

FAT 232

Erweiterung von Prozessgrenzen
der Bonded Blank Technologie durch
hydromechanische Umformung



Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung

AVIF A 250 / FOSTA P780

Forschungsstellen:

Leibniz Universität Hannover

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Jürgen Rosenberger

Technische Universität Braunschweig

Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Gregor Wisner

Das im Folgenden dargestellte Forschungsprojekt

Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung

wurde gefördert von der gemeinnützigen Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V.. Zweck der Stiftung ist die Förderung der Forschung auf dem Gebiet der Stahlverarbeitung und -anwendung in der Bundesrepublik Deutschland. Geprüft wurde das Forschungsvorhaben von Gutachtergremien der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF) sowie der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA). Die Gutachtergremien setzen sich aus Sachverständigen der Stahl anwendenden Industrie, der Stahlhersteller und der Wissenschaft zusammen.

Betreut wurde das Forschungsvorhaben vom gemeinsamen Projektbegleitenden Ausschuss der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) und der FOSTA sowie dem Arbeitskreis AK 17 ‚Leichtbau‘ der FAT im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie e.V. (VDA).

Der nachstehende Bericht fasst Zielsetzung und wichtigste Ergebnisse des Forschungsprojektes zusammen.

Bei der Doppellagenblechtechnik (Bonded Blanks) werden lokal Bereiche eines Bauteils durch die Verwendung eines Verstärkungsbleches und/oder einer höheren Materialgüte verstärkt. Hierzu wird das Verstärkungsblech auf das Grundblech aufgeklebt. Aufgrund der spezifischen Prozessanforderungen kommt hier ein Klebstoff zum Einsatz, der in einem zweistufigen Prozess abbindet bzw. aushärtet. In der ersten Stufe liegt die Klebschicht in Form eines Thermoplasten vor, was den Umformprozess erst möglich macht, da die Klebfuge unter der extrem hohen Umformpressung steht und kein Klebstoff herausgedrückt werden darf. In der zweiten Stufe wird der Klebstoff vernetzt, was zu einer hohen Gebrauchsfestigkeit führt und prozesseffizient in der Trockenstufe der KTL-Einbrennlackierung erfolgt. Das Verstärkungsblech kann dabei eine andere Blechdicke als das Grundblech aufweisen. Die Blechzuschnitte (Grund- und Verstärkungsblech) werden in einem Werkzeug zusammen umgeformt und können sich dabei relativ zueinander verschieben. Die Prozessgrenzen sind durch die maximale Differenz der Festigkeit bzw. Dicke des Verstärkungsbleches und der minimalen Festigkeit bzw. Dicke des Grundbleches vorgegeben. Werden diese Prozessgrenzen überschritten, tritt eine Kerbwirkung auf, und ein Reißer wird im Grundblech initiiert.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Erweiterung der Prozessgrenzen der Bonded Blank Technik mit geklebten Platinen durch die hydromechanische Umformung. Hierbei wurde eine Verminderung der Kerbwirkung im Grundblech erreicht. Darüber hinaus wurde insbesondere eine Steigerung der Verhältnisse Festigkeit/Dicke des Verstärkungsbleches zur Festigkeit/Dicke des Grundbleches angestrebt. Das Forschungsvorhaben wurde durch zwei Forschungsstellen bearbeitet, das IFUM bearbeitete die Umformtechnik und das ifs die Klebtechnik zum Fügen von Verstärkungsblech und Grundblech mittels nachvernetzbaaren Schmelzklebstoffen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1.1	Abschlussbericht des Forschungsprojektes	1
1.2	Das im Folgenden dargestellte Forschungsprojekt	1
2	Einleitung	13
3	Stand der Technik	15
3.1	Leichtbaukonzepte in der Blechumformung	15
3.2	Bonded Blanks Technik im Vergleich zu anderen Fertigungsleichtbautechnologien	17
3.3	Hydromechanisches Tiefziehen	21
3.4	FEM in der Umformtechnik	27
3.5	Klebstoffe zur Herstellung von Blechverbunden	30
4	Problemstellung und Zielsetzung	31
5	Aufbau der Anlagentechnik für Hydro Bonded Blanks	35
5.1	Optimierung der Anlagensteuerung	35
5.1.1	Verwendete Umformmaschinen	35
5.1.2	Aufbau des Werkzeugsystems zum hydromechanischen Tiefziehen ..	36
5.1.3	Verwendetes Werkzeugsystem für erwärmte Umformversuche	43
5.2	Konstruktion der Umformwerkzeuge	44
5.2.1	Simulationsgestützte Modifikation der Stempelgeometrie	44
5.2.2	Modularer Stempelaufbau	48
5.2.3	Maßnahmen zur Verringerung der Kerbwirkung (Stempel)	51
6	Experimentelle Untersuchungen zur Fertigungstechnik durch Kleben und Umformen	52
6.1	Ermittlung optimaler Prozessparameter	52
6.1.1	Untersuchte Blechwerkstoffe	52
6.1.2	Untersuchte Klebstoffe	55
6.2	Ermittlung der Prozessgrenzen	70
6.2.1	Bauteilziehtiefen	70
6.2.2	Bauteilversagensarten	70
6.2.3	Zuschnittsoptimierung am Verstärkungsblech	74
6.2.4	Visioplastische Untersuchung der Umformvorgänge	77
6.3	Untersuchung im Warmumformprozess	81
7	Experimentelle Untersuchungen an Bauteilen	83
7.1	KTL-Beschichtung unter Produktionsbedingungen	83
7.2	Beuluntersuchungen	85

7.2.1	Quasistatische Beuluntersuchungen an Federbeindomgeometrien	85
7.2.2	Quasistatische Beuluntersuchungen an warmumgeformten Rechteckgeometrien.....	90
7.2.3	Hochdynamische Beuluntersuchungen	95
7.3	Korrosionsuntersuchungen.....	108
7.4	Zyklische Bauteiluntersuchungen.....	117
7.5	Zerstörungsfreie Bauteiluntersuchungen mit ultraschallangeregter Thermografie	127
8	Zusammenfassung und Ausblick	138
9	Literaturverzeichnis	142

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	<i>Leichtbaukonzepte im Fahrzeugbau</i>	15
Abbildung 2:	<i>Vergleich unterschiedlicher Verstärkungsblechtechnologien [Mil07]</i>	17
Abbildung 3:	<i>Patchwork-Blanks in der Automobilindustrie</i>	19
Abbildung 4:	<i>Aufbau eines Werkzeugs zum gemeinsamen Umformen von Grund- und Verstärkungsblech in der Patchwork oder Bonded Blank Technik</i>	21
Abbildung 5:	<i>Verfahrensprinzip hydromechanisches Tiefziehen [Oeh01]</i>	22
Abbildung 6:	<i>Krafteinwirkung auf das Außenblech beim hydromechanischen Tiefziehen</i>	24
Abbildung 7:	<i>Umformergebnis in Abhängigkeit vom Wirkmediendruck</i>	25
Abbildung 8:	<i>Modifiziertes hydromechanisches Tiefziehen nach Siegert</i>	26
Abbildung 9:	<i>Aktives Hydro-Mec Verfahren</i>	27
Abbildung 10:	<i>Haupteinflussfaktoren auf einen Tiefziehprozess [Spr06]</i>	28
Abbildung 11:	<i>Prozessschritte des hydromechanisch unterstützten Tiefziehens mit zweistufiger Klebtechnik als Hydro Bonded Blanks</i>	32
Abbildung 12:	<i>Temperaturverhalten von einem latent reaktiven Schmelzklebstoff (Hotmelt)</i>	33
Abbildung 13:	<i>Starres Tiefziehwerkzeug</i>	34
Abbildung 14:	<i>Hydromechanisches Tiefziehen</i>	34
Abbildung 15:	<i>CAD-Schnittdarstellung des hydromechanischen Werkzeugsystems</i>	37
Abbildung 16:	<i>Eingebautes Werkzeug</i>	38
Abbildung 17:	<i>Anordnung der Plungerzylinder</i>	40
Abbildung 18:	<i>Druck-Maschinenwegverläufe der Plunger und des Wasserkastens</i>	41
Abbildung 19:	<i>Umlaufende Teflondichtung</i>	42
Abbildung 20:	<i>Ausbildung eines Druckpolsters beim hydromechanischen Tiefziehen</i>	43
Abbildung 21:	<i>Warmumformwerkzeug mit Rechteckgeometrie</i>	44
Abbildung 22:	<i>Modellaufbau in AutoForm</i>	45
Abbildung 23:	<i>1. Stufe der Modifikation der Stempelgeometrie</i>	46
Abbildung 24:	<i>2. Stufe der Modifikation der Stempelgeometrie</i>	47
Abbildung 25:	<i>Modifikation der Stempelgeometrie (CAD)</i>	48
Abbildung 26:	<i>CAD-Darstellung der modularen Stempelköpfe</i>	49
Abbildung 27:	<i>Schematische Darstellung der auswechselbaren Stempelköpfe</i>	50
Abbildung 28:	<i>Dimensionierung und Auswahl der Elastomerringe</i>	51
Abbildung 29:	<i>Übersicht Versuchsmatrix aus Grund- und Verstärkungsblechen</i>	

	<i>sowie den drei untersuchten Klebstoffen</i>	53
Abbildung 30:	<i>Pulversprühverfahren mit Applikationskammer</i>	59
Abbildung 31:	Beispiel für die Einbettung von scharfen Graten an Verstärkungsblechkanten in die Klebschichten bei Bonded Blanks (Schliff).....	60
Abbildung 32:	Methoden zur einfachen Beschichtung der Verstärkungsblechkanten mit Klebstoff zur Einbettung der Kante in die Klebschicht während des Tiefziehvorgangs, links angeschmolzener Pulverklebstoff, rechts an den VB-Kanten um wenige Millimeter überstehende Folien.....	61
Abbildung 33:	<i>Feinstufige Einstellung der Klebschichtdicke beim Fixierkleben durch vorbeschichtete Klebschicht auf dem Verstärkungsblech und Distanzstücke als Abstandshalter (Maße ermitteln durch Vorversuche und Beurteilung von geometrischen Abweichungen vom eben Zustand)</i>	62
Abbildung 34:	<i>Verläufe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) der drei im Vorhaben untersuchten Klebstoffe</i>	63
Abbildung 35:	<i>Dynamisch Mechanische Analyse (DMA) am Co-Polyamid Klebstoff Vestamelt X1333 zur Eingrenzung des möglichen Warmumform-Temperaturbereiches</i>	64
Abbildung 36:	<i>Dynamisch Mechanische Analyse (DMA) an allen drei Klebstoffen zur Eingrenzung des Warmumform-Temperaturbereiches; die Polyurethanklebstoffe zeigen nur ein schmales Temperaturband bei deutlich niedrigeren Temperaturen</i>	65
Abbildung 37:	Temperaturprofil der Beschichtungs- und Klebtechnik mit Lackbeschichtung (Kathodische Tauchlackierung - KTL).....	66
Abbildung 38:	<i>Maximale Klebfestigkeit von Zugscherproben aus Kombinationen von Stahlblechen und Klebstoffen unter verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen</i>	67
Abbildung 39:	<i>Prüfung von Zugscherproben (instrumentiert mit Thermoelement nahe Klebschicht und Dehnungsaufnehmer) in einer beheizbaren Temperierkammer, die in den Arbeitsbereich der Zugprüfmaschine eingebaut wird</i>	68
Abbildung 40:	<i>Prüfung von Zugscherproben geklebt mit Pulverklebstoff Evonik Vestamelt X1333, der charakteristische Erweichungsbereich liegt um die 90 °C</i>	68
Abbildung 41:	<i>Prüfung von Zugscherproben geklebt mit Pulverklebstoff Nolax HCM555, der charakteristische Erweichungsbereich liegt um die 45 °C</i>	69

Abbildung 42:	<i>Prüfung von Zugscherproben geklebt mit Folienklebstoff Lohmann TM 10850 (analog DC VP 20745), der charakteristische Erweichungsbereich liegt um die 45 °C</i>	69
Abbildung 43:	Reißer durch Kerbwirkung des Verstärkungsblechs	71
Abbildung 44:	<i>Zu 75 % umlaufender Reißer</i>	72
Abbildung 45:	Abzeichnung des Verstärkungsblechs aus dem Grundblech	75
Abbildung 46:	Alter und optimierter Zuschnitt	76
Abbildung 47:	Lage der VB-Segmente nach der Umformung	77
Abbildung 48:	Formänderungsanalyse an einem konventionell tiefgezogenen Bauteil	79
Abbildung 49:	<i>Formänderungsanalyse an einem hydromechanisch tiefgezogenen Bauteil</i>	80
Abbildung 50:	<i>Vergleich der Blechverdünnung an hydromechanisch und konventionell hergestellten Bauteilen</i>	81
Abbildung 51:	KTL-Bäder und Trägerrahmen, KTL Prozessschritte	84
Abbildung 52:	<i>Versuchsaufbau für quasistatische Beulversuche</i>	85
Abbildung 53:	<i>Prozessfolge beim quasistatischen Beulen von stilisierten Federbeindomegeometrien</i>	86
Abbildung 54:	<i>Faltungsbild beim quasistatischen Beulen stilisierter Federbeindomegeometrien</i>	86
Abbildung 55:	<i>Quasistatische Beulprüfung an unverstärkten Grundblechen</i>	87
Abbildung 56:	<i>Quasistatische Beulprüfung H340 LAD verstärkt und unverstärkt</i> ... 88	
Abbildung 57:	<i>Übersicht quasistatische Beulprüfung an unterschiedlichen Kombinationen</i>	90
Abbildung 58:	Prozessabfolge beim quasistatischen Beulen eines warmgeformten Rechtecknapfs.....	91
Abbildung 59:	<i>Versagensarten beim quasistatischen Beulen eines warmgeformten Rechtecknapfs</i>	91
Abbildung 60:	Umformtemperaturabhängige Beulkraftverläufe – Klebstoff X1333 – Raumtemp., 90 °C.....	92
Abbildung 61:	Umformtemperaturabhängige Beulkraftverläufe – Klebstoff HCM 555 - Raumtemp., 45 °C.....	93
Abbildung 62:	Umformtemperaturabhängige Beulkraftverläufe – Klebstoff TM 10850 - Raumtemp., 45 °C.....	94
Abbildung 63:	Vergleich der Beulkraftverläufe der drei Klebstoffvarianten bei Raumtemperatur	95
Abbildung 64:	Fallturm für Crashversuche mit den Federbeindomegeometrien, einheitliche Prüfmasse von 190 kg und Fallhöhe bis zum Auftreffen der Dornkuppe auf den verstärkten Bauteilboden von	

	1,5 m	96
Abbildung 65:	Vergleich der Resthöhen bei einer Probekörperauswahl aus verschiedenen Blechkombinationen und zwei Klebstoffen.....	98
Abbildung 66:	<i>Phasen des Einschlags und der Probekörperreaktion beim 4-Faltenbeulen (Probe HBB 3.166)</i>	<i>99</i>
Abbildung 67:	<i>Phasen des Einschlags und der Probekörperreaktion beim 3-Faltenbeulen (Probe HBB 3.156)</i>	<i>100</i>
Abbildung 68:	<i>Vergleich der Kraftverläufe bei unterschiedlichen Beulmustern im Crashversuch, das Dreifaltenbeulmuster (rot) führt zu geringerer Energieaufnahme; alle Verstärkungsbleche lösen sich nur im Lamellen-Randbereich vom Grundblech (H220)</i>	<i>101</i>
Abbildung 69:	<i>Vergleich der Kraftverläufe mit unterschiedlichen Grundblechen im Crashversuch</i>	<i>103</i>
Abbildung 70:	<i>Bauteil mit maximaler Resthöhe bei 5,1 m/s und 190 kg durch starke Verformung des Doppellagenbereichs, nur die Lamellen im Randbereich sind durch die geometriebedingte Kinematik vollständig abgelöst.....</i>	<i>104</i>
Abbildung 71:	<i>Vergleich der Kraftverläufe zum Einfluss der Alterung mit dem 10 Wochen VDA modif. Test im Crashversuch, Grundblech jeweils H220 in 1,15 mm, der Napf 3.55 ist ungealtert, jedoch nach dem Tiefziehen und vor der Aushärtung mit 8 Clinchpunkten im Halbkreis zusätzlich mechanisch fixiert worden</i>	<i>105</i>
Abbildung 72:	<i>Vergleich der Klebstoffe am Beispiel der Kombination GB H340 VB TRIP 800, oben HBB 3.26 mit Pulverklebstoff X1333, unten HBB 3.142 mit Folienklebstoff DC VP 20745</i>	<i>106</i>
Abbildung 73:	<i>Vergleich der Kraftverläufe zum Einfluss der Klebstoffe im Crashversuch, Bleche jeweils GB H340 in 1,5 mm, VB TRIP 800 in 1,25 mm, Verlauf weitgehend identisch, jedoch lösen die Verstärkungsbleche beim Pulverklebstoff X1333 ab und verbleiben in der Folienvariante DC VP 20745 am Grundblech</i>	<i>107</i>
Abbildung 74:	<i>Klebung der Randlamellen des Verstärkungsbleches beim Pulverklebstoff Vestamelt X1333</i>	<i>108</i>
Abbildung 75:	<i>Klebung im Lamellenbereich von Tiefziehnäpfen mit Folienklebstoff DC VP 20745</i>	<i>109</i>
Abbildung 76:	<i>Effekt der Benetzungsfähigkeit unterschiedlich viskoser Flüssigkeiten nach [Hab09].....</i>	<i>110</i>
Abbildung 77:	<i>Temperatur- und Feuchteprofil des einwöchigen Klimawechselzyklus mit einem Tag Salzsprühen in 5 %-iger Natrium-Chlorid-Lösung als modifizierter VDA 621-415.....</i>	<i>111</i>

Abbildung 78:	Probenahme aus einem beschleunigt gealterten Tiefziehnapf im verstärkten Bodenbereich (HBB 3.06, GB H340, VB TRIP 800, Vestamelt X1333, KTL, VDA modif. 10 Wochen, zyklisch getestet auf ± 3 kN-Horizont)	112
Abbildung 79:	<i>Schliffbild einer Klebung aus HBB 3.06, Entnahmestelle H.6-3, die Zinkschicht am Substrat oben ist nicht mehr zu erkennen, unten angegriffen</i>	113
Abbildung 80:	<i>Schliffbild einer Klebung aus HBB 3.06, Entnahmestelle H.6-4</i>	114
Abbildung 81:	<i>Überblick einer geöffneten Probe mit Klebstoffbeschichtung und KT-Lackresten im REM, die EDX-Messung liefert die Elemente Cl mit 3.52 Mass.-% und Sauerstoff mit 31.55 Mass.-%</i>	115
Abbildung 82:	<i>EDX-Spektrum an einer Stelle mit Phosphorablagerungen (1.26 Mass.-%) aus der Phosphatierung zur KTL-Vorbereitung mit geringem Anteil an Sauerstoff (7.43 Mass.-%)</i>	116
Abbildung 83:	Hydro Bonded Blanks Bauteile im zyklischen Test im Prüffeld des ifs, Konfiguration mit Kraftmessdose und Aufnahmeplatte oben sowie Hydropulser mit Lasteinleitungsstange von unten in den Bauteilboden	118
Abbildung 84:	Prinzip Tiefenmessungen am Lochkreis des Verstärkungsbleches (links), sichtbare Schädigung mit Auffedern des VBs am Lochkreis der auslaufenden Schlitze zwischen den Lamellen durch zyklische Beanspruchung (rechts)	119
Abbildung 85:	Kennlinien eines Hydro Bonded Blank Bauteils (HBB 3.06) mit dem Pulverklebstoff X1333 vor und nach dem zyklischen Versuch mit 3 kN Doppelamplitude, der flachere Verlauf (grün) kennzeichnet den Steifigkeitsverlust	120
Abbildung 86:	Kennlinien eines Hydro Bonded Blank Bauteils (HBB 3.148) vor und nach dem zyklischen Versuch mit 2 kN Doppelamplitude mit Folienklebstoff Lohmann DC VP 20745	121
Abbildung 87:	<i>Schädigungsfortschritt als Verlauf der Wegamplituden an Hydro Bonded Blank Bauteilen mit Pulverklebstoff X1333 nach Alterung bei 2 kN Lasthorizont, verschiedene Grundbleche</i>	122
Abbildung 88:	<i>Schädigungsfortschritt als Verlauf der Wegamplituden an Hydro Bonded Blank Bauteilen mit Pulverklebstoff X1333n nach Alterung bei 3 kN Lasthorizont, verschiedene Grundbleche</i>	123
Abbildung 89:	<i>Schädigungsfortschritt als Verlauf der Wegamplituden an Hydro Bonded Blank Bauteilen mit Folienklebstoff DC VP 20745 bei verschiedenen Lasthorizonten und Alterungszuständen</i>	124
Abbildung 90:	<i>Überblick zu zyklisch getesteten Näpfen aus im Wesentlichen zwei</i>	

	<i>Blechkombinationen GB H340 mit VB TRIP800 und GB H220 und VB TRIP800 (niedrigeres Lastspielniveau) im Zeitfestigkeitsbereich.....</i>	125
<i>Abbildung 91:</i>	<i>Überblick zu zyklisch getesteten Näpfen im ungealterten und im 10 Wochen VDA-gealterten Zustand mit zwei verschiedenen Klebstoffen</i>	126
<i>Abbildung 92:</i>	<i>Erzielte Lastspielzahlen nach Klebstoffen sortiert</i>	127
<i>Abbildung 93:</i>	<i>Prinzip der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie zur zerstörungsfreien Bewertung von Klebverbindungen</i>	129
<i>Abbildung 94:</i>	<i>Einsatz der Ultraschall-Lockin-Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung an hydromechanisch tiefgezogenen Bonded Blank Näpfen, Blick der Thermografiekamera auf den äußeren Grundblechbereich (links), Einspannung im pneumatischen Rahmen mit Ultraschalleinleitung über Sonotrode (rechts)</i>	130
<i>Abbildung 95:</i>	<i>Fehlstellenpräparation an einem Doppellagenblech</i>	131
<i>Abbildung 96:</i>	<i>Detektion der Fehlstellen im US-Lockin-Phasenbild</i>	132
<i>Abbildung 97:</i>	<i>Ultraschall-Lockin-Phasenbild von Napf 3.154 im Vergleich zum geöffneten Napf nach der Prüfung im Fallturm bei 5,1 m/s</i>	134
<i>Abbildung 98:</i>	<i>US-Lockin-Phasenbild von Napf HBB 3.42 im Vergleich zum geöffneten Napf nach der Prüfung im Fallturm bei 5,1 m/s</i>	135
<i>Abbildung 99:</i>	<i>Vergleich der US-Lockin-Phasenbilder von Napf 3.154 mit 6 Clinchpunkten auf einem Radius nahe dem Lochkreis des VB vor und nach einer freien Ofenhärtung ohne weitere Fixierung, Napf nach der Prüfung im Fallturm bei 5,1 m/s.....</i>	136

Formelverzeichnis

Symbol	Einheit	Benennung
β	-	Ziehverhältnis
F_{NH}	N	Niederhalterkraft
F_{St}	N	Stempelkraft
GB	-	Grundblech
p	bar	Wirkmediendruck
h	mm	Ziehtiefe eines Tiefziehbauteils
s_0	mm	Ausgangsblechdicke
$s_{0,\text{VB}}$	mm	Blechdicke des Verstärkungsblechs
s_{K}	mm	Klebschichtdicke
$T_{\text{V,max}}$	°C	Maximal zugelassene Ventilbetriebstemperatur
T_{W}	°C	Temperatur Warmumformversuche
VB	-	Verstärkungsblech

2 Einleitung

Bei der Doppellagenblechtechnik (Bonded Blanks) werden lokal Bereiche eines Bauteils durch die Verwendung eines Verstärkungsbleches verstärkt. Hierzu wird das Verstärkungsblech auf das Grundblech aufgeklebt. Aufgrund der spezifischen Prozessanforderungen kommt hier ein Klebstoff zum Einsatz, der in einem zweistufigen Prozess abbündet bzw. aushärtet. In der ersten Stufe liegt die Klebschicht in Form eines Thermoplasten vor, was den Umformprozess erst möglich macht, da die Klebfuge unter der extrem hohen Umformpressung steht und kein Klebstoff herausgedrückt werden darf. In der zweiten Stufe wird der Klebstoff vernetzt, was zu einer hohen Gebrauchsfestigkeit führt und prozesseffizient in der Trockenstufe der KTL-Einbrennlackierung erfolgt. Das Verstärkungsblech kann dabei eine andere Blechdicke und/oder eine höhere Materialgüte als das Grundblech aufweisen. Die Blechzuschnitte (Grund- und Verstärkungsblech) werden in einem Werkzeug zusammen umgeformt und können sich dabei relativ zueinander verschieben. Die Prozessgrenzen sind durch die maximale Differenz der Festigkeit bzw. Dicke des Verstärkungsbleches und der minimalen Festigkeit bzw. Dicke des Grundbleches vorgegeben. Werden diese Prozessgrenzen überschritten, tritt eine Kerbwirkung auf und ein Reißen wird im Grundblech initiiert.

