

# Simulation, Validierung und Modelloptimierung von Sandwich-FKV am Beispiel eines Hochleistungssportgeräts

Benedikt Plaumann, Thomas Gumpinger und Dieter Krause  
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik;  
Technische Universität Hamburg-Harburg*

## 1 Einleitung

Dieser Aufsatz befasst sich mit einem neuartigen konstruktiven Konzept für ein Kiteboard mit an die Betriebszustände angepasster Steifigkeit. Beim *Kitesurfen* oder auch *Kiteboarden* bewegt sich der Sportler/Fahrer mit Hilfe der Zugkraft eines großen Lenkdrachens und dem dynamischen Auftrieb eines Brettes (*Kiteboard*) über das Wasser. Der Zug des Lenkdrachens, im Englischen *Kite*, wird über das *Kiteboard* an den Füßen des Fahrers in eine Bewegung in die gewünschte Richtung umgewandelt.



Abbildung 1: Ober- und Untersicht eines herkömmlichen Kiteboards (links), Kitesurfen beim Fahren (Mitte), typischer Kite (rechts).

Das Kiteboard hat mehrere Funktionen zu erfüllen, im Folgenden seien die wichtigsten aufgeführt. Ein Kiteboard muss:

- dynamisch Auftrieb erzeugen gegen ein Einsinken ins Wasser beim Fahren und für Sprünge (dies schließt die Aufnahme der Gewichtskraft des Fahrers ein),
- Querkräfte (senkrecht zur Fahrtrichtung und zur Vertikalen) übertragen,
- ein einfaches, Steuern und schnelles Ändern der Fahrtrichtung erlauben,
- eine gewisse Nachgiebigkeit aufweisen für ein ruhiges Fahrverhalten.

Der Fahrer steht mit seinen Füßen auf den Fußpolstern (Footpads) des Brettes, die zusammen mit den Fußschlaufen (Footstraps) eine möglichst feste, spielfreie Verbindung zwischen Fuß und Brett ermöglichen. Um hydrodynamische Strömungsaspekte zu erfüllen, verfügen marktübliche Kiteboards über eine in zwei Ebenen gebogene Geometrie mit unterschiedlichen Dicken.

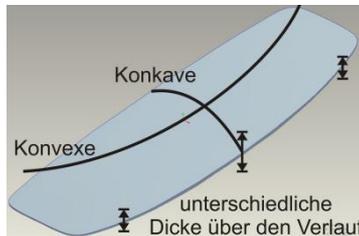


Abbildung 2: Komplexe Geometrie eines handelsüblichen Kiteboards.

## 1.1 Leichtbau

Kitesurfen beschränkt sich nicht nur auf ein reines Fahren, sondern schließt auch Sprünge ein. Neben den Maximalen Weite und Höhe der Sprünge können die Sprünge auch mit Rotationen und komplexen Figuren verbunden werden. Für ein agiles Verhalten möchte man möglichst geringe Trägheitsmomente durch ein reduziertes Eigengewicht des Kiteboards erreichen, um den Sportler nicht unnötig einzuschränken.

Wegen der hervorragenden Funktionserfüllung bei geringem Gewicht ist die Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) bei marktüblichen Kiteboards Standard. Diese Leichtbauwerkstoffe werden weiterhin mit einer Sandwich-Bauweise kombiniert, um bei der vorherrschenden Biegebelastung

durch Anordnung der tragenden Schichten möglichst weit von der neutralen Faser entfernt und damit Vergrößerung des Steiner-Anteils im Flächenmoment weiter Gewicht einsparen zu können, siehe auch [1].

