

R. Hailer*, H. Sedlmaier*, H. Lohse**, R. Schumacher***

* BMW GROUP, MÜNCHEN

** ASHLAND DREW AMEROID DEUTSCHLAND GMBH,
HAMBURG

*** FERCHAU ENGINEERING, MÜNCHEN

CFK-DACH M3 CSL

LEICHTBAUSTRATEGIE DANK KLEBTECHNIK

Abstract

In der M-GmbH der BMW Group entstand die Idee, auf Basis des bestehenden M3 ein noch leistungsfähigeres Fahrzeug zu entwickeln. Dieser M3 CSL sollte nicht nur durch eine entsprechende Motorisierung, sondern auch durch die konsequente Anwendung von innovativem Leichtbau eine hohe Fahrdynamik aufweisen.

Dieser Leichtbau gelang durch die Substitution von ausgewählten Bauteilen durch Leichtbauvarianten unter anderem aus CFK.

Bei dem auf die Fahrzeugstruktur geklebten CFK Dach war die Übernahme der bestehenden M3 Karosserie Voraussetzung für die Realisierung. Hierbei bestand die Hauptaufgabe aus Sicht der Klebetechnik in der Schaffung einer strukturellen Verbindung zwischen den Fügepartnern lackierter Stahl und CFK. Ausgehend von den Anforderungen der Kleinstserie mit nur etwa 1500 produzierten Fahrzeugen (manuelle Applikation, Klebstoffhärtung bei Raumtemperatur) und den üblichen Anforderungen an Klebungen im Automobilbau wurden aus den zur Verfügung stehenden Klebstofftechnologien ein 2-k-PU Strukturklebstoff für die strukturelle Verklebung im Bereich des vorgegebenen Punktschweißflansches und ein elastisches 1-k-PU System für die Unterfütterungsklebung ausgewählt. Besonderes Augenmerk wurde hier auf die resultierenden Fahrzeugeigenschaften (Steifigkeit, Crashverhalten, Akustik) gelegt.

Nach den erforderlichen Produkt- und Prozessabsicherungsmaßnahmen gelang die Integration des Klebprozesses in die bestehende Serienfertigung der 3-er Baureihe.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Füge-technologie Kleben einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung des Sondermodells BMW M3 CSL geleistet hat.

1. Einleitung

Der M3 CSL ist nach dem Konzept des intelligenten Leichtbaus entwickelt. Hierunter versteht man eine konsequente Gewichtsreduzierung durch den Einsatz der am jeweils bestgeeigneten Werkstoffe am richtigen Ort. Bild 1 gibt einen Überblick der beim M3 CSL verwendeten Leichtbauwerkstoffe.

In der Summe wird eine Gewichtsreduzierung von 110 kg gegenüber dem M3 erreicht.

