

Technische Information 07/2018

Erkennung und Beurteilung von Hagelschäden an CfK-Außenhautbauteilen

Fahrzeugart	Pkw
Fahrzeughersteller	alle
Fahrzeugtyp	alle
Baujahr	alle
Schadenbereich	Karosserieaußenhaut

Aufschlag eines Hagelkorns auf einer CfK-Dachhaut



Kontakt:

KTI GmbH & Co. KG
Kraftfahrzeugtechnisches Institut
Waldauer Weg 90a
34253 Lohfelden

Telefon: +49 561 51081 0
Telefax: +49 561 51081 13
E-Mail: info@k-t-i.de
Internet: www.k-t-i.de

© Jede Art der Vervielfältigung ist nur mit schriftlicher Genehmigung des KTI gestattet.

Einleitung

Immer häufiger sind Fahrzeuge mit Bauteilen aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CfK) in der Außenhaut von Hagelschäden betroffen. Dabei stellt sich die Frage, welche Schäden durch Hagelschlag entstehen können und wie diese zu erkennen sind. Ziel der vorliegenden Technischen Information ist es daher, Praxishinweise zur einfachen und zuverlässigen Erkennung und Bewertung von Schäden an CfK-Bauteilen in der Fahrzeugaußenhaut zu geben.

CfK-Bauteile in der Außenhaut

Tabelle 1 zeigt exemplarisch einige Pkw mit CfK-Bauteilen in der Außenhaut. Die mechanischen Eigenschaften und damit auch die Schadenmechanismen von CfK werden hierbei hauptsächlich durch die Anzahl und Dicke der Lagen, die Faserorientierung und -länge sowie der Haftung zwischen Matrix und Faser bestimmt. Verschiedene CfK-Bauteile unterscheiden sich demnach in der Faserlänge, verwendeten Matrix sowie Kombination mehrerer Lagen. In der Pkw-Außenhaut kommen zumeist CfK-Bauteile mit Kurzfasern ohne eindeutige Schichtentrennung zum Einsatz. Bei diesen Bauteilen kann es infolge mechanischer Überlastung am Faserende hin zu einem Auszug der Faser aus der Matrix kommen. Aufgrund der fehlenden Schichttrennung entsteht hierbei jedoch keine Delamination. Als weiteres Schadenbild kann es zu einer geringen plastischen Verformung an der Oberfläche kommen. Diese Verformungen sind oft nur wenige Zehntelmillimeter tief. Plastische Verformungen mit einer Tiefe $\leq 0,3$ mm sind kaum sichtbar und werden als BVID (Barely Visible Impact Damage) bezeichnet.

Tabelle 1: Beispiele für CfK-Bauteile in der Karosserieaußenhaut („-“ nicht verfügbar, s – serienmäßig, o – optional) Stand: November 2017

Fahrzeugmodell	Kotflügel	Türen	Frontklappe	Heckklappe	Dach
Alfa Romeo 4C	-	-	-	-	o
Alfa Romeo 4C Spider	-	-	-	-	o
Alfa Romeo Giulia Quadrifoglio	-	-	s	-	s
Audi R8 Spyder (42)	-	-	-	s	-
Audi RS5	-	-	-	-	o
BMW i8	-	-	-	-	-
BMW i3	-	-	-	-	s
BMW M3 CSL (E46)	-	-	-	-	s
BMW M3 (E92)	-	-	-	-	s
BMW M3 / M4 (F80 / F82; o. Glasdach)	-	-	-	-	s
BMW M5 (F90; o. Glasdach)	-	-	-	-	s
BMW M6 (E63)	-	-	-	-	s
BMW M6 (F13)	-	-	-	-	s
Chevrolet Corvette Z06 Coupe	-	-	s	-	s
Chevrolet Corvette Z06 Cabriolet	-	-	s	-	-
Lamborghini Gallardo Superleggera	-	-	-	s	-
Lamborghini Aventador Roadster	-	-	-	-	s

Neben den herstellungsbedingten Eigenschaften des CfK und konstruktiven Aspekten des Bauteils (z. B. Nachgiebigkeit der Bauteilfläche) wird die Hagelschlagempfindlichkeit von der Bauteiltemperatur und Form des Hagelkorns beeinflusst. Bei dem Auftreffen eines Hagelkorns durchdringt das CfK-Bauteil von außen nach innen eine Druckwelle. Diese verursacht eine Biegeverformung und induziert von der Impactstelle ausgehend Zug-, Druck- und Schubspannungen. Während ein Teil der gesamten Durchbiegung elastisch zurückfedert, kann der plastische Anteil zu einem Versagen der Matrix in Form von Zwischenfaserbrüchen, Delamination und Faserbrüchen oder -auszügen führen. Diese Schäden nehmen mit der Tiefe zu. Bei CfK-Bauteilen mit Kurzfasern lassen sich diese Schäden deshalb von der Rückseite am ehesten erkennen.