Ziel des geplanten Forschungsvorhabens war die Erweiterung der Prozessgrenzen der Bonded Blank Technik mit geklebten Platinen durch die hydromechanische Umformung. Hierbei wird durch den prozessbedingten hydrostatischen Druck eine Verminderung der Kerbwirkung im Grundblech erreicht, da die Umformung des Verstärkungsbleches nicht mehr allein durch das Grundblech in Form einer Streckziehbeanspruchung erfolgt, sondern durch die Drucküberlagerung ein günstiger Biegeprozess auf die Randbereiche des Verstärkungsbleches erfolgt. Aus dieser Überlegung heraus wurde insbesondere eine Steigerung der Verhältnisse Festigkeit/Dicke des Verstärkungsbleches zur Festigkeit/Dicke des Grundbleches angestrebt.

Während des Umformprozesses soll ein weitgehend freies Abgleiten der Blechzuschnitte aufeinander möglich sein, um die freie plastische Formänderung nicht zu behindern. Der Einsatz von Klebstoffen, insbesondere von Schmelzklebstoffen (Hotmelts) mit latent reaktiven Komponenten für diese Fügeaufgabe, bietet Vorteile gegenüber Schweiß- und Nietverfahren wie z. B. großflächige Lasteinleitung und einen Korrosionsschutz zwischen Grund- und Verstärkungsblech. Dabei ist die Konsistenz des Klebstoffes während des Umformvorganges ausreichend hochviskos, damit er nicht aus der Fuge herausgedrückt wird und so das Werkzeug und auch das Bauteil verschmutzen könnte. Das Abgleiten der Bleche aufeinander kann durch die Klebstoffviskosität im

nicht ausgehärteten Zustand über die Temperatur beeinflusst werden. Der reaktive Schmelzklebstoff dient in einer ersten Verfahrensstufe zum Fixieren der Platinen aufeinander und wird nicht vernetzt (Vorfügen durch thermoplastisches Schmelzen, Benetzen und Erstarren). Das endgültige Fügen von Grund- und Verstärkungsblech erfolgt erst nach dem Umformvorgang. Die Neubenetzung vergrößerter Blechoberflächen und vollständige Aushärtung der Klebschicht erfolgt im umgeformten Zustand durch erneutes Aufschmelzen des Hotmelts und durch zusätzliche chemische Reaktion einer reaktiven Klebstoffkomponente in einem abschließenden Wärmeprozess, beispielsweise während der KTL-Trocknung bei Temperaturen von ca. $T = 180^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$.

Das Forschungsvorhaben wurde durch zwei Forschungsstellen bearbeitet: Das IFUM bearbeitete die Umformtechnik und das ifs die Klebtechnik zum Fügen von Verstärkungsblech und Grundblech zu einem Doppellagenblechverbund mittels nachvernetzbarer Schmelzklebstoffen.

3 Stand der Technik

3.1 Leichtbaukonzepte in der Blechumformung

Eine Gewichtsreduzierung, zum Beispiel im Fahrzeugbau, wird durch die Anwendung verschiedener Leichtbaukonzepte erreicht. Diese sollen dazu beitragen, die steigenden Fahrzeuggesamtwerte zu reduzieren. Der Anstieg der Fahrzeuggewichte begründet sich hauptsächlich auf einem Zuwachs an Leistung, Komfort und Sicherheitselementen des Fahrzeugs. Ein erhöhtes Gesamtgewicht verursacht einen Mehrverbrauch an Kraftstoff. Vor dem Hintergrund steigender Kraftstoffpreise und einem gesteigerten Umweltbewusstsein der Kunden werden Leichtbaukonzepte immer bedeutender, da durch eine Verminderung des Fahrzeuggesamtwerts Kraftstoff eingespart werden kann [Müt06]. Vier verschiedene Leichtbaukonzepte werden in *Abbildung 1* veranschaulicht und nachfolgend etwas genauer beschrieben.

Werkstoffleichtbau
Einsatz alternativer Werkstoffe zur Gewichtsreduzierung (höher- und höchstfeste Stähle, Aluminium, Magnesium, Titan)

Fertigungsleichtbau
Potenziale der Verbindungstechnik erschließen (Tailored Blanks, Patchworktechnik, Bonded Blanks, Tailored Tubes)



Konzeptleichtbau
Bauweisen mit einem günstigen Verhältnis von Funktion und Gewicht einsetzen (höhere Schweller mit reduzierter Blechdicke, belastungsangepasste Profile)

Formleichtbau
konsequente Umsetzung von belastungsgerechten Trägerstrukturen (Einsatz von Versickungen und anderen Strukturen, bombierte Bauteile)

Quelle: Bänder, Bleche, Rohre 1999, Volkswagen AG

Abbildung 1: Leichtbaukonzepte im Fahrzeugbau

Werkstoffleichtbau:

Beim Werkstoffleichtbau werden herkömmlich verwendete Werkstoffe durch alternative Werkstoffe in verschiedenen Bereichen des Fahrzeugbaus substituiert. Die alternativen Werkstoffe weisen vergleichsweise bessere Gewichtseigenschaften auf als die herkömmlichen. Es handelt sich bei den Alternativen zum einen um höherfeste oder höchstfeste Stähle als wanddickenreduzierte Stahlbleche im Bereich des Strukturbaus zur Erhöhung der passiven Sicherheit sowie zum anderen um

Leichtmetalle wie Aluminium, Magnesium oder Titan zur Gewichtsreduzierung. Durch die Verwendung von höherfesten oder höchstfesten Stählen kann eine Festigkeitssteigerung bei gleichzeitiger Gewichtsreduzierung, beispielsweise bei crashrelevanten Strukturbauteilen, erreicht werden. Auch Kunststoffe und die faserverstärkten Verbundwerkstoffe sind für den Einsatz im Werkstoffleichtbau geeignet [Müt02].

Formleichtbau:

Beim Formleichtbau wird eine Erhöhung des Widerstandsmoments durch in das Bauteil eingebrachte Strukturen erreicht. Auf diese Weise kann bei gleich bleibenden oder verbesserten Bauteileigenschaften die Blechdicke und somit das Bauteilgewicht reduziert werden. Als Anwendungen aus der Automobilindustrie sind beispielsweise mit Sicken versehene Rückwände oder Fahrzeugböden mit bombierten Einprägungen bekannt.

Fertigungsleichtbau:

Durch den Einsatz von Tailored Blanks, Tailored Tubes, Patchworktechnik oder Bonded Blank Technik wird über eine kombinierte Verbindungs- und Umformtechnik der Fertigungsleichtbau realisiert. Das Laserstrahlschweißen sowie das Kleben von Aluminium- und Stahlblechen können als weitere Beispiele für den Fertigungsleichtbau in der Karosserierohbaufertigung genannt werden.

Der Einsatz des Fügeverfahrens Kleben ist in diesem Bereich des Leichtbaus besonders vielseitig, da eigenschaftsoptimierte Werkstoffe, aber vor allem optimierte Werkstoffkombinationen, zum Einsatz kommen können. Bei diesen Mischbauweisen können sich etablierte Fügeverfahren aufgrund des physikalischen Fügevorgangs und der teilweise stark unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften (mangelnde Schweißbarkeit, Potenzialunterschiede, Korrosionsneigung) teilweise als wenig geeignet oder schwer zu realisieren erweisen [Kai07].

Konzeptleichtbau:

Der Einsatz von Bauteilen, die ein vorteilhaftes Verhältnis von Funktion und Gewicht aufweisen, wird Konzeptleichtbau genannt. Dabei werden beispielsweise Strukturbauteile an belasteten Stellen mit einem entsprechenden Querschnitt an die Belastung angepasst. So können ein optimales Aufwand-Nutzen-Verhältnis und eine Gewichtsreduktion des Bauteils erzielt werden. Ein Beispiel für den Konzeptleichtbau ist die Querschnittsvergrößerung von Querträgern bei Reduzierung der Blechdicke [Müt06].

3.2 Bonded Blanks Technik im Vergleich zu anderen Fertigungsleichtbautechnologien

Grundsätzlich wird bei der Bonded Blanks Technologie [Doe02, FAT06] eine ähnliche Strategie wie bei der Patchwork Technik [Kle97, Kle03] verfolgt. Beide Technologien resultieren in belastungsoptimierten Bauteilen durch die gezielte Materialaufdickung eines Grundbleches mit einem oder mehreren Verstärkungsblechen. Der Blechverbund wird jeweils zusammen in nur einem Werkzeug umgeformt. Dadurch wird gezielt mehr Festigkeit in lokale Bauteilbereiche eingebracht [Thy08]. Das endgültige Fügen von Grund- und Verstärkungsblech findet bei der Bonded Blank Technik jedoch erst nach dem Umformprozess statt.

Um einen Vergleich der unterschiedlichen Technologien zum lokalen Verstärken zu geben, sind in *Abbildung 2* vier unterschiedliche Technologien zur Herstellung lokal verstärkter Blechbauteile anhand eines schematischen Federbeindoms dargestellt [Mil07].

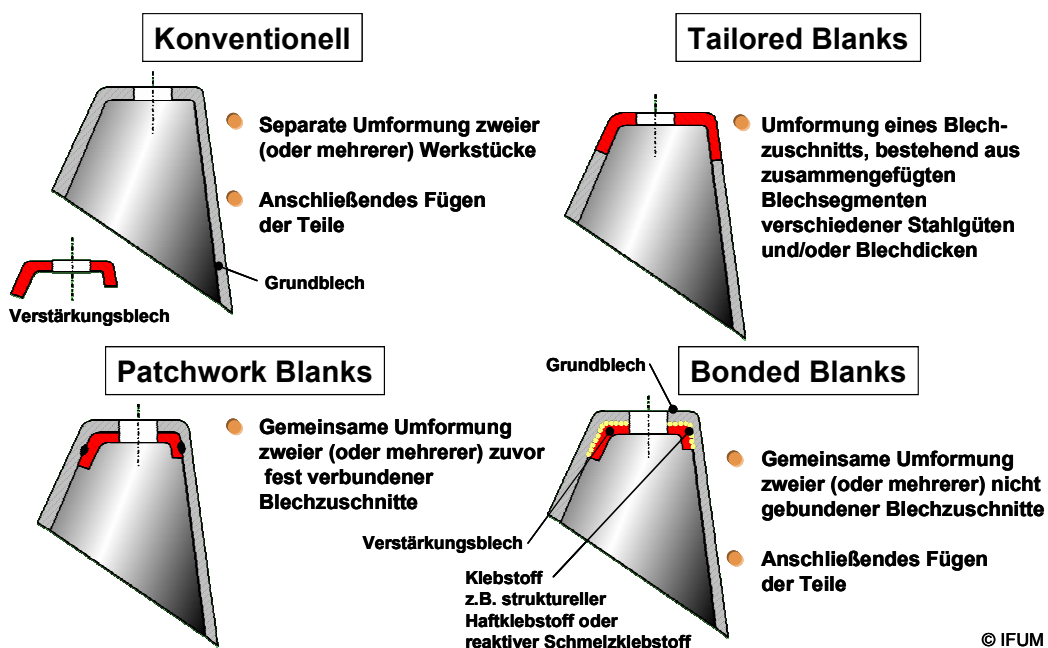


Abbildung 2: Vergleich unterschiedlicher Verstärkungsblechtechnologien [Mil07]

Bei der konventionellen Herstellungstechnologie werden das Grundblech (GB) sowie das spätere Verstärkungsblech (VB) zunächst separat in unterschiedlichen Werkzeugen umformtechnisch erzeugt und im Anschluss daran in einem zusätzlichen Fügeschritt miteinander verbunden. Es besteht auch die Möglichkeit, mehr als ein Verstärkungsblech herzustellen und in den späteren Blechverbund einzubringen.

Nachteilig bei der konventionellen Fertigung sind höhere Fixkosten für die Fertigung von mehreren Umformwerkzeugen sowie höhere variable Kosten durch eine längere Pressenbelegungszeit. Außerdem werden hohe Anforderungen an die Abdichtung der Fuge zwischen Grund- und Verstärkungsblech gestellt, um Spaltkorrosion zwischen den Bauteilen zu verhindern [Dil04]

Die Tailored Blanks Technologie zeichnet sich dadurch aus, dass das VB bereits vor Beginn der Umformung durch Schweißen in das GB eingefügt wird. Der so entstandene Zuschnitt wird dann beispielsweise durch das Verfahren Tiefziehen zum Zielbauteil umgeformt. Mehrere zugeschnittene Platinen (Vorplatinen) unterschiedlicher Dicke, Güte (Gleichmaßdehnung, Streckgrenze) und/oder Oberflächenbeschaffenheit (z. B. unbeschichtet, schmelztauch- oder elektrolytisch verzinkt, organisch beschichtet) werden dabei in einem Schweißprozess verbunden. Dabei wird fast ausschließlich das Laserstrahlschweißen eingesetzt. Als wesentliche Vorteile des Laserstrahlschweißens sind die geringe Wärmebeeinflussung des Materials, die hohe Prozessgeschwindigkeit sowie die gute Automatisierbarkeit anzusehen [Kor03]. Wesentliche Nachteile sind die hohe erforderliche Maßgenauigkeit der Platinenzuschnitte im linearen und speziell nichtlinearen Nahtbereich sowie vorhandene chargenbedingte Blechdickenunterschiede.

Die Patchworktechnik funktioniert nach einem ähnlichen Prinzip, wobei hier durch das hinzugefügte Verstärkungsblech (Patch) ein Mehrlagenverbund entsteht. Das Verfahrensprinzip beruht auf einer gezielten lokalen Materialaufdickung eines Grundblechs durch Fügen eines kleineren Bleches, dem Patch, und ihrer gemeinsamen Umformung. An den aufgedickten Stellen kann im Betriebsfall die Kräfteinleitung zum Beispiel durch Türscharniere, Schlösser oder andere Befestigungselemente erfolgen. Als Fügeverfahren bieten sich das Punktschweißen, das Stanznieten, das Clinchen oder das Kleben an [Die03, Kle97, Sch03].

Die Vorteile der Patchworktechnik sind [Brä00]:

- Mögliche mehrfache lokale Optimierung von Festigkeit und Funktionseigenschaften,
- Aufwandsreduzierung gegenüber lasergeschweißten Platinen unterschiedlicher Blechart und -dicke (Tailored Blanks),
- Verlagerung der Patchworktechnik in die Halbzeugfertigung,
- Einsatz einfacher Fertigungsverfahren / geringer Investitionsaufwand.

Die Blechdeformation und die Relativbewegung zwischen Grundblech und Patch müssen während des Umformprozesses von der Fügestelle übertragen werden. Die Grenzen der Patchworktechnik ergeben sich durch die Beanspruchungen an den

Fügestellen während des Umformvorgangs. Wird das Patchworkkleben mit konventionellen Rohbauklebstoffen angewendet, muss der Klebstoff zumindest teilausgehärtet werden, um ein Herausquetschen aus der Klebefuge zu verhindern [Mer03]. Auch hier ist die Verarbeitung mehrerer Verstärkungsbleche theoretisch möglich.

Die lokale Verstärkung von Blechbauteilen in der Automobilindustrie ist besonders an Stellen lokaler Kraffteinleitungen oder lokaler zyklischer Belastung interessant. In *Abbildung 3* sind am Beispiel eines Pkws Beispiele für den Einsatzbereich dieser Technologie dargestellt [Thy08].



Abbildung 3: Patchwork-Blanks in der Automobilindustrie

Neben der Gewichtsreduzierung ist aber auch eine Verringerung der Fertigungskosten durch den Einsatz unterschiedlicher Fertigungsleichtbauverfahren erreichbar. Die unterschiedlichen Aspekte dieser möglichen Kostensenkung sind nach [Kor03] nachfolgend aufgelistet und detaillierter beschrieben:

- Eine Bauteilintegration in die Platine reduziert die Anzahl der Einzelpressteile sowie deren Ziehwerkzeugsätze. Daraus ergibt sich eine kürzere Pressenbelegungszeit, wodurch die variablen Kosten zur Herstellung einer Baugruppe vermindert werden.
- Durch die Vorverlagerung von Fügeoperationen auf die Platine entfallen Rohbauoperationen. Insbesondere im Fahrzeugnassbereich können ggf. auf diese Weise aufwändige Abdichtmaßnahmen entfallen.

- Durch eine günstige Zuschnittwahl der Platinen wird eine verbesserte Materialnutzung erreicht. So können z. B. Abfallbereiche für Verstärkungsbleche verwendet werden. Material, das in der konventionellen Fertigung des Verstärkungsbleches prozessbedingt im Flanschbereich benötigt wird, entfällt weitgehend.
- Neben den genannten drei Hauptaspekten kann durch die Vorverlagerung der Fügeverfahren auch der Logistikaufwand reduziert werden [Kor03]

Bei allen Fertigungsleichtbauverfahren ist besonders auf das Rückfederungsverhalten höherfester oder höchstfester Werkstoffe zu achten, die in der Kombination mit typischen Tiefziehwerkstoffen einen hohen Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Bauteilkombinationen haben [Hüt01].

In *Abbildung 4* ist der Aufbau eines Werkzeugs zur gemeinsamen Umformung von Verstärkungsbereichen dargestellt. Als werkzeugseitige Änderung gegenüber der konventionellen Fertigung ist der Stempel derart zu bearbeiten, dass das Verstärkungsblech absatzfrei in einer eingebrachten Tasche im Stempel aufgenommen werden kann. Dieses Prinzip stellt grundsätzlich die Möglichkeit bereit, praktisch jedes bestehende Werkzeug für den Einsatz der Doppellagenblechtechnik in einer sehr wirtschaftlichen Art und Weise zu modifizieren. Zur Fixierung der Bleche zueinander bieten sich unterschiedliche Möglichkeiten an: Justagestifte [Doe02], Clinchen, Nieten, Schweißen oder Kleben (Klebstoffteilaushärtung) [Böh04, FAT06, Beh06]. Die Fixierung ist notwendig, damit die Verstärkungsbleche eine kontrollierte Bewegung und Ausformung im Umformvorgang mitmachen.

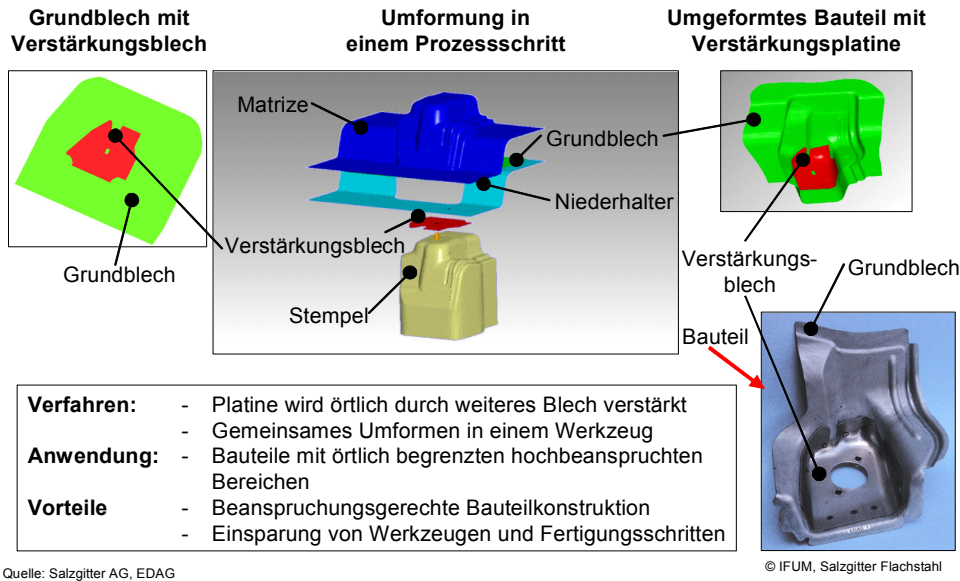


Abbildung 4: *Aufbau eines Werkzeugs zum gemeinsamen Umformen von Grund- und Verstärkungsblech in der Patchwork oder Bonded Blank Technik*

Als potenzielle Anwendungsgebiete der Bonded Blank Technik können beispielsweise folgende Praxisbauteile aus der Automobilindustrie genannt werden:

- Verstärkungselemente im Unterboden und in der B-Säule
- Federbeindom
- Verstärkung Heckabschlussteil, z. B. VW Lupo
- Schlossverstärkung der Motorhaube

Im Gegensatz zur Patchwork-Technik kann die Bonded Blank Technik mit einer zweistufigen Klebtechnik grundsätzlich größere Umformgrade im Erstzug realisieren, da die Bleche im Umformprozess weitgehend frei aufeinander abgleiten können und nicht durch lokale Verformungsbehinderungen oder weitgehend gehärtete Klebstoffe an der Ausformung behindert werden. Eine Vernetzung und Härtung wird erst nach dem Umformen prozesseffizient in der KTL-Trockenstufe vorgenommen.

3.3 Hydromechanisches Tiefziehen

Im Bereich der Tiefziehverfahren mit Wirkmedien wurde eine Vielzahl von Verfahrensvarianten entwickelt [Beh07]. Das wesentliche Merkmal wirkmedienbasierter Tiefziehverfahren besteht darin, dass ein Werkzeugelement

durch ein Druckmedium ersetzt wird. Der prinzipielle Verfahrensablauf des hydromechanischen Tiefziehens gliedert sich wie folgt (vgl. *Abbildung 5*):

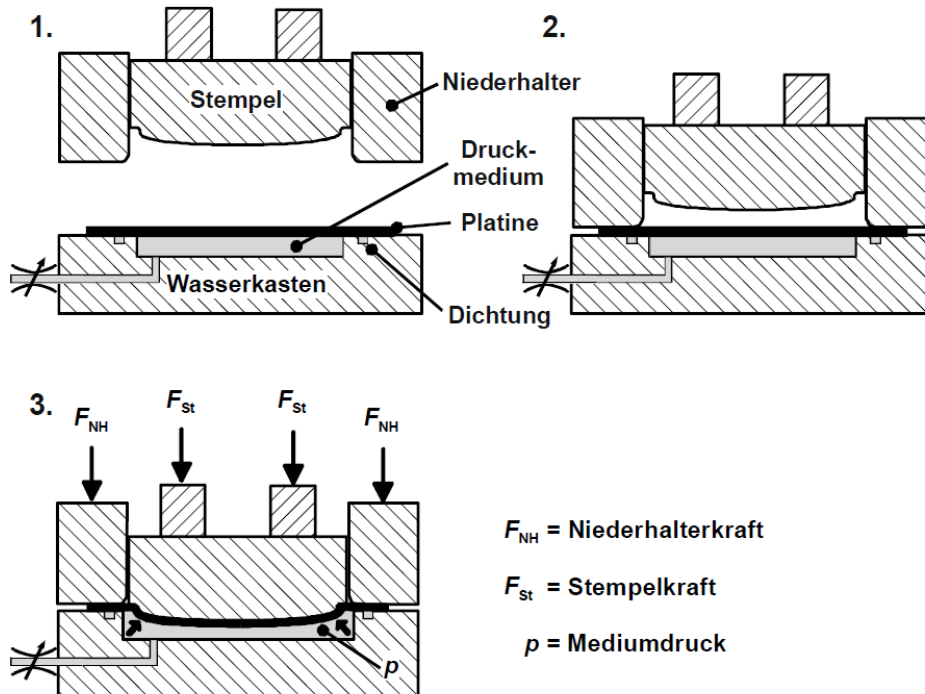


Abbildung 5: Verfahrensprinzip hydromechanisches Tiefziehen [Oeh01]

- 1) Die Platine wird direkt auf das mit einem Wirkmedium gefüllte Unterwerkzeug (Wasserkasten) gelegt.
- 2) Das Werkzeug wird durch den Niederhalter verschlossen.
- 3) Der Stempel formt das Werkstück gegen den sich im Wasserkasten aufbauenden Wirkmediumdruck um [Beh07, Tsc05].

Bei diesem Umformvorgang treten zwischen Stempel und dem sich ausformenden Bauteil Reibkräfte auf, welche einen Teil der Ziehkraft auf die Zarge übertragen. Der über den Bauteilboden eingeleitete Kraftanteil verringert sich dadurch und bewirkt eine Verschiebung des meistbeanspruchten Werkstückbereichs von Bauteilboden zum Ziehradius hin, woraus sich die nachfolgend aufgeführten Vorteile ergeben:

- Es können günstigere Ziehverhältnisse β erreicht werden als bei klassischen Tiefziehverfahren.
- Die Herstellung konischer und parabolischer Geometrien erfordert weniger Umformstufen.