## 1.2 Gewünschtes Verhalten der Steifigkeit

Ähnlich wie beim Snowboarden spielt das Steifigkeitsverhalten des Brettes eine wichtige Rolle. Ein biegeweiches Board kann leichte Erschütterungen gut abfangen und ermöglicht - eine ausreichende Dämpfung vorausgesetzt - ein angenehmes, ruhiges Fahrverhalten. Der Zielkonflikt besteht darin, dass ein biegesteifes Board hingegen ein gutes Folgeverhalten bei stärkeren Änderungsbewegungen des Fahrers ermöglicht, da wenig Verformung auftritt. Bei starker Durchbiegung eines weichen Boards während des Absprungs verändert sich die Unterwasserform so erheblich, dass ein starkes Abbremsen eintritt, der Fahrer verliert viel an Geschwindigkeit und erhält möglicherweise auch einen ungewollten Drehimpuls, sollte das nun stark gebogene Board noch angestellt gewesen sein. Weiterhin geht dabei Bewegungsenergie für den Absprungvorgang verloren, da sie nicht elastisch im Brett gespeichert wird, sondern fast vollständig dazu benötigt wird, das unter dem Brett befindliche Wasser zu verdrängen.

Es werden folgende Betriebszustände unterschieden:

- Reiner *Fahrzustand* bei geringer bis mittlerer Belastung: Die Belastung des Boards durch Krafteinleitung an den Fußpunkten ist schwelend wegen kleiner Unebenheiten der Wasseroberfläche. Diese ist in den seltensten Fällen wirklich glatt, meistens findet man wind- und welleninduziertes Kabbelwasser vor.
- Zustand beim *Absprung*: Die Belastung ist hier die höchste, direkt herbeigeführte und variiert je nach Masse des Fahrers, seiner sportlichen Verfassung und seiner aktuellen Intention. Die Kennwerte des Betriebspunktes können also variieren.
- Zustand nahe der *Maximalbelastung*: Oberhalb dieser Schwelle versagt das Board. Dieser Zustand tritt zum Beispiel bei ungünstigen Landungen nach sehr hohen Sprüngen ein, bei denen höhere Belastungen auftreten können als beim reinen willkürlichen Absprung.



### 1.3 Ableiten des Ziels

Der Sportler kann beim Erwerb eines Boards üblicherweise zwischen biegeweichen und biegesteifen Boards wählen. Dabei ziehen Profi-Fahrer gewöhnlich biegesteifere Boards vor, weil sie die geringe Verformung beim Absprung für wichtig erachten. Anfänger bevorzugen ruhig fahrende und Fehler verzeihende biegeweiche Bretter. Bei fortgeschrittenen Fahrern stellt die Wahl der Steifigkeit des Boards ein Problem dar, welches durch einen mittelsteifen Kompromiss nur unbefriedigend gelöst werden kann. Was in allen Fällen wünschenswert wäre, ist ein Board, welches sich biegeweich beim Fahren und ab einer gewissen Belastung deutlich biegesteifer verhält, siehe Abbildung 3. Diese zustandsabhängige Änderung des Steifigkeitsverhaltens ist das Ziel des vorgestellten Lösungsansatzes. Die ausreichende Dämpfung ist heute bei marktüblichen Kiteboards durch entsprechende Bauweise realisiert.

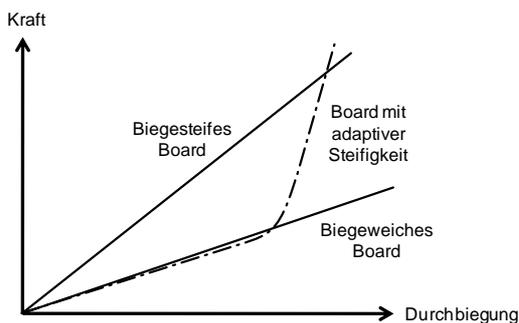


Abbildung 3: Durchbiegung von biegesteifen und -weichen marktüblichen Boards. Eine adaptive Steifigkeit kann die Vorteile beider verbinden.

## 2 Konzept der adaptiven Steifigkeit

Das verwendete Konzept zur betriebspunktabhängigen Anpassung der Steifigkeit beruht auf einer unterschiedlichen Kopplung der Biegeflächenmomenten zweier aufeinander aufliegenden Körper. Zur Verdeutlichung wird zunächst die Mechanik des Wirkprinzips erläutert:

Zwei ideale Biegebalken mit gleichem Elastizitätsmodul, identischen Abmessungen und damit auch gleichem axialen Flächenmoment zweiter Ordnung liegen aufeinander. Von Interesse ist das unterschiedliche Biegeverhalten, wenn einmal beide Balken lose aufeinander liegen und auch aufeinander gleiten können, und wenn beide Balken ideal miteinander, quasi zu einem Bauteil, verbunden sind. Reibung sei zunächst vernachlässigt.

