

Hochsteife, ultraleichte CFK-Trägerstrukturen für den ATLAS-Pixeldetektor

Norbert Himmel ¹, Thomas Pfaff ¹, Uwe Schmitt ¹, Karl-Walter Glitza ²

¹ Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 67663 Kaiserslautern

² Fachbereich Physik, Bergische Universität Wuppertal

Abstract

Im Jahr 2006 wird am CERN zur Suche nach bisher nicht entdeckten Elementarteilchen der weltweit größte und leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger mit eingebauten Experimenten wie ATLAS in Betrieb genommen. Die Aufgabenstellung ist die Entwicklung einer CFK-Trägerstruktur für den Pixeldetektor innerhalb des Experimentes ATLAS. Da das Bauteil nur wenige Zentimeter vom Kollisionspunkt der Teilchen entfernt eingebaut wird, wird ein möglichst geringer Masseinsatz in einer Bauweise mit extrem engen Toleranzen unter Einsatz hochsteifer, strahlungsbeständiger Verbundwerkstoffe gefordert. Der Vortrag beschreibt die Konstruktion und die Auslegung des Bauteils, die Fertigung und Vermessung eines Prototypen sowie daraus abgeleitete Ansätze zur Optimierung.

Keywords

Elementarteilchenphysik, ATLAS-Pixeldetektor, Trägerstruktur, Faser-Kunststoff-Verbund, CFK

1 Einleitung

1954 unterzeichneten 12 Länder eine Konvention zur Gründung des Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN), mit Sitz in Genf (Schweiz). Aufgabe des CERN ist die Untersuchung des Aufbaus der Materie und der diese zusammenhaltenden Kräfte. Das CERN ist heute das weltweit größte Forschungszentrum auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik, in dem nahezu 3000 Angestellte am CERN und weitere 6500 Wissenschaftler (immerhin die Hälfte der weltweit tätigen Elementarteilchenphysiker) aus 500 Universitäten und über 80 Nationalitäten arbeiten. Für diese Forschungsarbeit stehen Beschleuniger, die Teilchen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigen, und Detektoren, welche die Reaktionsprodukte nach der Kollision sichtbar machen, zur Verfügung. Bis vor kurzem war der 1989 in Betrieb genommene „Large Electron-Positron Beschleuniger (LEP)“ im Einsatz, der 2006 durch den „Large Hadron Collider (LHC)“ ersetzt werden soll. LHC nutzt den 100 m unter der Erdoberfläche liegenden Tunnel des LEP mit einem Umfang von 27 km (siehe Bild 1). Bei einer maximalen Energie von 14 TeV, die dem Zehnfachen der bisher erreichbaren Energie entspricht, soll mit Hilfe des LHC die Existenz des sogenannten HIGGS-Teilchens, nachgewiesen werden. ATLAS ist eines der Experimente, die in den LHC eingebaut werden.