- Die Blechdickenreduzierung an den Bodenradien fällt verglichen mit dem klassischen Verfahren geringer aus. Dies ermöglicht die Verarbeitung kleinerer Blechdicken und die Bauteilgestaltung mit kleineren Bodenradien.
- Die Verarbeitung unterschiedlichster Blechdicken und Materialien ist (in Abhängigkeit der einzuhaltenden Toleranzen) mit dem gleichen Werkzeug möglich.
- Die Herstellkosten können unter bestimmten Voraussetzungen unter denen des klassischen Tiefziehens liegen.
- Durch den Wegfall des Unterwerkzeugs (mit entsprechend herzustellender Kontur) können die Werkzeugkosten verringert werden.
- Nahezu jede Umformmaschine, auf der reguläre Tiefziehprozesse durchgeführt werden können, eignet sich für das Verfahren.
- Übliche Einarbeitungszeiten treten nicht auf oder können stark reduziert werden.
- Es sind gleichmäßigere Blechdickenverläufe erzielbar.
- Form- und Maßgenauigkeiten können verbessert werden.
- Es können hohe Oberflächengüten erzielt werden.

[Tsc05, Beh07, Beh10]

Eine weitere Besonderheit des Prozesses ist in dem während der Bauteilumformung vorherrschenden allseitigen hydrostatischen Druck zu sehen. Dieser Druck sorgt zum einen dafür, dass das Bauteil sich in allen Bereichen gut an die Stempelkontur anlegt, hat aber darüber hinaus aufgrund seiner in jedem Bereich senkrecht auf dem Blech stehenden Wirkrichtung eine sehr homogene Krafteinleitung zur Folge. Dadurch stellt sich ein günstigerer Spannungszustand im Ziehteil ein [Her84, Bay94], was besonders beim Ziehen von konischen Werkstücken und den damit verbundenen freien Umformzonen vorteilhaft sein kann [Tsc05, Beh07, Oeh01]. Dieser Zustand ist in *Abbildung 6* illustriert.

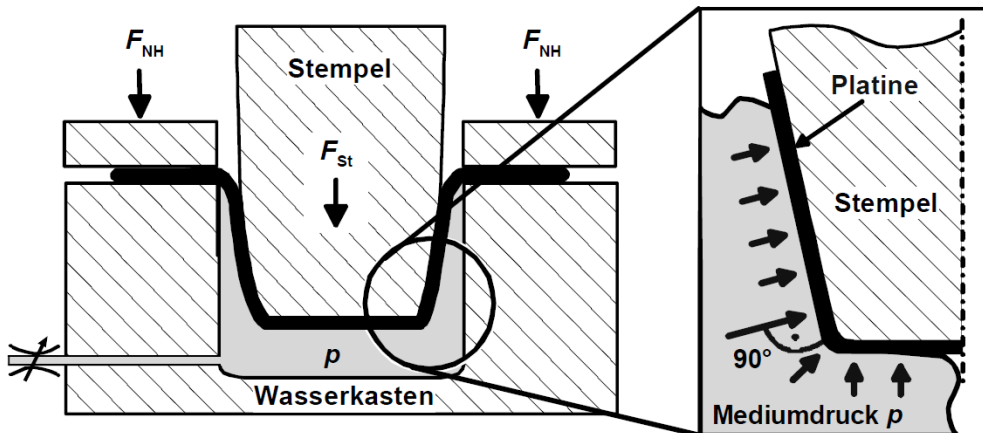


Abbildung 6: Krafteinwirkung auf das Außenblech beim hydromechanischen Tiefziehen

Durch den senkrecht zur Blechoberfläche wirkenden Querdruck lässt sich im Vergleich zum konventionellen Tiefziehen über die Ziehteilzarge eine generell größere Kraft vom Ziehteilflansch in den Ziehteilboden übertragen [Beh07]. Für den Praxiseinsatz wurden mehrere Verfahrensvarianten des hydromechanischen Tiefziehens entwickelt. Die Unterschiede resultieren aus verschiedenen Dichtungssystemen bzw. anderen Drucksteuerungen [Bay94, Her84, Sma96].

Verfahrensgrenzen des hydromechanischen Tiefziehens sind durch Falten 1. und 2. Art, Reißen sowie Wulstbildung entgegen der Ziehrichtung gegeben. Die Wulst bildet sich aufgrund des Mediumdrucks zwischen Niederhalterradius und Stempel aus. Besonders bei Bauteilen mit konischen Zargen ist eine deutliche Wulstbildung zu erkennen. In *Abbildung 7* sind die möglichen Bauteilfehler durch falsch eingestellten Wirkmediendruck dargestellt.

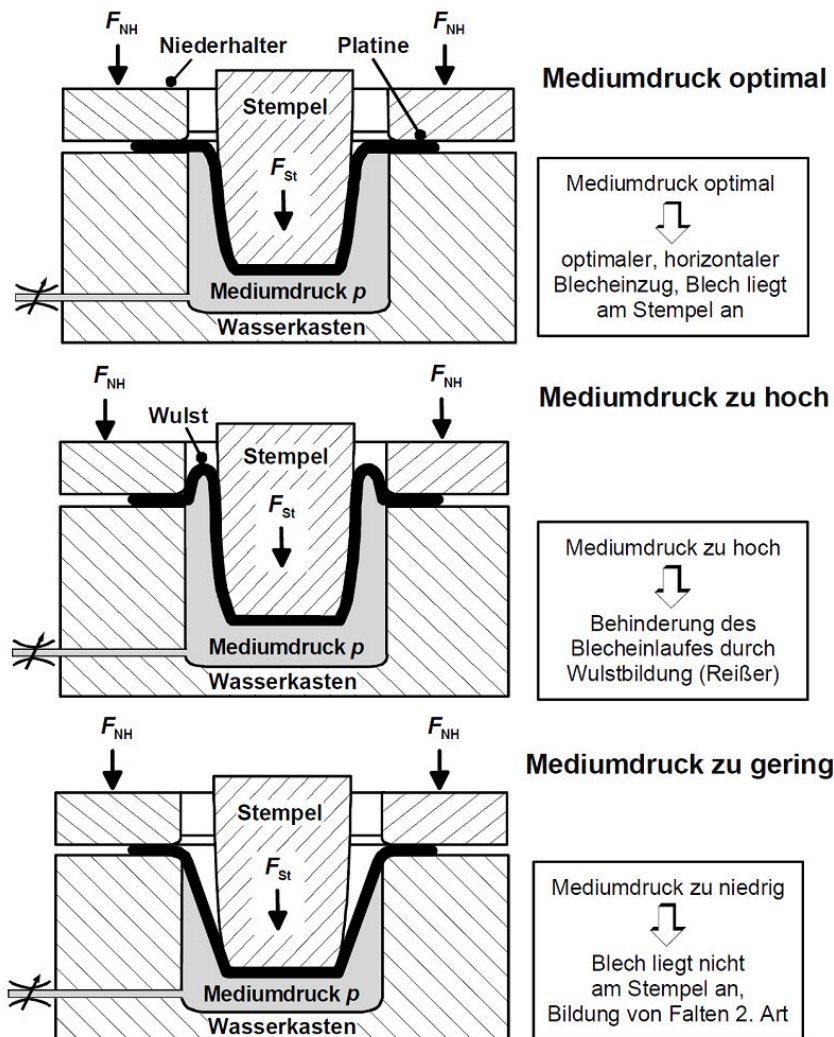


Abbildung 7: Umformergebnis in Abhängigkeit vom Wirkmediendruck

Maßgeblich für die Umformung eines Gutteils ist ein optimaler, horizontaler Blecheinlauf. Dieser kann durch eine gezielte Steuerung des Wirkmediendrucks erreicht werden [Beh07].

Eine alternative Möglichkeit zur Vermeidung der Ziehulst ist beispielsweise das modifizierte hydromechanische Tiefziehen nach Siebert. Dabei wird die Ziehulst oberhalb mit einem Stützdruck p_{st} beaufschlagt [Sie01]. Durch Einsatz des modifizierten hydromechanischen Tiefziehens ergeben sich folgende Vorteile:

- Einstellung hoher Mediumdrücke bei kleinen Ziehtiefen,
- Verwendung höherer maximaler Mediumdrücke möglich,
- Gute zur Einstellbarkeit der Wulstbildung.

Das Funktionsprinzip des nach Siegert modifizierten hydromechanischen Tiefziehens ist in *Abbildung 8* dargestellt.

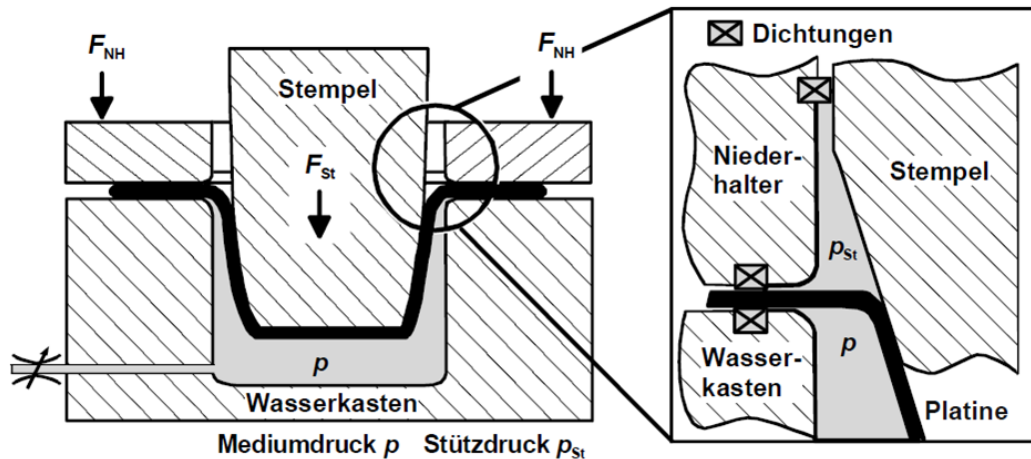


Abbildung 8: Modifiziertes hydromechanisches Tiefziehen nach Siegert

Eine weitere spezielle Verfahrensvariante des hydromechanischen Tiefziehens bietet das Aktive Hydro-Mec-Verfahren der Firma SMG in Waghäusel. Der Ablauf des Aktiven Hydro-Mec-Verfahrens gliedert sich in Anlehnung an den eingangs beschriebenen Verfahrensablauf in folgende Verfahrensschritte (*Abbildung 9*):

1. Positionieren der Platine auf dem mit Wirkmedium gefüllten Wasserkasten im geöffneten Werkzeug.
2. Schließen des Werkzeugs (Die Platine ist umlaufend, flüssigkeitsdicht zwischen Wasserkasten und Niederhalter eingespannt.).
3. Aufbau der Niederhalterkraft, anschließendes definiertes Befüllen des Wasserkastens mit dem Wirkmedium. Dadurch erfolgt ein aktives Vorrecken der Platine mit dem Ziel einer Kaltverfestigung des Werkstoffes.
4. Ausformung des Bauteils durch den Stempel gegen den sich aufbauenden Wirkmediendruck. Dabei erfolgt eine bauteilspezifische Steuerung des Wirkmediendrucks sowie des Niederhalterdrucks. Im Anschluss an die Umformung erfolgt eine Kalibrierung durch die Erhöhung des Wasserkastendrucks.

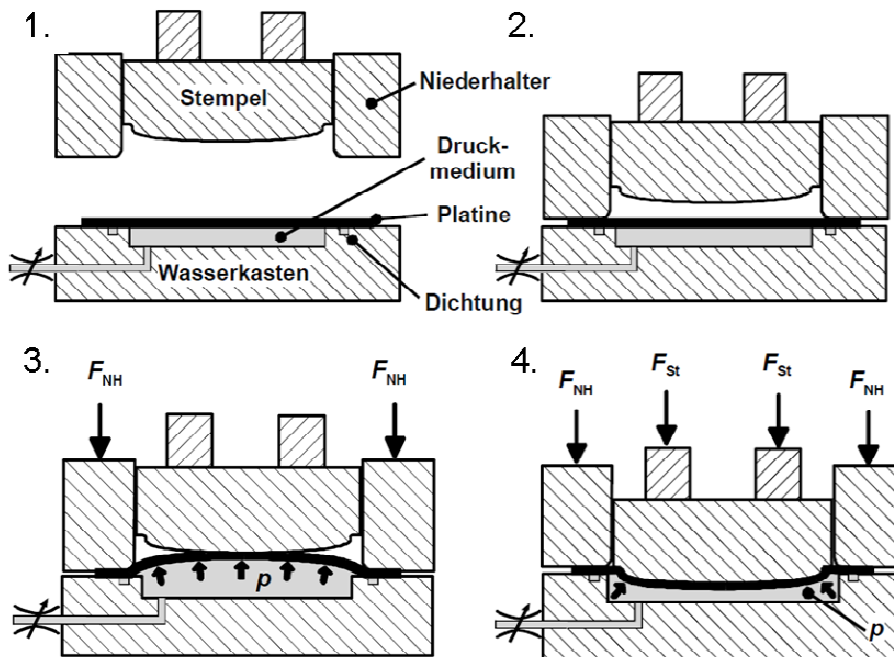


Abbildung 9: Aktives Hydro-Mec Verfahren

Eine weitere Verfahrensweise besteht darin, das im Schritt 3 beschriebene Vorrecken mit dem Ziel einer Kaltverfestigung des Blechwerkstoffs mittels relativ hoher Niederhalterkräfte und geringer Wirkmediendrücke durchzuführen. Durch das Vorrecken werden über der Werkstückoberfläche größere und gleichmäßigere Umformgrade realisiert. Speziell bei großflächigen Geometrien, wie beispielsweise Automobiltüren, Dächern oder Front- bzw. Heckklappen, ist dies in Bezug auf bessere Festigkeitseigenschaften im Sinne einer erhöhten Beulfestigkeit vorteilhaft. Beispielsweise kann somit eine Reduzierung bzw. Einsparung von Verstärkungselementen erfolgen.

Bei einer weiteren Verfahrensweise wird mittels geringer Niederhalterkräfte und eines höheren Wirkmediumdrucks im Werkzeug eine gezielte Materialbereitstellung durch den Einzug des Blechwerkstoffs erreicht. Dies dient der späteren Ausformung kritischer Bauteilbereiche.

3.4 FEM in der Umformtechnik

Im Rahmen der Auslegung von Umformprozessen und Umformwerkzeugen hat sich der Einsatz von Computersimulationen bewährt und immer stärker an Bedeutung gewonnen. Erforderliche Änderungen an Umformwerkzeugen während der Produktentstehung können bis zu 30% der eigentlichen Werkzeugkosten verursachen. Um

diesen Aufwand zu minimieren und die zur Bauteilherstellung optimalen Prozessparameter ermitteln zu können, wird vor der Investition in Anlagen und Werkzeuge numerisch mittels FEM-Simulation geprüft, wie sich ein Bauteil am besten herstellen lässt. Weiterhin bietet die Simulation erhebliches Potenzial in der Verkürzung des Produktentstehungsprozesses [Slit99, Spr06].

Die dabei abbildbaren Haupteinflussfaktoren sind in *Abbildung 10* dargestellt.

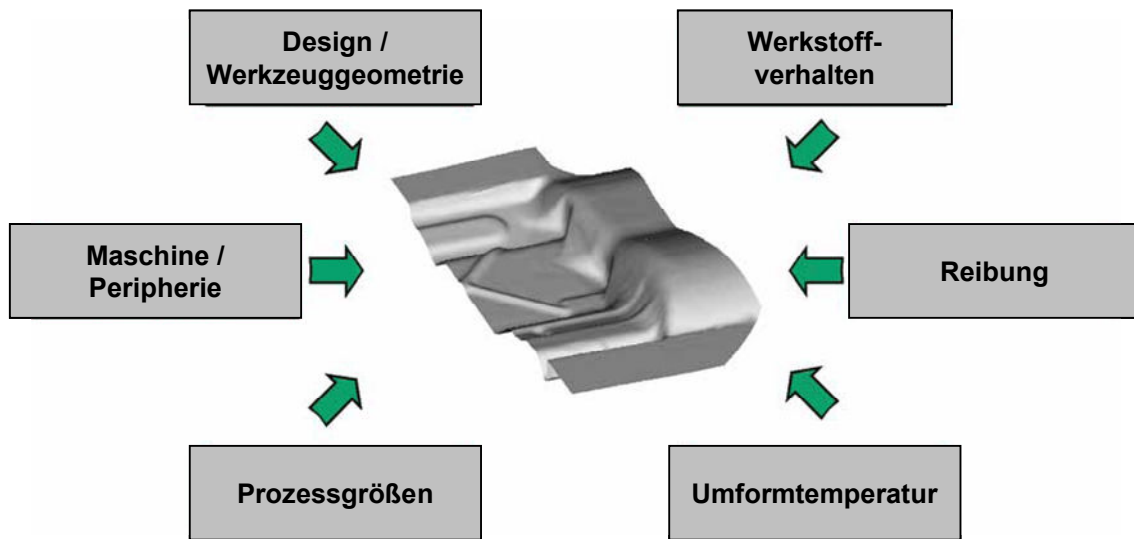


Abbildung 10: Haupteinflussfaktoren auf einen Tiefziehprozess [Spr06]

Der folgende Abschnitt stellt eine zusammenfassende Erklärung der technologischen Vorgehensweise bei der Simulation von Umformprozessen mit Hilfe der FEM dar:

Kontinuumsmechanische Vorgänge werden auf Basis differentieller Gleichgewichtsbedingungen und kinematischer Grundbeziehungen näherungsweise beschrieben. Dabei werden die Spannungen der Gleichgewichtsbedingungen und die Dehnungen der kinematischen Grundbeziehungen über ein Werkstoffgesetz verknüpft [Sem02].

Das so entstandene differentielle Gleichungssystem kann mit numerischen Näherungsverfahren, wie z. B. der Finite-Elemente-Methode (FEM), gelöst werden [Hor98]. Die FE-Berechnung trägt zu einer zeitgünstigen und kostengünstigen Konstruktionsphase bei. Bei der FE-Simulation können komplexe Geometrien und Nichtlinearitäten abgebildet und konkrete Prozessparameter ermittelt werden [Sem02].

Die FEM ist ein mathematisches Verfahren, bei dem ein durch ein Variationsprinzip bzw. durch ein System von Differenzialgleichungen beschriebenes Problem, das

analytisch nicht lösbar ist, in ein algebraisches Problem umgewandelt wird. Die zu betrachtende Gesamtstruktur eines Systems wird dabei durch ein Berechnungsmodell ersetzt, das diese Struktur in eine Vielzahl kleiner Teilgebiete (finite Elemente) unterteilt.

Die Elemente sind an ihren Eckpunkten bzw. ihren Seitenkanten durch Knoten miteinander verbunden. Durch einfache Ansatzfunktionen für die Elemente werden anschließend das Verhalten der Gesamtstruktur des Systems beschrieben und, je nach vorliegender Problemstellung, Verschiebungen, Spannungsfelder, Temperaturfelder, magnetische Felder etc. im System ermittelt. Dabei werden die außen bzw. innen wirkenden Kräfte bzw. Spannungen in statisch gleichwertige Knotenpunktskräfte oder -spannungen überführt, da Spannungen bzw. Kräfte nur über die Elementknoten übertragen werden können.

Die FEM stellt somit eine Näherung der exakten Lösung des Problems dar. Dabei gilt, dass je feiner das zu beschreibende System in finite Elemente unterteilt wird, desto genauer wird das beschriebene Problem an die Realität angenähert und desto höher ist somit die Lösungsgüte der FEM-Berechnung. Mit einer steigenden Zahl finiter Elemente zur Beschreibung des Problems steigt jedoch auch der Berechnungsaufwand exponentiell an. Es muss daher immer ein Kompromiss zwischen Berechnungsaufwand und Ergebnisgenauigkeit gewählt werden. Im Hinblick auf die weiter ansteigende Leistungsfähigkeit von Rechnern lassen sich jedoch immer komplexere FEM-Modelle mit einem feineren Finite-Elemente-Netz realisieren.

Kommerzielle FEM-Software besteht grundsätzlich aus drei Bestandteilen [Beh07]

- Pre-Prozessor (Software zur Erstellung des FEM-Modells),
- Solver (Berechnung der Feldgrößen, wie z. B. Spannungen, Kräfte, Temperaturen im betrachteten Prozess),
- Post-Prozessor (Software zur Visualisierung der Berechnungsergebnisse)

Grundsätzlich werden zwei Methoden bei der Lösung durch FEM unterschieden, und zwar das dynamisch explizite und das statisch implizite Lösungsverfahren [Sta85]. Bei expliziten Verfahren wird das aufgestellte Differenzialgleichungssystem durch extrem kleine Zeitschritte mit hoher Rechengeschwindigkeit direkt gelöst. Sie sind bedingt stabil, und die kleinste Gitterzelle bestimmt meist den Zeitschritt. Die impliziten Verfahren stellen iterative Lösungsprozesse dar, die die Bewegungsgleichung mit einem linearen Ansatz in der Zeit lösen. Sie verhalten sich mitunter wesentlich robuster und numerisch stabiler als explizite Verfahren, sind dabei aber auch deutlich langsamer [Ste07]

3.5 Klebstoffe zur Herstellung von Blechverbunden

Kleb- und Dichtstoffe werden schon lange im Automobilbau eingesetzt, vor allem Dichtstoffe und Dichtmassen sind seit Langem etabliert. Der Einsatz tragender oder struktureller Klebstoffe ist jedoch eine jüngere Entwicklung der letzten 20 bis 30 Jahre, die zunächst mit dem ausschließlichen Fügen von feststehenden Verglasungen im Karosseriebau (Front- und Heckscheiben) mit semistrukturellen Polyurethan-Klebstoffen begann und nach einer gewissen Entwicklung auch für die Verbindung von Blechwerkstoffen, häufig jedoch in Kombination mit mechanischen oder thermischen Fügeverfahren, Einzug in den Karosserie-Rohbau gefunden hat. Die kombinierten (hybriden) Fügeverfahren aus Kleben und mechanischen oder thermischen Fügeverfahren sind zum einen notwendig, um die Füge Teile mit dem zunächst noch weichen Klebstoff ausreichend bis zur endgültigen Härtung zu fixieren, und zum anderen bestehen auch oft noch Vorbehalte bezüglich der Zuverlässigkeit von nur geklebten Verbindungen. Grundsätzlich kommen ein- und zweikomponentige Klebstoffe zum Einsatz; dort, wo eine thermische Härtung im Prozessablauf möglich ist (Rohbau mit der abschließenden Lackierung durch die kathodische Tauchlackierung – KTL - mit Einbrennen des wasserbasierten Lacks im Trockenofen), werden meist einkomponentige Klebstoffe eingesetzt.

Beim Kleben der Bleche wird zwischen dem Kleben „roher“ Bleche (Rohbau) und lackierter Bleche unterschieden. Lackierte Bleche werden meist mit ein- oder zweikomponentigen Polyurethanen geklebt, die kalthärtend sind und eine gute Haftung auf der Lackoberfläche aufweisen. Bei nicht lackierten „rohen“ Blechen, die meist beölt und / oder mit anderen Umformhilfsmittel wie z. Bsp. sogenannte Drylubes versehen sind, müssen Klebstoffe eingesetzt werden, die neben einer dauerhaften Adhäsion auf den Metalloberflächen eine Verträglichkeit für die verwendeten Hilfsstoffe aufweisen. Hier eignen sich insbesondere Klebstoffe auf Epoxidharzbasis. Durch eine Warmhärtung wird die Ölaufnahme unterstützt. Um ein Auswaschen aus der Fuge in den Waschprozessen vor dem Lackieren zu verhindern, sind die Klebstoffe häufig thermoplastischer Natur.

