Datenauswertung erfolgt eine Aufbereitung der Messdaten. Dazu wird der Gleichanteil und einzelne Ausreißer entfernt bevor optional eine Filterung möglich ist. Anschließend wird aus den gemessenen Dehnungen der Winkel der Flossenhinterkante für jede Sensorreihe berechnet. Dazu wird die Krümmungsverteilung mit einer quadratischen Trendlinie angenähert. Anschließend wird diese integriert, wodurch man die Winkelverteilung erhält und die feste Einspannung an der Hauptflosse als Randbedingung hinzugenommen. Evaluiert man die Gleichung am Ende des flexiblen Elements, erhält man den Winkel der Hinterkante (Abbildung 6). Die parallel aufgezeichneten Steuergrößen der Flossen erlauben Aussagen zur Wirksamkeit der gewählten Konstruktion.



**Abbildung 6:** Gemessene Dehnungen der mittleren Sensorreihe und daraus berechneter Winkel der Hinterkante der Backbord-Flosse.

Im Anschluss an den Erprobungszeitraum wurde ein dritter Flossenprototyp durch BaltiCo und SKF Blohm + Voss Industries hergestellt. Mit Hilfe der Messungen an den beiden ersten Flossen konnte dessen GFK-Mittelebene besser an die erforderlichen Verformungen angepasst werden. Weiterhin wurde festgestellt, dass keine nennenswerte Torsion der Hinterkante auftritt. Nach dem Einbau dieser dritten Flosse folgt eine weitere Erprobung, um die Effizienz des im NEWA-Projekt entwickelten Flossenstabilisators zu quantifizieren.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03x3029C.

GEFÖRDERT VOM



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Referenzen

- [1] D. Roach, "Real time crack detection using mountable Comparative Vacuum monitoring sensors," *Smart Struct. Syst.*, vol. 5, no. 4, pp. 317–328, 2009.
- [2] Vishay Precision Group, "Ermüdungsverhalten von Vishay Micro-Measurements-DMS." Micro-Measurements, 2010.
- [3] H. C. H. Li, I. Herzberg, C. E. Davis, A. P. Mouritz, and S. C. Galea, "Health monitoring of marine composite structural joints using fibre optic sensors," *Compos. Struct.*, vol. 75, no. 1–4, pp. 321–327, 2006.
- [4] S. DOWNING and D. SOCIE, "Simple rainflow counting algorithms," *International Journal of Fatigue*, vol. 4, no. 1. pp. 31–40, 1982.