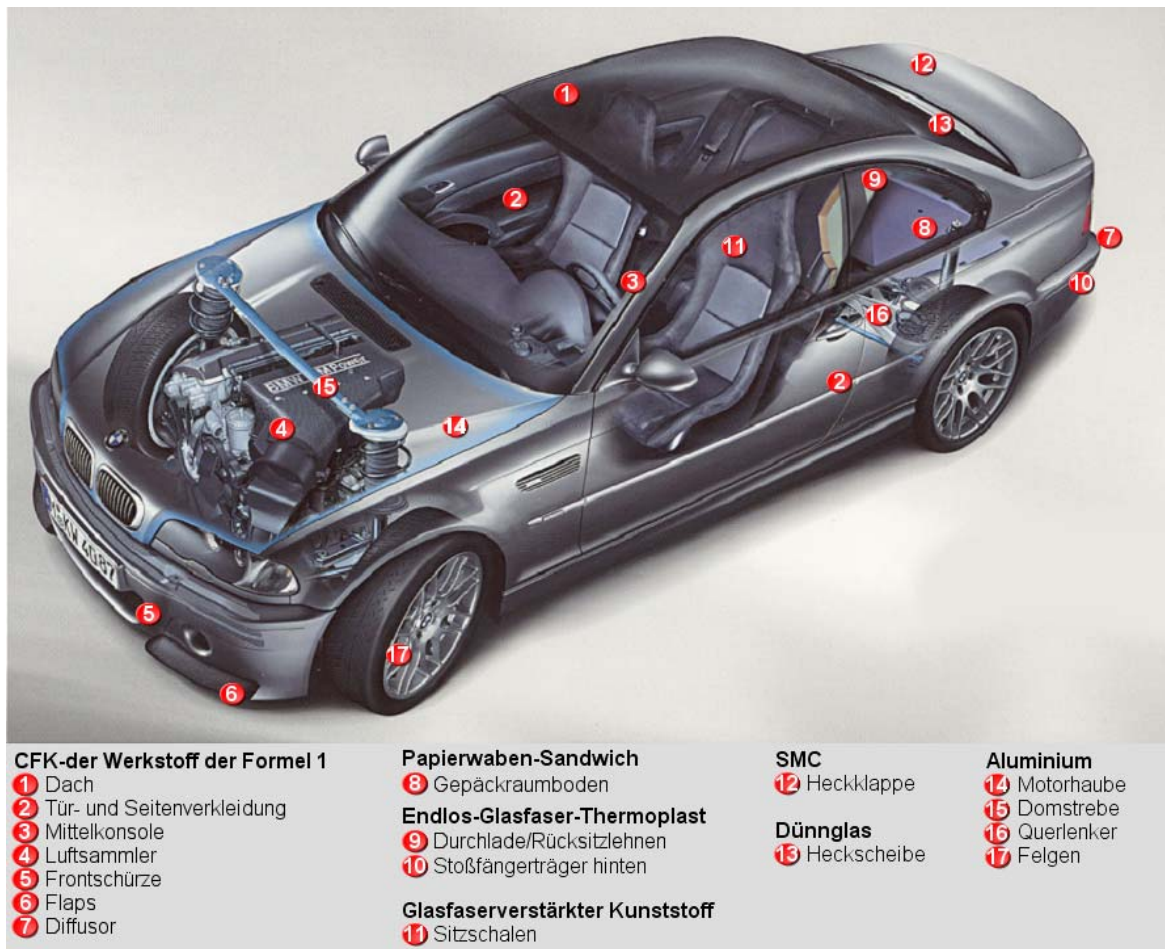


Bild 1 Leichtbaumaterialien im M3 CSL

2. Idee – Verbesserte Fahrdynamik durch Gewichtsreduzierung beim Dach

Besonders signifikant wirkt sich der intelligente Leichtbau des M3 CSL beim Dach in CFK-Sichtoptik aus. Dieses großflächige Bauteil, im BMW Werk Landshut von Spezialisten gefertigt, ist rund sechs Kilogramm leichter als das herkömmliche Stahldach.

Nicht nur das Gesamtgewicht wird reduziert, auch der Fahrzeugschwerpunkt wird nach unten verlagert. Bild 2 zeigt einen Vergleich der Gewichte von Dächern aus verschiedener Materialien bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften.

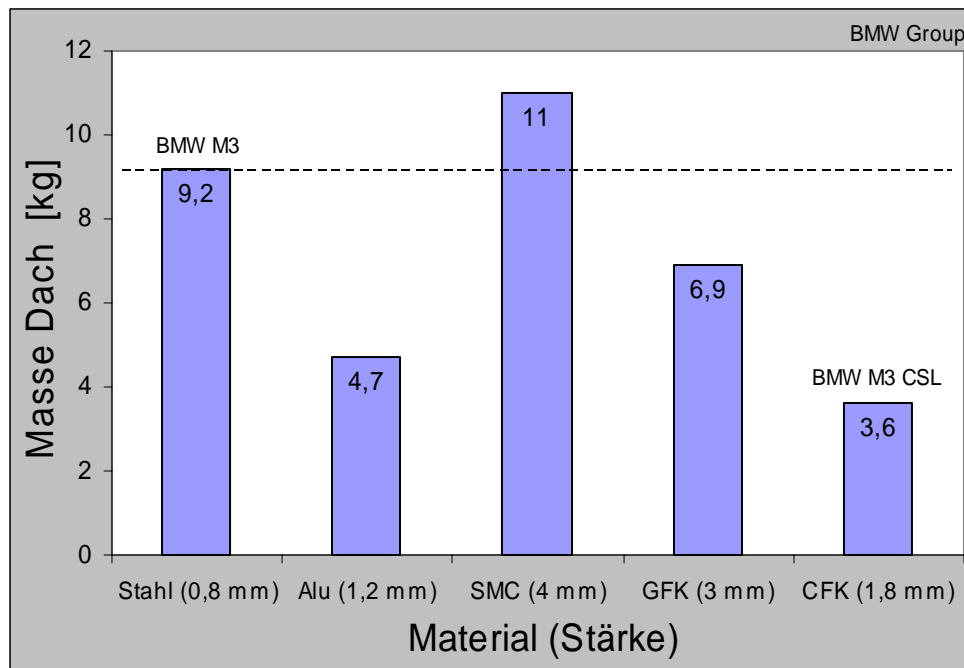


Bild 2 Gewichtsvergleich verschiedener Materialien beim Dach

3. Auswahl des Fügeverfahrens

Das Fügen des CFK-Dachs stellt einen neu zu integrierenden Prozess dar. Bei der Auswahl des Fügeverfahrens sind folgende Kriterien von ausschlaggebender Bedeutung:

- Integration in den bestehenden Serienprozess der 3er-Fertigung, bei weitgehend vorbestimmter Fahrzeugkonstruktion
- Designvorgaben (Außenhaut in Class-A Qualität des CFK Daches)
- geringe Stückzahl über eine Laufzeit von 7 Monaten (ca. 1500 Einheiten, max. 15 pro Tag)

So muss der lackierte Punktschweißflansch der Serienkarosse als Klebeflansch dienen und darf aus Korrosionsschutzgründen mechanisch nicht mehr bearbeitet werden. Das Fügen des Daches sollte ohne kostenaufwendige Anlagentechnik in den Montageablauf neu integriert werden. Alle diese Anforderungen führen zu einer reinen Klebverbindung und einem manuellen Prozess.

4. Darstellung der Fügeteile

Bild 3 zeigt die beiden Fügeteile, CFK-Dach und lackierter Karosserierrahmen. Rückseitig auf dem CFK-Dach ist die Lage der Klebstoffraupen dargestellt. Es kommen zwei verschiedene Klebstoffe, umlaufend ein Strukturklebstoff und im Bereich der Dachspiegel ein Unterfütterungsklebstoff zum Einsatz.