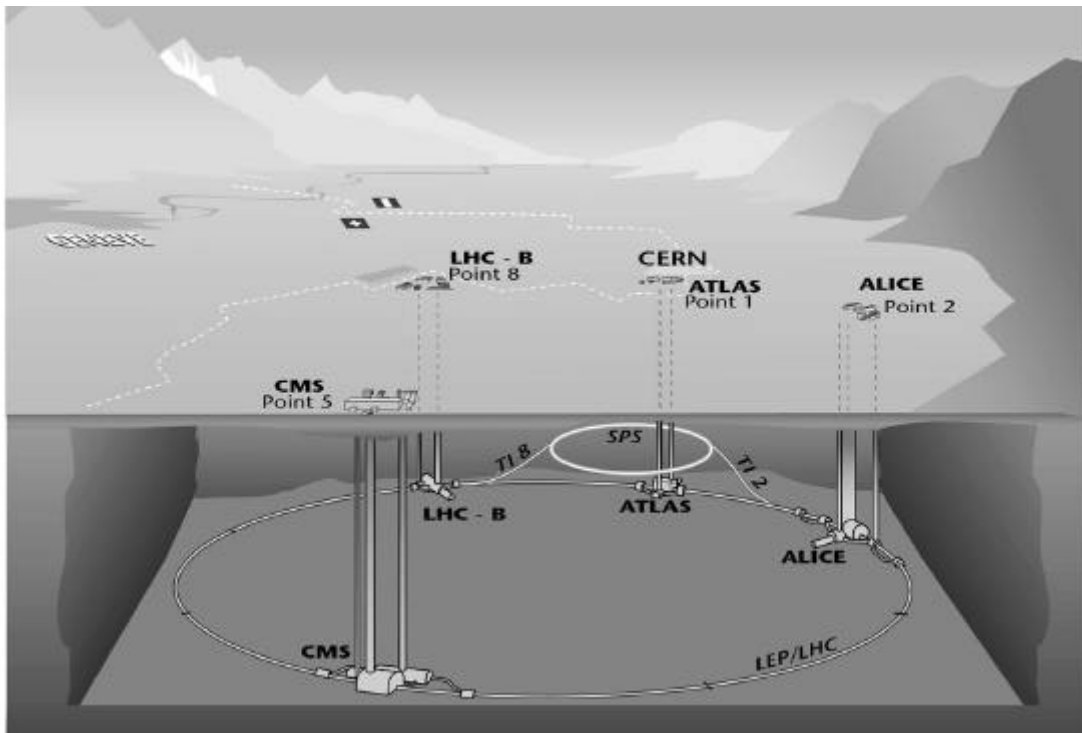


Bild 1 : „large hadron collider LHC“ und ATLAS-Experiment

2 Aufgabenstellung

Die zu entwickelnde Trägerstruktur ist Teil des ATLAS-Experiments (vgl. Bild 2).

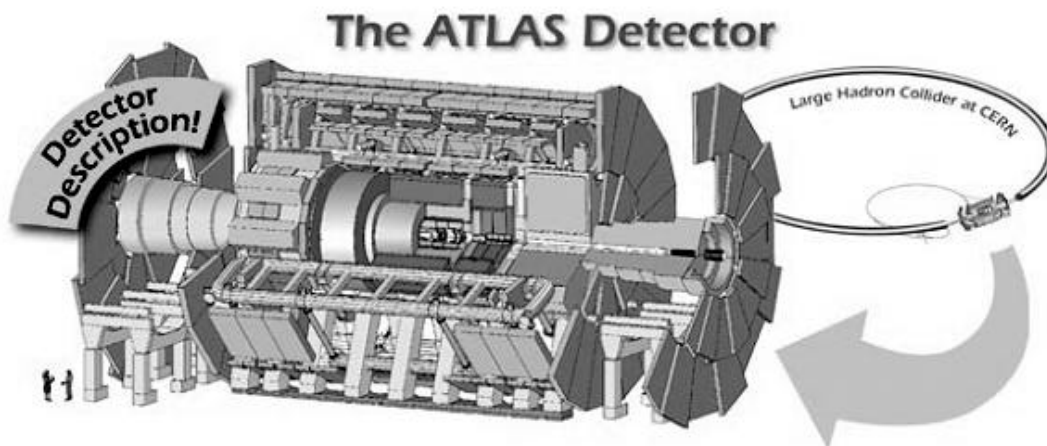


Bild 2 : ATLAS-Experiment (ATLAS Detektor)

Der ATLAS Detektor ist 40 m lang, der Durchmesser ist 20 m und seine Masse liegt bei 7000 Tonnen. In Bild 3 ist der innere Detektor (Inner Tracker) hervorgehoben. Teil des inneren Detektors ist der Pixel Detektor, der mit 140 Millionen Siliziumsensoren (pixels mit den Abmessung $50 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$) zur möglichst exakten Bestimmung der Position der bei der Teilchenkollision erzeugten Reaktionsprodukte ausgestattet ist. Die Sensorpunkte sind in Modulen zusammengefasst, die mit Hilfe von Trägerstrukturen („staves“ oder „disks“) auf drei Zylinderschalen konzentrisch um den LHC-Teilchenstrom herum bzw. auf drei Scheiben an beiden Enden des Pixeldetektors befestigt sind.

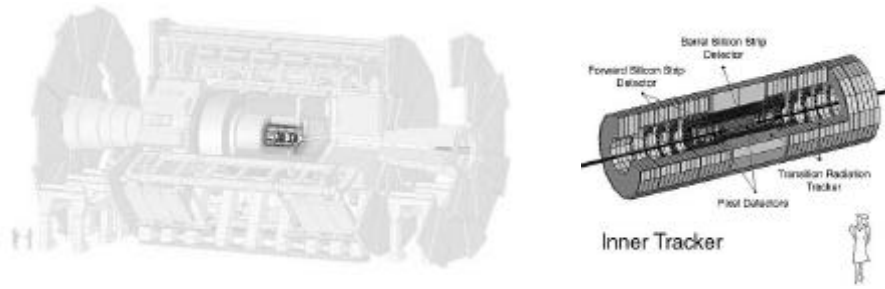


Bild 3 : Links hervorgehoben: Innerer Detektor (Inner Tracker); rechts: Innerer Detektor mit Pixeldetektor

Aufgabe des IVW ist, die beiden äußeren Zylinderschalen (layer 1 und 2) zu konstruieren (Programm Pro/ENGINEER), mit der Finite-Elemente-Methode (ANSYS) zu berechnen, einen Prototypen zu fertigen und Geometriemessungen zur Ermittlung der Bauteiltoleranzen sowie zur Validierung der Auslegungsmodelle und –rechnungen durchzuführen.