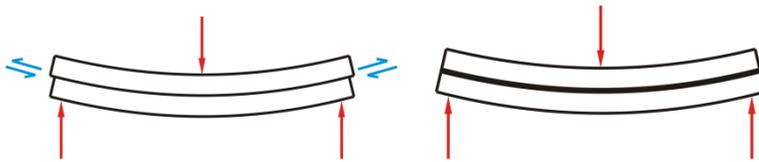


Abbildung 4: Zwei identische Biegebalken, lose gleitend (links) und ideal mit einander verbunden, quasi „verklebt“ (rechts).

Im ersten Fall „lose gleitend“ addieren sich die Flächenmomente der identischen Balken, während im zweiten Fall „verklebt“ das Flächenmoment  $I$  neu berechnet werden muss, wobei die Höhe  $h$  (doppelte Höhe eines Balkens) mit dem Exponenten 3 eingeht.

$$I = b \cdot h^3$$

Für den hier vorgestellten Fall mit identische Balken, etc. ergibt sich eine Zunahme der Steifigkeit wenn die Balken nicht mehr aufeinander gleiten können um den Faktor 4 gegenüber dem ersten Fall. Die Breite  $b$  des Querschnitts hat hingegen wenig Einfluss.

## 2.1 Realisierung des Wirkprinzips

Das gewählte Wirkprinzip der gleitenden oder fixierten Balken wurde zur Anwendung bei einem Kiteboard weiterentwickelt. Dazu wurden auf der Oberseite des Boards Biegebalken angebracht, welche in Längsrichtung auf dem Board geführt sind. So können sich die Balken sich in Längsrichtung gegenüber dem Board verschieben. Auf der Unterseite des Boards können keine Maßnahmen ergriffen werden, da hier die Geometrie nur Strömungsaspekten folgt.

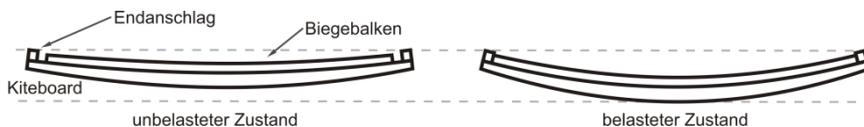


Abbildung 5: Realisierung der Fixierung der Balken zueinander ab einer bestimmten Verformung durch Endanschläge.

Der Fall, dass ein Gleiten der Biegebalken auf dem Board möglich ist, wird für den Fahrzustand mit biegeweichem Verhalten verwendet (siehe linke Darstellung in Abbildung 5). Die Fixierung der Balken relativ zum Board für den biegesteifen Fall wird durch Endanschläge realisiert (siehe rechte Dar-

---

stellung). Gleiten die Balken durch Biegung der Gesamtkonstruktion in die Endanschläge, so tritt nur eine vergleichsweise geringe Stauchung der Balken auf, da die für die Biegung benötigten starken Decklagen in Längsrichtung sehr geringe Druckverformung aufweisen. Im Vergleich zur großen auftretenden Durchbiegung kann nun annähernd von einer Fixierung der Balken gegenüber dem Board über der ganzen Kontaktlänge gesprochen werden. Die Durchbiegung ist in dem Fall der Fixierung deutlich geringer als die Durchbiegung bei lose gleitenden Balken. Der Wechsel zwischen weichem und steifem Verhalten tritt auf, sobald die Balken in die Endanschläge fahren. Diese adaptive Anpassung ermöglicht ein biegeweiches Verhalten beim Fahren in Kabelle Wasser ebenso wie ein steifes Verhalten mit begrenzter Durchbiegung beim Absprung, siehe Abbildung 5.

Durch eine Verstellbarkeit der Anschläge kann der Punkt, ab dem eine Versteifung des Boards auftritt, entsprechend dem Fahrergewicht und persönlichen Vorlieben frei gewählt werden.