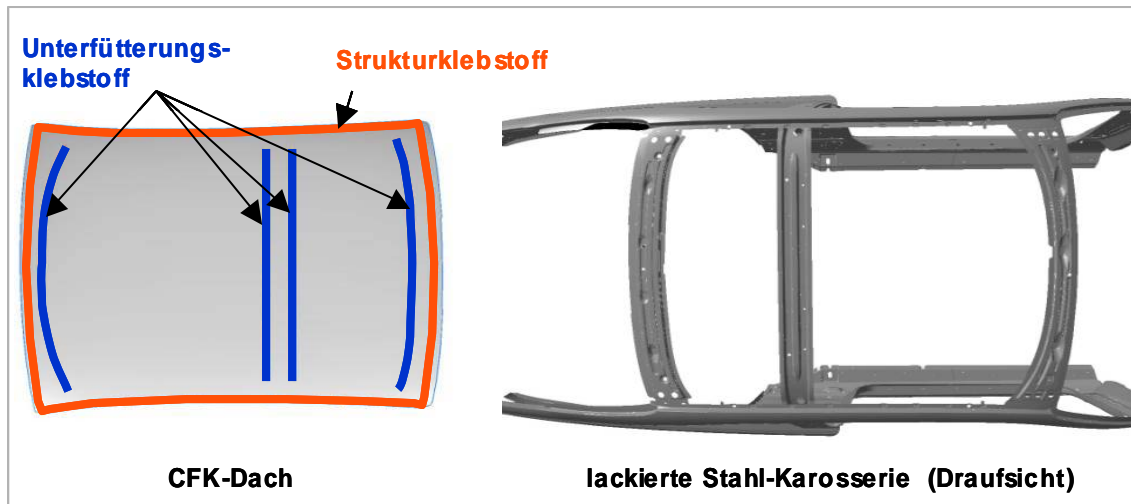


Bild 3 Darstellung der Fügebauteile

5. Anforderungen an das Klebstoffsystem

Nachdem die Entscheidung gefallen war, die Fügebauteile Kleben für diesen Montageschritt zu nutzen, wurden die Anforderungen an den zu verwendenden Klebstoff unter Berücksichtigung der o.g. Besonderheiten wie folgt definiert:

- Gewährleistung einer sicheren Verbindung der CFK-Außenhaut mit dem Dachrahmen
 - Gute Haftung auf decklackiertem Blech und auf CFK mit Epoxidharz Basis
 - Dichtheit
 - Festigkeit
 - Ausgewogenes Verhältnis von Steifigkeit und Elastizität
 - Alterungsbeständigkeit
- Klebstoffhärtung bei Raumtemperatur
- Erreichen einer Handhabungsfestigkeit innerhalb von 100 Minuten bei einer minimalen Offenen Zeit von 20 Minuten
- Manuelle Verarbeitbarkeit aus Kartuschen
- Standfeste Klebstoffraupe

6. Auswahl des Klebstoffs

Die Klebstoffauswahl wurde erheblich durch die vorgegebenen Prozess-Vorgaben bestimmt. Aufgabe des Klebstoffherstellers zu diesem Zeitpunkt war es, geeignete Klebstoffsysteme vorzustellen. Aus den zur Verfügung stehenden Klebstofftechnologien

- höchstfeste Phenolharzklebstoffe mit aber nur minimaler Dehnfähigkeit
- hochfeste 1- und 2-k Epoxidharzklebstoffe mit Reißdehnungen bis ca. 10 – 15 %
- 2-k Acrylat-Klebstoffe, die bei nur wenig geringeren Festigkeiten Vorteile in der Dehnfähigkeit zeigen
- strukturelle 2-k Polyurethanklebstoffe mit guten Festigkeiten und Dehnungen um die 50 %
- hochelastische semi-strukturelle 1-k oder 2-k Polyurethanklebstoffe

entschied sich die Fa. Ashland für die strukturelle Klebung einen 2-k Polyurethanklebstoffe vorzustellen. Diese Klebstoffgruppe verbindet die für die Anwendung notwendige hohe Steifigkeit mit einer guten Elastizität, wie sie für das große Bauteil Fahrzeugdach erforderlich ist. Es ist bekannt, dass die Abhängigkeit der resultierenden Steifigkeit einer geklebten Konstruktion von dem Schubmodul des verwendeten Klebstoffs in etwa einer e-Funktion folgt. Der deutlich höhere Schubmodul z.B. eines Epoxidharzklebstoffs von etwa 3000 MPa gegenüber ca. 500 – 700 MPa der strukturellen 2-k Polyurethanklebstoffe sollte sich hinsichtlich der Fahrzeugsteifigkeit nur unwesentlich in einem Steifigkeitsgewinn bemerkbar machen; der Vorteil der höheren Elastizität überwiegt bei weitem.

Das Kraft-Dehnungs-Diagramm für einen typischen strukturellen 2-k Polyurethan Klebstoff zeigt ein E-Modul von 660 MPa, eine Reißdehnung von ca. 75 % und einer Zugfestigkeit von 25 MPa.

Für die Klebstoffauswahl durch den Klebstoffhersteller war hilfreich, dass neben Erfahrungen auf lackierten Blechen auch solche auf CFK vorlagen. Es konnte für die Klebstoffauswahl, auf im Rahmen eines früheren Projektes erarbeitete Ergebnisse von Zugscherversuchen zurückgegriffen werden.

