

Falzkleben im automobilen Rohbau

Prof. Dr.-Ing. Reimund Neugebauer, Dipl.-Ing. Fred Jesche,
Dipl.-Ing. (FH) Sandra Menzel, Dipl.-Ing. Karsten Richter,
Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz -
Prof. Dr. rer. nat. Bernd Mayer, Dr. rer. nat. Holger Fricke, B.Sc. Ivo Fabian Neumann,
Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung Bremen

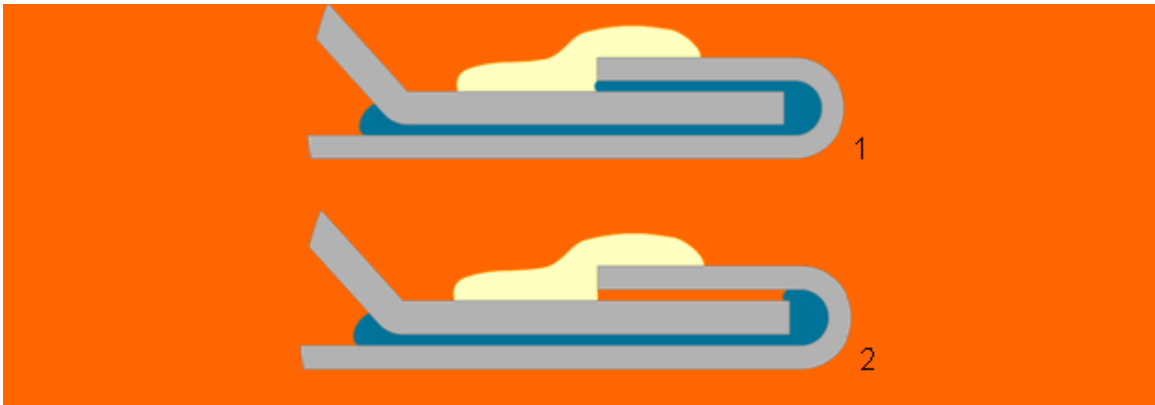
1. Einleitung

Funktionsorientierter Leichtbau und hybride Antriebstechnik sind die erklärten Entwicklungsschwerpunkte der Fahrzeugindustrie. Diese gilt dabei als Innovationsträger in Sachen Leichtbau und Fügeverfahren – jedoch werden künftig auch andere Industriezweige von den hier erreichten Verbesserungen profitieren können. Die Reduzierung des Fahrzeuggewichts ist dabei ein wesentlicher Bestandteil der Effizienzstrategie vieler OEM. Dabei ist es Ziel, die Potenziale der Werkstoffe für leichte Fahrzeuge optimal zu nutzen und die richtigen Materialien an der richtigen Stelle einzusetzen. Zunehmende Bedeutung erlangen die so genannten „kalten Fügeverfahren“, da viele der hochentwickelten metallischen Werkstoffe einen Großteil ihrer spezifischen Eigenschaften verlieren, wenn sie thermisch gefügt werden. Bestrebungen, in der Zukunft zunehmend Faserverbundwerkstoffe einzusetzen (Hybridbauweise), unterstreichen den Sachverhalt.

2. Falzkleben im automobilen Rohbau

2.1 Definition Falzkleben

Eines der „kalten Fügeverfahren“ ist das Falzen bzw. Falzkleben von Blechen. Durch die Kombination von Kleben und Falzen zählt das Falzkleben zu den Hybridfügeverfahren. Die hergestellte Verbindung zeichnet sich durch Form- sowie Stoffschluss der verbundenen Fügeteile aus. Beim Falzkleben werden zum Erzeugen des Formschlusses zwei Bleche mittels Umformen gefügt. Durch den zuvor applizierten Klebstoff zwischen den beiden Blechbauteilen wird nach erfolgter Aushärtung ein entsprechender Stoffschluss sichergestellt. Dabei verteilt sich der Klebstoff während des Umformens zwischen den Fügepartnern, wobei eine Benetzung des Falzgrundes über die Falzwurzel bis hin zum Flanschbereich der Falznahtklebung erfolgt. Die Verteilung des Klebstoffes wird durch verschiedene konstruktive Vorgaben definiert. Hierbei gibt es seitens der Automobilhersteller unterschiedliche Umsetzungen in Form von definierten Füllgraden. Üblicherweise wird eine Verteilung des strukturellen Klebstoffs zwischen einem minimalen Füllgrad Fill 2 und einem maximalen Füllgrad Fill 3 angestrebt. Der Fill 2 ist derart definiert, dass die Fläche unter dem Innenblech benetzt ist und die Falzwurzel mit Klebstoff ausgefüllt ist. Bei Fill 3 fließt der Klebstoff zusätzlich aus der Falzwurzel heraus unter den Falzflansch bis an die vordere Kante des Falzflansches.



Querschnittsdarstellung einer Falzklebung mit Nahtabdichtung.

Die Verteilung des strukturellen Klebstoffes entspricht der konstruktiven Vorgabe eines maximal (1) oder Fill 3 bzw. minimal (2) oder Fill 2 gefüllten Falzes.

Vorteile durch das zusätzliche Einbringen von Klebstoff in den Falzbereich ergeben sich u. a. durch eine Erhöhung der Arbeitsaufnahme im Falle eines Unfalles sowie eine Verbesserung der Biege- und Torsionssteifigkeit der Fügeverbindung. Des Weiteren wird ein verbesserter Korrosionsschutz (Trennung der Potentiale) sowie eine gleichmäßige Kräfteinleitung und Schwingungsdämpfung erzielt. Diese Eigenschaften sind nötig, um den stetig steigenden Sicherheits-, Komfort-, und Qualitätsansprüchen im Automobilbau gerecht zu werden. Man findet Falznahtklebungen u. a. an den Außenbereichen der Radhäuser sowie bei Anbauteilen wie Türen und Klappen. Der Einsatz dieser hybriden Füge-technik (Formschluss der Bleche und adhäsive Kräfte des Klebstoffes) ist seit vielen Jahren Stand der Technik und hat das herkömmliche Falzen/Bördeln fast vollständig verdrängt.

2.2 Prozessablauf im automobilen Rohbau

Der Prozessablauf beim Falzkleben im automobilen Rohbau unterscheidet sich anwenderspezifisch in einigen Prozessschritten, kann jedoch wie folgt verallgemeinert beschrieben werden:

Das Zuführen und Positionieren der Blechbauteile in die Falzvorrichtungen erfolgt automatisiert mittels Robotern und Handhabungswerkzeugen. Zunächst wird das im Presswerk vorgefertigte Außenhautblech mit einem vorgekanteten 90°-Bord eingelegt. Anschließend erfolgt die volumen- und lagegeregelte Applikation des strukturellen Klebstoffs. Überwiegend werden einkomponentige, heißhärtende Epoxidharzklebstoffe zur Herstellung der Falznahtklebung eingesetzt. Die Schubmoduln der Klebstoffe liegen in der Größenordnung 1000 MPa mit einer Verbundfestigkeit von 20-40 MPa, womit eine Zuordnung zu den hochfesten Klebstoffen getroffen werden kann. Abhängig von ihrer Viskosität werden Falzklebstoffe als Raupe (hochviskos) oder per Wirbelsprühverfahren (niedrige Viskosität) appliziert. Die eingesetzten Klebstoffe sind oftmals mit Glaskugeln gefüllt, um eine minimale Klebschichtdicke zu gewährleisten. Als weitere positive Effekte beim Einsatz von Klebstoffen mit Glaskugeln werden das Verkrallen der Glaskugeln in der Metalloberfläche und die dadurch verbesserte Handhabungsfestigkeit sowie die verminderte Rückfederung angesehen. Bei der volumen- geregelten Applikation des strukturellen Klebstoffes wird in einigen Fällen das Applikationsbild überwacht (QUISS). Hierdurch können größere Abweichungen von der vorgegebenen Raupenposition sowie Raupenunterbrechungen detektiert werden.

Nach erfolgter Klebstoffapplikation wird das versteifende Strukturteil der zu fügenden Baugruppe wiederum mittels Roboter zugeführt, geschachtelt und durch einen Niederhalter in der Lage fixiert. Der eigentliche Falzvorgang schließt sich an. In der industriellen Praxis

kommen sowohl das Roll- als auch das Tabletop-Falzen zum Einsatz, wobei die Auswahl des Falzverfahrens v. a. auf Grundlage der zu fertigenden Stückzahlen und Taktzeiten in Kombination mit den entstehenden Werkzeug- und Anlagenkosten erfolgt.