### 3 Auslegung mit Modellierung und Simulation

Das in Kapitel 2.1 vorgestellte Konzept wurde in einem ersten Entwicklungsansatz ausgearbeitet. Die Auslegung der Komponenten erfolgte unter Zuhilfenahme einer Simulation auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM), da die komplexen Geometrien eine vereinfachte Grundlagensbetrachtung wie in Kapitel 2 nicht mehr zulassen.

Im konsequenten Leichtbau, wie er bei einem Hochleistungssportgerät mit hohen mehraxialen Beschleunigungen und Belastungen notwendig ist, sind Unsicherheiten möglichst weit zu minimieren. Diese können sich beispielsweise auf die Ergebnisse von Simulationen mit vereinfachenden Modellen, oder einen unzureichenden Datenbestand der in der Realität auftretenden Belastungen beziehen. Die aus Unsicherheiten resultierenden „Angstzuschläge“ bei den Sicherheitsfaktoren bedeuten eine Gewichtserhöhung. Als Folge gilt es im Leichtbau, Unsicherheiten möglichst weit zu reduzieren, so dass bei gegebener Sicherheit eine maximale Ausnutzung der Konstruktion erreicht wird. Dazu eignen sich insbesondere Versuche zur Verifizierung von Modellen und Validierung von Rechenergebnissen. Zum Abgleich zwischen Simulation und Versuch musste auf eine realitätsnähere Versuchsumgebung verzichtet werden, da zum einen der Bestand an belastbaren Daten nicht ausreichend war und zum anderen, da die mehraxialen, schnell wechselnden Belastungen nicht reproduzierbar eingebracht werden können. So kann in der Realität z.B. die vom Wasser benetzte Fläche der Unterseite des Boards innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde zwischen 0 und 100% schwanken.

Es muss sichergestellt werden, dass der vergleichende Versuch sowohl am realen Prototypen als auch im rechnerischen Modell reproduzierbar und annähernd identisch durchgeführt werden kann. So wurde ein klassischer 4-Punkt-Biegeversuch als Vergleichsversuch gewählt. Als Kenngröße für den Abgleich wurde die Durchbiegung in der Mitte des Boards gewählt. Diese ist in Simulation und Realität einfach und reproduzierbar messbar und bildet die unterschiedlichen Belastungszustände hinreichend genau ab.

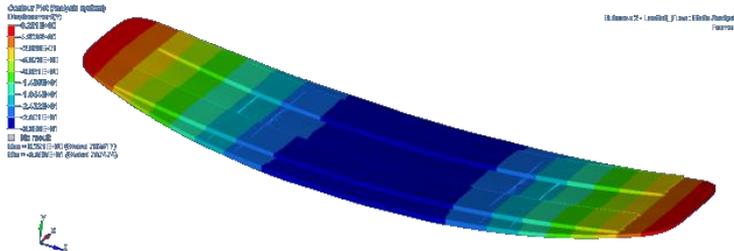


Abbildung 6: Durchbiegung im 4-Punkt-Biegeversuch als Kenngröße zur Quantifizierung der Steifigkeit.

### 3.1 Ausgewählte Aspekte der Modellierung

Die Wahl einer Faserverbund-Sandwich-Bauweise bedeutet anisotrope Materialeigenschaften, welche für eine Auslegung zu berücksichtigen sind. Auch in einer FEM-Analyse ist die Umsetzung des anisotropen Materialverhaltens zusammen mit einem nicht-linearem Verhalten der Balken beim Gleiten in die Endanschlüsse in ein ausreichend realitätsnahes Simulationsmodell komplex und bedingt eine Unsicherheit bezüglich der Korrektheit der Ergebnisse. Daher müssen Modelle und Ergebnisse in Versuchen mit Prototypen verifiziert bzw. validiert werden.

Es wurde ein herkömmliches Kiteboard als Muster modelliert und durch Finite Elemente für eine Simulation abgebildet. Durch die Wahl eines Boards auf dem aktuellen Stand der Technik kann gewährleistet werden, dass wichtige hydrodynamische Anforderungen erfüllt werden. Der hydrodynamische Strömungsaspekt liegt nicht im Fokus dieser Arbeit.