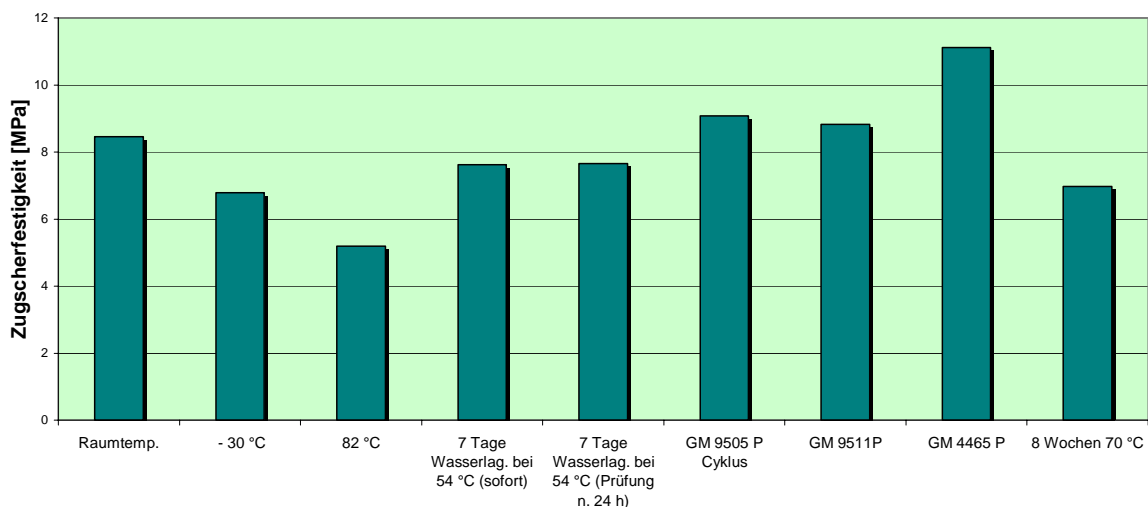


Bild 4 Zugscherfestigkeiten auf CFK von Raumtemperatur härtenden PLIOGRIP 2-k PU-Klebstoffen

Die in Bild 4 zusammengefassten Festigkeitswerte für CFK-Klebungen zeigen, dass eine für die gestellte Klebaufgabe ausreichende Festigkeit, auch nach Alterung gewährleistet bleibt. Bei den damaligen Prüfungen wurde in allen Fällen Faserausrisss beobachtet, d.h. der Klebstoff zeigt eine höhere Festigkeit als das Substrat.

Da die Klebung aufgrund der geringen Stückzahl nicht automatisiert werden sollte, war eine wesentliche Anforderung an den Klebstoff eine ausreichend lange Offene Zeit von mindestens 20 Minuten um die umlaufende Klebstoffraupe mit der notwendigen Sorgfalt auftragen zu können. Gleichzeitig musste aber auch die Forderung nach dem Erreichen einer ausreichenden Handhabungsfestigkeit, die es erlaubt die Karosserie nach 100 Minuten weiter zu transportieren, erzielt werden. Bild 5 zeigt die Handhabungsfestigkeit verschiedener Raumtemperaturhärtender PLIOGRIP 2-k Polyurethan Klebstoffe. Die Abhängigkeit des Zeitpunktes des Erreichens einer Handhabungsfestigkeit, im Allgemeinen reichen 0,7 – 0,8 MPa aus, hängt wie nicht anders zu erwarten von der Offenen Zeit des Klebstoffs ab. Die Klebstoffvariante mit der Offenen Zeit von 30 Minuten erfüllt die Vorgabe des Erreichens der Handhabungsfestigkeit nach bereits 100 Minuten.

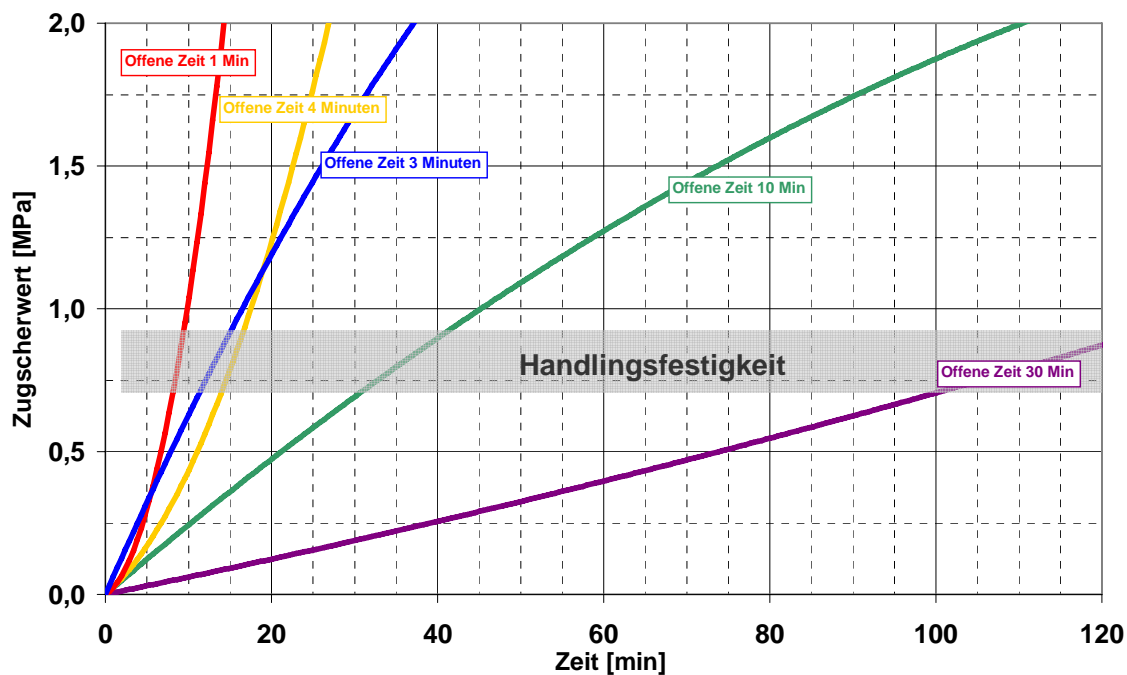


Bild 5 Handhabungsfestigkeiten von Raumtemperatur härtenden PLIOGRIP 2-k PU-Klebstoffen