3 Konzept, Konstruktion

3.1 Vorgaben

Startpunkt der Aufgabe war die Vorgabe des Konstruktionsfreierraums, der sich größtenteils aus der vorgegebenen Position der stabförmigen Pixelträger (Stave) ergibt. Die Zylinderschale sollte zur einfachen Montage, Demontage und Vermessung der Staveposition aus Halbschalen aufgebaut werden. Weiterhin war die Aufhängeposition der Zylinderschale in die übergeordnete Tragstruktur festgelegt. Die Forderung nach sehr geringen Fertigungstoleranzen (kleiner 0,030 mm), hohe Maßhaltigkeit beim Abkühlen ($\Delta T=30^\circ \text{ C}$) und infolge Feuchtequellung, geringe Durchbiegung durch Eigengewicht und Stavemasse, hohe Strahlenbeständigkeit, hohe Eigenfrequenz und eine Lebensdauer von 10 Jahren setzen extrem hohe Ansprüche sowohl an die einzusetzenden Werkstoffe als auch an die Fertigung und Bauweise.

3.2 Bauweise

Um die geforderte Präzision der Schale zu erreichen, wurde eine möglichst einfache Bauweise gewählt (siehe Bild 4). Ebene bzw. einfach gekrümmte Laminare mit geringer Biegesteifigkeit sollten durch hochgenau gefertigte Vorrichtungen zu präzisen Baugruppen zusammengesetzt werden, die erst als Komplettzylinder ihre volle Steifigkeit und Maßgenauigkeit erreichen.

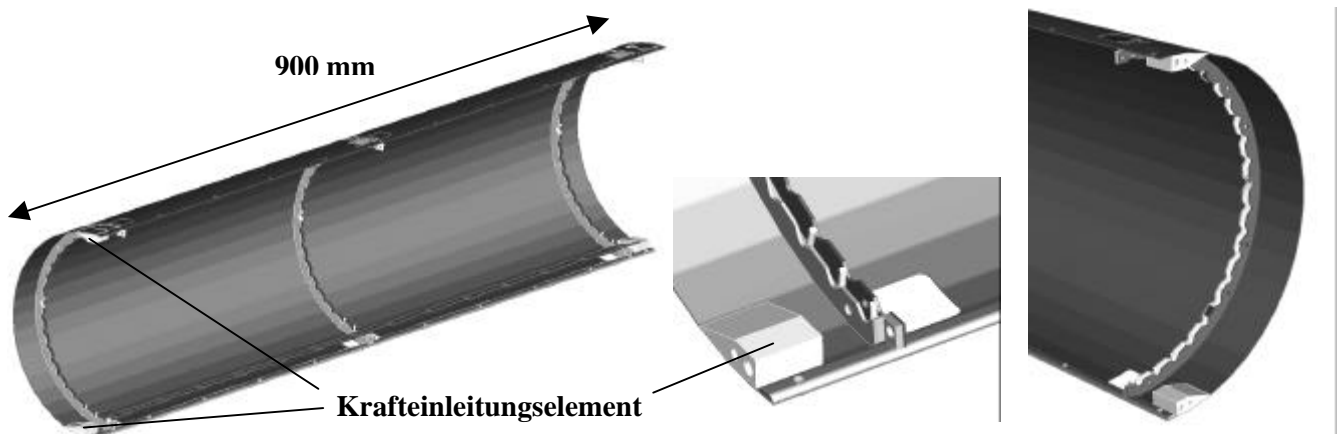


Bild 4 : CAD-Modell der Halbschalenstruktur

Die beiden Halbschalen haben zur Fixierung und Positionierung der Staves sowie zur Aussteifung der Schalenmembran drei Verstärkungshalbringe. Zur Aufhängung der kompletten Zylinderschale in die Tragstruktur sind an den Enden PEEK-Krafteinleitungselemente befestigt.

Durch Aufteilen der Struktur in zwei Halbschalen entstehen zwei weitere Fügestellen. Zum einen werden die Halbringe an ihren beiden Enden durch Passschrauben und Passflächen kraft- und momentenschlüssig verbunden, zum anderen wird bei beiden Halbschalen durch Überlappungsflächen durch Schubübertragung eine nahezu gleiche Biege- und Torsionsteifigkeit im Vergleich zur ungeteilten Zylinderschale angestrebt.

4 Material

4.1 CFK

Als Laminat wurde ein 6 lagiger, quasi-isotroper Aufbau aus dem CFK-Prepregsystem XN80/EX1515 eingesetzt. Der E-Modul der XN80-Kohlenstofffaser beträgt 780 GPa. Das Cyanatester-Harzsystem EX1515 weist neben einer geringen Feuchteaufnahme eine sehr hohe Strahlenbeständigkeit auf. Die Laminatdichte beträgt $1,76 \text{ kg/dm}^3$, der mittlere Zug-E-Modul 156 GPa. Zur Charakterisierung des Werkstoffes vor und nach der Autoklavhärtung wurden DSC- und Ultraschalluntersuchungen durchgeführt.