Der folgende Prozessschritt ist optional. Durch ein Angelieren des Klebstoffs mittels induktiver Erwärmung oder Durchlaufen eines Rohbauofens wird eine Handhabungsfestigkeit der Falzklebung erreicht. Eine Relativbewegung zwischen den einzelnen Blechen einer gefügten Baugruppe bei Transport und Lagerung kann so minimiert sowie die Auswaschbeständigkeit während der Kathodischen Tauchlackierung (KTL) verbessert werden.

Zusammen mit der gesamten Rohkarosserie durchläuft eine falzgeklebte Baugruppe beim Lackieren der Karosserie den kompletten Lackierprozess. Während der KTL-Vorbereitung (Reinigung, Spülung, Phosphatierung) und der Elektrotauchlackierung werden Lackschichten von bis zu 30 µm auf den Blechbauteilen der Karosserie abgeschieden. Durch die Umgriff-Fähigkeit dieses Verfahrens ist eine Beschichtung auch in Hinterschnitten und Hohlräumen möglich. Dringt flüssiger (unkoagulierter) KTL-Lack durch den Falzspalt in den Bereich des Falzes ein, kann hier eine Beschichtung erfolgen. Der strukturelle Klebstoff wird gemeinsam mit dem koagulierten KTL-Lack im Ofen ausgehärtet. Dies erfolgt bei Temperaturen von 180 bis 200 °C über einen Zeitraum von 15 bis 30 Minuten.

Im Nachgang wird die Nahtabdichtung aufgebracht. Hierbei wird mittels angepasster Applikationsverfahren (Dünnstrahlspritzen oder Flatstream-Verfahren) ein PVC-Plastisol im Bereich von Flanschen und Falzen aufgetragen. Die Nahtabdichtung verschließt den Falzspalt und dient der Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit sowie dem Schutz der Beschnittkante des Außenbleches.

Die Applikation der Nahtabdichtung erfolgt im Sichtbereich (Türen, Heckklappe) mittels Dünnstrahlspritz- bzw. Flatstream-Verfahren. Es soll ein gleichmäßiges Applikationsbild in hochwertiger Anmutung erzielt werden. Im Unterbodenbereich oder im Bereich von Radhäusern werden Nahtabdichtungen mittels Wirbelsprühverfahren aufgetragen. Hiermit kann eine breitflächige Applikation umgesetzt werden. Ferner ermöglicht ein „Überspritzen“ den Auftrag des Plastisols in dicken Schichtstärken. Bei dem Plastisol handelt es sich um eine Dispersion granulärer Vinylchlorid-Polymerisate (PVC-U also Hart-PVC) in einem flüssigen Weichmacher. Bei Temperaturen unter 35 °C findet kein Abbindeprozess statt. Bei höheren Temperaturen kommt es, hervorgerufen durch das Aufweichen bzw. Aufquellen der PVC-U-Partikel, zum Gelieren des Plastisols. Bei Temperaturen zwischen 140 °C und 220 °C bindet das Plastisol vollständig ab und weist die für PVC-P (Weich-PVC) charakteristischen Eigenschaften auf.

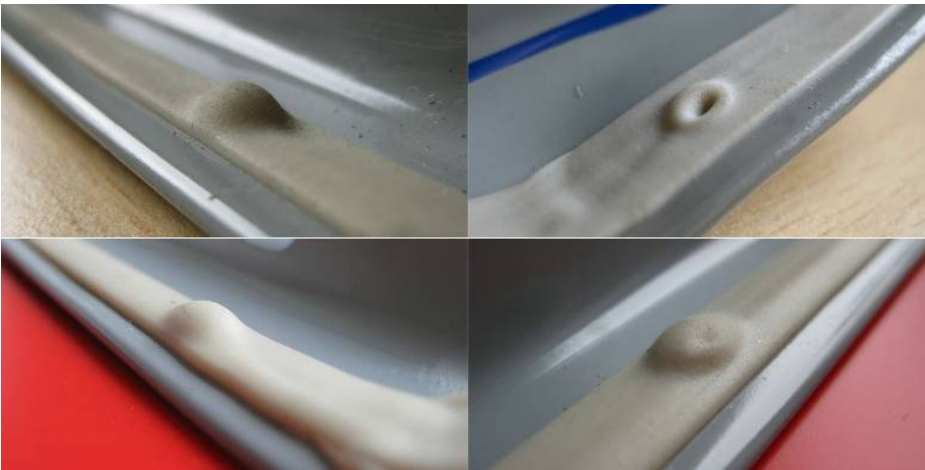
2.3 Auftretende Probleme beim Falzkleben

Rund um das Falzkleben und die damit verbundenen nachfolgenden Prozesse können zahlreiche Probleme auftreten, die das Fügeergebnis negativ beeinflussen bzw. im Produktlebenszyklus zum Bauteilversagen führen können. Hierzu gehören u. a.:

- Schwankungen beim Klebstoffauftrag hinsichtlich definierter Raupenlage und Klebstoffmenge,
- Mangelnde Anfangsfestigkeit,
- Werkzeugverschmutzung,
- Klebstoffauswaschungen im KTL und im Reinigungsprozess,
- KTL-Ausläufer,
- Blasenbildung in Falzklebstoff und Nahtabdichtung,

- Mangelnde Möglichkeiten der Prüfung sowie
- Falzkorrosion.

Die Fehlerstellen in der Nahtabdichtung stellen ein bisher ungelöstes Problem dar und sind nach Einschätzung zahlreicher Anwender der Falzklebetechnologie das kritischste der genannten Probleme. Die Ursachen der Blasenbildung sind nicht geklärt und können somit nicht systematisch verhindert werden.



Fehlerstellen in der Nahtabdichtung

Die Auslegung der Verbindungen und des Falzklebprozesses erfolgen bisher überwiegend auf der Basis von Erfahrungen. Alle auftretenden Fehlerstellen müssen aufwendig nachbearbeitet werden, da sie - wenn sie im Fahrzeug verbleiben - einen ständigen und direkten Zugang für Elektrolyte in den Falz und somit einen Angriffspunkt für Korrosion bieten. Korrosionsschäden an Türen und Heckklappen führen zu einem erheblichen finanziellen Schaden für die Automobilindustrie. Dies wird auch durch Rückrufaktionen oder Nachbesserungen der Nahtabdichtung von im Feld befindlichen Fahrzeugen deutlich.



Fehlerstellen in der Nahtabdichtung und Korrosion als Folge

3. Ursachen für die Blasenbildung

Um die Ursachen für Fehlstellen in Falzklebung und Nahtabdichtung zu ermitteln, werden folgende Methoden eingesetzt:

- Formulierung von Erklärungsmodellen zur Entstehung von Fehlstellenentstehung. Diese werden aus den Erfahrungen und Voruntersuchungen der Anwender sowie aus der Analyse fehlerbehafteter Bauteile aus der industriellen Produktion entwickelt.
- Analysen und Teilerperimente sowie numerische Simulationen zur gezielten Untersuchung einzelner Zusammenhänge
- Gesamtexperiment, in welchem Falzklebbauteile mit seriennahen Parametern hergestellt werden.