Um eine gute Verarbeitbarkeit aus Kartuschen mit einem ansprechenden Applikationsbild zu erreichen dürfen die Viskositäten der Einzelkomponenten nicht zu hoch sein. Nur dann lässt sich der notwendige Auspressdruck gering halten, was Voraussetzung für die Verarbeitung mittels handelsüblicher, Druckluft betriebener Pistolen ist. Andererseits ist eine standfeste Klebstoffraupe unbedingte Voraussetzung, um ein unkontrolliertes Verlaufen zu verhindern. Um dies zu erreichen enthält der ausgewählte 2-k-PU-Klebstoff lediglich eine geringe Menge pyrogener Kieselsäure zur Thixotropierung, sodass eine einfache Verarbeitung aus Kartuschen gewährleistet ist. Die Standfestigkeit der gemischten Raupe wird durch Zugabe einer sehr geringen Menge eines chemisch wirkenden Thixotropierungsmittels zu der Polyolkomponente erreicht. Dieses reagiert nach Vermischen der Komponenten

sehr schnell mit einem der Isocyanatgruppen und bewirkt so einen Viskositätsanstieg. Parallel dazu erfolgt die wesentlich langsamer ablaufende eigentliche Härtingsreaktion des Klebstoffs. Bild 6 zeigt den zeitlichen Viskositäts-Verlauf eines chemisch thixotropierten Klebstoffs im Vergleich zu einem herkömmlichen System. Die geringere Anfangsviskosität des chemisch thixotropierten Systems, bei ansonsten gleicher Raupen-Standfestigkeit resultiert in einem deutlich verringerten Druckaufbau im Mischer und somit in einer verbesserten manuellen Applizierbarkeit aus Kartuschen.

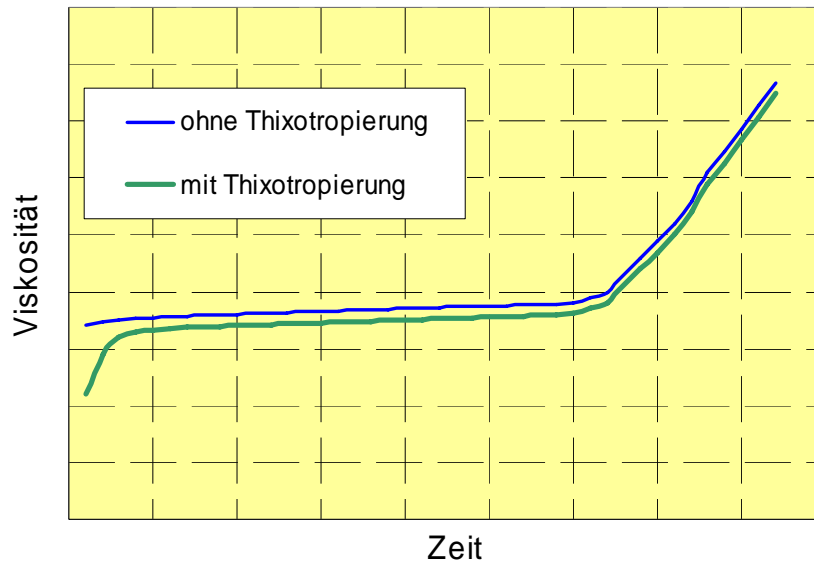


Bild 6 Viskositäts-Zeit-Verlauf eines Systems mit und ohne chemischer Thixotropierung

7. Absicherungsmaßnahmen Produkt und Prozess

Das Dach hat als Teil der Fahrzeug-Struktur und Außenhaut funktionelle Anforderungen, wie z. B. Crashesicherheit, Steifigkeit, Festigkeit und akustische Dämpfung zu erfüllen. Daraus resultiert die Notwendigkeit einer umfangreichen Absicherung.

In Bild 7 sind die Absicherungsmaßnahmen zum Projekt der Dachklebung beim M3 CSL dargestellt. Auf der linken Seite sind die produktspezifischen, auf der rechten Seite die prozessspezifischen Themen aufgeführt.

Im weiteren Verlauf dieses Vortrags wird auf beispielhaft ausgesuchte Maßnahmen und Ergebnisse der Strukturklebung eingegangen.



Bild 7 Absicherung Produkt und Prozess

8. Einfluß des Klebstoffs auf die Fahrzeug-Torsionssteifigkeit

Als Vorgabe sollte mit dem geklebten CFK-Dach die gleiche Fahrzeug-Torsionssteifigkeit der geschweißten Stahlkarosserie erreicht werden. 2 unabhängige Untersuchungen haben den Einfluß des Klebstoff-Schubmoduls untersucht.