4.2 PEEK

Im Prototypen wurde PEEK für die Herstellung von Abstandhaltern, Schrauben und Anbindungselementen verwendet, während für das eigentliche Bauteil PEEK mit Kohlenstofffaserverstärkung aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften und Verklebbarkeit mit CFK eingesetzt wird (Bild 5).

Eigenschaft	PEEK	CF-PEEK
thermisch-mechanische Belastbarkeit	hoch	sehr hoch
Kriechfestigkeit	hoch	sehr hoch
Chemische Beständigkeit	gut	gut
Hydrolysebeständigkeit, auch gegen Heißdampf	beständig	beständig
Zähigkeit	hoch	niedrig
Verschleißfestigkeit	hoch	sehr hoch
Elektrische Leitfähigkeit bzw. Isolation	isolierend	leitend
Zerspanbarkeit	gut	gut
Beständigkeit gegen Gammastrahlung	hoch	hoch
Sonstiges	niedriger Reibungskoeffizient	hohe Maßhaltigkeit
Zugmodul [MPa]	3500	13000
Biegemodul [MPa]	4100	20200
Dichte [g/cm^3]	1,32	1,44
Bruchdehnung [%]	50	1,3
Temperaturdehnkoeffizient [$10^{-6}/\text{K}$]	47	15
Feuchteaufnahme bis Sättigung bei 23 °C [%]	0,5	0,1

Bild 5 : Vergleich der Eigenschaften von PEEK und CF-PEEK (Victrex 450CA30)

4.3 Klebstoff

Alle nicht lösbaren Verbindungen wurden mit dem Epoxidharz Araldit AW 106 ausgeführt, das sich auf Grund guter Strahlenbeständigkeit und guter mechanischer Eigenschaften für diese Anwendung eignet.

4.4 Finite-Elemente-Berechnungen

Das Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) zur Berechnung der Durchbiegung infolge Eigen- und Stave-Gewicht wurde aus Schalenelementen (CFK-Schale, Stave) und Volumenelementen (PEEK-Elemente) aufgebaut (siehe Bild 6).

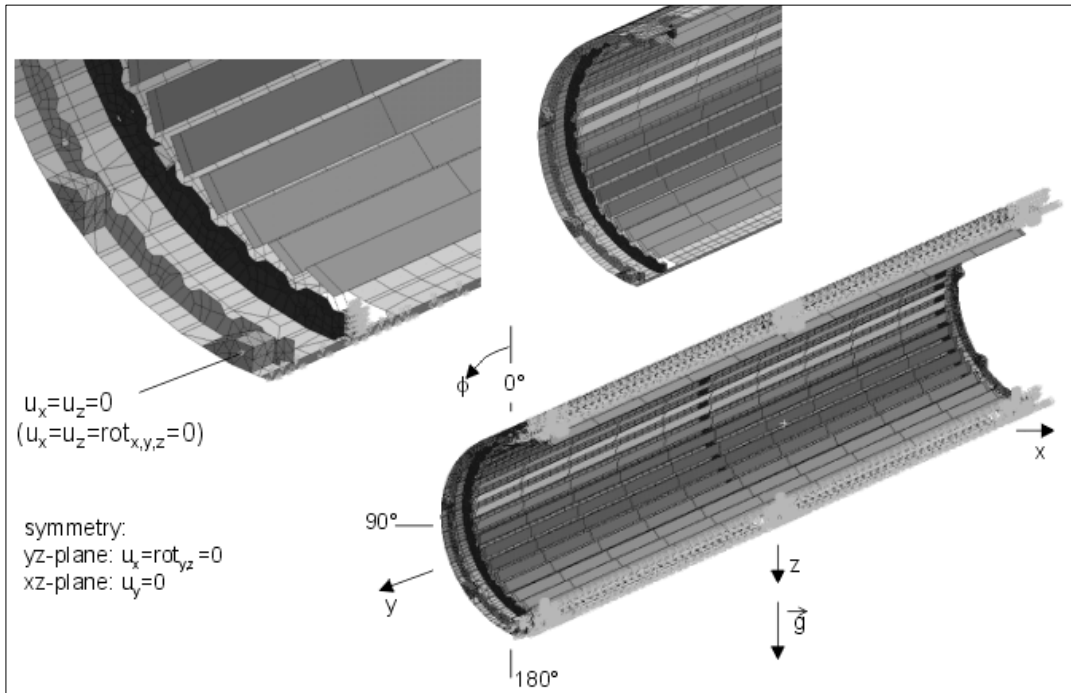


Bild 6 : Finite-Elemente-Modell

Pro Stave wurde eine Masse von 65 g angesetzt und die Schwerkraft in z-Richtung simuliert. Zur Festlegung der konstruktiven Gestaltung der Krafterleitung wurden verschiedene Varianten berechnet, deren wesentliche Ergebnisse in Bild 7 dargestellt sind.