4 Problemstellung und Zielsetzung

Während des Umformprozesses des Doppellagenverbundes soll ein weitgehend freies Abgleiten der Blechzuschnitte aufeinander möglich sein, um die freie plastische Formänderung nicht zu behindern. Der Einsatz von Klebstoffen, insbesondere von Schmelzklebstoffen (Hotmelts) mit latent reaktiven Komponenten für diese Fügeaufgabe, bietet Vorteile gegenüber Schweiß- und Nietverfahren, wie z. B. die großflächige Lasteinleitung und einen gewissen Korrosionsschutz zwischen Grund- und Verstärkungsblech. Dabei ist die Konsistenz des Klebstoffes während des Umformvorganges im Raumtemperaturbereich ausreichend fest, damit er nicht aus der Fuge herausgedrückt wird und so das Werkzeug und auch das Bauteil verschmutzen könnte. Das Abgleiten der Bleche aufeinander kann durch die Klebstoffviskosität im nicht ausgehärteten Zustand einfach über die Temperatur beeinflusst werden. Der reaktive Schmelzklebstoff dient in einer ersten Verfahrensstufe zum ausreichenden Fixieren der Platinen aufeinander, ohne dabei zu vernetzen (Vorfügen durch thermoplastisches Schmelzen, Benetzen und Erstarren). Das endgültige Fügen von Grund- und Verstärkungsblech erfolgt erst nach dem Umformvorgang. Die Neubenetzung vergrößerter Blechoberflächen und vollständige Aushärtung der Klebschicht erfolgt im umgeformten Zustand durch erneutes Aufschmelzen des Hotmelts und durch zusätzliche chemische Reaktion einer reaktiven Klebstoffkomponente in einem abschließenden Wärmeprozess, beispielsweise während der KTL-Trocknung bei Temperaturen von ca. $T = 180\text{ °C} - 200\text{ °C}$ (*Abbildung 11*).

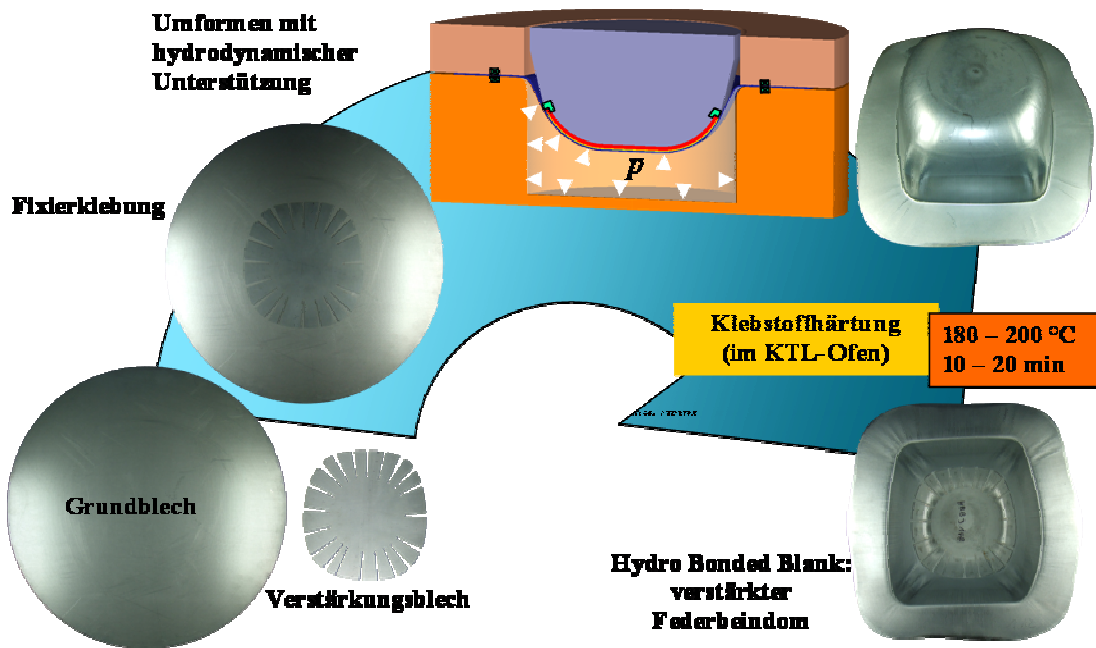


Abbildung 11: Prozessschritte des hydromechanisch unterstützten Tiefziehens mit zweistufiger Klebtechnik als Hydro Bonded Blanks

Als reaktive Komponenten können latent reaktive Epoxydharze oder Polyurethane zum Einsatz kommen. Sie reagieren bei Überschreiten einer materialspezifischen Starttemperatur und vernetzen dreidimensional zum Duromer. Fein verteilt im thermoplastischen Grundwerkstoff (Polyamid oder Polyether) können sie diesen ebenfalls teilweise vernetzen. Der Klebstoff baut daher im zweiten Schritt durch dreidimensionale Vernetzung der Polymerketten eine strukturelle Festigkeit auf, die höher als bei den reinen Thermoplasten liegt, gleichzeitig erhöht sich die Warmfestigkeit der Verbindung. Die Verwendung von Hotmeltpolymeren in Kombination mit Polyurethanen (PUR) für strukturelle Verklebungen im Automobilbereich ist durch die Prozesstemperaturen in der Herstellung begrenzt. Temperaturen in der KTL-Trocknung von $T = 180$ bis zu 200 °C stellen eine Obergrenze der Anwendbarkeit dar, da die Polymere teilweise oberhalb von $T = 160\text{ °C}$ degenerieren. Jedoch ist die Kinetik dieses Vorganges typischerweise sehr träge, so dass kurzfristige Expositionen von derart hohen Temperaturen nur begrenzte Schädigungen hervorrufen (Abbildung 12).

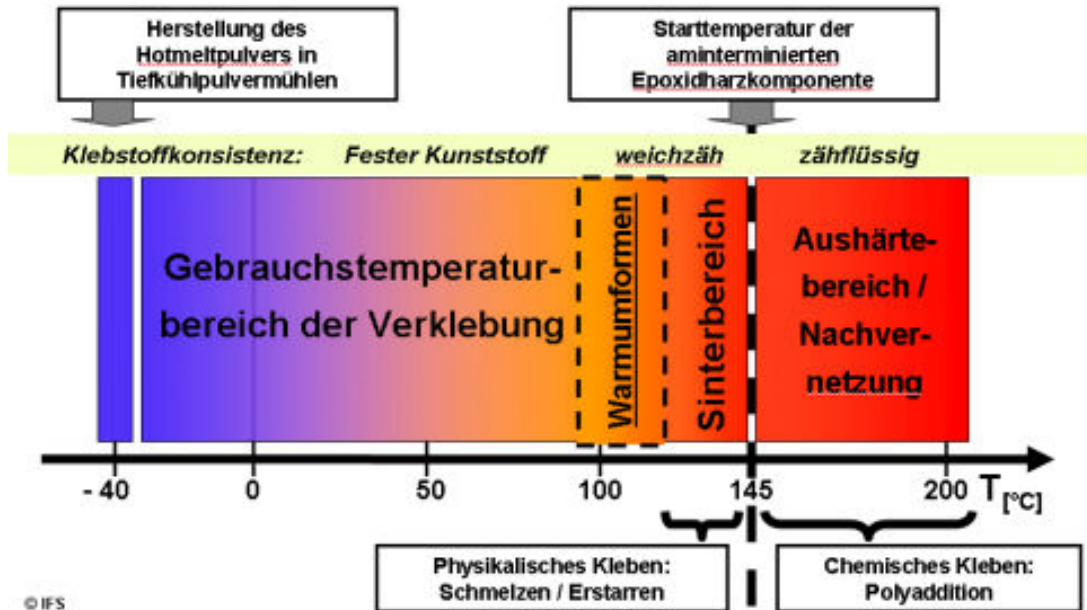


Abbildung 12: Temperaturverhalten von einem latent reaktiven Schmelzklebstoff (Hotmelt)

Als Applikations- oder Beschichtungsverfahren kommen grundsätzlich viele etablierte Verfahren in Frage, der bei Raumtemperatur feste Kunststoff ermöglicht jedoch speziell die Lieferform und Applikationsmöglichkeiten als Pulver oder Folie. Die Klebstofffolien können mit und ohne Klebrigkeit (Tack) eingesetzt werden. Die zuverlässige Beschichtung der Verstärkungsblechkanten muss dabei durch alle Beschichtungsvarianten gewährleistet werden, da in [FAT06] der positive Beitrag der eingebetteten Verstärkungsblechkante beschrieben wurde. Die Kerbwirkung am Dickensprung der Struktur wurde deutlich reduziert.

Das Verstärkungsblech wird während des Umformprozesses hauptsächlich auf Biegung beansprucht und vom Grundblech an den Stempel herangedrückt. Die Prozessgrenzen sind damit durch die maximale Differenz der Festigkeit bzw. Dicke des Verstärkungsbleches und der minimalen Festigkeit bzw. Dicke des Grundbleches vorgegeben. Wird diese Prozessgrenze überschritten, liegt das Verstärkungsblech nicht vollständig am Stempel an und zeichnet sich auf der Oberfläche des Grundbleches ab. Im Bereich der Verstärkungsblechkante tritt Kerbwirkung auf, und ein Reißer wird im Grundblech initiiert (Abbildung 13).

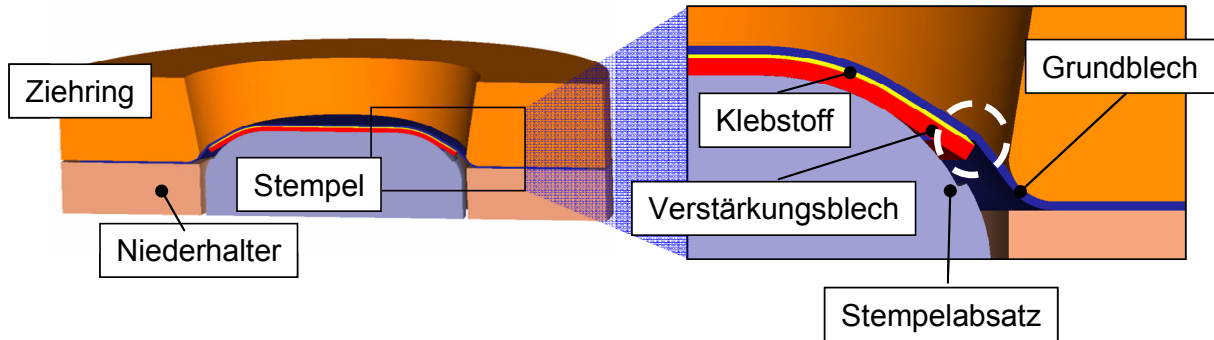


Abbildung 13: Starres Tiefziehwerkzeug

Ziel des durchgeführten Forschungsvorhabens ist die Erweiterung der Prozessgrenzen der Bonded Blank Technik durch die hydromechanische Umformung. Hierbei wird insbesondere eine Steigerung des Verhältnisses Festigkeit bzw. Dicke des Verstärkungsbleches zur Festigkeit bzw. Dicke des Grundbleches angestrebt. Darüber hinaus wird eine Verminderung der Kerbwirkung im Grundblech durch die Drucküberlagerung erwartet. Teilziele bestehen in der werkzeugseitigen Realisierung, in der Ermittlung optimaler Prozessparameter sowie in der Bewertung der Bauteilqualität. Zudem sollten geeignete Klebsysteme identifiziert werden, die den Umformprozess ertragen bzw. unterstützen und bei den zu erwartenden Betriebsbeanspruchungen über ein ausreichendes Eigenschaftsniveau verfügen.

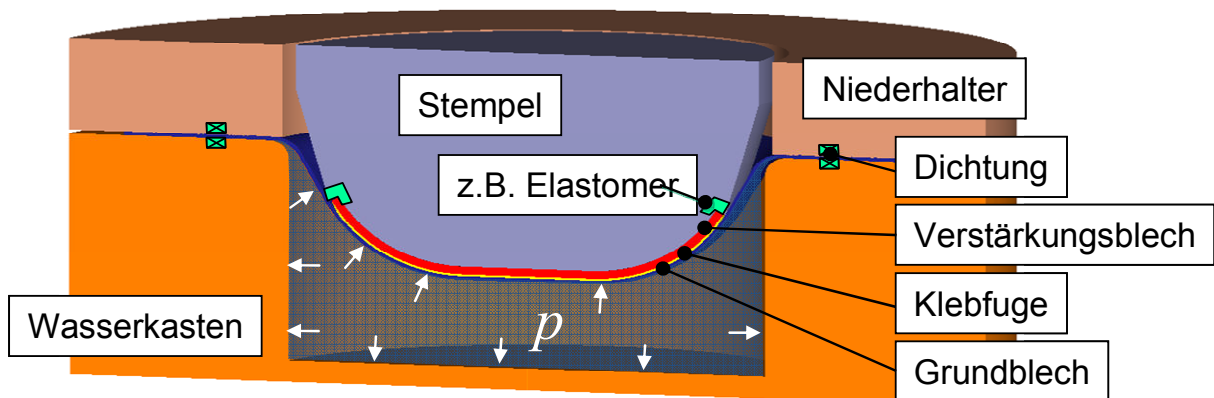


Abbildung 14: Hydromechanisches Tiefziehen

5 Aufbau der Anlagentechnik für Hydro Bonded Blanks

5.1 Optimierung der Anlagensteuerung

Im Rahmen der Praxisversuche wurden zur umformtechnischen Herstellung der Beispielgeometrie (Federbeindom) und der Rechtecknäpfe mit gewölbtem Boden zwei unterschiedliche Umformmaschinen mit hydraulischem Antrieb genutzt. Diese Maschinen sowie die grundsätzlichen Werkzeugkonzepte werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

5.1.1 Verwendete Umformmaschinen

Hydraulische Presse Schirmer & Plate

Aufgrund des verwendeten Werkzeugkonzepts zur Realisierung der hydromechanischen Umformung von Doppellagenblechverbunden muss für die Versuche an der stilisierten Federbeindomgeometrie in den verschiedenen Blechwerkstoff-, Blechdicken- und Klebstoffkombinationen eine Umformmaschine mit ausreichend großer Stößelkraft gewählt werden. Dies begründet sich darin, dass über den Stößel die Kraffteinleitung zum druckdichten Verschließen des Werkzeugsystems realisiert wird. Da der Prozess nach dem Verdrängungsprinzip arbeitet, wird darüber hinaus der zur Umformung benötigte Wirkmediendruck durch das Eindringen des Stempels in das Volumen des Wasserkastens aufgebaut.

Ein weiterer Aspekt, der eine genügend hohe Stößelkraft erforderlich macht, ist in den untersuchten Werkstoffen und Blechdicken begründet. So wurde unter anderem der Werkstoff MSW 1200 in einer Blechdicke von $s_0 = 3,0$ mm als Verstärkungsblech verwendet. Die Umformung solcher Blechgüten mit den entsprechenden Blechdicken erfordert den Einsatz einer entsprechend dimensionierten Umformmaschine. In der nachfolgenden Übersicht sind die wichtigsten technischen Spezifikationen der Maschine zusammengestellt.

Technische Daten:

max. Stößelkraft:	12.500 kN
max. Rückzugkraft:	1.375 kN
max. Betriebsdruck:	315 bar
Einbauhöhe (bei Hub oben):	1.250 mm
Stößelhub:	500 mm
Tisch- und Stößelfläche:	1.250 mm x 1.250 mm
max. Pressgeschwindigkeit:	28 mm/s

Das genaue Funktionsprinzip und die unterschiedlichen Betriebszustände des Werkzeugsystems werden in *Abschnitt 5.1.2* näher erläutert.

Hydraulische Presse Hydrap HPDZb 63

Für die Versuche an der Rechteckgeometrie mit gewölbtem Bauteilboden kommt eine hydraulische Presse zum Einsatz. Die technische Spezifikation der zum Einsatz gekommenen Anlage ist in der folgenden Übersicht dargestellt:

Druckkraft:	63 - 630 kN
Ziehkissenkraft:	40 - 400 kN
Rückzugkraft:	100 kN
Stößelhub:	500 mm
Ziehkissenweg:	250 mm
Tischfläche:	800 x 800 mm
Stößelaufspannfläche:	800 x 900 mm
Hubgeschwindigkeiten max. ab:	410 mm/s
Last:	0 - 90 mm/s
auf:	300 mm/s

Eine zusätzliche Anforderung an den Umformprozess besteht in der Temperierbarkeit der Werkzeulemente, um die Verbesserung des Klebstoffverhaltens bei temperierter Umformung untersuchen zu können. Dafür ist eine Erwärmung aller am Umformprozess beteiligten Werkzeugkomponenten (Niederhalter, Ziehring und Stempel) erforderlich. Dies ermöglicht eine Umformung der vorgewärmten Rohlinge bei der erwünschten Temperatur, wohingegen es beim Einsatz eines nicht erwärmbaren Werkzeugsystems durch die relativ langsame Prozessgeschwindigkeit und die gute Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Werkzeugstähle zu raschem Temperaturverlust in den Blechverbunden kommen würde.

5.1.2 Aufbau des Werkzeugsystems zum hydromechanischen Tiefziehen

Das Werkzeugsystem zur hydromechanischen Herstellung der Bonded Blanks Federbeindomgeometrie funktioniert nach dem Verdrängungsprinzip. Der Pressenstößel leitet die Kraft zum Verdrängen des Wirkmediums (und damit zur Umformung des Bauteils) sowie die Kraft zur Verdrängung der Plungerzylinder zwecks Einstellung der lokalen Niederhalterkräfte ein.

Abbildung 15 zeigt den prinzipiellen Aufbau als CAD-Schnittdarstellung.

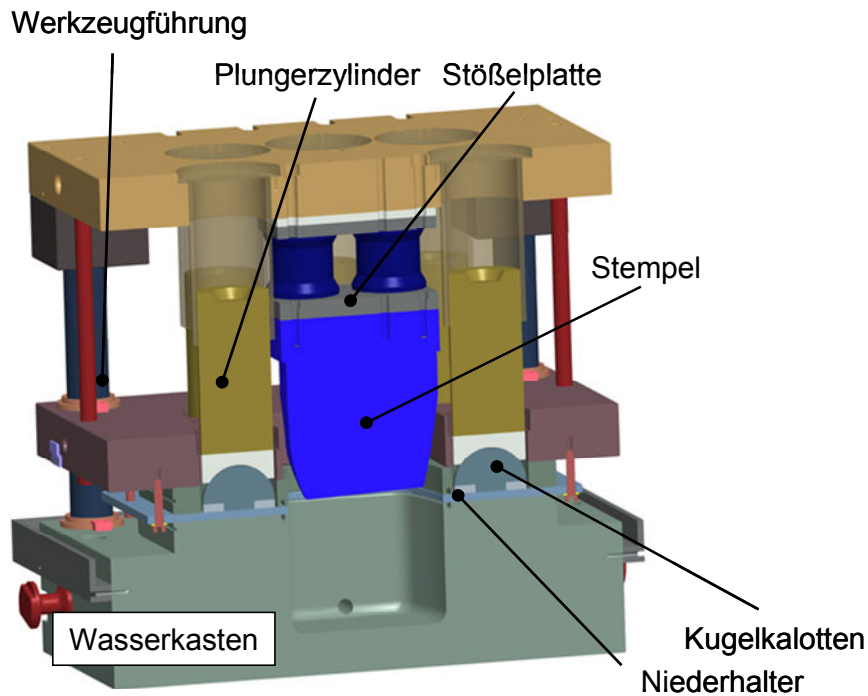


Abbildung 15: CAD-Schnittdarstellung des hydromechanischen Werkzeugsystems

Da das System mit einem flüssigen Wirkmedium arbeitet, ist ein Aufbau mit oben liegendem Stempel (Wasserkasten unten) erforderlich. Die Niederhalterkinematik muss daher entsprechend angepasst werden. Dies wurde über die Plungerzylinder realisiert. Diese setzen mit Kugelkalotten auf die Niederhalterplatte auf. Diese Kalotten verhindern ein Verkanten und eine unerwünschte Belastung der Werkzeugkomponenten.

Die Einzelschritte beim Durchlaufen einer Arbeitssequenz, also der Herstellung eines Bauteils, lassen sich wie folgt beschreiben (vgl. *Abbildung 16*):

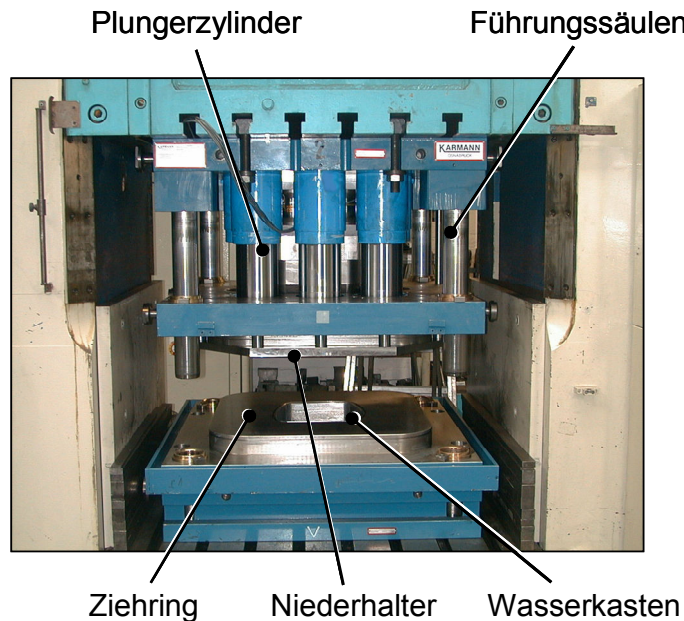


Abbildung 16: *Eingebautes Werkzeug*

1) Füllen des Wasserkastens:

Der Wasserkasten wird bis zu einem Wirkmedienniveau, das die Umformung des Bauteils ohne das Einschließen von Luftvolumina zulässt, gefüllt. Der Wirkmediumstand schließt mit der Kante des Wasserkastens ab. Als Wirkmedium kommt Hydrauliköl zum Einsatz.

2) Einlegen der Platine:

Die Platine wird auf den Teflon-Dichtungsring des Wasserkastens (höchste Erhebung) aufgelegt und zentriert.

3) Schließen des Werkzeugs:

Der Pressenstößel wird bei geschlossenen Plungerventilen abgesenkt, bis der Niederhalter Kontakt zur Platine bekommt. Ab diesem Zeitpunkt werden die Plungerventile auf den eingestellten Wert geöffnet, um das Öl aus den Plungern definiert ausströmen zu lassen. Dadurch wird die lokal gewählte Niederhalterkraft eingestellt.

4) Umformen:

Der Stößel wird weiter abgesenkt, und der Stempel formt die Platine gegen den sich aufbauenden Wirkmediumdruck aus. Der Druck im Wasserkasten wird durch ein Abströmventil eingestellt, der Stößel wird bis zur benötigten Ziehtiefe abgesenkt.

5) Rückhub Stempel – Ausfahren Plungerzylinder:

Die Ventile der Plungerzylinder werden geöffnet und von einem Hydraulikaggregat extern mit Druck beaufschlagt. Dadurch fahren die Zylinder aus. Dies hebt den Stempel aus dem Wasserkasten und stellt die Plungerzylinder wieder in Ausgangslage für den nächsten Umformvorgang.

6) Rückhub Stößel:

Der Pressenstößel wird nun bis in den oberen Totpunkt angehoben.

7) Bauteilentnahme:

Das tiefgezogene Bauteil wird aus dem Werkzeugsystem entnommen.

Eine komplett durchlaufene Sequenz dieser Prozedur dauert auf diese Weise ca. 6 - 8 Minuten. Aufgrund der entstehenden Wirkmediumdrücke und der schlagartigen Entspannung des Mediums beim Auftreten eines Reißers muss für jede Sequenz zur Sicherheit eine Schutzscheibe aus Plexiglas vor das Werkzeugsystem gesetzt werden.

Der beschriebene Aufbau ermöglicht die lokale Einstellung von Niederhalterkräften. Das Verhalten der acht umlaufend angeordneten Plungerzylinder ist durch die Ventilstellung steuerbar. Dabei können die Plunger entweder alle individuell gesteuert werden oder in Gruppen zusammengeschaltet sein. Das Zusammenschalten von Plungergruppen hat sich aufgrund der spezifischen Bereiche der Bauteilecke und der Bauteilseiten als sinnvoll erwiesen. Dabei werden beispielsweise die Plunger mit den Nummern 1, 3, 5, und 7 (Eckenbereiche entsprechend *Abbildung 17*) sowie die Plungerzylinder 2, 4, 6 und 8 (Seitenbereiche des Bauteils) zusammengeschaltet.