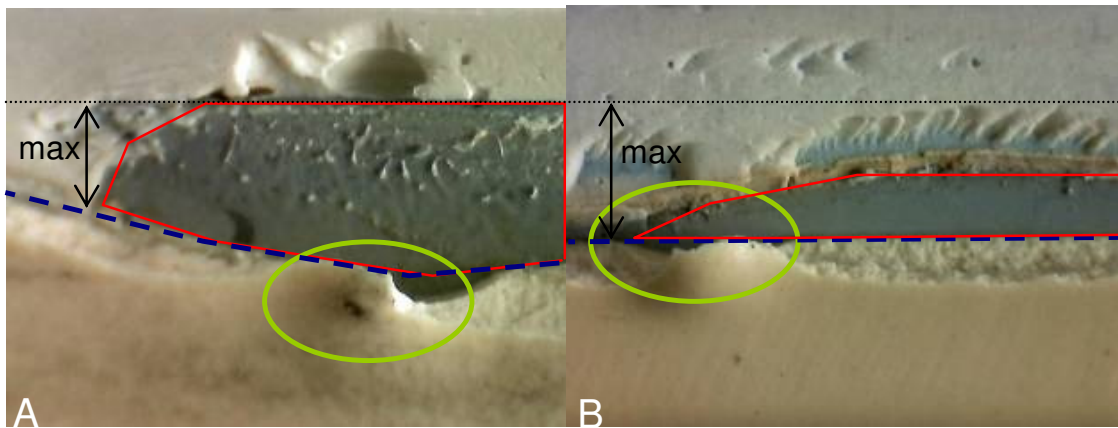
3.1 Kategorisierung von Fehlern im Falzklebstoff und der Nahtabdichtung von Realbauteilen

Anhand von durch die Industriepartner zur Analyse bereit gestellten Bauteilen aus realen Fertigungsprozessen konnte geschlussfolgert werden, dass Fehler innerhalb des Falzes bzw. der Falzklebung ursächlich für Fehlstellen in der Nahtabdichtung sind. An jeder untersuchten Fehlstelle konnte ein durch die Nahtabdichtung abgeschlossenes Luftvolumen identifiziert werden. Das identifizierte Luftvolumen befindet sich jeweils in einer Kavität, die sich hinsichtlich ihrer geometrischen Ausprägungen unterscheiden. Es sind verschiedene Materialien an der Entstehung einer Kavität beteiligt. Als geometrische Randbedingung sind die gefalzten Blechbauteile anzusehen. Hinzu kommt die Verteilung des Falzklebstoffes und des KTL-Lackes innerhalb des Falzspaltes.

Zur Fehlerbeschreibung und Kategorisierung von Fehlern im Falzklebstoff wird der KTL-Umgriff herangezogen. Die Umgriffbarkeit des KTL-Lackes beschreibt die Möglichkeit des flüssigen KTL-Lackes Hinterschnitte oder Hohlräume zu benetzen und durch eine angelegte elektrische Spannung dort zu koagulieren.

1. Fehlerkategorie mit KTL-Umgriff

Die Spaltgängigkeit des KTL-Lackes wird durch die Größe der Spaltöffnung des Falzes bestimmt. Bei den phänomenologischen Untersuchungen lassen sich Falznahtklebungen mit KTL-Beschichtung innerhalb des Falzes identifizieren. Voraussetzung für diesen KTL-Umgriff ist eine hinreichend große Spaltöffnung und eine unvollständige Füllung des Falzspaltes mit Klebstoff (siehe Bild). Aufgrund der Füllgradschwankung befindet sich eine Kavität im Bereich der Falzspaltöffnung (rot markierte Fläche). Diese wird während des KTL-Prozesses mit flüssigem KTL-Lack gefüllt. Hierdurch kann eine entsprechende Beschichtung innerhalb des Falzspaltes durch Koagulation erzeugt werden.



Fertigungsbedingte Abweichung des Füllgrades des strukturellen Falzklebstoffes und erfolgter KTL-Umgriff.

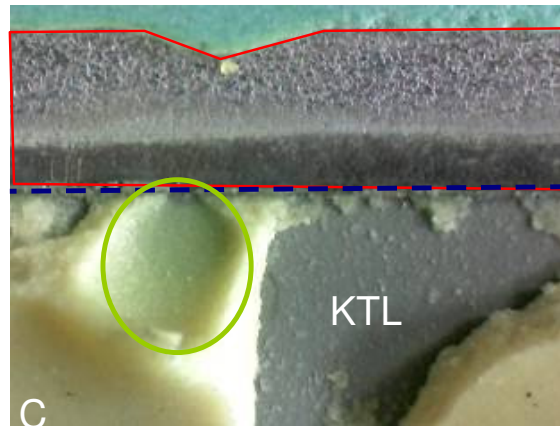
Die mit A + B bezeichneten Fotografien zeigen die Klebstoffverteilung im Bereich einer Schwankung der Klebstofffüllung im Falz. Die schwarz gepunktete Linie kennzeichnet den Verlauf der Beschnittkante des Innenteiles. Die blau gestrichelte Linie den entsprechenden Verlauf der Beschnittkante des Außenteiles. Die rot umrandete Fläche beschreibt den Bereich der Kavität mit erfolgtem KTL-Umgriff. Die Fehlstelle in der Nahtabdichtung ist mit einem grünen Oval gekennzeichnet. Auf der jeweils linken Seite der Fotografien entspricht der Füllgrad des Klebstoffes den maximalen (max) konstruktiven Vorgaben.

Den beiden Abbildungen A+B ist zu entnehmen, dass im Bereich der Füllgradschwankung eine Fehlstelle in der Nahtabdichtung zu erkennen ist (grüne Kennzeichnung). Ein häufig identifiziertes Fehlerbild ist durch Fotografie B beschrieben, hier befindet sich die Fehlstelle unmittelbar am Wechsel des maximalen Füllgrades zu geringeren Füllgraden.

Ursache für die Klebstoffverarmungen im Falzspalt sind Fehler bei der Klebstoffapplikation in Hinblick auf Position und Volumenstrom (Unterdosierung). Des Weiteren können Strömungsvorgänge beim Schachteln der Blechbauteile die Verteilung des Klebstoffes beeinflussen. Zusätzlich können weitere Abweichungen bei der Klebstoffverteilung zu einem geöffneten Spalt führen. So wurde bei einer der untersuchten Proben ein Klebstoffklecks (keine Verbindung zum übrigen Klebstoff in der Falzung) als Ursache für die Öffnung des Falzspaltes ausgemacht.

2. Fehlerkategorie ohne KTL-Umgriff

Der Falzspalt kann soweit geschlossen sein, dass kein flüssiger KTL-Lack in den Spalt eindringen kann. Der mit C markierten Fotografie kann eine entsprechende Klebstoff- und KTL-Lackverteilung entnommen werden. Deutlich ist die metallfarbene, unbeschichtete Oberfläche innerhalb des Falzbereiches ersichtlich (rote Markierung). Zum Vergleich wurde in der unteren rechten Hälfte der Fotografie die Nahtabdichtung entfernt und die KTL-beschichtete Oberfläche sichtbar gemacht (Kennzeichnung "KTL"). Auf der unteren linken Seite ist eine Fehlstelle in der Nahtabdichtung (grüne Markierung) zu erkennen.



Fehlerbild bei gleichmäßiger Verteilung des Klebstoffes und nicht erfolgtem KTL-Umgriff. Die rot markierte Fläche kennzeichnet die Kavität innerhalb der Falznahtklebung. Deutlich ist die unbeschichtete metallische Oberfläche des Bleches zu erkennen. Mit KTL ist der beschichtete Bereich des Bauteiles unter der Nahtabdichtung gekennzeichnet. Die blau gestrichelte Linie beschreibt den Verlauf der Beschnittkante des Außenteils. Mit einem grünen Oval ist die Fehlstelle (Blase) in der Nahtabdichtung gekennzeichnet.

Unter den gegebenen geometrischen Randbedingungen hat sich ein konkaver Meniskus aus KTL-Lack am Eingang zum Falzspalt zwischen Beschnittkante des Außenteiles und der Oberfläche des Innenteiles ausgebildet. Der KTL-Lack koagulierte auf den Blechteilen und verschiebt den vorhandenen, minimalen Falzspalt. Bei der Fehlstelle auf der linken Seite der Fotografie ist dieser Meniskus unterbrochen. Diese Unterbrechung fungiert als Düse, so dass der aufgrund der Temperaturerhöhung angestiegene Druck innerhalb der Falzklebung hier eine Bewegung/Deformation der Nahtabdichtung bewirkt. Hierdurch entsteht die Fehlstelle in der Nahtabdichtung (grüne Markierung).