Versuche

Die Versuche wurden an einer Dachhaut des BMW i3 durchgeführt. Im Gegensatz zu mechanisch hoch beanspruchten CfK-Bauteilen besteht dieses Bauteil nicht aus Endlosfasern, sondern aus recyceltem CfK mit Kurzfasern. Die einzelnen kurzen Fasern ergeben optisch, durch eine annähernd gleiche Ausrichtung, ein CfK-typisches Aussehen. Zum Schutz des CfK vor schädlichen ultravioletten Strahlen dient ein spezieller Klarlack in einer Stärke von circa 100 µm mit besonders hohem Lichtschutzfaktor.

Für die Versuche wurde die Dachhaut auf einem Tragegestell aus massiven Vierkant-Stahlprofilen befestigt. Geometrisch entsprach das Gestell der Karosseriestruktur des BMW i3.

Zur Simulation von Hagelschlag wurde ein spezielles Verfahren genutzt, mit dem im Bauwesen die Hagelschlag-Widerstandsklassen von Dachziegeln geprüft werden. Dabei wurden mit einer Druckluft-Hagelkanone spezielle Eiskugeln auf die Dachhaut geschossen. Von elementarer Bedeutung für realistische Ergebnisse einer Hagelschlagprüfung sind die Hagelkörner. Diese wurden für die Versuche in einem speziellen Verfahren angefertigt. Die Schwierigkeit bei der Herstellung von Hagelkörnern liegt u.a. in der Nachstellung des Wachstums. Dieses ist durch gefrierendes Wasser um einen Kristallisationskeim herum und gleichzeitiger Dichteänderung gekennzeichnet. Die stufenweise Entstehung der Hagelkörner durch Auf- und Abwinde sowie Verunreinigungen in der Luft führen hierbei zu einzelnen Anlagerungsschichten. Das Ablösen einzelner Schichten innerhalb des Hagelkorns führt daher i.d.R. zu einem Zerspringen beim Aufschlag. Für die durchgeführten Beschüsse wurden Hagelkorndurchmesser beginnend mit 20 mm bis 50 mm in Schritten von 5 mm verwendet. Zur Vermeidung überlappender Schäden wurde darauf geachtet, dass sich die Schlagstellen nicht unmittelbar nebeneinander befinden.

Schadenbeurteilung

Prinzipiell sind Ultraschallprüfungen und thermografische Methoden zur Detektion von Fehlstellen innerhalb von CfK-Bauteilen am besten geeignet. Die Anwendung und Ergebnisauswertung der Ultraschallprüfung ist bei nicht ausreichender Erfahrung jedoch sehr fehleranfällig. Diese Methode wurde daher als Möglichkeit für eine einfache Prüfmethode nicht weiter betrachtet. Als praxistaugliche Methoden zur Erkennung von Schäden am CfK-Dach kommen daher die Thermografie und die Sichtprüfung infrage.

Bei der aktiven Thermografie zeigte sich, dass eine für die Auswertung geeignete Wärmeeinbringung in die Dachhaut schwierig war. Schäden ließen sich durch die Lock-in-Thermografie nicht erkennen.

Die passive thermografische Untersuchung wurde mit einer Wärmebildkamera Flir C2 durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass die Aufnahmen mit der verwendeten Wärmebildkamera lediglich die Temperaturverteilung im Bauteil liefert und keine Schlüsse auf Schäden innerhalb des CfK-Bauteils zulassen.

Als weitere Methode zur Beurteilung eines Hagelschadens an einem CfK-Bauteil bleibt die Sichtprüfung. Leicht erkennbar war mit bloßem Auge ein Riss in der Klarlackschicht im Eckbereich. Die Sichtprüfung ergab weiterhin, dass durch den Aufprall von Hagelkörnern ab 40 mm Durchmesser kaum sichtbare Dellen entstanden sind (sogenannte BVID). Aufgrund der geringen Dellentiefe von weniger als 0,3 mm sind diese Schäden mit vertretbarem Aufwand anhand von Fotos nicht darstellbar. Bei der Untersuchung der Dachinnenseite zeigten sich im Randbereich zwei weitere Beschädigungen in Form von Rissen. Schäden an der Innenseite der Dachhaut wurden nur an den Stellen festgestellt, an denen auf der Dachhautoberseite Dellen vorhanden waren. Im Vergleich zur Thermografie wurden die von außen sichtbaren Schäden durch die Sichtprüfung schneller und einfacher erkannt. Darüber hinaus wurden auch leichte Dellen im CfK festgestellt, welche bei thermografischen Verfahren nicht sichtbar sind. Der geringe Aufwand prädestiniert daher die Sichtprüfung zur Feststellung von Hagelschäden an der betrachteten Dachhaut. Die Verwendung verschiedener Streifensegel erbrachte keine zusätzlichen Erkenntnisse. Allerdings war eine „kaum sichtbare“ Delle leichter zu fotografieren.