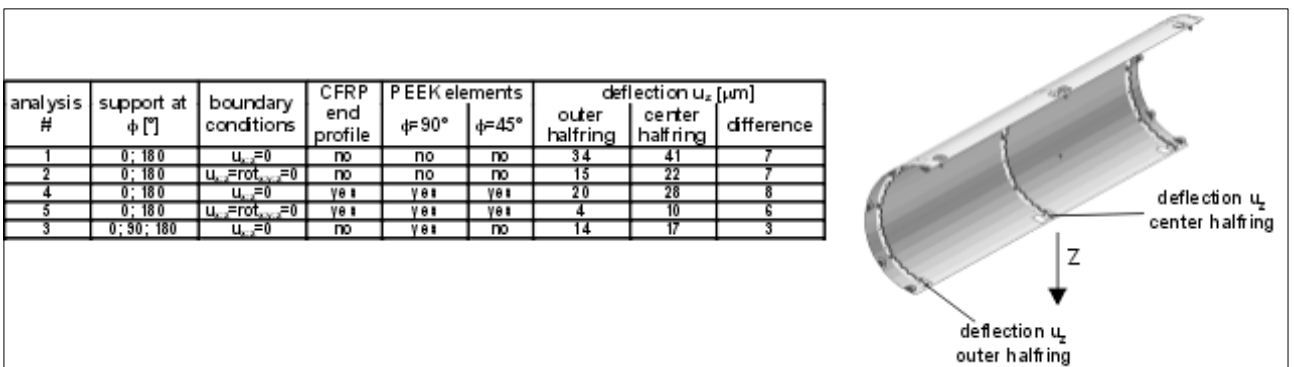


Bild 7 : Untersuchung unterschiedlicher Krafterleitungsvarianten

5 Fertigung

5.1 Halbringe

Die Deckschichten der Halbringe wurden aus einer CFK-Platte mit einer Fläche von etwa $0,5 \text{ m}^2$ und einer Dicke von $0,9 \text{ mm}$ mittels Wasserstrahlschneiden mit einem Aufmaß von $0,5 \text{ mm}$ vorgeschnitten und in einer Vorrichtung gebohrt. Die vorgeschrittenen und gebohrten Deckschichten wurden in einer weiteren Vorrichtung wie in Bild 8 dargestellt eingesetzt, mit den PEEK-Abstandselementen verklebt und anschließend entlang der Außenkontur auf Endmaß bearbeitet.

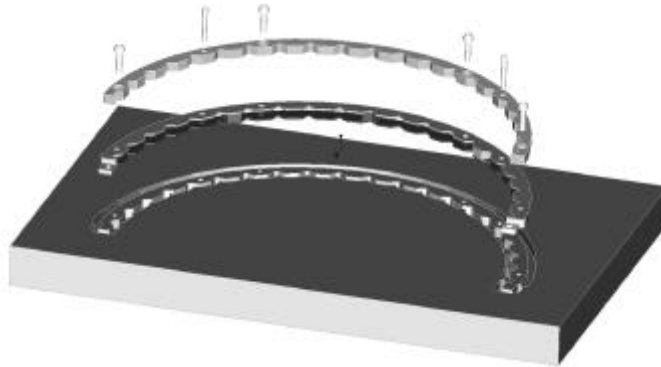


Bild 8 : Vorrichtung zum Verkleben und Endbearbeiten der Halbringe

5.2 Halbschalen

Parallel zu den Halbringen wurden auf einem Graphitwerkzeug (geringe Ausdehnung bei der Prepregaushärtung) facettierte Halbschalen mit dem Lagenaufbau $[0^\circ/\pm 60^\circ]_s$ und einer Dicke von $0,45 \text{ mm}$ laminiert, im Autoklaven ausgehärtet und getempert. Zur Erstellung des Bohrbildes und zur Bearbeitung der Außenkontur der Schale wurden die ausgehärteten und getemperten Halbschalen auf einer Vorrichtung ausgerichtet und fixiert.

5.3 Zusammenbau

Die auf Endkontur bearbeiteten Halbringe wurden mit den bearbeiteten Halbschalen und den PEEK-Anbindungselementen in einer Zusammenbauvorrichtung zu zwei Halbschalenbaugruppen verklebt, die wie in Bild 9 dargestellt zur kompletten Zylinderschale verschraubt wurden.