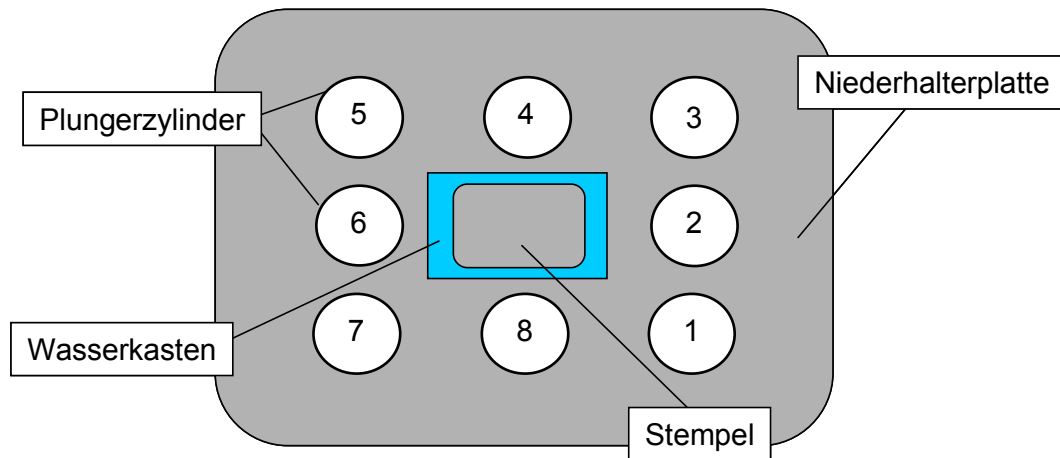


Abbildung 17: Anordnung der Plungerzylinder

Diese Möglichkeit kann im Tiefziehvorgang dazu genutzt werden, das Nachfließverhalten des Grundblechwerkstoffs zu beeinflussen. Bei einer Gruppenschaltung entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise kann beispielsweise durch einen höher gewählten Druck in den Seitenbereichen bei geringer gewähltem Druck in den Eckbereichen eine gleichmäßigere Flanschausbildung erreicht werden.

Während der Bauteilumformung kommt es in den Eckbereichen aufgrund des radial zusammenlaufenden Materials und tangentialer Druckspannungen tendenziell zu einer relativen Aufdickung dieser Bereiche. Die dadurch hervorgerufene geringe Kontaktkraft des Niederhalters in den Seitenbereichen kann durch einen höher eingestellten Druck der Seitengruppe kompensiert werden. Dies kann dazu beitragen, Bauteilfehler, die ihre Ursache in dieser Dicken- und Kräfteinleitungsdifferenz haben, zu reduzieren oder ihr Auftreten im Umformprozess zeitlich zu verzögern, was zu einer Erweiterung der Prozessgrenzen genutzt werden kann.

In *Abbildung 18* sind die entsprechenden Druck-Maschinenwegverläufe für die Umformung eines Verbunds aus H260 YD als GB und TRIP 800 als VB exemplarisch dargestellt.

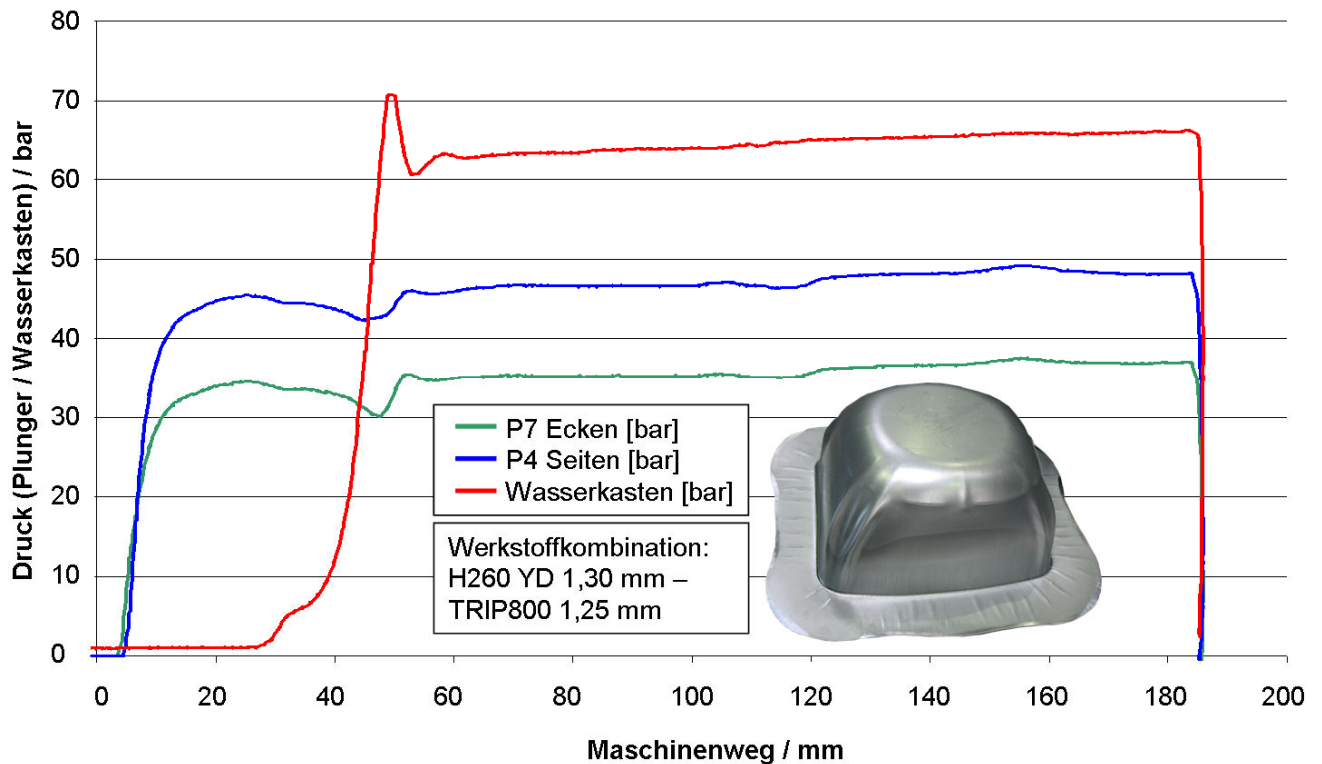


Abbildung 18: Druck-Maschinenwegverläufe der Plunger und des Wasserkastens.

Da die Druckspeisung des Systems wie auch der Ablaufstrang der Plungerzylinder und des Wasserkastens als gemeinsames System ausgeführt sind, lässt sich das Aufsetzen des Stempels auf dem Blech mit dem darauffolgenden Beginn der Ausformung bei steigendem Wasserkastendruck ebenfalls an einer Beeinflussung der Plungerdruckkurven belegen. Nach etwa 40 mm Maschinenweg und stetig ansteigendem Wasserkastendruck wird hier der Maximalwert erreicht und auf dem eingestellten Niveau gehalten.

Die Drucksteuerung jedes einzelnen Plungerzylinders über einen Umformvorgang ist ebenfalls möglich. Dafür werden dem System wegabhängige sog. Generatorkurven für jedes Plungerventil vorgegeben. In diesen Kurven ist hinterlegt, zu welchem Zeit- bzw. Wegpunkt ein bestimmter Zylinder mit einem bestimmten Druck beaufschlagt wird. Diese Kurven werden dann im Versuch individuell so angepasst, dass ein optimales Umformergebnis hinsichtlich der Vermeidung bzw. Reduzierung von Bauteilfehlern, wie Falten und Reißen, erzielt werden kann.

In den Versuchen zur Umformung mit diesen Generatorkurven hat sich allerdings gezeigt, dass im Vergleich zu Bauteilen, die mit der vorher beschriebenen Arbeitsweise (mit der gruppenweisen Ansteuerung der Plungerzylinder in den Seiten-

bzw. Eckenbereichen) hergestellt wurden, zwar eine leichte Verbesserung hinsichtlich des Einlaufverhaltens erzielt werden kann, diese Verbesserung im Verhältnis zum entsprechenden Aufwand für die Ermittlung der Generatorkurven allerdings nicht zu rechtfertigen ist. Die große Anzahl an unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten von Werkstoffen, Blechdicken und verwendeten Klebstoffen, die für jede Kombination eine entsprechende Ermittlung dieser Kurven erforderlich machen würde, wäre in einem akzeptablen Zeit- und Werkstoffaufwand nicht zu bewältigen.

Um ein druckdichtes Abschließen des Systems bei eingelegter Platine sicherzustellen, kommt eine die Wasserkastenöffnung umlaufende Teflondichtung zum Einsatz. Diese Dichtung ist als Verschleißteil ausgelegt und kann bei entsprechend starker Abnutzung durch die Relativbewegungen mit dem Blech bei eingebautem Werkzeug ersetzt werden (vgl. *Abbildung 19*).

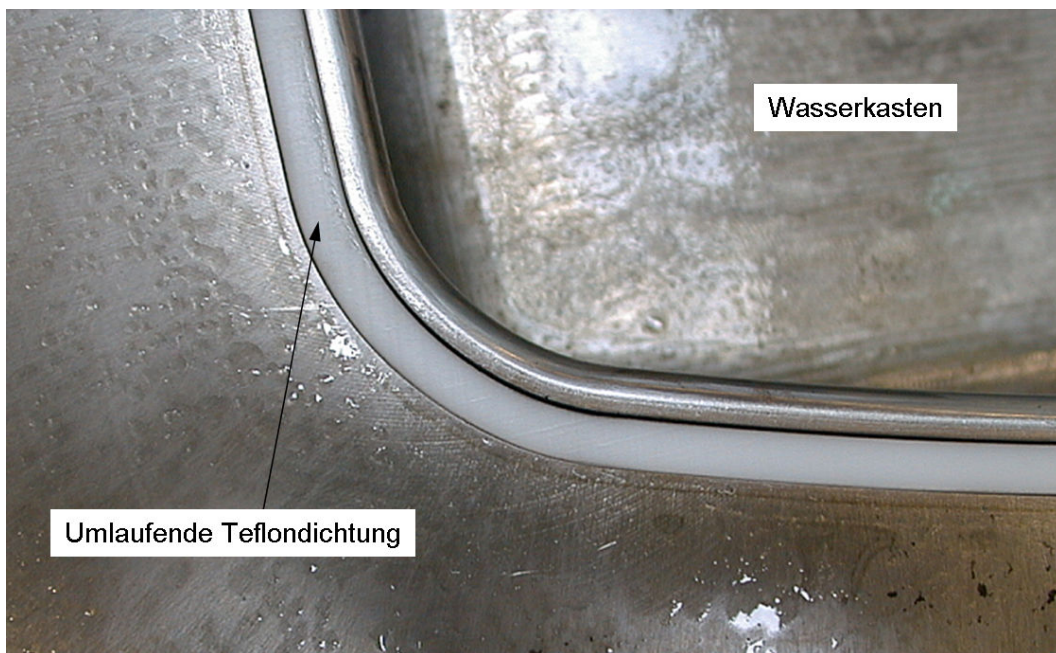


Abbildung 19: Umlaufende Teflondichtung

Als eine besondere Ausprägung der Prozessführung kann ein sich ausbildendes Druckpolster im Bereich der Wasserkastenöffnung betrachtet werden. Das genaue Einstellen dieses Prozesspunktes über den Wasserkastendruck und die Stempel- und Niederhalterkraft ist dabei erforderlich. Vorteilhaft an dem sich einstellenden Zustand ist eine Verbesserung der erzielbaren Oberflächenqualität, da die Reibung

durch das Druckpolster verringert wird. Weiterhin wird der eigentlich geometrisch vorgegebene Radius an der Kante der Wasserkastenöffnung durch das aufgebaute Druckpolster etwas „verrundet“, und die vom Material erforderte Biegung über diese Kante wird sanfter. Dadurch sinkt auch die benötigte Umformkraft. Allerdings kann bei zu ungenau eingestelltem Druck eine starke Wulstbildung des einlaufenden Blechs als negativer Effekt beobachtet werden, welcher zu Bauteilfehlern wie Reißen oder zu einer Verringerung der erreichbaren Ziehtiefe führen kann.

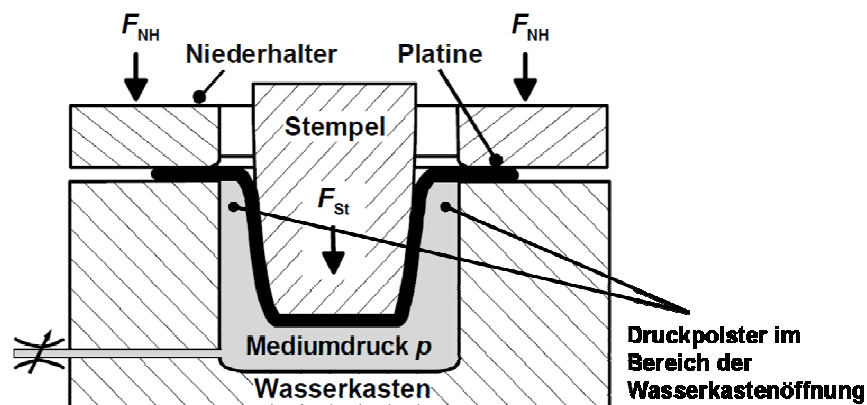


Abbildung 20: Ausbildung eines Druckpolsters beim hydromechanischen Tiefziehen

5.1.3 Verwendetes Werkzeugsystem für erwärmte Umformversuche

Um eine mögliche Verbesserung des Umformvermögens der verwendeten Klebstoffe bei erhöhten Umformtemperaturen untersuchen zu können, wurden Bauteile mit einer Rechteckgeometrie in einem beheizbaren Tiefziehwerkzeugsystem hergestellt. Ein derartiger Versuch an den Federbeindomgeometrien ist nicht möglich, da für die Versuche bei Zieltemperaturen von bis zu $T_W = 100 \text{ °C}$ das Wirkmedium sowie alle weiteren aktiven Werkzeugkomponenten auf diese Temperatur erwärmt werden müssten. Die Freigabe des Ventilherstellers für die im Werkzeugsystem verbaute Ventiltechnik ist lediglich bis zu einer Arbeitstemperatur von $T_{V,max} = 67 \text{ °C}$ erteilt worden. Ein Austausch der kompletten Ventiltechnik zur Anpassung an die Verarbeitungstemperatur wäre kostentechnisch im Rahmen dieses Projektes nicht darstellbar gewesen. Weiterhin ist eine Verarbeitung der Bauteile nach dem in *Abschnitt 5.1.2* beschriebenen Vorgehen bei der Verwendung eines heißen Wirkmediums aus Sicht der Arbeitssicherheit für den Maschinenführer nur schwer umsetzbar.

Der Stempel des zum Einsatz gekommenen Tiefziehwerkzeugs sowie ein

hergestelltes Bauteil sind in *Abbildung 21* dargestellt.

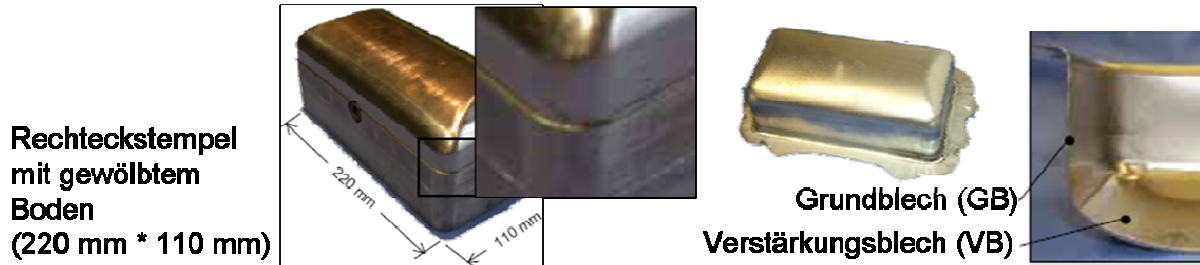


Abbildung 21: Warmumformwerkzeug mit Rechteckgeometrie

Die Werkzeugkomponenten Stempel, Ziehring und Niederhalter sind im verwendeten Versuchsaufbau mit Heizpatronen ausgestattet. Diese auf dem Prinzip der Widerstandserwärmung basierenden Heizelemente sind zusammen mit Temperatursensoren an den unterschiedlichen Werkzeugkomponenten an ein 3-Kanal-Heizgerät angeschlossen, das eine Erwärmung auf ein voreingestelltes Temperaturniveau und das Halten auf dieser Temperatur ermöglicht.

Die zu verarbeitenden Bonded Blanks werden darüber hinaus vor der Umformung in einem Ofen entsprechend der gewünschten Verarbeitungstemperatur vorgewärmt.

5.2 Konstruktion der Umformwerkzeuge

5.2.1 Simulationsgestützte Modifikation der Stempelgeometrie

Im Zuge der ersten Projektphase wurde die bisher im hydromechanischen Tiefziehwerkzeug zum Einsatz gekommene Stempelgeometrie an den neuen Anwendungsfall des Tiefziehens eines Bonded Blanks angepasst. Dafür wurde die Umformsimulation unter Verwendung des Simulationssystems AutoForm[®] genutzt. *Abbildung 22* zeigt den entsprechenden Modellaufbau mit den dazugehörigen Komponenten.

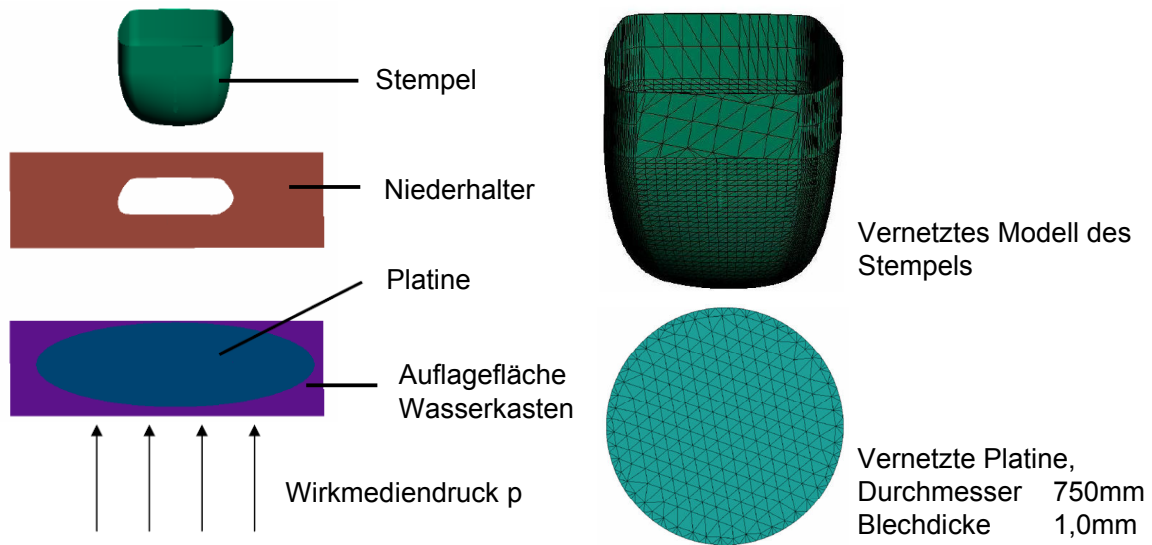


Abbildung 22: Modellaufbau in AutoForm

Entsprechend dem Realversuch entfällt die Matrize als Werkzeugkomponente und wird ersetzt durch den sogenannten Wasserkasten, also einen mit Wirkmedium gefüllten Hohlraum. Die Geometrie des Niederhalters wurde aus dem Werkzeugsystem übernommen.

Anfängliche Berechnungsergebnisse aus der Ursprungsgeometrie bzw. einer Weiterentwicklung dieser Geometrie haben deutlich gezeigt, dass eine Neuentwicklung der Stempelgeometrie unumgänglich ist. Jegliche Modifikation der alten Geometrie hat nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen können.

Bei der Ursprungsgeometrie sind folgende Gestaltungsmerkmale als problematisch im Sinne der Umformung von Doppellagenblechverbunden identifiziert worden:

- Scharfe Kanten,
- Ausgeprägte Schräge am Bauteilboden,
- Ausgeprägte Asymmetrie sowie
- Richtungswechsel im Krümmungsverlauf entlang der Stempelflanke.

Da bei dem verwendeten Werkzeugaufbau die untere Stempelgeometrie (Sockel und unterer Stempelkörperbereich) aufgrund der Niederhalterausparung in ihrer grundsätzlichen Form nicht geändert werden konnte, haben sich durch rotationssymmetrisches Freischneiden des Stempelkopfes unterschiedliche Effekte eingestellt, welche den zu untersuchenden Umformprozess ausgeprägt negativ beeinflussen (vgl. *Abbildung 23*):

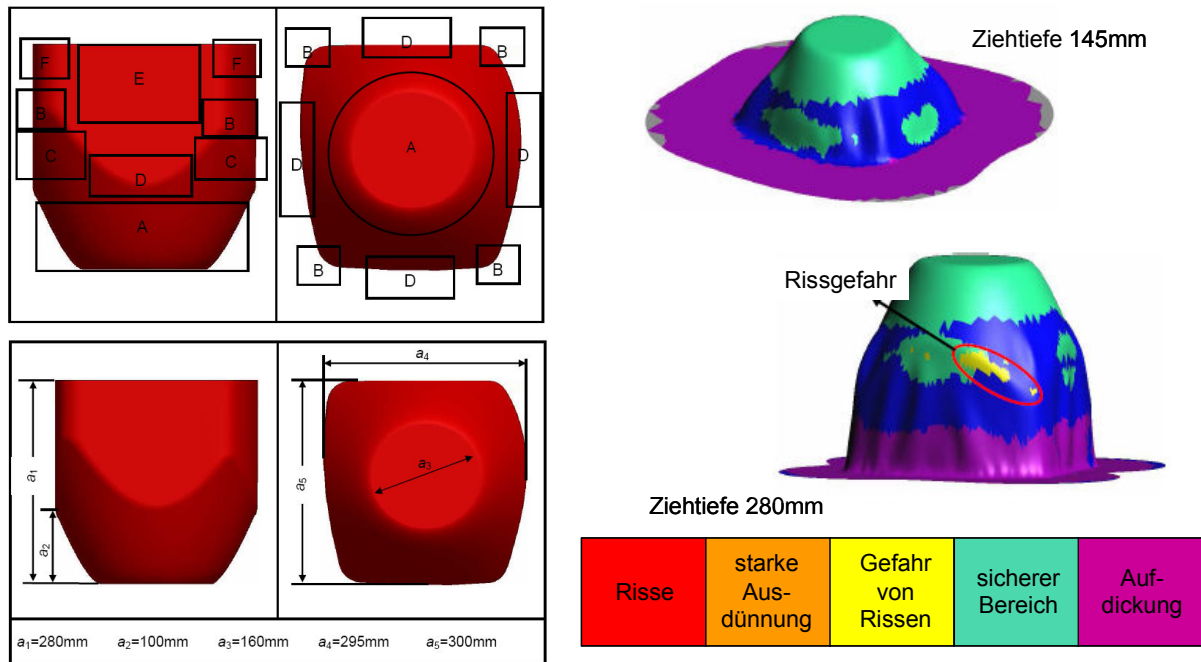


Abbildung 23: 1. Stufe der Modifikation der Stempelgeometrie

Die Hauptprobleme bei dieser Geometrie liegen in den deutlichen Kanten, die sich durch das Freischneiden am Übergang des rotationssymmetrischen Teils in den eher rechteckigen Grundkörper des Stempels einstellen. Diese Kanten (Bereiche D in *Abbildung 23*) sind als Bereiche identifiziert worden, in denen es vermehrt zur Rissbildung gekommen ist. Diesem Problem ist bei der Verwendung der ursprünglichen Geometrie nicht erfolgreich zu begegnen, was eine generelle Neukonstruktion erfordert. Ein weiteres Problem wird durch den erforderlichen Übergang einer eher rechteckigen Geometrie im Stempelsockel in einen annähernd rotationssymmetrischen Stempelkopf deutlich. Dieses Problem ist umformtechnisch nur bedingt zu beherrschen.

In *Abbildung 24* ist die zweite Modifikationsvariante dargestellt, die nicht mehr durch eine Umgestaltung der ursprünglichen Geometrie, sondern durch einen ganzheitlichen Neuaufbau entsprechend der bisher gewonnenen Erkenntnisse gekennzeichnet ist. Vor allem ein möglichst sanfter Übergang der Bereiche Stempelkopf in Stempelsockel als auch die Vermeidung scharfer Kanten im Bereich des Kopfes sind bei grundsätzlicher Beibehaltung der stilisierten Federbeindomgeometrie im zweiten Modell umgesetzt worden.

Auch die waagerechte Kontaktfläche im Bereich des Stempelkopfes (Bereich A in *Abbildung 23* und *Abbildung 24*) wurde deutlich vergrößert.