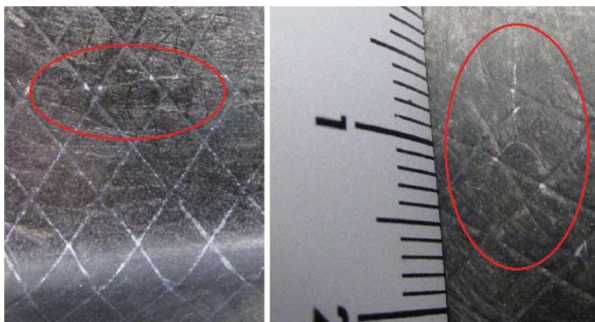


Abbildung 1: Schäden auf der Innenseite im Randbereich (Bildausschnitt 2 cm x 2 cm)



Abbildung 2: Delle im Eckbereich

Bewertung der Ergebnisse

Abweichend von bereits bekannten Untersuchungen wurde keine Fallbolzenanlage zur Simulation von Hagelschlag verwendet. Stattdessen wurden speziell erzeugte Hagelkörner mit einer Druckluft-Hagelkanone auf eine reale CfK-Dachhaut geschossen. Dadurch wurde die Impactenergie nicht über einen starren, runden Stahlbolzen eingebracht, sondern über eine Eiskugel, die in ihrem Bruchverhalten und der Auftrefffläche einem realen Hagelkorn ähnelt. Die bei den Versuchen verwendeten künstlichen Hagelkörner stellen idealisierte Proben dar. Die Ergebnisse können daher zwar die Bandbreite möglicher Schäden eingrenzen, nicht aber die Folgen eines konkreten Hagelereignisses widerspiegeln. Je nach Wachstum unterscheiden sich reale Hagelkörner in Form und Festigkeit zum Teil deutlich. So kann ein reales Hagelkorn einen größeren Schaden verursachen, wenn statt einer runden Form die Energie über eine spitze Geometrie in das Bauteil eingeleitet wird. Nicht untersucht wurde, ob Aufschläge mehrerer Hagelkörner nacheinander auf die gleiche Stelle Einfluss auf die Schadenempfindlichkeit haben. Die in der Literatur häufig behandelte Delamination tritt nur in CfK-Bauteilen mit einer eindeutigen Schichttrennung auf. Bei der in den Versuchen betrachteten Dachhaut mit kurzen Fasern trifft dies nicht zu.

Zusammenfassung

In einer Versuchsreihe wurde eine reale CfK-Dachhaut mit verschiedenen großen künstlichen Hagelkörnern an unterschiedlichen Stellen beschossen. Bei den Versuchen stellte sich heraus, dass sehr große Hagelkörner von außen sichtbare Schäden an der betrachteten CfK-Dachhaut hervorrufen können. Diese zeigen sich in der Bauteilfläche durch „kaum sichtbare“ Dellen mit einer sehr geringen Tiefe ($< 0,3$ mm). In den formstifen Randbereichen kommt es am ehesten zu Rissen und Brüchen.

Insgesamt zeigte sich, dass die Dachhaut, an der die Versuche durchgeführt wurden, sehr unempfindlich gegen Hagelschlag ist. So verursachten erst Hagelkörner mit einem Durchmesser ab 40 mm überhaupt Schäden am Dach. Sofern diese im Rand oder Eckbereich erkennbar sind, sollte der Dachhimmel ausgebaut werden, um die Rückseite einer Sichtprüfung zu unterziehen. Dellen bieten zwar Anhaltspunkte für weitere Beschädigungen innerhalb des CfK, haben für sich genommen jedoch keinen Einfluss auf die Funktion des Bauteils.

Vor diesem Hintergrund muss die strukturelle Funktion eines CfK-Bauteils bekannt sein. Das in den Versuchen betrachtete Bauteil mit Kurzfasern ohne eindeutige Schichttrennung hat keine kraftübertragende Funktion innerhalb der Karosserie. Bei strukturell relevanten Bauteilen aus CfK mit Endlosfasern und eindeutiger Schichttrennung müssen Schäden im Inneren des Bauteils erkannt werden.

Dipl.-Ing. (FH) Helge Kiebach MEng (TAR)

© Jede Art der Vervielfältigung ist nur mit schriftlicher Genehmigung des KTI gestattet.