---

Wichtige Aspekte der Modellierung zur FEM-Simulation sind:

- Einleitung der Belastungen als Linienlasten in mehrere Knoten
- Modellierung des Materialverhaltens der Sandwich-Bauweise mit anisotropem Verhalten der FKV-Deckschichten
- Modellierung der kinematischen Kopplung zwischen Biegebalken und Board. In der Realität liegt ein Kontaktverhalten mit reibungsbehafteter Verschiebung gegeneinander vor.

Als Ergebnis der FEM-Simulationen wurden Aussagen für Entscheidungen bei der Auslegung erwartet. Wichtige Ergebnisse waren:

- Erkenntnisse zum Laminataufbau und die damit erwarteten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften (vor allem die Durchbiegung).
- Kräfte in den Endanschlügen
- Kräfte auf Schraubenverbindungen in Langlöchern

### 3.1.1 Das Materialmodell

Das Materialmodell muss Laminataufbau, Werkstoffgesetze, -verhalten und -kennwerte abbilden, [2]. Nachdem alle erforderlichen Daten und Materialgesetze im Materialmodell zusammengestellt worden sind, muss allerdings in einem Abgleich von Versuchen am ersten Prototypen mit den Ergebnissen der Simulation das Modell verifiziert werden. Im vorliegenden Fall wurde an dieser Stelle eine Optimierung des Modells notwendig, die zwei Schritte beinhaltet: Dem Ausgleich von Modellfehlern durch Hinzufügen von Offsets und eine Modellerweiterung mit feinerer Detaillierung.

#### *Optimierung: Ausgleich Modellfehler*

Im Modell des Kiteboards aus Finiten Elementen bestehen der Kern aus dreidimensionalen Quaderelementen und die Laminatdeckschichten aus zweidimensionalen Schalenelementen. Die Deckschichten sind ideal mit den Kernelementen verbunden, indem die jeweiligen Elemente an der Kontaktoberfläche die gleichen Knoten verwenden. Da die zweidimensionalen Schalenelemente in der rein theoretischen Betrachtung zunächst keine Dicke besitzen, liegen diese dabei quasi als eine unendliche dünne Schicht auf der Kernmodellierung. Dies ist in Abbildung 7 visualisiert. Dabei ist die

---

theoretische unendliche dünne Deckschicht durch eine dünne Linie angedeutet.

In einer Simulation auf Basis des Modells wird für die Berechnung der Elementeigenschaften allerdings eine Dicke eingeführt. Alle Spannungen in dem Element sind auf die Querschnittsfläche bezogen. Diese künstliche „Aufdickung“ erfolgt dabei symmetrisch zu beiden Seiten, wenn nicht anders vorgegeben. Da der Kern kaum zur Steifigkeit beiträgt und nur zur Übertragung des Schubs und zur Distanzierung der Deckschichten dient, kann die geringe Überschneidung in diesem Punkt häufig vernachlässigt werden. Allerdings trägt eine nicht zur Bezugsebene symmetrische (Teil-)Struktur über den Steiner-Anteil mit quadratisch steigendem Einfluss zum Flächenmoment bei. Da die Eigenschaften der Deckschicht bei dieser Modellierung einen Steiner-Anteil zugewiesen bekommen, der zu dicht am Kern liegt, fällt die Steifigkeit der Gesamtstruktur geringer aus als bei korrekter Modellierung. Dies ist in Abbildung 7 erkennbar, die Dicke der Gesamtstruktur ist in der Mitte größer als links und bildet die reale Dicke korrekt ab. Der Fehler wird laut Expertenaussage seitens des Softwareherstellers in der Industrie üblicherweise in Kauf genommen, da die Änderung des Abstandes zur Kernmitte vergleichsweise gering ist. Das resultierende Problem ist im vorliegenden Fall allerdings nicht vernachlässigbar, da die Kerndicken relativ gering zu den Laminatdicken sind. Es kann jedoch behoben werden, wenn die Deckschichten über ein Offset im Modell vom Kern entfernt werden.