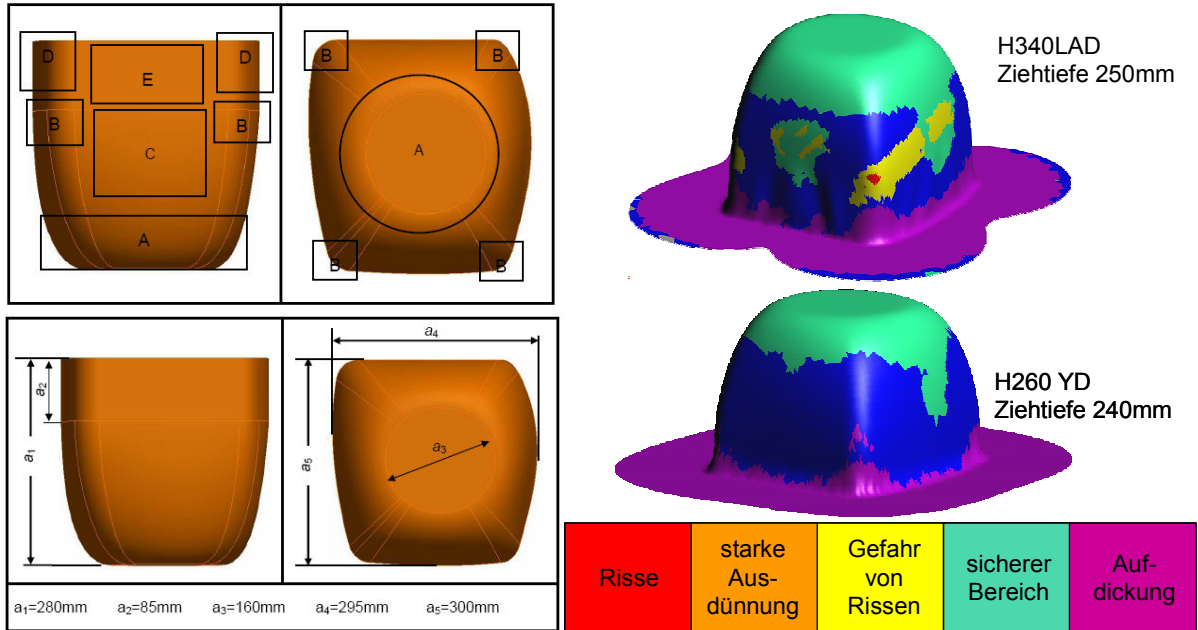


Abbildung 24: 2. Stufe der Modifikation der Stempelgeometrie

In den durchgeführten Simulationsrechnungen wurde weiterhin die voraussichtlich schadensfrei erzielbare Ziehtiefe ermittelt. Im Hinblick auf die geplanten Untersuchungen an den Klebverbunden in der Kuppe der zu erzeugenden Federbeindome wurde mit Priorität auf das Erreichen einer Ziehtiefe abgezielt, ab der aus geometrischer Sicht sicher von einer ausreichenden Ausformung des VB ausgegangen werden kann. Diese minimal zu erzielende Ziehtiefe wurde in der Simulation sowie in den Realversuchen in ca. $h = 130 \text{ mm}$ gefunden.

In *Abbildung 25* sind neben der ursprünglichen Geometrie die erste Modifikation sowie die letztendlich als optimal identifizierte Geometrie nebeneinander dargestellt.

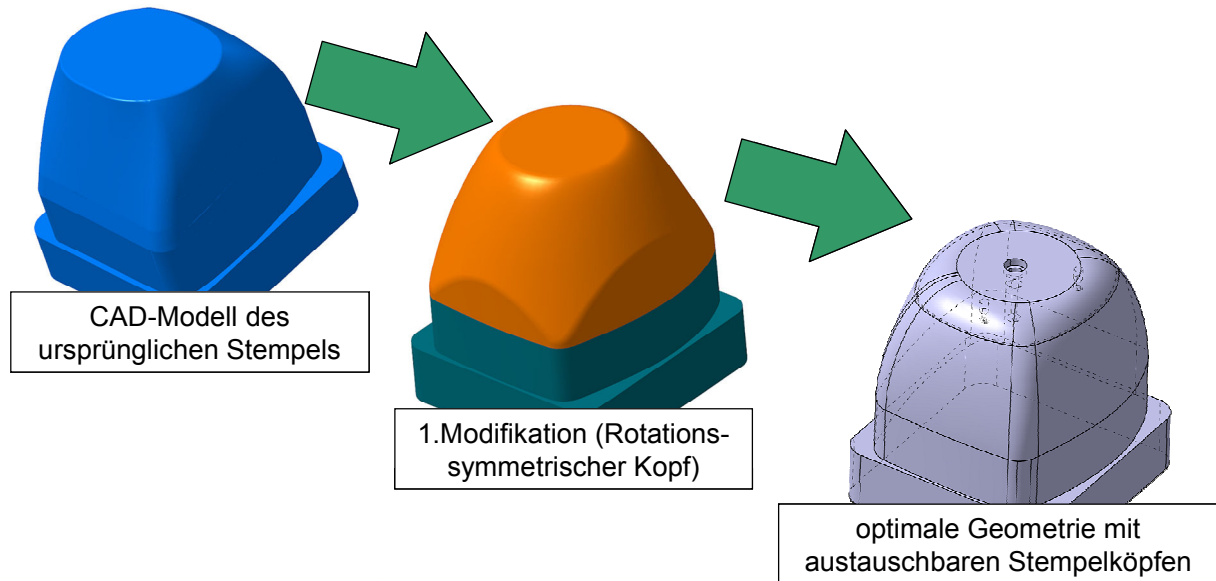


Abbildung 25: *Modifikation der Stempelgeometrie (CAD)*

5.2.2 Modularer Stempelaufbau

Aufgrund der geplanten Verarbeitung unterschiedlicher Verstärkungsblechdicken in Bereichen zwischen $s_{0,VB} = 0,8 \text{ mm}$ bis $s_{0,VB} = 3,0 \text{ mm}$ ist der Stempel mit auswechselbaren Stempelköpfen ausgestattet worden. Auf einen Grundsockel können somit Stempelaufsätze für unterschiedliche Verstärkungsblechdicken montiert werden. Die Aufsätze sind dabei so konstruiert worden, dass das VB nur Kontakt zu den Aufsätzen hat, und ein Aufkanten des VBs in Bereichen des Stempelgrundkörpers vermieden werden kann. *Abbildung 26* zeigt das Prinzip dieses Aufbaus.

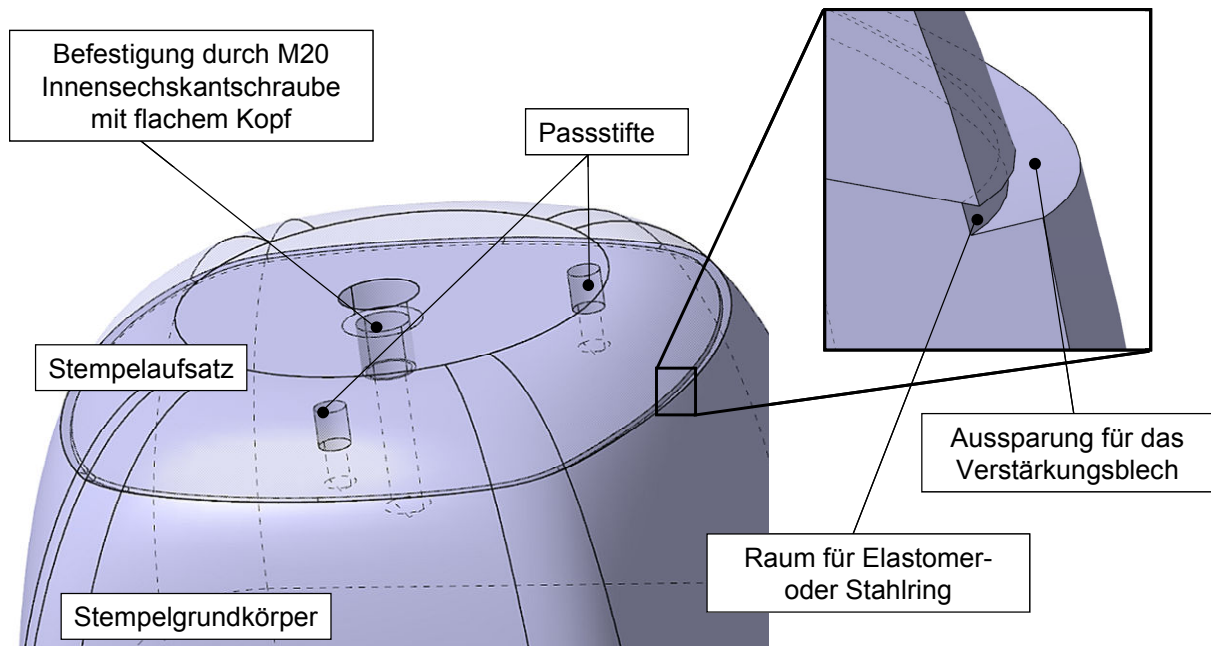


Abbildung 26: CAD-Darstellung der modularen Stempelköpfe

Als Montagehilfe und Verdrehsicherung dienen gegenüberliegende Bohrungen in den Anlageflächen der beiden Komponenten, die über einen Passtift justiert werden. Die kraftschlüssige Verbindung der beiden Stempелеlemente wird durch eine zentral angeordnete Innensechskantschraube realisiert. Zur Aufnahme des Schraubenkopfes ist eine Vertiefung in den Stempelaufsätzen eingebracht.

Die Montierbarkeit „von unten“ ist bei dem hier verwendeten Werkzeugaufbau zwingend erforderlich, da die Möglichkeit zum Auswechseln der Stempelköpfe bei eingebautem Werkzeug sichergestellt sein soll. Hierfür wird das Werkzeug maximal auseinander gefahren, also der Stempel mittels der Plungerzylinder in den oberen Totpunkt verfahren. Die Verschraubung ist dann für die Montage zugänglich. In *Abbildung 27* sind die Lage der Stempelaufsätze und die Prozedur zum Auswechseln dieser Aufsätze schematisch dargestellt.

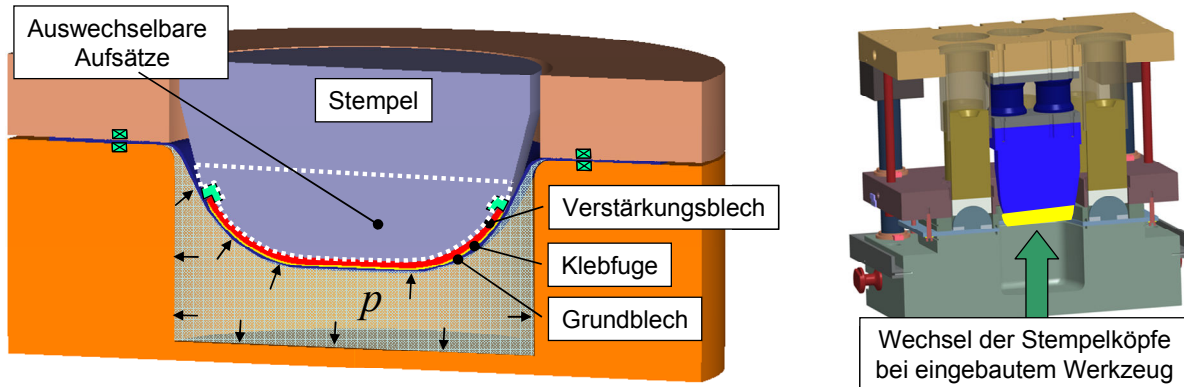


Abbildung 27: Schematische Darstellung der austauschbaren Stempelköpfe

Die Dimensionierung der Stempelköpfe wurde entsprechend der zur Verarbeitung vorgesehenen Verstärkungsblechdicken gewählt. Die untersuchten (und werkstoffkundlich in Abschnitt 6.1.1 näher beschriebenen) Blechwerkstoffe weisen dabei Blechdicken von $s_{0,VB} = 1,25 \text{ mm}$ bis $s_{0,VB} = 3,0 \text{ mm}$ auf. Diese Aufsätze sind mit V2 bis V4 bezeichnet (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Vorgesehene Verstärkungsblechdicken

Bezeichnung	Aufnahme für Verstärkungsbleche der Blechdicke
V1	ohne Verstärkungsblech
V2	$s_{0,VB} = 1,25 \text{ mm}$
V3	$s_{0,VB} = 1,5 \text{ mm}$
V4	$s_{0,VB} = 3,0 \text{ mm}$



V1
V2
V3
V4

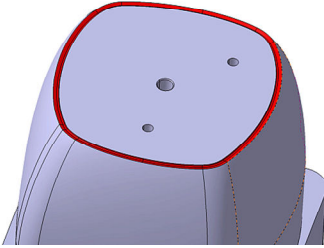
Eine weitere Variante ohne Reduzierung der Stempelkopfhöhe ist erforderlich, um Versuche ohne Verstärkungsblech durchführen zu können. Diese ist mit V1 bezeichnet. Die Nachrüstung mit Stempelaufsätzen für die Verarbeitung anderer Verstärkungsblechdicken ist bei Einhaltung der Anschlussmaße an den Stempelgrundkörper möglich. Die in der Simulation optimierte und in den Versuchen verwendete Stempelkopfgeometrie hat dazu geführt, dass die Aufsätze einen sehr

scharfkantigen Auslaufbereich ausgebildet haben, der entsprechende Sicherheitsmaßnahmen bei der Handhabung und Montage der Aufsätze erforderlich macht.

5.2.3 Maßnahmen zur Verringerung der Kerbwirkung (Stempel)

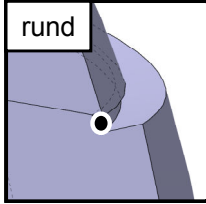
Zur Optimierung des Stempels wurde im Bereich der Absatzkante eine Nut vorgesehen, in der verschiedene Elastomerringe montiert werden können. Dadurch wird der Rand des Verstärkungsblechs zur Abschwächung der einkerbenden Wirkung elastisch gebettet, um diese Zone prozesssicherer zu gestalten. In der ersten Versuchsreihe wurden dazu die in *Abbildung 28* gekennzeichneten Elastomerringe untersucht.

ERIKS COMPOUND	TEMPERATURBEREICH °C
NBR 36624	-30 / +120
NBR 47702	-30 / +120
EPDM 55914	-50 / +120
EPDM 55914PC	-50 / +150
Silikon 714177	-60 / +220
Neoprene 32906	-35 / +110
Viton® schwarz 51414	-20 / +200
Viton® grün 51414	-20 / +200
Viton® schwarz 514320	-20 / +200

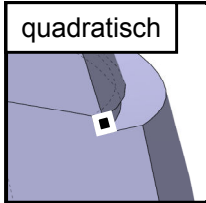


O-Ringe mit ca. 8% Aufmaß
in umlaufender Nut

rund



quadratisch



Elastomerring mit den benötigten Festigkeitsanforderungen zum Einsatz in Hydrauliköl im angestrebten Temperaturbereich

Abbildung 28: Dimensionierung und Auswahl der Elastomerringe

Eine Verbesserung der erzielten Ergebnisse in Form einer weniger stark abgebildeten Verstärkungsblechkante oder einer vergrößerten Ziehtiefe konnte allerdings nicht festgestellt werden. Bei Versuchen unter ansonsten identischen Bedingungen wurden zwischen dem Einsatz unterschiedlicher Elastomere mit Ringgeometrien und der Verwendung der Stempelaufsätze ohne einen Elastomerring keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Dies gilt für jegliche erprobte Elastomerringeometrie. Da die Elastomere selbst starker Verformung nur wenig Widerstand entgegensetzen und zu sehr großer Formänderung fähig sind, ist zu vermuten, dass sie den Prozess kaum anders beeinflussen als eine freigelassene Nut. Die Problematik des Aufkantens des VBs in Bereichen außerhalb des Stempelaufsatzes wurde, abgesehen von provoziertem nicht zentriertem Einlegen, nicht beobachtet. Dies spricht dafür, dass im Verlauf des Tiefziehvorgangs die Relativbewegungen der beiden Blechkörper in diesem Bereich sowie die bis zum Zeitpunkt eines möglichen Aufsetzens erreichte Verformung im VB ein Aufkanten verhindern.

6 Experimentelle Untersuchungen zur Fertigungstechnik durch Kleben und Umformen

6.1 Ermittlung optimaler Prozessparameter

In Anlehnung an die in der Simulation untersuchten Ziehtiefen wurde eine Zielziehtiefe von $h = 140$ mm für alle Werkstoff-, Blechdicken-, und Klebstoffkombinationen festgelegt. Diese Ziehtiefe kann noch erreicht werden, ohne dass die Prozessreserve zum Auftreten der Versagensart Reißen zu gering wird. Die Ausformung der Bonded Blank-verstärkten Kuppe im Sinne eines vollständigen Anliegens des VBs ist bei dieser Ziehtiefe gewährleistet. Die Beschränkung auf diese Bauteilhöhe berücksichtigt weiterhin eine bei größeren Ziehtiefen unter den möglichen Kombinationen teilweise stark unterschiedlich ausgeprägte Ausbildung der Versagensart Falten 2. Art.

Die eingelegten Platinen wurden niederhalterseitig mit Ziehöl (Raziol CLF 180) versehen. Dies ist erforderlich, da in diesem Bereich zwischen Blech und Niederhalter sowie zwischen Blech und der im System vorhandenen Teflondichtung starke Relativbewegungen auftreten, dieser Bereich aber nicht durch Kontakt zum Wirkmedium mit einem Schmierstoff versorgt werden kann. Sowohl die Haltbarkeit der Werkzeugkomponenten als auch die erreichbaren Oberflächenzustände des Bauteils werden durch diese Maßnahme verbessert.

6.1.1 Untersuchte Blechwerkstoffe

Die im Rahmen der Versuche zur Herstellung stilisierter Federbeindomgeometrien mit lokalen Bonded Blanks Verstärkungen hergestellten Blechwerkstoff-, Blechdicken-, und Klebstoffkombinationen sind in *Abbildung 29* dargestellt.

Versuche mit dem Grundblechwerkstoff H340LAD in einer Blechdicke von $s_{0,GB} = 0,8$ mm, wie auch der Verstärkungsblechwerkstoff MSW1200 mit einer Blechdicke von $s_{0,GB} = 3,0$ mm sind in der zweiten großen Umformserie zur Bereitstellung von einheitlichen Bauteilen für die verschiedenen Bauteilversuchsreihen nicht weiterverfolgt worden. Der Grundblechwerkstoff H340 hat in dieser Blechdicke dem Umformvorgang nicht durchgängig bis zur geforderten Ziehtiefe von 140 mm versagensfrei standgehalten.

Der Verstärkungsblechwerkstoff MSW1200 hat in der Blechdickenausführung 3,0 mm eine zu starke Kerbwirkung auf jegliches Grundblechmaterial ausgeübt. Diese Kerbwirkung hat bei den Umformversuchen zu einem frühzeitigen Versagen der Bauteile durch Reißen stets an der Verstärkungsblechkante geführt.

Werkstoff GB	Blechdicke GB	Werkstoff VB	Blechdicke VB	Klebstoff
H340 LAD	1,50	TRIP800	1,25	Pulver X1333
H340 LAD	1,50	TRIP800	1,25	Folie TM10850
H340 LAD	1,50	H340 LAD	1,50	Pulver X1333
H340 LAD	1,50	H340 LAD	1,50	Folie TM10850
H220 YD	1,15	TRIP800	1,25	Pulver X1333
H220 YD	1,15	TRIP800	1,25	HCM555
H220 YD	1,15	TRIP800	1,25	Folie TM10850
H220 YD	1,15	H340 LAD	1,50	Pulver X1333
H220 YD	1,15	H340 LAD	1,50	HCM555
H220 YD	1,15	H340 LAD	1,50	Folie TM10850

Abbildung 29: Übersicht Versuchsmatrix aus Grund- und Verstärkungsblechen sowie den drei untersuchten Klebstoffen

H340 LAD (nach DIN EN 10346: HX340LAD)

Dieser Werkstoff ist sowohl als Grundblechwerkstoff als auch als Verstärkungsblechwerkstoff zum Einsatz gekommen. Die Kombination H340 – H340 hat erwartungsgemäß zu einem sicheren Umformprozess und damit zur Produktion von Gutteilen nach der in *Abschnitt 5.2* genannten Spezifikation geführt. Da sowohl Grundblech als auch Verstärkungsblech aus dem gleichen Werkstoff bestehen und darüber hinaus noch gleiche Blechdicken aufweisen, sind die mechanischen Umformeigenschaften in Grund- und Verstärkungsblech gleich, und es kommt nur zu einer minimalen gegenseitigen Beeinflussung. Da sich eine verhältnismäßig ähnliche Bauteilformung im Kuppenbereich einstellt, ist zu vermuten, dass die Relativbewegung der beiden Blechkomponenten, denen der Klebstoff während der Umformung ausgesetzt ist, relativ gering gehalten werden kann.

Auch in Kombination mit TRIP 800 sowie als Verstärkungsblechwerkstoff in einem Verbund mit H220 YD als Grundblech sind gute Ergebnisse in Form stabiler Umformprozesse und der Herstellung von Gutteilen nach o. g. Spezifikation erzielt worden. Der feuerverzinkte Oberflächenzustand des Werkstoffs stellt jedoch im Vergleich zu einer Elektrolytverzinkung eine größere Herausforderung hinsichtlich der prozesssicheren Klebung dar.

TRIP 800 (nach prEN 10338: HCT780T+ZE)

In Absprache mit der voestalpine Stahl GmbH wird der von diesem Hersteller

gelieferte elektrolytverzinkte Werkstoff mit der Bezeichnung HCT780T+ZE (nach prEN 10338) im Bericht durchgehend die Bezeichnung TRIP 800 tragen Dieser Werkstoff ist ausschließlich als Verstärkungsblechwerkstoff zum Einsatz gekommen und wurde mit beiden verwendeten Grundblechwerkstoffen sowie allen Klebstoffsystemen kombiniert. Die gute Eignung dieses Werkstoffs wird durch die Herstellung von Gutteilen entsprechend der Spezifikation und von einer robusten Prozessführung in allen ausgeführten Kombinationen belegt. TRIP 800 Verstärkungsbleche wurden hauptsächlich im Drahterodierverfahren hergestellt.

MSW 1200

Der Werkstoff MSW1200 erfordert aufgrund der hohen Festigkeit und der Ausführung in einer Blechdicke von $s_0 = 3,0$ mm eine entsprechend groß dimensionierte Anlagentechnik zur Vorbereitung der Verstärkungsbleche. Das Zuschneiden von quadratischen Platinen, die dann im Paket übereinander gelegt und drahterodiert werden können, ist auf einer speziell für diese Werkstoffgüte und Blechdicke ausgelegten Blechschere durchgeführt worden.

Der Werkstoff ist allerdings nach der ersten Versuchsreihe in der weiterführenden Versuchsmatrix nicht mehr berücksichtigt worden, da sich eine zu starke Kerbwirkung im Bereich der Verstärkungsblechränder eingestellt hat. Diese führte schon bei geringsten Ziehtiefen von teilweise unter 30 mm zum Reißen des Blechverbundes. Aufgrund dieser Beobachtungen war nicht davon auszugehen, dass die im weiteren Projektverlauf durchgeführten Maßnahmen zur Reduzierung der Kerbwirkung bei diesem Verstärkungsblechwerkstoff in einem Umfang greifen würden, der eine sichere und fehlerfreie Umformung entsprechend der Spezifikation zugelassen hätte.

Die Verwendung von MSW1200 als Verstärkungsblechwerkstoff in einer Blechdicke von $s_{0,GB} = 1,5$ mm hat zwar einer Umformung mit größeren erreichbaren Ziehtiefen verglichen zum dickeren Verstärkungsblech standgehalten, eine genügend große Anzahl an Näpfen mit reproduzierbar erreichter ausreichender Ziehtiefe konnte allerdings nicht hergestellt werden. Diese extreme Werkstoffkombination ist daher zwar für einige Auswertungen, wie die Untersuchung von Reißern und das Abbilden der Verstärkungsbleche auf dem Grundblech, mit herangezogen worden, in die weiteren Untersuchung konnten diese Bauteile allerdings nicht mit einbezogen werden.

H220 YD (nach DIN EN 10346: HX220YD)

Der Werkstoff ist in einer Blechdicke von 1,15 mm ausschließlich als Grundblech

zum Einsatz gekommen. Er hat ein vergleichbares Verhalten zum H340 LAD gezeigt, wobei trotz geringerer Blechdicke aufgrund der sehr guten Tiefzieheigenschaften dieses Werkstoffs die gleichen Ziehtiefen erreicht werden konnten. Spezifische Bauteilfehler in Form von Faltenbildung erster oder zweiter Art bzw. das Auftreten von Reißern haben sich bei keinem der beiden Grundblechwerkstoffe ausgeprägt gezeigt. Auch hier wird durch den feuerverzinkte Oberflächenzustand des Werkstoffs im Vergleich zu einer Elektrolytverzinkung eine größere Herausforderung hinsichtlich der prozesssicheren Klebung festgestellt.