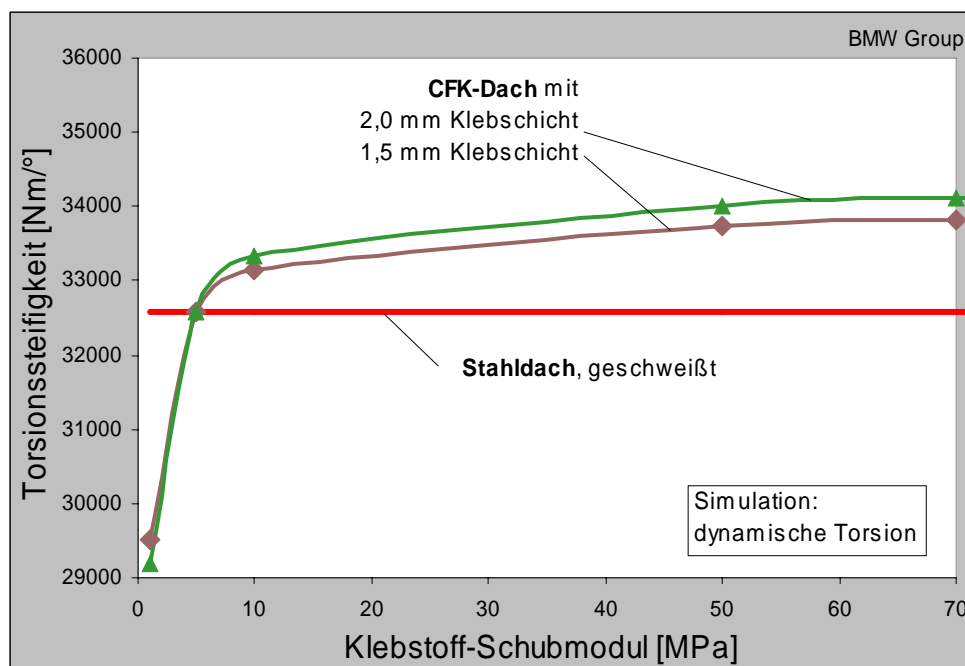


Bild 8 Ermittlung des Soll-Klebstoff-Schubmoduls in der Simulation

Bild 8 zeigt die Simulation einer dynamischen Torsion. Die Torsionssteifigkeit der Karosserie bricht unterhalb einem Klebstoffschubmodul von ca. 7 MPa ein. Bei einem Klebstoffschubmodul von 5 MPa wird die Referenzkurve des geschweißten Stahldachs erreicht.

Die statischer Torsion im Fahrzeugprüfstand (Bild 9) kommt zu einem ähnlichen Ergebnis. Hier wurde ein Versuchs-Klebstoff verwendet, dessen Schubmodulverlauf über der Temperatur bekannt ist. Durch Temperieren des Fahrzeugs konnten somit unterschiedliche Klebstoffschubmodule eingestellt werden.

Die Torsionssteifigkeit der Karosse fällt bei dieser Methode stark ab, wenn der Klebstoffschubmodul ca. 6 MPa unterschreitet.

Fazit aus beiden Untersuchungen: Mit einem Klebstoff-Schubmodul von 6 MPa wird eine ausreichende Fahrzeugs-Torsionssteifigkeit erreicht.

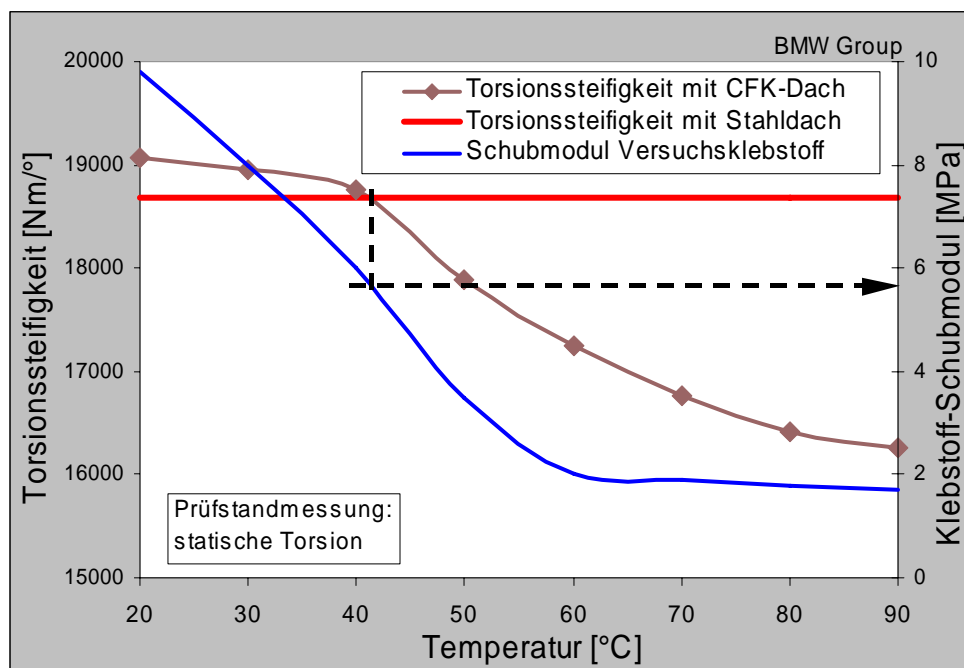


Bild 9 Ermittlung des Soll-Klebstoff-Schubmoduls im Fahrzeugprüfstand

9. Mechanische Prüfungen

In verschiedenen Prüfmethode mit insgesamt 136 Untersuchungsreihen wurden mechanischen Prüfungen durchgeführt. Bild 10 zeigt schematisch die Inhalte, Methoden und Ergebnisse. Ein Ausschnitt der Ergebnisse wird im folgenden dargestellt.