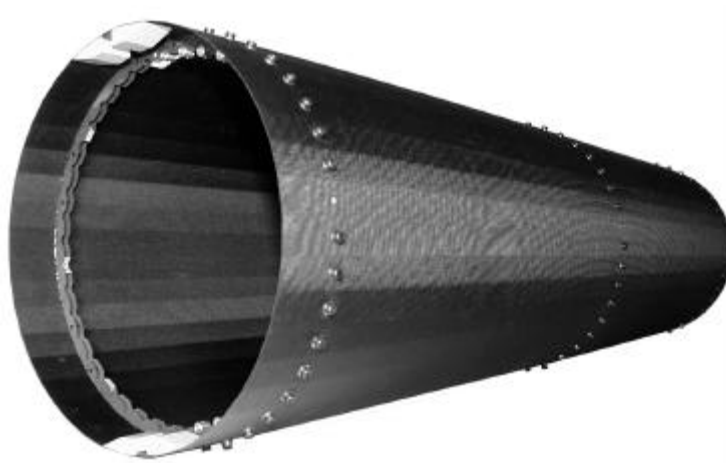
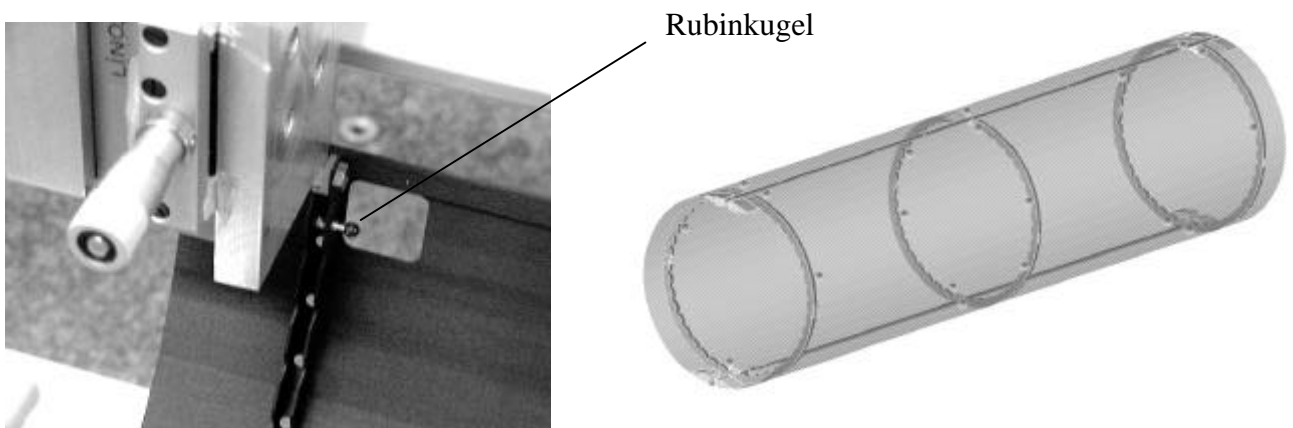


Bild 9 : Komplette Zylinderschale

6 Geometrievermessung

Die Staves werden in den v-förmigen Nuten der Halbringe positioniert. Die Funktionsflächen der Halbringe wurden vor und nach dem Verkleben in die Halbschalen mit Bezug auf die Halbring/Halbring-Schnittstelle getrennt vermessen. Bild 10 links zeigt einen Ausschnitt einer in eine Messvorrichtung eingebauten Zylinderschale. An den Halbringen wurden wie in Bild 10 : rechts zu erkennen 20 Rubinkugeln als Bezugspunkte für die Vermessung der Durchbiegung und der thermischen Ausdehnung der Kompletstruktur befestigt. Die Rubinkugeln wurden im FE-Modell als Kugelmittelpunkte nachgebildet, um die geometrische Vermessung des Bauteils mit den



Ergebnissen aus den Berechnungen vergleichen zu können.

Bild 10 : Positionierung von Rubinkugeln zur Vermessung der Strukturen

7 Diskussion und Optimierungsmöglichkeiten

In der ersten Entwicklungsphase wurde eine Zylinderschale konstruiert, berechnet, als Prototyp gefertigt und geometrisch vermessen. Die gemessenen und berechneten Verformungen konnten mit dem ersten FE-Modell zunächst nicht vollständig abgebildet werden. Detailliertere FE-Rechnungen ergaben, dass ein erheblicher Teil der theoretisch erreichbaren globalen Biegesteifigkeit durch Spiel in den Halbringverbindungen und in der durch Verschraubung realisierten Überlappungsverbindung der beiden Halbschalen verloren geht. Zudem zeigte die Untersuchung verschiedener Krafteinleitungsvarianten, dass die lokal hohen Verformungen im Krafteinleitungsbereich sich in die äußeren Halbringe fortpflanzen und erheblich zur Gesamtdurchbiegung beitragen (vgl. Bild 11).



Bild 11 : Verformung in x (links)- und y-Richtung (rechts) in Millimeter

Im einzelnen wurden drei Faktoren identifiziert, die wesentlich zur Gesamtdurchbiegung beitragen:

- a) Lokale Verformungen im Bereich der Krafteinleitung
- b) Verformungen des Zylinderquerschnitts
- c) Geometrie (Flächenträgheitsmoment) und Material (E-Modul)

Neben der Durchbiegung waren die Maßhaltigkeit der Struktur beim Abkühlen und die Höhe der ersten Eigenfrequenz zu betrachten. Die ersten FE-Rechnungen zeigten aber, dass beide Lastfälle unkritisch sind.