6.1.2 Untersuchte Klebstoffe

Die Klebstoffe und die damit zusammenhängende Klebtechnik unterliegen in der vorliegenden Zielsetzung zum kombinierten Fügen und Umformen besonderen Randbedingungen. Speziell die Tatsache, dass ein Klebstoff als Schicht zwischen den Doppellagen in direkter Pressung unter den vollen Umformdruck beim Tiefziehen gesetzt wird, schränkt die Verwendung vieler viskoser Klebstofftypen deutlich ein. Die niedrigviskosen, d. h. flüssigen Klebstoffe würden zu einem erheblichen Teil an den offenen Rändern des Verstärkungsbleches ausgequetscht und in der Folge den Stempel verschmutzen, nachfolgende Bauteile würden ebenfalls unkontrolliert mit Klebstoffresten beschmutzt und würden aufwändige Nacharbeit verursachen. Dieser Zustand darf daher im Prozess nicht auftreten, die zulässige Viskosität der Klebstoffe im Umformvorgang ist sicherzustellen und ausreichend hoch zu wählen. Die Viskosität der Klebstoffe als Mischung von kurzkettigen polymeren Stoffen oder schon weitgehend fertig verarbeiteten langkettigen polymeren Stoffen ist jedoch keine Konstante, sondern unterliegt im Wesentlichen zwei Randbedingungen, der Temperatur und dem Reaktionsfortschritt bei Polymerreaktionen.

Eine Klebstoffauswahl für den Einsatz im Bereich Bonded Blanks muss die in *Tabelle 2* zusammengefassten Randbedingungen berücksichtigen. Diese zum Teil sehr hohen Anforderungen werden von den marktüblichen Klebstoffen in der Regel nicht vollständig erreicht, so dass ein nicht erfülltes Kriterium auf seine Auswirkung im Einzelfall geprüft werden sollte und eine geeignete zusätzliche Maßnahme zur Erfüllung der generellen Anforderungen gewählt werden kann.

Tabelle 2

Anforderungen an Klebstoffe für die Bonded Blank Technik	
Fertigungsprozess (Platine)	Beschichtung nur Verstärkungsblech Beschichtung der Verstärkungsblech- kanten Materialverträglichkeit zu Ölen und Trockenschmierstoffen
Umformprozess	Ausreichende Haftung Keine Verunreinigung des Werkzeugs Verträglichkeit zu Ölen, Fetten, Verschmutzungen
Fertigungsprozess (KTL)	Aushärtung im KTL-Trockner $T \leq 200 \text{ °C}$ Rückfederwiderstand Keine Kontamination der Lackierbäder Lackierfähigkeit des Klebstoffs oder des Nahtübergangs
Gebrauchstauglichkeit	Statische Festigkeit Schwingfestigkeit Energieaufnahme im Crashfall Temperaturbeständigkeit Beständigkeit zu Tausalzen
Umweltverträglichkeit / Recyclingfähigkeit nach Erreichen der Lebensdauer	Keine giftigen Reaktionsprodukte beim thermischen Recyceln der metallischen Werkstoffe

So kann beispielsweise eine partielle Entfettung der zu klebenden Oberflächen eine verminderte Ölverträglichkeit des ausgewählten Klebstoffs in seiner adhäsiven Anbindung erheblich unterstützen, oder in Bereichen mit einer hohen Rückfederneigung der Bauteile kann eine mechanische Fügetechnologie (z. B. Clinchen) die Klebfuge deutlich entlasten.

In Untersuchungen zur Patchwork-Technik mit der Fügetechnik Kleben wurden in [Kle03, Neu06, Die03] verschiedene Klebstoffgruppen auf ihre Eignung für das Patchworkkleben untersucht. Bewährte viskose Rohbauklebstoffe wurden durch thermische Aktivierung über den sogenannten Gelpunkt teilvernetzt (Vorhärtung oder Teilhärtung), damit die Klebstoffe so hochviskos eingestellt werden, dass sie nicht mehr aus der Klebfuge beim Umformen ausgequetscht werden können, jedoch noch begrenzt formbar bleiben und eine gewisse Umformung durch Tiefziehen ermöglichen. Eine gut definierte Vorhärtung konnte jedoch bei keinem der untersuchten Klebstoffe prozesssicher erzielt werden. Ist die Vorhärtung zu weit

fortgeschritten, sind in der Regel nur noch geringe Umformgrade erzielbar. Weiterhin ist ein sehr enges Prozessfenster in der Temperaturführung einzuhalten, was in der Serienfertigung nur schwer umzusetzen ist. Die Folge ist ein vorzeitiges Versagen des teilvernetzten Klebstoffs.

Andere Wege mit einer mehrstufigen Klebtechnik geht die Bonded Blanks Technik, die entweder eine zweistufige Klebung mit Fixierkleben in einer ersten Stufe und einer weitergehenden Härtung des Polymers in einer zweiten Stufe mit reaktiven Schmelzklebstoffen oder nachvernetzbaaren Haftklebstoffen realisiert [Beh06, Beh06a, Wis08]. Eine Variante der Bonded Blanks Technik stellt der Weg über einen latent reaktiven Klebstofffilm dar, der zunächst nur einseitig auf der Verstärkungsblechseite im Bandbeschichtungsverfahren adhäsiv anbindet, zum Fügen der Doppellagen jedoch zunächst nur durch mechanische oder thermische Fügeverfahren vor der Umformung fixiert wird. Dieser Klebstofffilm zwischen den Blechen wird erst in einer nach der Umformung anstehenden Wärmebehandlung, wie der KTL-Ofenbehandlung, zum Einbrennen der Grundierung aktiviert [Lüh11]. In der Bonded Blanks Technik erlaubt die Klebschicht ein weitgehend freies Abgleiten der Bleche aufeinander, im Falle der mechanisch vorfixierten Doppellagen begrenzen die Fügepunkte die Umformung je nach Geometrie und Werkstoffkombination.


Im vorliegenden Projekt wurde die Linie der reaktiven Schmelzklebstoffe für das zweistufige Kleben von Bonded Blanks weiter verfolgt, deren prinzipielle Eignung im Vorhaben FAT/AVIF A 195 [FAT06] schon gezeigt wurde. Die Möglichkeit der Vorbeschichtbarkeit von Verstärkungsblechen, der schnellen Fixierklebung in einer einfachen Heizpresse nur durch den Parameter Temperatur gesteuert, dem ausreichend freien Abgleiten ohne große Verformungsbehinderung und Spannungsspitzenabbau, der guten Klebpolsterwirkung der festen Klebstoffschicht am Dickensprung zwischen Verstärkungs- und Grundblech mit Verringerung der Kerbwirkung während des Umformens sowie die völlige Vermeidung von Klebstoffaustritt aus der Fuge beim Tiefziehen machen das Verfahren attraktiv für die lokale Verstärkung. Dabei wurden neben einem Klebstoff aus [FAT06] auch zwei weitere moderne latent reaktive Schmelzklebstoffe auf Polyamid/Polyurethan-Basis ausgewählt, um diese Klebstoffe auf Eignung für den zweistufigen Klebprozess im Zusammenhang mit der Umformtechnik durch Tiefziehen unter den Randbedingungen der Automobilindustrie zu untersuchen.

In [FAT06] hat sich ein Co-Polyamid bei Umgebungsbedingungen (RT bei 20 °C–23°C) als tendenziell recht sprödhart erwiesen, was beim Tiefziehen teilweise zu unmittelbaren Ablösungen von Verstärkungsblechen geführt hatte. Wird der bei RT recht spröde Klebstoff auf Temperaturen deutlich unter dem Schmelztemperaturbereich erwärmt, erweicht er temperaturabhängig, jedoch nicht so

stark, dass er aus der Klebfuge gequetscht werden kann. Den großen Formänderungen des Bauteils, speziell bei der Erweiterung der Prozessgrenzen beim Tiefziehen, setzt der Klebstoff jedoch kaum noch Widerstand entgegen und wird genauso plastifiziert wie die Blechwerkstoffe.

Die Klebstoffauswahl wurde im Vorfeld des Vorhabens in der Antragsphase getroffen. Neben dem pulverförmigen reaktiven Schmelzklebstoff Evonik Vestamelt X1333 (Nachfolgebezeichnung des in [FAT06] untersuchten Vestamelt Z2333) wurden ein weiterer pulverförmiger reaktiver Hotmelt der Firma Nolax HCM 555 (Collano Group) auf Polyamid/Polyurethanbasis mit geringerem Schmelzpunktniveau und ein als latent reaktiver Folienklebstoff auf Polyurethanbasis mit IPDI¹-Härter zunächst als Lohmann TM 10850, später als artgleicher Duplocoll DC VP 20745 ausgewählt. Die nachfolgende *Tabelle 3* gibt eine Übersicht der im Vorhaben eingesetzten Klebstoffe.

Tabelle 3: Untersuchte Klebstoffe für Hydro Bonded Blanks

Unternehmen	Klebstoff	Chem. Basis	Lieferform	Temperaturen	
				Vor- beschichtung	Wärme- aktivierung
	HCM 555	reaktiver PU-Schmelzklebstoff	Pulver	(Kurz) 80 °C	120 – 160 °C
	Vestamelt X1333	reaktives Co-Polyamid, Schmelzklebstoff	Pulver	150 °C	> 165 °C
	Duplocoll VP-20745	reaktiver Schmelzklebstoff (IPDI)	Folie	(Kurz) 90 °C	100 – 160 °C

Der Einsatz von Feststoffpulver zur dünnen Beschichtung von Verstärkungsblechen ist aus der Pulverlackindustrie bekannt und stellt dort ein qualitativ äußerst hochwertiges Beschichtungsverfahren dar. In einfach aufgebauten Pulversprühanlagen mit leistungsfähigen Absauganlagen können entweder manuell oder auch vollautomatisch gleichmäßig dicke Schichten auf komplexe Bauteilgeometrien aufgetragen werden [Kle03, Pie10]. *Abbildung 30* zeigt das Pulversprühverfahren mit Applikationskammer aus der Pulverlack-Beschichtungstechnik mit elektrostatischer Unterstützung zur Erzielung einer möglichst dichten Pulverbeschichtung sowie ein Verstärkungsblech der ersten großen Umformserie mit angeschmolzener Hotmeltschicht und zuverlässiger Beschichtung der Kanten sowie in den Schlitzten (rechts).

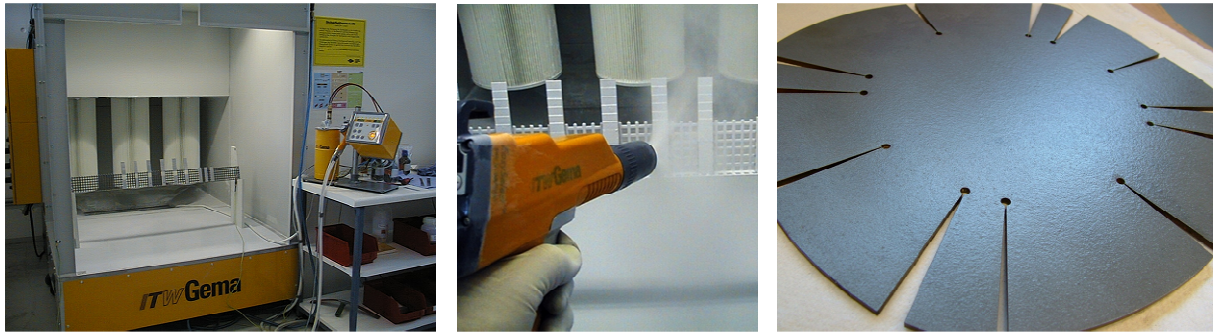


Abbildung 30: Pulversprühverfahren mit Applikationskammer

Charakteristisch ist die Vorbeschichtung ausschließlich der Verstärkungsbleche, da sie die einfach begrenzte Geometrie mitbringen (im Gegensatz zum Grundblech) und speziell die Kanten zuverlässig mit Klebstoff benetzt werden sollten, damit sie nach dem Fügen in einer etwa 0,2 mm bis 0,4 mm dicken Klebschicht eingebettet werden können. Die elektrostatisch aufgebrauchte Pulverklebstoffschicht muss direkt im Anschluss in einer thermischen Anlage (Ofen, IR-Strahler oder Induktionserwärmung der Bleche) aufgeschmolzen werden, damit sie sich nicht mehr vom Blech lösen kann. Die pulverbeschichteten Verstärkungsbleche sind bei Umgebungsbedingungen klebfrei (tackfrei) und im Falle der hier verwendeten Polymertypen auch sehr lange latent reaktiv (mindestens 6 Monate). Diese Eigenschaft ist durch die Wahl der thermisch blockierten reaktiven Komponenten begründet, wo hingegen feuchtigkeitsvernetzende reaktive Hotmelts durch Eindiffundieren von Wasser auch bei relativ trockener Lagerung bei Umgebungsbedingungen aushärten.

Die Hotmelt-Folienvariante auf Polyamid/Polyurethan-Basis als Rollenware erlaubt sehr einfache Applikationsstrategien, da eine vollflächige Beschichtung durch einen Verstärkungsblech-konturnahen Zuschnitt oder großtechnisch durch passend besäumte Stanzware der Klebfolie zu realisieren ist. Obwohl weitgehend klebfrei bei RT, werden die latent reaktiven Klebfolien während der Herstellung mit einer Trennschicht aus silikonisiertem Papier oder einer Kunststoffolie von der nächsten Schicht Klebstoff getrennt, damit die Rekristallisierung des Filmes während der Lagerzeit abgeschlossen werden kann. Für die Applikation ist die Entfernung der Trennschicht zu berücksichtigen, speziell für stark automatisierte Prozesse ist dies zuverlässig zu realisieren, stellt aber eine verfügbare Technologie dar. Die Folienschichtdicken des latent reaktiven Polyurethan-Klebstoffs sind aus technischen Gründen (verfügbare Trocknungsstrecken beim Hersteller) auf ca. 100 µm beschränkt, die empfohlene Klebschichtdicke für die Doppellagentechnik als Bonded

¹ Isophorondiisocyanat (IPDI)

Blanks liegt nach [FAT06] jedoch zwischen 200 und 500 μm . Das Material hat jedoch einen ausgesprochenen Hotmelt-Charakter, so dass eine mehrfach laminierte Schicht bei Vermeidung von Lufteinschlüssen eine technisch einfache Lösung der Schichtdickenanforderung darstellen kann. Die Mehrlagenfolie wird im Fixierklebschritt durchwärmt und an den Oberflächen klebrig. Durch den Fügeschritt in der beheizten Presse wird eine ausreichend feste Fixierklebung erzielt, ohne dass die Reaktion angestoßen wird. Daher ist mit an den Klebstoff angepassten begrenzten Temperaturen und möglichst kurzen Pressenzeiten zu arbeiten, die sich an der ersten Durchwärmung des Mehrschichtverbundes aus Grund- und Verstärkungsblech sowie mehreren dazwischen liegenden Klebefolien orientieren und dann sofort abgebrochen werden sollten, um den Reaktionsstart zu vermeiden.

Die Beschichtung der Verstärkungsblechkanten mit Klebstoff trägt zur Verringerung der Kerbwirkung in dieser kritischen Zone am Dickensprung der lokalen Verstärkung bei. Der Klebstoff wirkt wie ein Polster und kann (falls vorhanden) selbst scharfe Grate in die Polymerschicht einbetten, die durch bestimmte Zuschnittstechniken (Abtafeln, Scherschneiden, Erodieren, Laser- oder Wasserstrahlschneiden) oder fehlerhafte Ausführung von eigentlich unkritischen Zuschnittstechniken entstehen können, siehe Abbildung 31.

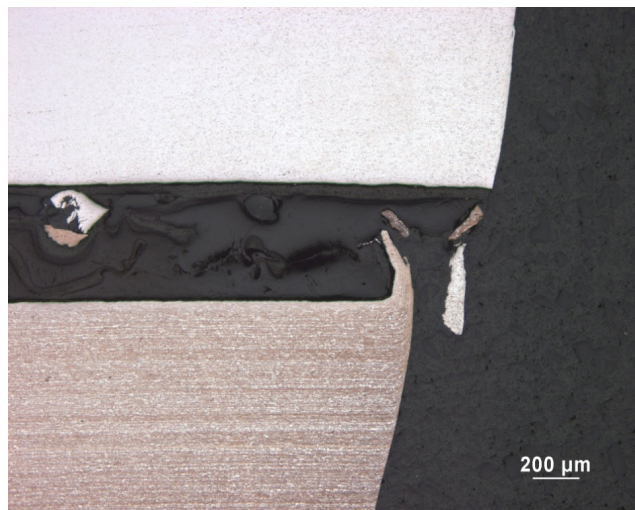


Abbildung 31: Beispiel für die Einbettung von scharfen Graten an Verstärkungsblechkanten in die Klebschichten bei Bonded Blanks (Schliff)

Dabei wird die zuverlässige Klebstoffbeschichtung der Verstärkungsblechkante durch den Fertigungsprozess beim Pulversprühen ohne weitere Maßnahmen durch den Pulverumgriff auch auf nicht direkt senkrecht besprühte Flächen realisiert. Es ist jedoch darauf zu achten, dass sich die trocken applizierte Beschichtung bis zum Anschmelzen oder Ansintern nicht durch Vibrationen oder schlagartige

Beanspruchungen von der Blechkante ablösen kann.

Eine weitere einfache Methode zur Einbettung der Verstärkungsblechkante in eine Folienklebstoffschicht stellt das angepasste Besäumen der Klebstoffolie durch Zuschnitt oder Stanzen dar. Eine um wenige Millimeter größere Klebfolie wird zwischen Grund- und Verstärkungsblech eingelegt (siehe Abbildung 32), und anschließend erfolgt das Fixierkleben durch Erwärmen und mechanisches Pressen.

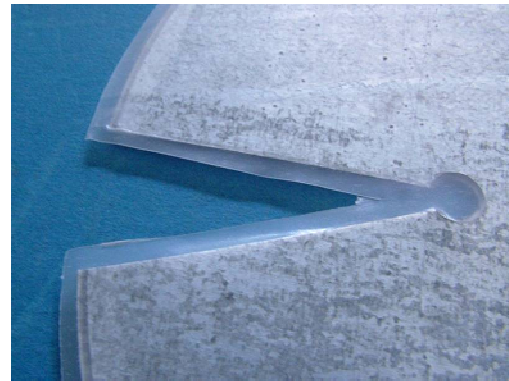


Abbildung 32: Methoden zur einfachen Beschichtung der Verstärkungsblechkanten mit Klebstoff zur Einbettung der Kante in die Klebschicht während des Tiefziehvorgangs, links angeschmolzener Pulverklebstoff, rechts an den VB-Kanten um wenige Millimeter überstehende Folien

Beim Fixierkleben ist die zeitliche Temperaturführung und der mechanische Presszustand zur definierten Klebung mit der erforderlichen Klebschichtdicke zu beachten. In *Abbildung 33* ist eine einfache experimentelle Distanzeinstellung über fein abgestuft einstellbare (auf $\pm 0,05$ mm genaue) Distanzstücke dargestellt, mit der im heißen Zustand die erforderliche Klebschichtdicke reproduzierbar eingestellt wird. Die Höhe der Distanzstücke wird nach einer stichpunktartig durchgeführten Klebschichtdickenmessung ausgewählt, deren Maß aus der Gesamtdicke von Verstärkungsblech und Klebschicht besteht abzüglich eines von der Ebenheit und der Größe des Verstärkungsbereiches abhängenden Maßes zwischen $100 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$. Um dieses Maß wird die erwärmte Klebschicht verquetscht. Die Ebenheit des Verstärkungsbleches und auch die möglicherweise ungleichmäßig dicke Klebstoffbeschichtung muss in die Vorversuche zur Fixierklebung eingehen, ansonsten wird entweder keine ausreichende Anbindung des Verstärkungsbleches an das Grundblech erzielt (Distanzstücke zu hoch), oder es tritt unzulässig viel Klebstoff speziell in den Schlitzen des Verstärkungsbleches aus und verursacht möglicherweise Abzeichnungsprobleme (Distanzstücke zu niedrig). Durch den

Wärmeeintrag durch die Bleche wird die Klebschicht aufgeschmolzen, das Verstärkungsblech baut einen hydrostatischen Druck in der zähflüssigen Schmelze auf und das Volumen wird geringfügig flacher deformiert. Ein geringfügiger Klebstoffaustritt am Rande des Verstärkungsbleches ist einerseits als optische Kontrolle erwünscht, andererseits ist die VB-Kante zuverlässig in der Klebschicht eingebettet.

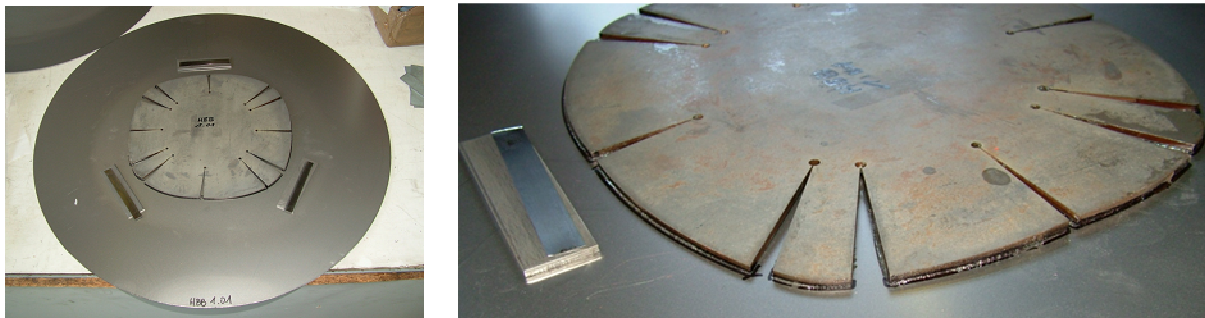


Abbildung 33: *Feinstufige Einstellung der Klebschichtdicke beim Fixierkleben durch vorbeschichtete Klebschicht auf dem Verstärkungsblech und Distanzstücke als Abstandshalter (Maße ermitteln durch Vorversuche und Beurteilung von geometrischen Abweichungen vom eben Zustand)*

Der erforderliche Temperaturbereich zum Fixierkleben kann den technischen Datenblättern für das rein thermoplastische Schmelzkleben entnommen werden und ist in *Tabelle 3* aufgeführt.

Die Methoden der thermischen Analyse liefern Anhaltspunkte, bei welchen Temperaturen ein sinnvolles erwärmtes Umformen der Bonded Blanks erfolgen könnte, wenn die Werkstoffeigenschaften des Klebstoffs im Raumtemperaturbereich zu spröde für ein gutes Umformverhalten sein sollte. Speziell die Methode der Dynamisch-Mechanischen Analyse (DMA) liefert Informationen über das temperaturabhängige elastisch- und viskoplastische Verhalten der Klebstoffe und die dynamische Differenz-Kalorimetrie (DDK oder englisch: DSC²) liefert weitere Informationen über Schmelzwärmen und auch reaktive Vorgänge, die typischerweise als exotherme Vorgänge ablaufen.

In *Abbildung 34* sind die DSC-Verläufe der drei im Projekt verwendeten Klebstoffe dargestellt. Dabei sind die ausgeprägten Schmelzpeaks auf generell zwei

² DSC - Differential Scanning Calorimetry entspricht der dynamischen Differenzkalorimetrie (DDK)

verschiedenen Temperatur-Niveaus erkennbar. Die Polyamid/Polyurethan-Varianten Nolax HCM555 (Pulver) und Lohmann Folie TM 10850 (analog Lohmann DC VP 20745) schmelzen schon bei Temperaturen knapp über dem Raumtemperaturbereich zwischen 45 °C und 65 °C, während die Co-Polyamid Pulverklebstoff-Variante Evonik Vestamelt X1333 auf einem deutlich über RT liegenden Niveau (> 70 °C) erweicht und über 125 °C schmilzt.