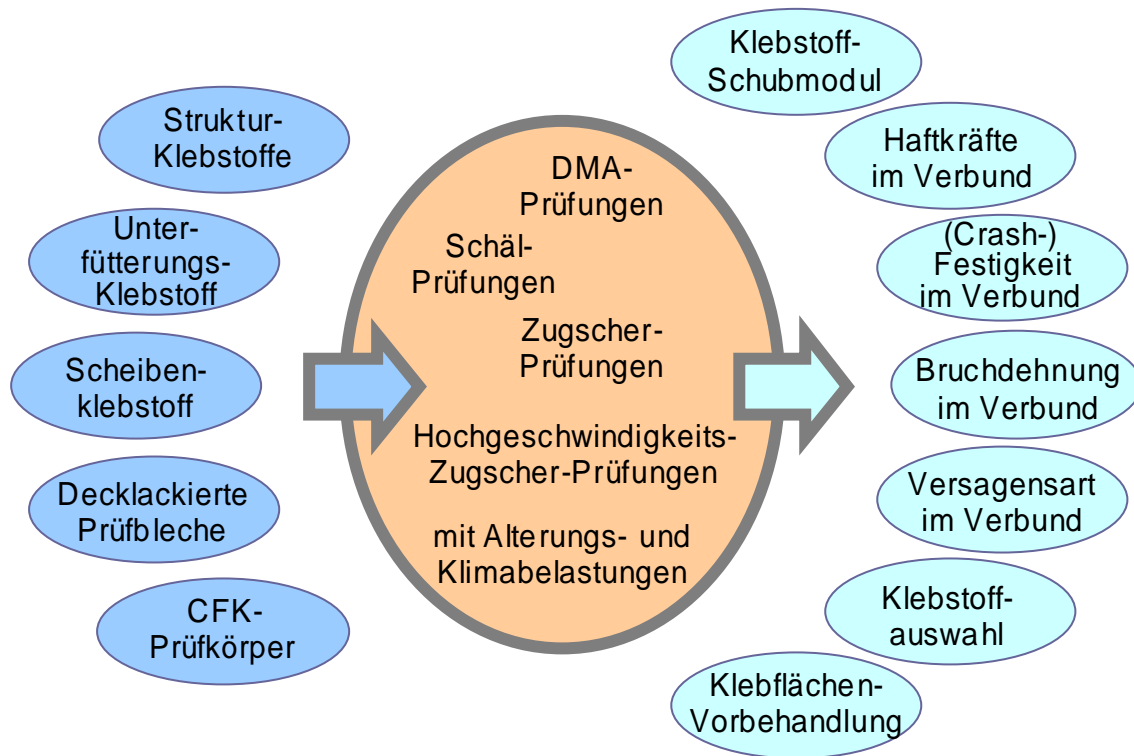


Bild 10 Inhalte, Methoden und Ergebnisse der mechanischen Prüfungen

9.1 Klebstoff-Schubmodul

Bild 11 zeigt die dynamische Methode zu Ermittlung des Klebstoff-Schubmoduls. Gewählt ist eine Amplitude im linear viskoelastischen Bereich und eine Prüffrequenz am unteren Ende der Fahrzeug-Gebrauchsbelastung (10 Hz).

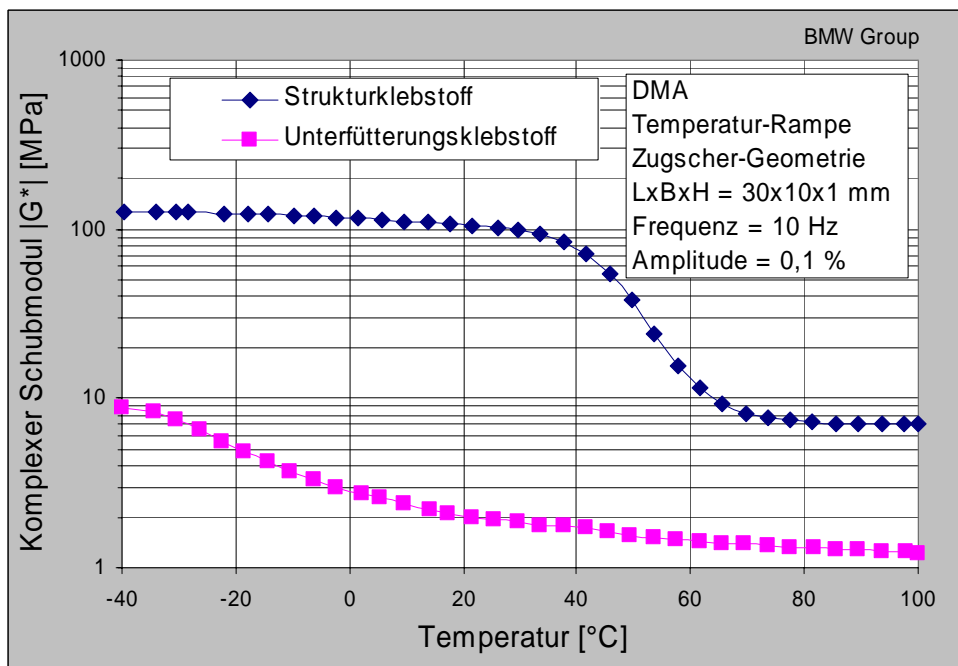


Bild 11 Ermittlung der Ist-Klebstoff-Schubmodule in der DMA

9.2 Prüfung Gesamtverbund

In einem sehr umfangreichen Prüfprogramm wurden Zugscherprüfungen an geklebten original Fügmaterialien durchgeführt. Bild 12 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisse. Geprüft wurden 2 Lacke, verschiedene Oberflächenvorbehandlungen, unterschiedliche Abbindezeiten, Alterungen und Klimabelastungen.