3. Weitere Fehlerbilder in der Falzklebung

Weitere identifizierte Fehlerbilder bei der phänomenologischen Untersuchung sind durch eine schaumartige, kapillarhafte und teilweise feinverästelte Struktur in der Klebstoffverteilung beschrieben. Häufig wird diese Struktur "Borkenkäfer" genannt, da sie in ihrer Anmutung an die Brutgänge eines Borkenkäfers erinnert (siehe Fotografie D). Als modellhafte Erklärung für das Aufschäumen und die Kanalbildung sind mögliche Lufteinschlüsse innerhalb des Falzklebstoffes in der Falzwurzel zu nennen. Die "Borkenkäfer"-Struktur entsteht erwiesenermaßen durch ein Rückfedern des umgefalteten Außenteiles, was auch durch ein Teilerperiment nachvollzogen werden konnte.

Bei der Betrachtung des KTL-Lackes lassen sich ebenfalls schaumartige Strukturen identifizieren. Als modellhafte Erklärung für deren Entstehung ist der Verbleib von unkoagulierte, also flüssigem KTL-Lack innerhalb des Falzspaltes zu nennen. Dieser kann während des Einbrennensprozesses aufschäumen und anschließend aushärten (siehe Fotografie E). Des Weiteren können sich begrenzende Strukturen aus eingebranntem KTL-Lack ausbilden (Fotografie F). Hierdurch werden ebenfalls die Geometrie der Kavität beschrieben/verändert und ein mögliches eingeschlossenes Volumen begrenzt.

Die oben genannten Phänomene sind in der folgenden Abbildung mit exemplarischen Fotos aus den Untersuchungen dargestellt. Diese Phänomene können in unterschiedlichen Ausprägungen und Kombinationen auftreten. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein Luftvolumen in eine Kavität eingeschlossen ist. Die geometrische Ausprägung der Kavität wird durch die Bleche, die Klebstoffverteilung sowie durch KTL-Lack und dessen Verteilung beschrieben. Die abgeschlossenen, luftgefüllten Kavitäten führen zu unterschied-

lichen Fehlstellen in der Nahtabdichtung. Im Folgenden werden eine Kategorisierung dieser Fehlstellen in der Nahtabdichtung sowie weitere Erläuterungen der Fehlstellen innerhalb der Falznahtklebung vorgenommen.

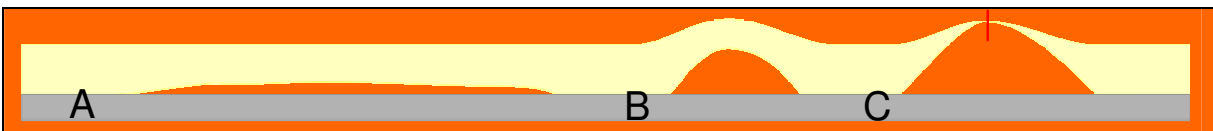


Exemplarische Auswahl von Fotografien der phänomenologischen Untersuchungen der industriellen Bauteile mittels Binokular. Bei allen Abbildungen befindet sich die Falzwurzel am oberen Bildrand.

Fotografie D zeigt schaumartige Strukturen sowie eine Kanalbildung im Klebstoff durch eingeschlossene Luft in der Falzwurzel (rote Markierung). Fertigungsbedingte Abweichungen seitens der Verteilung des KTL-Lackes sind den Abbildungen E und F zu entnehmen. Aufgeschäumter KTL-Lack (E) sowie eine begrenzende Struktur durch ausgehärteten KTL-Lack (rot) innerhalb des Falzes und Klebstoffflecks (blau).

4. Fehlerkategorien der Nahtabdichtung

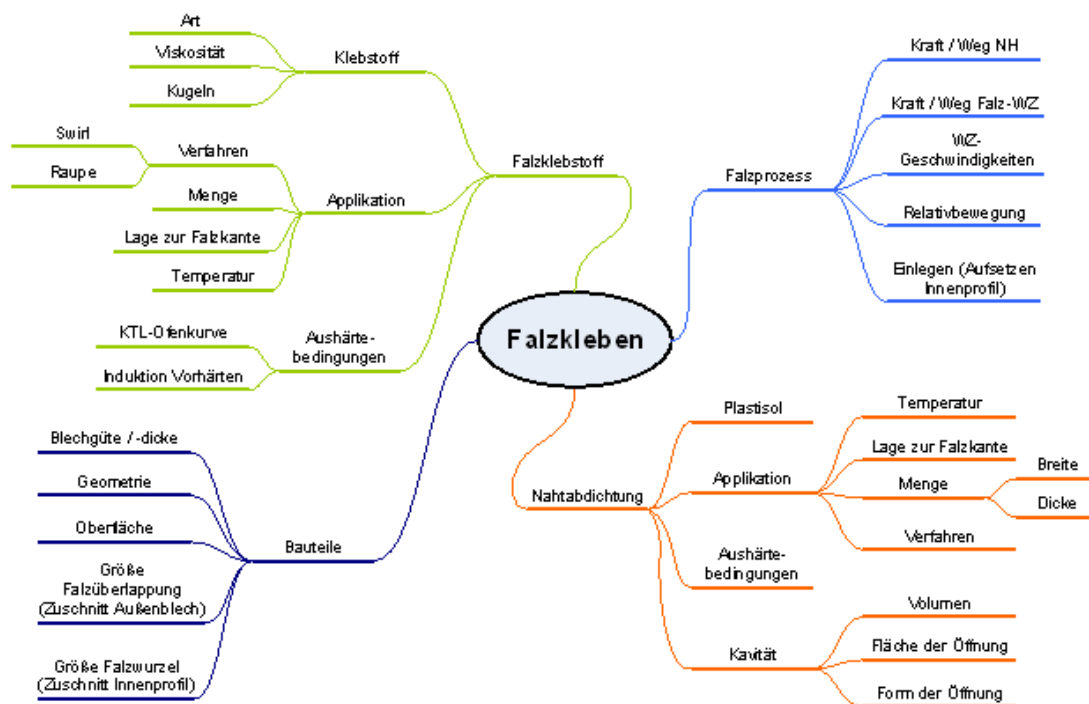
Die Fehlstellen in der Nahtabdichtung werden zur Auswertung kategorisiert. Nahtabdichtungsfehler treten nicht ausschließlich in Form einer kompakten Blase (siehe B in der nachfolgenden Abbildung) auf. Unter bestimmten Randbedingungen sind latente langgestreckte Fehlstellen (siehe A) in der Nahtabdichtung zu identifizieren. Diese latenten Fehlstellen sind äußerlich nicht sichtbar. Erst durch eine zerstörende Prüfung ist ein Fehler zu erkennen. Die Öffnungsgeometrie der Kavität sowie der Schichtdicke des Plastisols beeinflussen die Ausprägung der Fehlstelle in der Nahtabdichtung. Des Weiteren gibt es die Kategorie der geplatzten Fehlstelle (siehe C). Diese Fehlstellen verfügen über eine kleine Pore, die zum Teil nur mit Hilfe einer Lupe ersichtlich ist. Eingefallene, geplatzte Blasen dieser Kategorie erinnern in ihrer Anmutung an einen Vulkankrater. Die eingeführte Kategorisierung erfolgt auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen und dient dem einheitlichen Sprachgebrauch bei der Analyse und Interpretation von Fehlstellen.



Kategorien von Fehlstellen in der Nahtabdichtung. A: latente Fehlstelle, von Außen nicht als Fehlstelle zu erkennen. B: (normale) Fehlstelle, blasenförmig. C: zerstörte bzw. im Prozess geplatzte Fehlstelle mit (mikro) Öffnung (rot).

3.2 Theorien zu den Ursachen der Blasenbildung

Das Falzkleben ist ein komplexer Fertigungsprozess, bei dem zahlreiche Prozessparameter zu dem erreichbaren Fügeergebnis beitragen und somit als für die Blasenentstehung ursächliche Störgrößen in Betracht kommen.