#### *Optimierung: Erweiterung des Modells*

Beim Abgleich von Messwerten des ersten Prototyps mit den Simulationsergebnissen der ersten Iterationsschleife zeigt sich, dass das Gewicht - eine wichtige Kenngröße zur Verifizierung - nicht übereinstimmt. Anders als im Modell zunächst vereinfacht abgebildet, sind Kontaktschichten zwischen Deckschichten und Kern und die Schutzschicht (Finish) zunächst nicht im Modell berücksichtigt, da das Harz einen eher vernachlässigbaren Einfluss auf die Steifigkeit hat. Allerdings führt die zusätzliche Aufdickung der Schichten in der Berechnung wiederum zu einem größeren Steiner-Anteil im Flächenmoment. Die Einführung dieser Finish-Schicht und der Kontaktschichten aus reinem Harz im Materialmodell, wodurch die korrekte Dicke des Gesamtlaminats beschrieben wird, bedingt aber auch eine Änderung des relativen Faservolumenanteils. Die Betrachtung wurde so differenziert, dass die Laminatschichten nun einen höheren Faservolumenanteil aufweisen als zuvor mit dem global gemittelten, da die reinen Harzanteile separat im Modell vorkommen. Die Dicke der Faserschichten wurde durch Messung der „trockenen“ Fasereinheiten bestimmt. Bezogen auf das so definierte Volumen der Faserschichten muss ein sinnvoller Faservolumenanteil für das beschriebene Volumen fest-

gelegt werden, da die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der einzelnen Laminatschichten im Gesamtlaminat über den jeweiligen Faservolumenanteil bestimmt wird. Entsprechend der Quellen [3] und [4] wurde der Faservolumen  $\varphi$  neu zu 45% definiert, was nahe dem fertigungstechnischen Maximum unter den gegebenen Umständen - Gelege und Gewebe in Handfertigung und anschließender Vakuumhärtung - liegt. Dies ist gerechtfertigt, da auftretende Harzüberschüsse schon in den zusätzlich eingeführten Harzschichten berücksichtigt wurden. Pro Volumen der Fasereinheit ist nur die Durchtränkung dieser Einheit ohne zusätzliche Vergrößerung des Gesamtvolumens zu berücksichtigen.

Die Optimierung Materialmodell ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

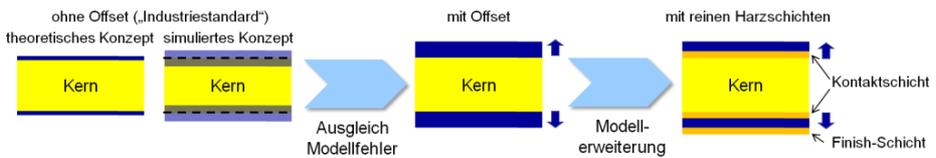
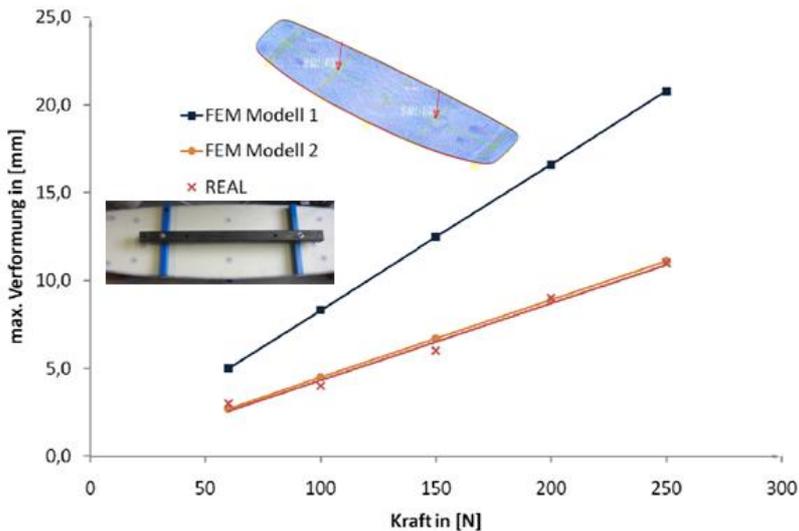


Abbildung 7: Ausgang und durchgeführte Modelloptimierung.