9.3 Hochgeschwindigkeits-Prüfung Gesamtverbund

Zur Abschätzung der Crash-Festigkeit des Fügeverbunds wurden Hochgeschwindigkeits-Scherzugprüfungen durchgeführt. Bild 12 stellt eine Auswahl der Ergebnisse dar.

Man erkennt Festigkeiten in Abhängigkeit der Lackoberfläche, der Alterung der Prüftemperatur und der CFK-Vorbehandlung.

Bei höheren Temperaturen ergeben sich höhere Crash-Festigkeiten aufgrund des niedrigeren Klebstoff-Schubmoduls bei besserem Dämpfungsverhalten.

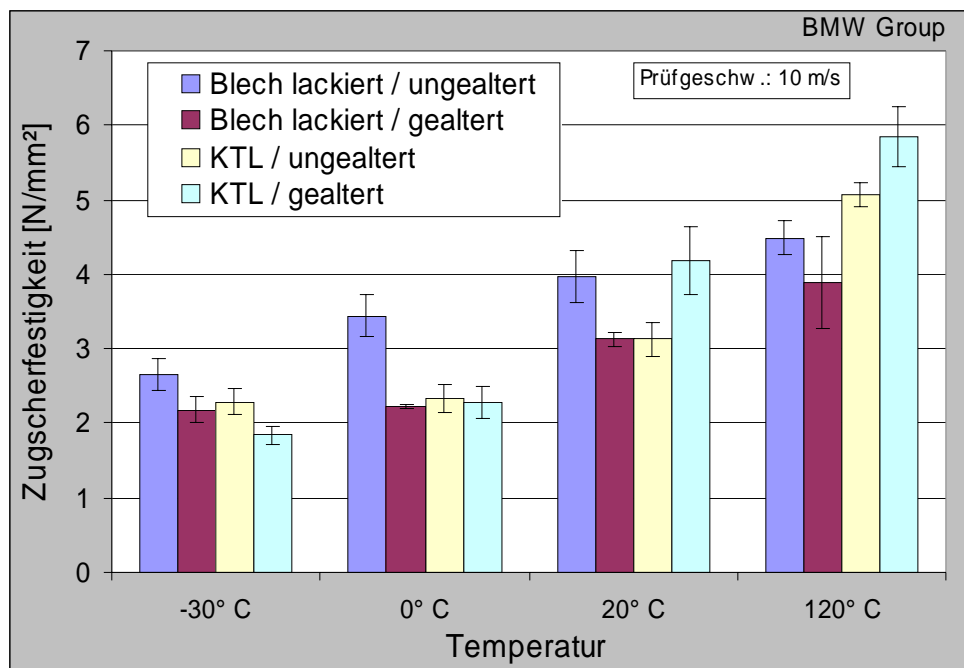


Bild 12 Prüfung des Hochgeschwindigkeits-Zugscher-Verhaltens

10. Gesamtfahrzeugprüfung Crashfestigkeit

Zur passiven Fahrzeugsicherheit wurden alle vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Crash-tests durchgeführt. Alle Anforderungen wurden erfüllt, die Abschätzung aus den Hochgeschwindigkeitsprüfungen an Probekörpern wurde damit bestätigt. Insbesondere ist kein großflächiges Versagen der Klebung aufgetreten.



Bild 13 Seitencrash am M3 CSL

11. Klebprozess in der Montage

Zum Fügen des Daches wird das Fahrzeug in eine Klebzelle ausgeschleust. Das CFK-Dach wird dort manuell von 2 Werkern mit Hilfe einer Montagevorrichtung gefügt. In dieser Vorrichtung wird das Dach bereits zur Vorbehandlung der Klebflächen und Kartuschenapplikation der Klebstoffe gehalten. Die Vorbehandlung des Roh-CFKs beinhaltet eine manuelle Reinigung mit Isopropanol-Wasser-Gemisch, gefolgt von einem mechanischen Aufrauen und abschließender erneuter Reinigung. Der Klebstoffauftrag erfolgt aus Kartuschen mit einer pneumatisch betriebenen Kartuschenpistole.

Auf den gereinigten Fahrzeug-Karosseriefansch wird in einigen Bereichen zum Stufen- ausgleich ebenfalls Strukturklebstoff appliziert.



Bild 14 Fügeprozess

Gemeinsam von beiden Werkern wird das Dach innerhalb der Offenen Zeit gefügt, ausgerichtet und mit den integrierten Schnellspannern fixiert. Anschließend werden Klebstoff- austritte verstrichen. Nach 100 Minuten wird die Vorrichtung entfernt und das Fahrzeug wieder in den weiteren Fertigungsablauf eingeschleust.

Die Werker sind intensiv geschult. Jede Klebung wird detailliert dokumentiert, und jedes Fahrzeug wird auf Wasserdichtheit geprüft.

12. Fazit und Ausblick

Abschließend läßt sich festhalten:

1. Die Integration der zusätzlichen Montage-Klebung dieser Kleinstserie in den normalen Prozess ist reibungslos gelungen
2. Die Fügetechnologie Kleben hat einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung des Sondermodells BMW M3 CSL geleistet
3. Die Marktakzeptanz des M3 CSL war sehr gut
4. Die gewonnenen Erfahrungen können in kommende, auch automatisierte Dach- und Modul-Klebung einfließen
5. Durch zunehmende Leicht- und Modulbauweise ist eine steigende Bedeutung der Klebtechnik zu erwarten
6. Ein bei höheren Stückzahlen notwendiges schnelleres Erreichen der Handhabungsfestigkeit kann durch lokales, wärmebeschleunigtes Aushärten erreicht werden