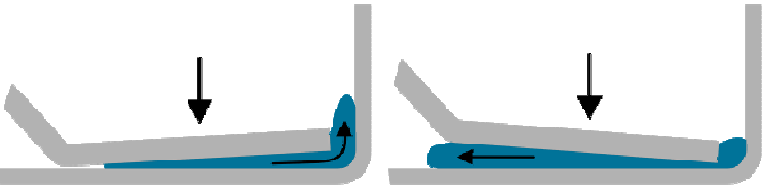



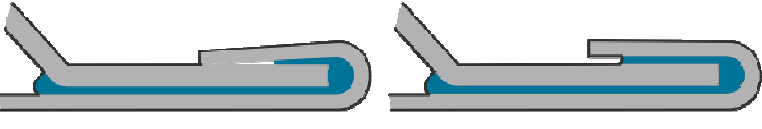
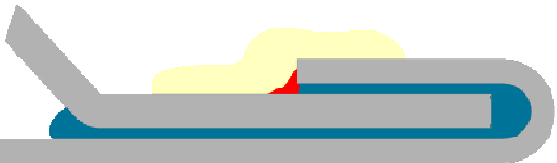
Prozessparameter beim Falzkleben

Basierend auf den Erfahrungen der Anwender und den Überlegungen und Vorversuchen an den Forschungsstellen wurden verschiedene Ursachen zur Entstehung dieses Fehlerbildes untersucht. Alle Erklärungsmodelle für die Entstehung von Blasen im PVC-Plastisol basieren auf der folgenden zentralen Hypothese:

Während des Falzklebprozesses bildet sich eine Kavität, die durch die Bleche, den ausgehärteten Falzklebstoff und durch den eingebrannten KTL-Lack begrenzt wird. Das PVC-Plastisol schließt ein Luftvolumen in dieser Kavität ein. Die Erhöhung der Temperatur im Aushärteprozess des Plastisols führt zu einer Druckerhöhung innerhalb der Kavität. Hieraus resultiert eine Volumenvergrößerung der Luft, die eine Deformation der unabhängenen PVC-Nahtabdichtung hervorruft.

Alle in Rahmen des Vorhabens analysierten Fehlstellen weisen ein mit der Hypothese übereinstimmendes Schadensbild auf. Im Folgenden wird ein Bezug zwischen den Fehlerbildern und Prozesseinflüssen mittels Thesen hergestellt. Neben der Abhängigkeit von den Materialien und der Geometriegebung durch den Falzvorgang wird die Ausbildung der Kavität durch die Klebstoffverteilung (-verdrängung) beeinflusst. Weitere Einflussfaktoren sind die Tauchlackierung und die thermischen Einflüsse während der Klebstoffaushärtung. Da verschiedene Hersteller unterschiedliche konstruktive Vorgaben hinsichtlich der Füllgrade der Falznahtklebung nutzen, wird ein Füllgrad Fill 2 (siehe Kapitel Falzkleben) trotz des systemimmanenten Lufteinschlusses nicht als These für die Fehlstellenentstehung aufgeführt. In der Praxis entstehen sowohl bei den Füllgraden Fill 2 als auch bei Fill 3 Fehlstellen, so dass die konstruktive Vorgabe eines nicht vollständig gefüllten Falzes nicht als ursächlich für die Entstehung von Fehlstellen angesehen werden kann.

Thesen für Mechanismen zur Bildung von Kavitäten im Falzspalt

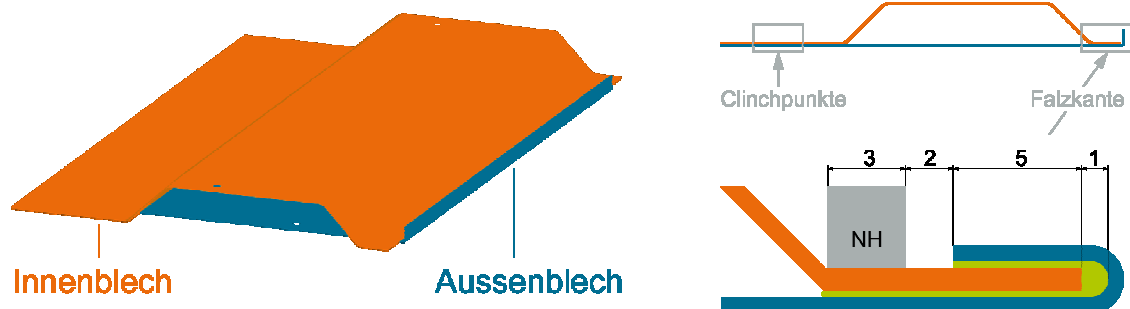
<p>Schemazeichnung</p>	<p>These für Ursachen zum Lufteinschluss</p>
	<p>Bei der Klebstoffapplikation kommt es zu Lufteinschlüssen innerhalb des Klebstoffes.</p>
	<p>Beim Schachteln der Blechbauteile werden Strömungsvorgänge im Klebstoff hervorgerufen.</p>
	<p>Strömungsvorgänge und die Position der Klebstoffraupe bestimmen die KS-Verteilung.</p>
	<p>Klebstoffverteilung vor dem 135° bzw. 180°-Fertigfalz bestimmen Füllgrad und -schwankung.</p>
	<p>Rückstelleffekte der Bleche begünstigen einen Lufteintrag in die Falzklebung.</p>
	<p>KTL-Lack beeinflusst in Abhängigkeit der gegebenen Randbedingungen die Begrenzung der Kavität bzw. -öffnung.</p>
<p>keine Abbildung</p>	<p>Thermische Effekte während des Aushärtens der Polymer-systeme beeinflussen die Kavitätsgeometrie.</p>
	<p>Bei der Applikation des Plastisols wird ein Luftvolumen eingeschlossen.</p>
<p>keine Abbildung</p>	<p>Thermische Ausdehnung des eingeschlossenen Luftvolumens</p>

3.3 Gesamtexperiment

Als Nachbildung eines realen Falzklebprozesses im automobilen Rohbau wurde ein prozessnahes Gesamtexperiment entwickelt, mit dem im Labormaßstab die Probleme des Falzklebprozesses nachgestellt werden können. Aufgrund der Erfahrung, dass die Blasenproblematik sowohl beim Rollfalzen als auch beim werkzeuggebundenen Falzen gleichermaßen auftritt, erfolgte eine Beschränkung des Versuchsprogramms auf das werkzeuggebundene Falzen. Zur Minimierung des Werkzeugeinarbeitenaufwands und zur besseren Handbarkeit des Versuchsaufbaus und der simulativen Begleitung der Untersuchung wurden die Falzgeometrien weiter eingeschränkt auf eine gerade ebene Falzlinie.

Die Probengeometrie der zu falzenden Blechteile wurde einer vereinfachten automobilen Falzbaugruppe nachempfunden. Die Größe der Proben wurde so festgelegt, dass sie im Labor gut handhabbar sind, dabei aber trotzdem eine ausreichend lange Falzkante gewährleistet ist. So wurden Probenabmessungen von ca. 200 mm x 300 mm vorgegeben, wobei auf einer Länge von 300 mm gefalzt wird. Das Außenblech ist eben ausgeführt. Das Innenblech soll die geometrischen Bedingungen eines Versteifungsteils abbilden und wird daher zu einem Hutprofil geformt. Zusätzlich wird jedes Innenblech an der Beschnittkante im späteren Falzbereich mit einem Überschnitt als geometrische Unstetigkeit versehen, der bei mehrstufigen Schneidvorgängen häufig als Freilegung in Beschnittkanten vorkommt. Dieser Überschnitt wird in jedes Innenblech wiederholgenau eingebracht.

Da an nur einer Seite der Probe gefalzt werden soll, ist es notwendig, eine Fixierung von Innen- und Außenblech nach dem Falzen vorzunehmen, um eine Relativbewegung beim Teilehandling auszuschließen. Hierfür wird das Clinchen als Fügeverfahren gewählt, d. h. alle Proben enthalten an der der Falzkante gegenüber liegenden Seite zwei rechteckige Clinchpunkte, die mit einer Clinchzange *Eckold MZD 45/30* eingebracht werden. Die Maße am Falz (Falzwurzelbreite = 1 mm, Überdeckung = 5 mm, Abstand zum Niederhalter = 2 mm, Niederhalterbreite = 3 mm) werden gemäß den Vorgaben aus dem projektbegleitenden Ausschuss realisiert und von der Parametervariation im Versuchsprogramm ausgeschlossen.