Mit dem optimierten Materialmodell konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung am realen Prototyp erreicht werden.



---

Abbildung 8: Durchbiegung des Kiteboards (ohne Biegebalken), Simulation mit dem ursprünglichen, dem optimierten FEM Modell und Messung am Prototyp.

### 3.1.2 Modell der kinematischen Kopplungen

Die Anbindung der Biegebalken an das Kiteboard ist der nächste wichtige Schritt zur vollständigen Simulation. Zur Vereinfachung kann die Untersuchung auf zwei Zustände beschränkt werden: Einmal sind die Biegebalken von Anfang an in den Endanschlüssen fixiert, im anderen Fall können sie über die volle Länge frei gleiten. Allerdings ist die computergemäße Modellierung des Kontaktproblems, wie es am flächigen Oberflächenkontakt und an den Langlochführungen zwischen Biegebalken und Board vorliegt, schwierig [5], da das Kontaktverhalten ein besonders schwer zu berechnendes nichtlineares Verhalten darstellt [2]. Im Fall der frei gleitenden Balken muss zusätzlich die Verschiebbarkeit an den Kontaktstellen gewährleistet werden. Die Verschiebung ist in der Realität weiterhin mit Reibung, einem weiteren nichtlinearen Verhalten, behaftet. Die Modellierung des Kontaktverhaltens der komplexen Geometrien bei den auftretenden kleinen, aber nicht zu vernachlässigenden Verschiebungen wird derzeit weiter untersucht, da bislang nur qualitative Aussagen aus der Simulation mit Board und Biegebalken abgeleitet werden konnten. Neue Funktionen der Software ermöglichen hier Fortschritte, wobei allerdings die Berücksichtigung von Reibung weiterhin ein Thema zukünftiger Forschung bleiben wird.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von einem Wirkprinzip wurde ein Konzept in einem ersten Entwicklungsansatz ausgearbeitet, um bei Kiteboards eine nach Betriebspunkt veränderliche Steifigkeit zu realisieren. Kiteboards sollten im reinen Fahrzustand relativ biegeweich und ab einer gewissen Verformung deutlich biegesteifer sein um weitere Verformung einzuschränken. Das Konzept wurde mittlerweile zum Patent angemeldet.

Die Auslegung wurde durch Simulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode unterstützt. Da üblicherweise durchgeführte Vereinfachungen bei der Modellierung der höchst anisotropen Materialeigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden in Sandwichbauweise und bei der Modellierung der kinematischen Kopplungen als kritisch erkannt worden waren, wurde eine Validierung an einem realen Prototyp (Abbildung 9) durchgeführt. Es zeigte sich, dass eine Modelloptimierung notwendig ist. Während das Materialmodell mit seinen zahlreichen Besonderheiten nach der Modelloptimierung valide

Ergebnisse liefert, ist bei der Modellierung der kinematischen Kopplungen zwischen Board und Biegebalken noch weitere Forschungsarbeit notwendig.

Mit einem in den notwendigen Punkten zutreffenden Modell für eine Simulation könnten in Zukunft beispielsweise Zustände des praktischen Gebrauchs untersuchen, deren genaue Bestimmung durch Messung vielfach kaum möglich wäre. Dies bietet interessante Möglichkeiten für Verbesserungen.



Abbildung 9: Fahrbereiter Prototyp des Kiteboards.

## Literatur

- [1] Krause, D.: Gestalten von Leichtbau-Produkten – Potential und Grenzen von Faserkunststoffverbunden. Industrie-Seminar, Hamburg 2007
- [2] Bathe, K.-J.: „Finite-Elemente-Methoden“, Springer-Verlag, Berlin 2002, 2. Auflage.
- [3] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: „Handbuch Faserverbundwerkstoffe“, R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, Waldenbruch, 2009.
- [4] Schürmann, H.: „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, Springer-Verlag, Berlin, 2007, 2. Auflage.

- 
- [5] Klein, B.: „FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode“, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2003, 5. Auflage.