Durch einige leicht zu realisierenden Veränderungen am Prototypen konnte die gemessene Durchbiegung unter Eigengewicht und Stavemasse von anfänglich 0,039 mm auf 0,006 mm reduziert werden, wobei sich dieser Zahlenwert auch durch die FE-Rechnung reproduzieren ließ.

Nachfolgend sind die am Prototypen vorgenommenen Veränderungen und deren Auswirkungen sowie die für das endgültig zu fertigende Bauteil vorgesehenen zusätzlichen Änderungen aufgeführt:

- a) Um den lokalen Verformungen im Bereich der Krafteinleitung entgegenzuwirken, wurden die anfänglich oben (0°) und unten (180°) angebrachten Krafteinleitungselemente durch insgesamt vier Elemente am Umfang unter 45° , 135° , 225° und 315° ersetzt. Die zu fertigende Struktur ist wegen zusätzlich hinzugekommener Anforderungen im Endbereich doppelschalig auszuführen, wodurch sich auch eine wesentlich homogenere Gestaltung des Krafteinleitungsbereich ergibt.
- b) Die Verformung des Zylinderquerschnitts konnte durch eine Drehung der Schale um 90° und die Verlagerung der Halbringteilung und der Halbschalenüberlappung in den seitlichen Schubereich stark verringert werden. Die neu zu fertigende Struktur wird darüber hinaus eine spielfreie Halbringverbindung aufweisen. Ein Ring zur Aufnahme von Kräften aus den Kühlleitungen der Staves an beiden Enden der Zylinderschale trägt zusätzlich zur Verbesserung der Rundheit bei. Zur Verbesserung der Stavepositionierung werden entlang der Zylinderachse außerdem fünf statt drei Halbringe eingebaut, die ebenfalls zu geringeren Querschnittsverformungen führen.
- c) Durch weitgehende Beseitigung der unter Punkt a) und b) beschriebenen Effekte konnte die theoretisch erreichbare globale Biegesteifigkeit der Zylinderschale, die sich aus der Geometrie und dem Material zusammensetzt, annähernd erreicht werden. Aufgrund der sehr geringen Durchbiegung konnte am Prototypen untersucht werden, ob eine weitere Einsparung von Bauteilmasse durch Ausschnitte in der Zylinderschale möglich ist (Durchbiegung unter Eigengewicht und Stavemasse, Eigenfrequenz). Diese Ausschnitte würden weiterhin eine homogenere Verteilung der in den Sensorelementen erzeugten Wärme ermöglichen.

Bild 12 zeigt das Ergebnis einer Verformungsanalyse der Komplettschale des Prototypen mit Ausschnitten im Bereich der Halbschalen und vier Krafteinleitungselementen in der geänderten Einbaulage.

Durch die Ausschnitte in den Halbschalen konnte die Masse der Zylinderschale um 10 % verringert werden, wodurch sich die maximale Durchbiegung von 0,005 auf 0,006 mm erhöhte (Rechnung und Messung).