Probengeometrie für das prozessnahe Gesamtexperiment

Für die Versuchsdurchführung wurde eine Reihe an Festlegungen gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss getroffen. Zunächst erfolgte die Beschränkung des Versuchsprogramms auf eine einzige Blechepaarung. Für die Außenhautbleche werden Bleche der Güte DC06+ZE mit einer Blechdicke $s_0 = 0,7$ mm verwendet. Die Innenbleche werden aus der Blechgüte DC04+ZE mit einer Blechdicke $s_0 = 1,0$ mm gefertigt. Hinsichtlich des Oberflächenzustandes der Bleche wird der Vergleich zwischen komplett entfetteten und definiert beöhlten Blechoberflächen angestrebt. Im betrieblichen Falzprozess ist das Innenblech stärker beölt als das Außenblech. Auf Basis der zulässigen Werte für die Grundbeölung von Blechen wurden folgende definierte Ölmengen festgelegt: Außenblech $1,5$ g/m², Innenblech 3 g/m². Verwendet wird das Ziehöl *Multidraw KTL N16* des Herstellers Zeller +



Gmelin, das die Anforderungen des VDA-Pflichtenheftes und sämtlicher deutscher Automobilhersteller erfüllt.

Entsprechend der unterschiedlichen Nutzung bei den OEM wurde jeweils ein Vertreter eines hochviskosen Klebstoffs (*Betamate 1493G* der Firma Dow Automotive) und eines niedrigviskosen Klebstoffs (*Terokal 8026* der Firma Henkel) in das Versuchsprogramm integriert. Beide Versuchswerkstoffe sind einkomponentige Epoxidharzklebstoffe, welche zur Sicherstellung einer definierten minimalen Klebschichtdicke mit Glaskugeln gefüllt sind. Die Applikation des hochviskosen *Betamate 1493G* erfolgt robotergestützt im Raupenauftrag. *Terokal 8026* wird aufgrund seiner niedrigen Viskosität mittels Wirbelsprühverfahren robotergestützt aufgetragen. Als Füllgrad der Falzwurzel wird sowohl der Fill 2 als auch der Fill 3 in die Versuchsmatrix integriert. Bei Fill 3 lässt es sich nicht vermeiden, dass Klebstoff aus dem Falz herausgequetscht wird. Dieser überschüssige Klebstoff wird bei den ersten Versuchsreihen auf den Blechen belassen. In späteren Versuchsreihen wird jedoch auch untersucht, welchen Einfluss das Wischen hat, welches bei den PbA-Mitgliedern bei ausgetretenem Klebstoff durchgeführt wird. Hier wird der überschüssige Klebstoff direkt nach dem Falzen mit einem Spatel entfernt.

Auch bei der Aushärtung der Falzklebstoffe sollen die zwei in der Serienfertigung gebräuchlichen Szenarien untersucht werden: das alleinige Aushärten der Falzverbindung im Ofen und das Aushärten im Ofen mit vorhergehendem induktiven Vorhärten der Baugruppen. Der KTL-Prozess sollte ursprünglich nicht berücksichtigt werden. Da es sich im Verlauf des Projektes jedoch herausstellt, dass der KTL-Prozess einen Einfluss auf die Bildung der Fehlstellen in der Nahtabdichtung hat, werden stichprobenartig auch einige Proben in den Serien-KTL-Prozess bei VW Sachsen eingeschleust und ausgehärtet.

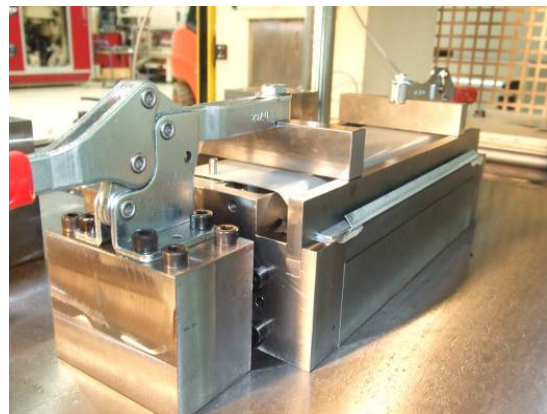
Die Nahtabdichtung sollte laut dem ursprünglichen Versuchsplan ebenfalls nicht mit untersucht werden, da davon ausgegangen wird, dass sie die Fehlstellen nur sichtbar macht, der Ursprung der Fehlstellen jedoch schon im Bauteil steckt und in den vorgelagerten Prozessen zu suchen ist. Da jedoch allein aus den Erfahrungen der Anwender nicht eindeutig definiert werden kann, wie eine Falzklebung aussieht, die letztendlich zu einer Fehlstelle in der Nahtabdichtung führt, wird festgelegt, alle Proben mit einer Nahtabdichtung zu versehen, diese jedoch nicht gezielt zu variieren. Das PVC-Plastisol (*EFTEC EFSEAM PS 423-1*) wird bei Daimler Bremen zunächst manuell, später dann robotergestützt aufgetragen. Das Abbinden erfolgt im Ofen. Da das Aufbringen der Nahtabdichtung für die Probensets in mehreren Chargen stattfindet, kann keine gleichbleibende Dicke sichergestellt werden. Bei der Auswertung der Proben wird daher die jeweilige Dicke der Nahtabdichtung gemessen.

In der realen Prozesskette bei den Anwendern kann zwischen dem Falzen der Baugruppen und der KTL-Lackierung, d.h. der endgültigen Aushärtung des Falzklebstoffes eine Zeitspanne von bis zu 3 Wochen liegen. Während dieser Zeit kann es durch diverse Handlings- und Transportvorgänge zu einer Verschiebung von Innen- und Außenblech kommen. Diese Relativbewegung im unausgehärteten Zustand soll auch in dem Versuchsprogramm untersucht werden. Sie soll im Experiment maximal ± 1 mm betragen.

Parameter	Realisierungen	
Füllgrad Falzklebstoff	Fill 2 	Fill 3 
Falzklebstoff / Applikation	Terokal 8026GB Wirbelsprühen	Betamate 1493G Raupe
Blechoberfläche	beölt Außenblech 1,5 g/m ² Innenblech 3 g/m ²	entfettet
Relativbewegung	mit + / - 1 mm	ohne
Aushärten Falzklebstoff	Ofen	Induktion + Ofen

Versuchsmatrix der im Gesamtexperiment zu vergleichenden Parameter

Die aufgeführten Parameter werden vollfaktoriell miteinander kombiniert, um so die Einflüsse der einzelnen Realisierungen isolieren und bewerten zu können. Für jeden Parametersatz wurden fünf Proben angefertigt.

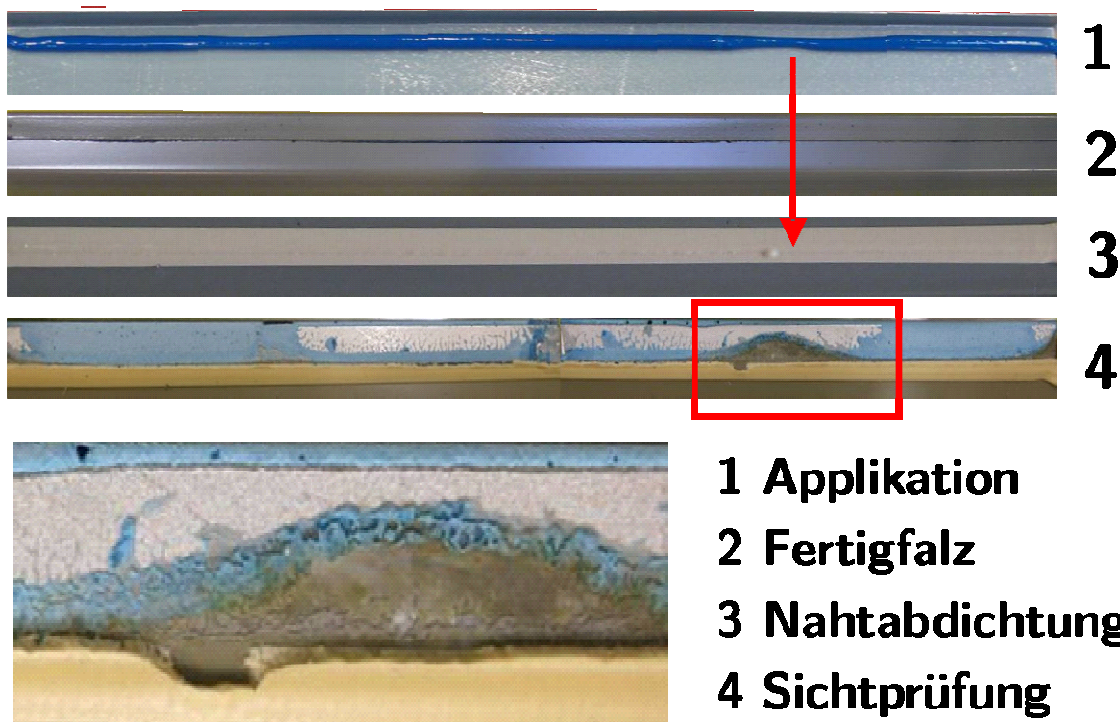


links: Klebstoffapplikation mit Wirbelsprühverfahren, rechts: Falzwerkzeug (nach dem Vorfalzen)

3.4 Auswertung

Sämtliche im Verlauf des Gesamtexperiments angefertigten Probekörper wurden während der Verarbeitung mehrfach fotografisch dokumentiert, um eine detaillierte anschließende Auswertung zu ermöglichen. Fotos wurden jeweils nach der Applikation des Klebstoffs, nach dem Falzen, ggf. nach dem Wischen von ausgetretenem Klebstoff, ggf. nach dem induktiven Vorgelieren des Klebstoffs sowie nach der Aushärtung bzw. dem durchlaufenen KTL-Prozess angefertigt. Auch nach dem durchgeführten Auftrag der PVC-Nahtabdichtung werden ebenfalls Fotografien erzeugt. Zu diesem Zeitpunkt lassen sich bereits größere Fehlstellen in der Nahtabdichtung per Sichtprüfung feststellen.

Im folgenden Bild ist ein Beispiel für eine vergleichende Gegenüberstellung der so entstandenen Fotodokumentation dargestellt. Aufgezeigt sind die vier Schritte der Fotodokumentation. Ersichtlich ist der Zusammenhang zwischen der lokalen Füllgradschwankung und einer Klebstoffunterdosierung sowie der Entstehung einer Fehlstelle in der Nahtabdichtung (Pfeil). Unten links ist der fehlerhafte Bereich der Falznahtklebung vergrößert dargestellt.



Exemplarische Darstellung der Fotodokumentation eines prozessnahen Probefalzes

Die Falznaht jedes einzelnen Versuchskörpers wurde zerstörend geprüft. Hierzu wird zunächst in der Probenmitte ein Querschliff der Falzverbindung hergestellt. An diesem Querschnitt wird die Geometrie der Falzverbindung gemessen. An der restlichen Probe wird das Außenblech im Bereich der Falzwurzel durch einen Trennschliff aufgetrennt. Die Klebstoffschicht wird durch Schalen freigelegt. Es wird eine Sichtkontrolle der inneren Falznahtklebung vorgenommen. Dabei können sowohl Fehlstellen in der Falzklebung als auch kleinere Fehlstellen in der Nahtabdichtung, welche bei einer äußerlichen Sichtprüfung nicht erkannt werden können, detektiert werden.

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche und Auswertungen können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

Ein Einfluss des Beölungszustandes der Bleche auf die Fehlerhäufigkeit konnte nicht festgestellt werden. Die Ölaufnahmefähigkeit der verwendeten Klebstoffe schließt diese Einflussgröße offensichtlich aus.

Die Form des Klebstoffauftrags (Raupe/Swirl) hat hingegen einen signifikanten Einfluss auf die Häufigkeit des Auftretens von Fehlern in der Nahtabdichtung. Es kann davon ausgegangen werden, dass es beim Klebstoffauftrag mit dem Swirl-Verfahren zu mehr Lufteinschlüssen kommt, die verstärkt zu Kanal- bzw. Kavitätenbildungen führen können. Es muss jedoch beachtet werden, dass bei den durchgeführten Experimenten bei den beiden Klebstoffauftragsverfahren jeweils verschiedene Klebstoffe verwendet wurden.

Auch der Füllgrad des Falzes mit Klebstoff hat einen offensichtlichen Einfluss auf die Fehlerhäufigkeit in der Nahtabdichtung. Die Flanschausfüllung Fill 2 ist in Verbindung mit einem Klebstoffauftrag in Raupenform deutlich weniger fehleranfällig als Fill 3. Das könnte darauf zurück zu führen sein, dass sich bei einem Füllgrad Fill 2 unter der Nahtabdichtung größere zusammenhängende Kavitäten bilden, die eine große Fläche zur Nahtabdichtung haben. Damit unterbleiben Düseneffekte, die bei der Erwärmung der Luft in den Kavitäten zu Blasen führen könnten. Erst bei einem Klebstoffauftrag im Swirl-Verfahren treten auch beim Füllgrad Fill 2 häufiger Fehler auf

Die gezielt eingebrachten Relativbewegungen der Bleche zueinander vor der Klebstoffaushärtung hatten in den Experimenten keinen Einfluss auf die Fehlerhäufigkeit. Ein Einfluss der Teileschachtelkinematik auf die Klebstoffverteilung vor dem Falzen wurde nicht untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass es beim Schachteln der Teile wegen der Führung in der Falzvorrichtung durch Stifte nur zu einem vernachlässigbar geringen Verkippen kommen kann.

Ein Vergleich der Technologien zum Aushärten des Klebstoffs zeigt keine signifikanten Unterschiede für die Fehleranfälligkeit. Die Probenauswertung zeigt jedoch, dass die KTL-Behandlung Effekte, die aus anderen Parameterkombinationen resultieren, verstärken oder abschwächen kann, indem Kavitäten oder Kanäle verschlossen oder diese mit düsenförmigen Austrittsöffnungen hin zur Nahtabdichtung versehen werden. Bei den Variationen zur Klebstoffaushärtung werden nur die drei Aushärteverfahren mit konstanten Prozessparametern gegenübergestellt. Es erfolgen keine Untersuchungen zum Einfluss der Temperaturführung auf die Klebstoffaushärtung und die Aushärtung der Nahtabdichtung.

Der Überschneidung an einer Beschnittkante kann nicht als ursächlicher Ausgangspunkt für die Bildung von Fehlern identifiziert werden.

In den Experimenten wird bestätigt, dass verschiedene Verfahrensparameter auch in ihrem Zusammenwirken einen Einfluss auf die Bildung von Fehlern in der Nahtabdichtung haben. Dabei wird deutlich, dass das Entstehen der Fehler immer durch die Ausdehnung von Luft in eingeschlossenen Kavitäten beim Aushärten der Nahtabdichtung erfolgt. Die Kavitäten benötigen ein entsprechendes Volumen und eine kritische Wirkungsfläche (Düse) auf die Nahtabdichtung. Verantwortlich für die Ausbildung der Kavitäten sind Störungen oder Unregelmäßigkeiten im Klebstofffluss. Diese könnten z.B. bedingt sein durch:

- die Qualität der Blechteile (Ist-Geometrie, Oberfläche, geometrische Unregelmäßigkeiten an den Blechen)
- die Positionierung und reproduzierbare Dosierung von Klebstoffen, Füllgrad des Falzes, Viskosität des Klebstoffs
- die Rückfederung des Falzes sowie der geschachtelten Bleche (nach dem Falzen, Lösen der Klemmkraft, Erwärmung)
- die Falzgeometrie (Überdrücken, Falzlänge)
- die Geschwindigkeiten beim Falzen (Pressengeschwindigkeit)
- den KTL-Prozess

Hier sind weitere detaillierte Untersuchungen notwendig, um die eigentlichen Ursachen für die Bildung der Kavitäten zu ermitteln.

Unabhängig von den verschiedenen Kombinationen der Verfahrensvarianten kann ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Fehlern in der Nahtabdichtung und sogenannten Klebstoffverarmungen festgestellt werden. Klebstoffverarmungen entstehen bei Störungen im Klebstoffauftrag. Es besteht ein offensichtlicher kausaler Zusammenhang der Klebstoffverarmung als Ursache für die Blasenbildung, was durch eine Gegenüberstellung der örtlichen Lage von reduziertem Klebstoffvolumen, Ausbildung einer abgeschlossenen Kavität und der Blase in der Nahtabdichtung erwiesen werden konnte. Anzumerken ist jedoch, dass nicht jede Klebstoffverarmung zwangsläufig zur Blasenbildung führen muss.