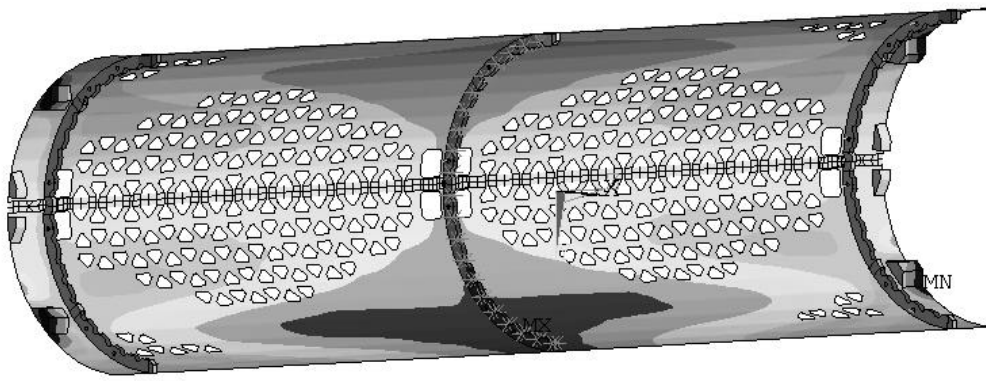


Bild 12 : Durchbiegung der Zylinderstruktur

Bild 13 zeigt den momentanen Stand der CAD-Arbeiten an der Zylinderschale. Trotz der Aufdopplung an den beiden Enden der Zylinderschalen, der beiden zusätzlichen Stave-Support-Ringe und der zusätzlich eingebrachten Zuglastungsringe zur Aufnahme der Kräfte und Fixierung der Kühlrohre der Staves konnte die Bauteilmasse durch die Reduzierung des Halbschalenlaminats von 0,45 mm auf 0,3 mm weitgehend konstant gehalten werden. Die etwa 0,6 kg schwere Struktur trägt 38 Staves mit einer Masse von insgesamt 4,2 kg (110 g pro Stave), wobei sie sich rechnerisch um maximal 0,004 mm durchbiegt. Bei der Abkühlung verformt sich die neue Struktur aufgrund der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von CFK ($\alpha_1 = -0,99 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) und CF/PEEK ($\alpha_1 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$). Mit einem Maximalwert von 0,005 mm kann diese als unkritisch angesehen werden. Die Modalanalyse ergab eine erste Eigenfrequenz der Struktur in Höhe von 133 Hz, die ausreichend weit über den geforderten 100 Hz liegt.

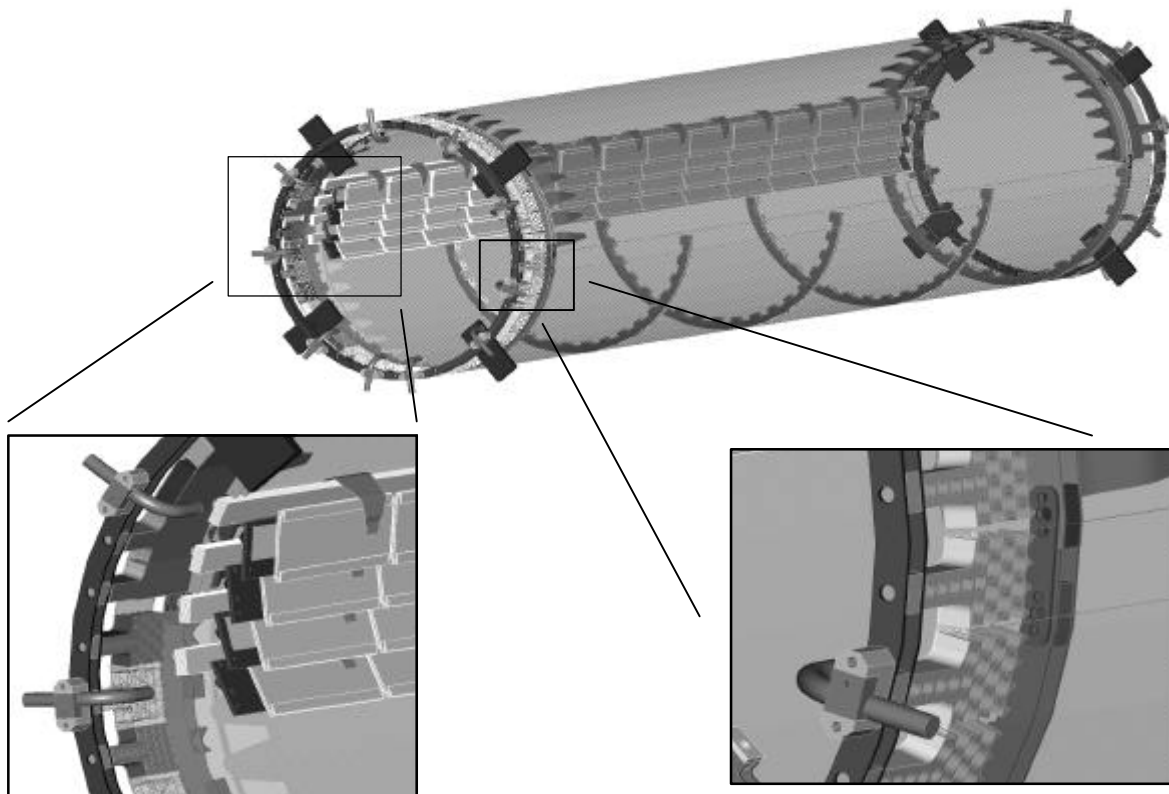


Bild 13 : Aktueller Stand der CAD-Arbeiten, verschiedene Teile sind zur Verbesserung der Sicht ausgeblendet oder halbdurchsichtig eingestellt

8 Ausblick

Die weiteren Entwicklungsarbeiten umfassen die Detaillierung der CAD-Geometrie, die Konstruktion und Fertigung von Werkzeugen und Vorrichtungen, die Definition eines Qualitätssicherungsprogramms, die Herstellung der Komponenten und Bauteilintegration sowie die Vermessung der Bauteile.

Dr.-Ing. Norbert Himmel,
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Pfaff und
Dipl.-Ing. (FH) Uwe Schmitt
Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
67663 Kaiserslautern
email: himmel@ivw.uni-kl.de

Dr. rer. nat. Karl-Walter Glitza
Fachbereich Physik
Bergische Universität Wuppertal
42097 Wuppertal
email: glitza@uni-wuppertal.de