4. FEM-Simulationen

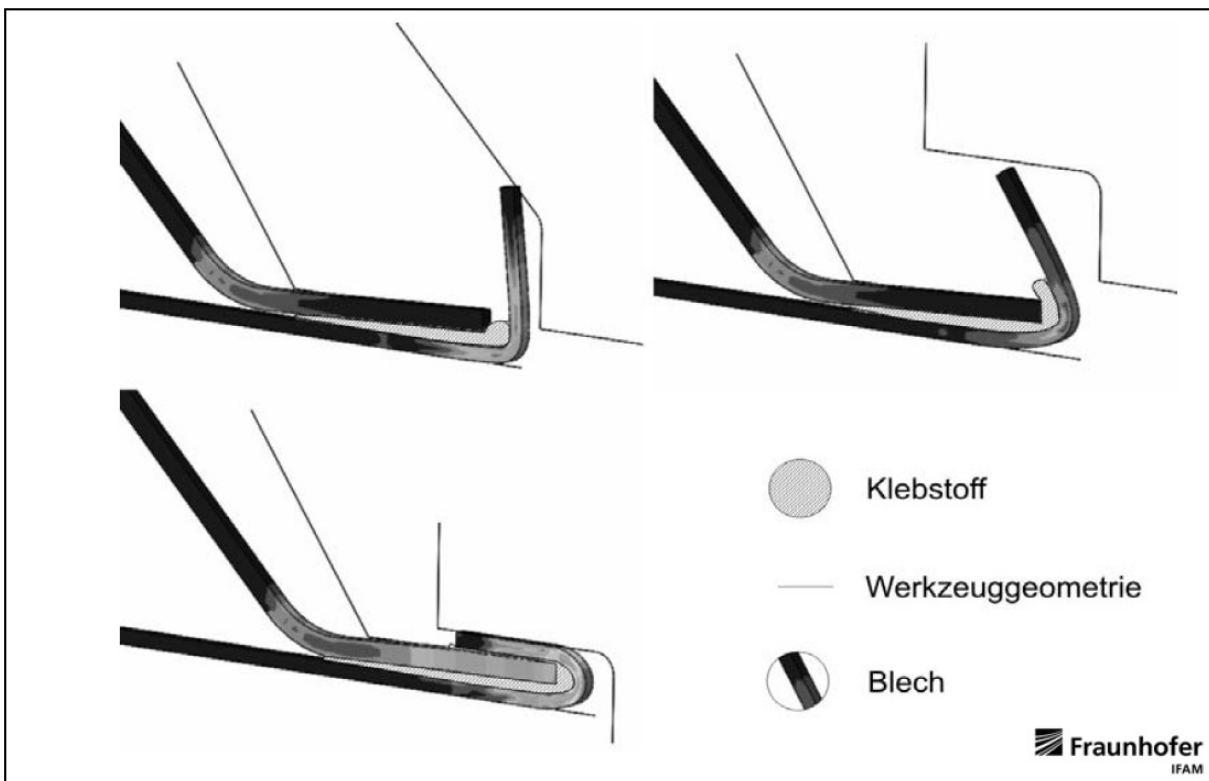
Ergänzend zu den durchgeführten Experimenten werden numerische Simulationsmodelle entwickelt. Hierbei werden zum einen das mechanische Umformverhalten der Blechbauteile und zum anderen das fluidmechanische Verhalten des Klebstoffes betrachtet. Es werden die Randbedingungen jeweils durch die strukturellen bzw. fluidmechanischen Vorgaben abgebildet und ausgetauscht. Diese Vorgehensweise wird als Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) bezeichnet.

Die Umformsimulation besteht entsprechend dem experimentellen Versuchsablauf aus 6 Schritten:

- 90° Abkanten des Außenbleches
- Zuführen des Innenprofils
- Aufsetzen des Niederhalters
- Vorfalzen auf 135°
- Fertigfalzen auf 180°
- Niederhalter öffnen

Die Materialkennwerte (Fließkurven) werden an den für die experimentellen Versuche verwendeten Blechwerkstoffen ermittelt. Die Geometrie des Hutprofils des Innenbleches wird an den real hergestellten Bauteilen vermessen und in die Simulation übernommen. Der simulierte Bereich der Probe ist in im folgenden Bild dargestellt.

Die im Folgenden vorgestellte gekoppelte FSI-Simulation wird mit dem Programm ABAQUS durchgeführt. Angewendet wird die Technologie CEL (Coupled Eulerian Lagrangian) die in neueren Versionen des Programms eingeführt worden ist. Die Berechnungen sind sehr aufwendig, und werden daher aufgrund der Beanspruchung im Modell als 2D-Berechnung durchgeführt.



Klebstoffverteilung während des Umformprozesses. Es handelt sich um drei Momentaufnahmen einer transienten Simulation. Der Klebstoff ist schraffiert dargestellt.

In der gekoppelten Simulation wird ein spezifisches Materialmodell für den Klebstoff genutzt und die Deformationen der Klebstoffraupe beim Umformen des Bleches berechnet. Die Deformationen des Klebstoffes beeinflusst rückwirkend die Verformung der Bleche. In der Simulation wird der gesamte Bereich, in dem ein Vorhandensein des Fluids möglich ist, durch ein Rechengitter abgebildet. Dieses Rechengitter ist überlagert durch die Finiten-Elemente, die die Blechbauteile beschreiben. Die geometrischen Begrenzungen der simulierten Blechbauteile, sowie die Geschwindigkeiten und Kräfte werden als Randbedingungen für das Fließen (verquetschen) des Klebstoffs übermittelt. Im Gegenzug werden im Klebstoff aufgebaute Drücke als rückwirkende Kraft an die Bleche übertragen. Zudem werden beide Querschnittflächen des Falzes mit der Randbedingung einer Spiegelfläche versehen. Hierdurch wird ein Herausquetschen des Klebstoffes in Längsrichtung des Falzes unterbunden.

Die gekoppelte Simulation beginnt mit dem Vorgang des Schachtelns der beiden Blechbauteile. Durch das Einlegen des Innenteils wird die auf das Außenteil applizierte Klebstoffraupe verquetscht. In den folgenden Schritten kommt es zur weiteren Klebstoffverteilung. Die Verteilung des Klebstoffes ist in der Abbildung 9.2 dargestellt. Die numerische Simulation ermöglicht einen tiefen Einblick in die Strömungsvorgänge während des Falzprozesses. Denkbar ist eine dezidierte Betrachtung unterschiedlicher Raupenpositionen im Bezug zum 90° abgekanteten Außenblech. Auch ein nicht planparalleles Einlegen des Innenbleches kann mittels dieser Methoden detailliert betrachtet werden.

5. Fazit

Ausgehend von Analysen der Fehler in der Nahtabdichtung an Falzklebungen wurden Hypothesen für die Fehlerursachen erarbeitet und für die einzelnen Prozessschritte mögliche Stör- und Stellgrößen erfasst. Für die Identifikation signifikanter Prozessparameter wird der Falzklebeprozess in einem seriennahen Gesamtexperiment nachgebildet. Hier werden die Prozessgrößen: Füllgrad des Falzes mit Falzklebstoff, Falzklebstoff und Applikation, Beschöpfung der Blechoberfläche, Relativbewegung zwischen den gefalzten Blechen, Härtetechnologie für den Falzklebstoff und KTL-Prozess in verschiedenen Variationen und Kombinationen vergleichend gegenüber gestellt. Die Experimente bestätigen, dass Fehler in der Nahtabdichtung immer an das Vorhandensein von Kavitäten in der Falzklebung gebunden sind. Andererseits führt das Vorhandensein von Kavitäten nicht zwangsläufig zu Fehlern in der Nahtabdichtung. Hochviskoser Klebstoff in stabiler Positionierung und Dosierung bei einer nichtvollständiger Füllung des Falzspaltes zeigt sich unempfindlich für eine Blasenbildung in der Nahtabdichtung. Für einen fehlerfreien Prozess sind Kavitätenbildungen im Falz zu minimieren und robuste Werkstoffe für die Nahtabdichtung erforderlich.

Das IGF-Vorhaben „Falzklebeprozess im automobilen Rohbau“, 294ZBG der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) in Kooperation mit der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA), dem DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. und der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung bedanken sich die Forschungsstellen Fraunhofer IWU und Fraunhofer IFAM.