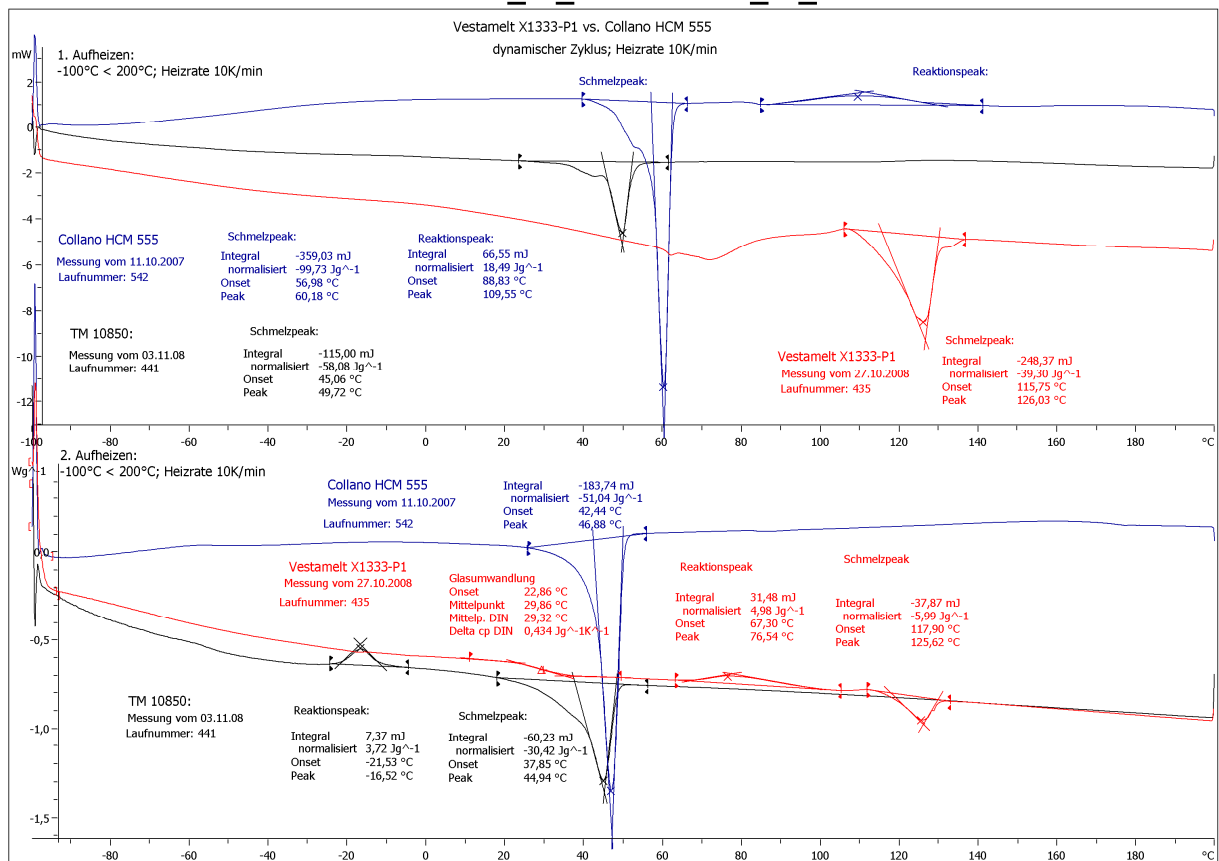


Abbildung 34: Verläufe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) der drei im Vorhaben untersuchten Klebstoffe

Zur Analyse werden Klebstoffproben in einem Tiegel kontinuierlich mit konstanten Heizraten von zunächst sehr tiefen Temperaturen (gekühlt durch flüssigen Stickstoff) aufgeheizt und die Temperaturdifferenz zu einem parallel geheiztem leeren Tiegel gemessen (Differenzkalorimetrie), anschließend werden die signifikanten Ausschläge im Verlauf (Peaks) mathematisch ausgewertet.

Zur Detektion des thermoelastischen und thermoviskoplastischen Verhaltens der Klebstoffe dient die Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA), bei der eine Reinstoffprobe zwischen beheizbaren Platten mechanisch beansprucht (tordiert oder gebogen) wird, während ein Aufheizprozess (typisch 3 K/min) durchgeführt wird. Es

lassen sich die elastischen und viskosen Moduln bestimmen und die Verläufe können zur Bestimmung des charakteristischen Glasübergangstemperaturbereichs genutzt werden, der bei den untersuchten thermoplastischen Basispolymeren den Übergang zwischen dem teilkristallinen Tieftemperaturverhalten und dem erweichten amorphen Zustand darstellt (Beispielverläufe Vestamelt X1333 in *Abbildung 35*). Aus den Verläufen wird der Bereich für ein erwärmtes Umformen für den bei Raumtemperatur sehr sprödharten Klebstoffs abgeschätzt. Zu höheren Temperaturen abgegrenzt durch den Schmelzbereich konnte eine untere Grenze von 70 °C gefunden werden, ab der man die Erweichungswirkung auch in Klebexperimenten untersuchen sollte.

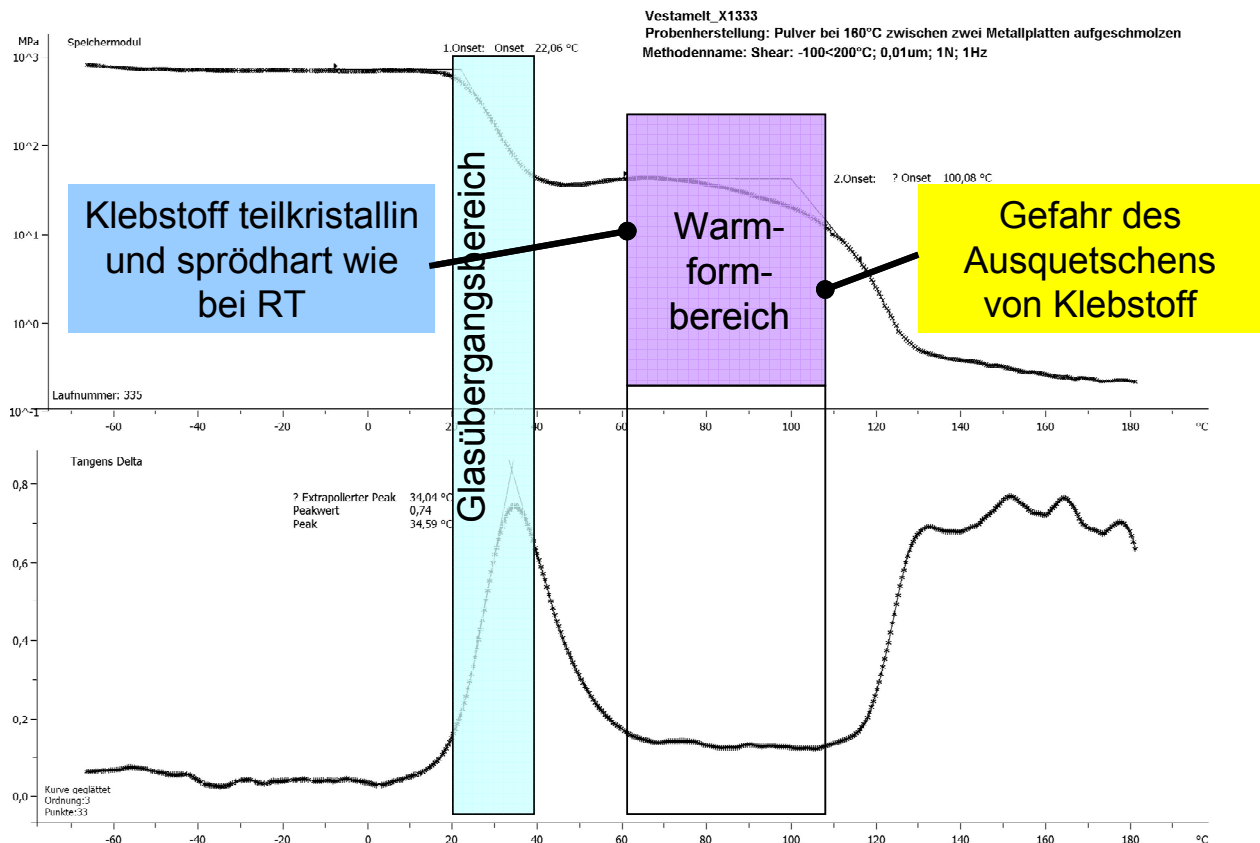


Abbildung 35: *Dynamisch Mechanische Analyse (DMA) am Co-Polyamid Klebstoff Vestamelt X1333 zur Eingrenzung des möglichen Warmumform-Temperaturbereiches*

Analog kann auch für die beiden Polyurethan-Varianten ein jedoch sehr viel schmalere Temperaturbereich gefunden werden (siehe *Abbildung 36*), der im experimentellen Maßstab zunächst an Kleinproben in der Temperierkammer und anschließend in Experimenten zum erwärmten Umformen von Tiefziehnäpfen weiter

untersucht werden soll. Ziel ist eine gute Plastifizierung der Klebschicht im Umformvorgang ohne die Gefahr eines Ausquetschens aus der Klebfuge.

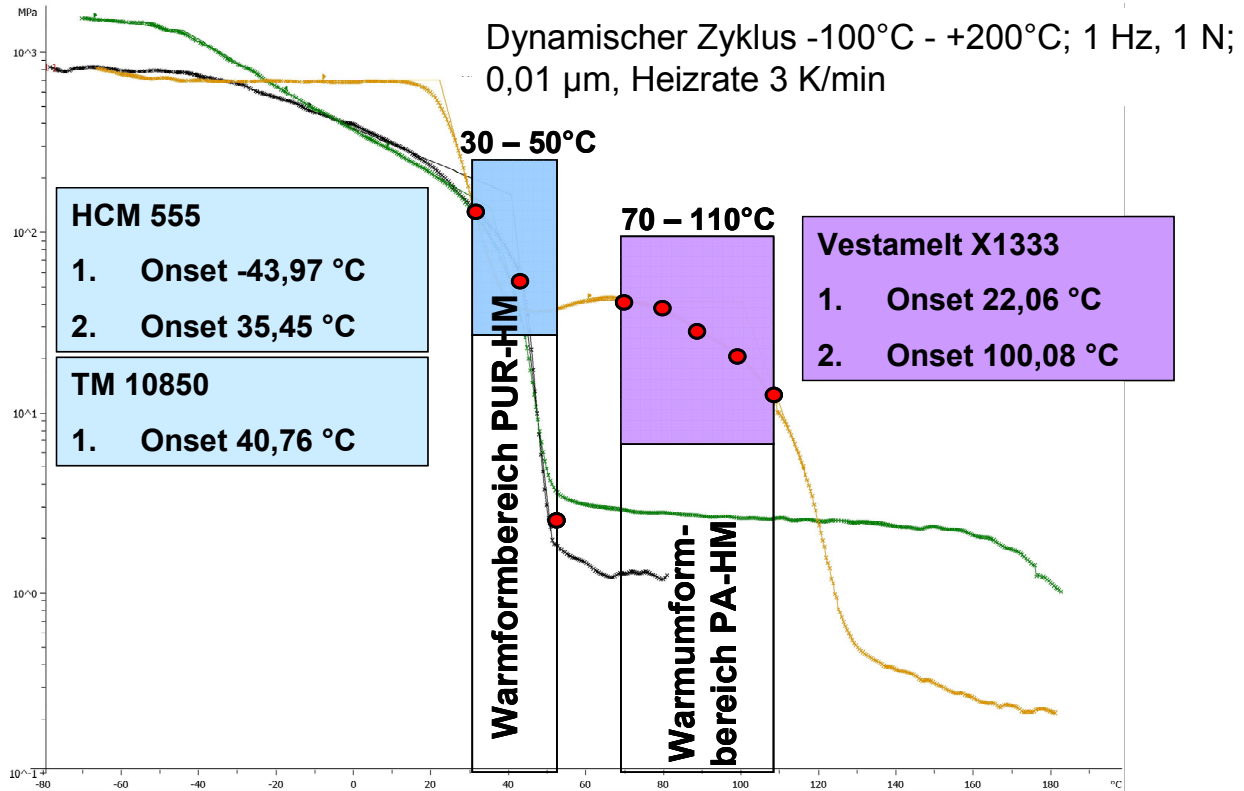


Abbildung 36: *Dynamisch Mechanische Analyse (DMA) an allen drei Klebstoffen zur Eingrenzung des Warmumform-Temperaturbereiches, die Polyurethanklebstoffe zeigen nur ein schmales Temperaturband bei deutlich niedrigeren Temperaturen*

Die beiden Erwärmungsschritte zur thermischen Fixierung der Beschichtung auf dem Verstärkungsblech und die Fixierklebung in der Heizpresse sind Prozesse vor dem Umformvorgang, ein erwärmtes Umformen würde einen weiteren thermischen Schritt darstellen, der sich ggf. prozesseffizient im Anschluss an den Fixierklebeschritt realisieren lässt, wenn die Restwärme in der Doppellagenplatte zum schnellstmöglichen Umformen genutzt wird. In Abbildung 37 sind die verschiedenen Temperaturprofile für die beiden Klebstoffklassen dargestellt, das Profil für das Co-Polyamid liegt generell bei höheren Maximaltemperaturen. Nach dem Umformen erfolgt die endgültige Härtung oder höhere Vernetzung durch einen weiteren Erwärmungsschritt, der prozesseffizient in der Ofenerwärmung nach der KTL-Beschichtung zum Einbrennen des Lacks erfolgen kann.

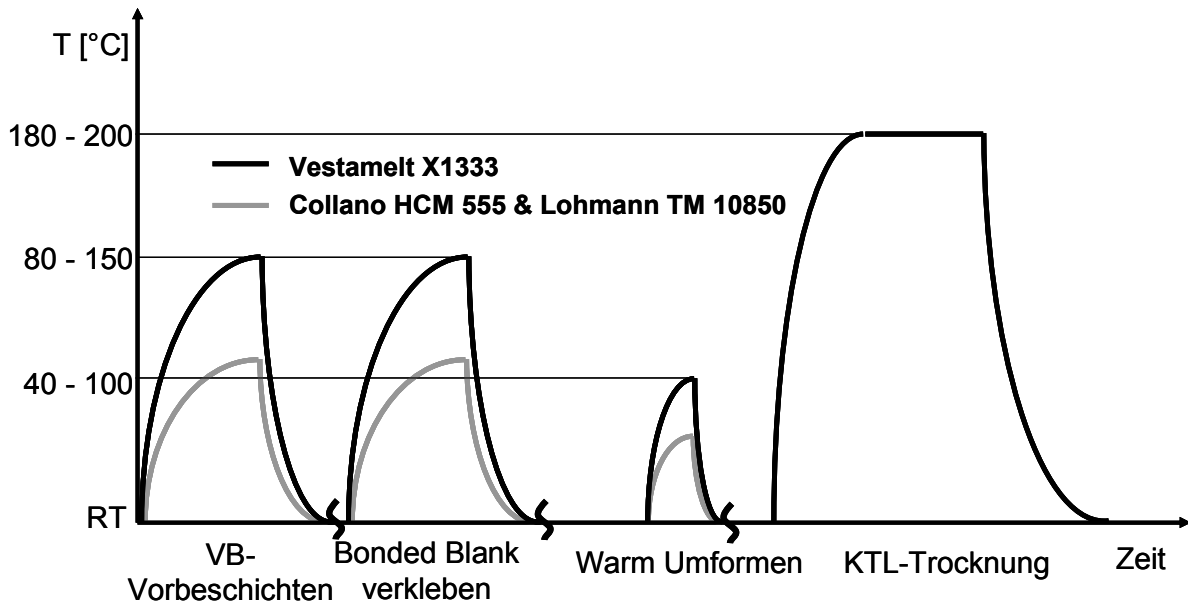


Abbildung 37: Temperaturprofil der Beschichtungs- und Klebtechnik mit Lackbeschichtung (Kathodische Tauchlackierung - KTL)

Zur Charakterisierung des Klebschichtverhaltens an Kleinproben wurden nach Verfügbarkeit der Materialien einschnittig überlappte Zugscherproben aus den Blechwerkstoffen und den Projektklebstoffen geklebt und in Anlehnung an DIN EN 1465 quasistatisch geprüft. Dabei wurde auch der mehrstufige Klebprozess abgebildet, siehe *Abbildung 38*.

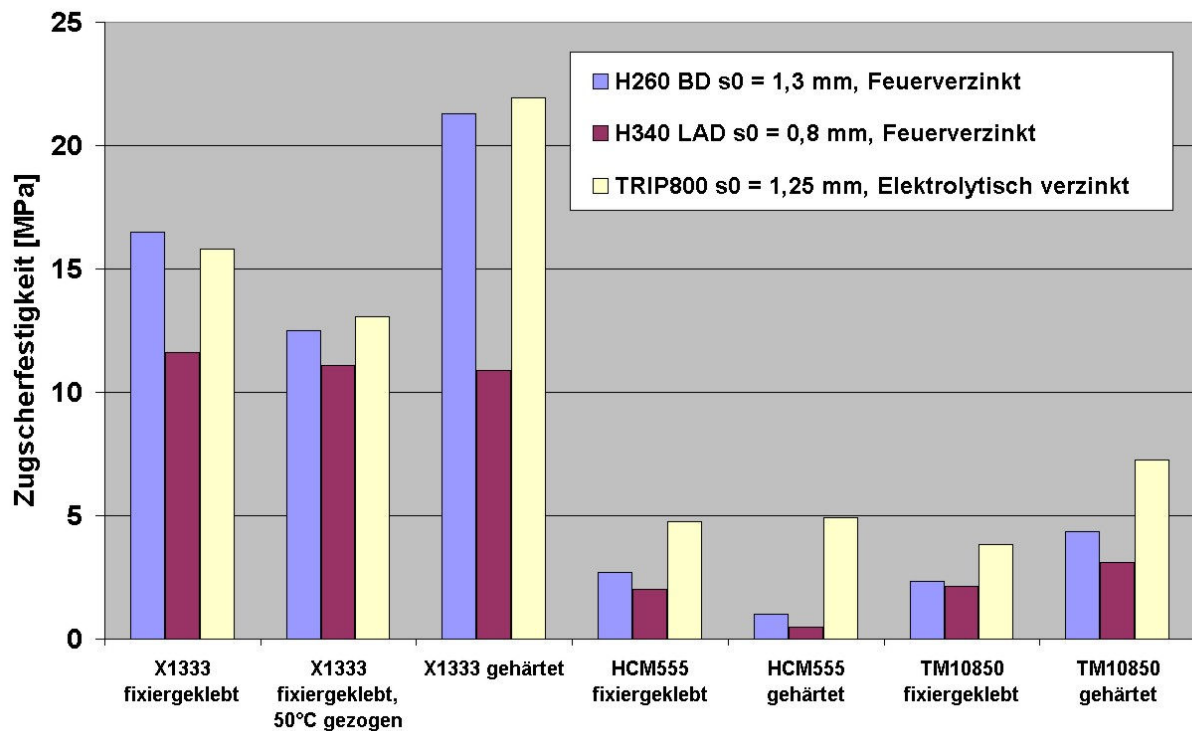


Abbildung 38: Maximale Klebfestigkeit von Zugscherproben aus Kombinationen von Stahlblechen und Klebstoffen unter verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen

Neben den bei Raumtemperatur gezogenen Proben wurden auch Zugscherprüfungen unter erhöhten Temperaturen in einer Temperierkammer durchgeführt, die in die Zugprüfmaschine eingebaut werden kann (Abbildung 39). In abgestuften Temperaturreihen wurde eine Matrix aus Blechwerkstoffen und Klebstoffen im Projekt geprüft. Die Temperaturstufen wurden aus den Bereichen generiert, die in der thermischen Analyse anhand der DMA-Verläufe als aussichtsreich für die Warmumformung der verschiedenen Klebstofftypen angesehen wurden, siehe Abbildung 36.

Im Nachfolgenden werden Ergebnisse der Prüfungen dargestellt. Der relativ hohe Temperaturbereich für das reaktive Co-Polyamid von etwa 70 °C bis 110 °C wurde in 10-K Schritten untersucht, ebenso der schmale Temperaturbereich für die Polyurethane im Bereich von 30 °C, 40 °C und 50 °C im Vergleich zur Raumtemperaturprüfung.

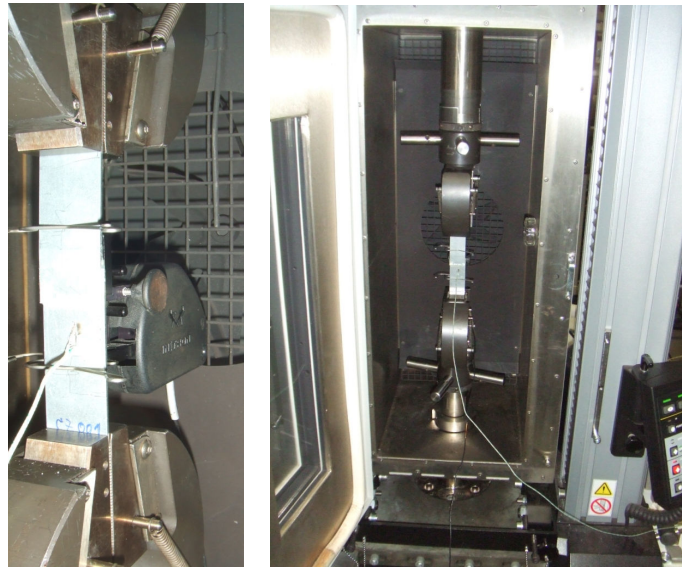


Abbildung 39: Prüfung von Zugscherproben (instrumentiert mit Thermoelement nahe Klebschicht und Dehnungsaufnehmer) in einer beheizbaren Temperierkammer, die in den Arbeitsbereich der Zugprüfmaschine eingebaut wird

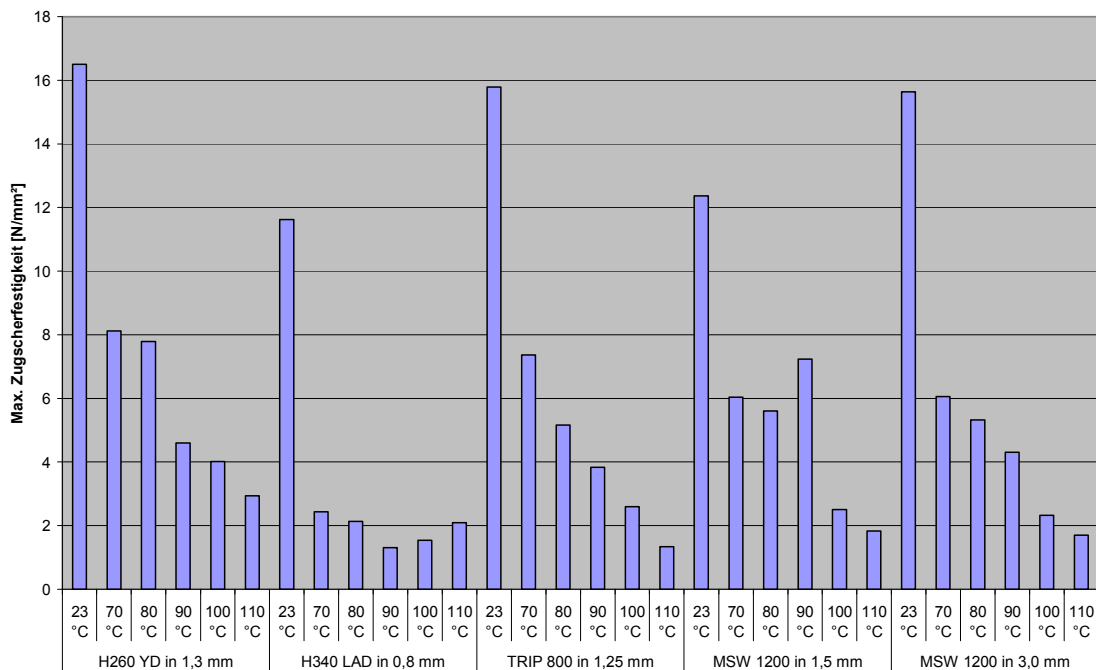


Abbildung 40: Prüfung von Zugscherproben geklebt mit Pulverklebstoff Evonik Vestamelt X1333, der charakteristische Erweichungsbereich liegt um die 90 °C

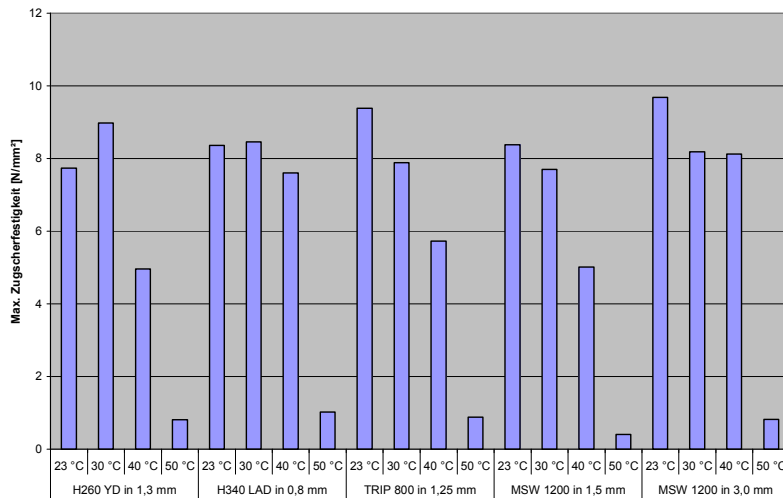


Abbildung 41: Prüfung von Zugscherproben geklebt mit Pulverklebstoff Nolax HCM555, der charakteristische Erweichungsbereich liegt um die 45 °C

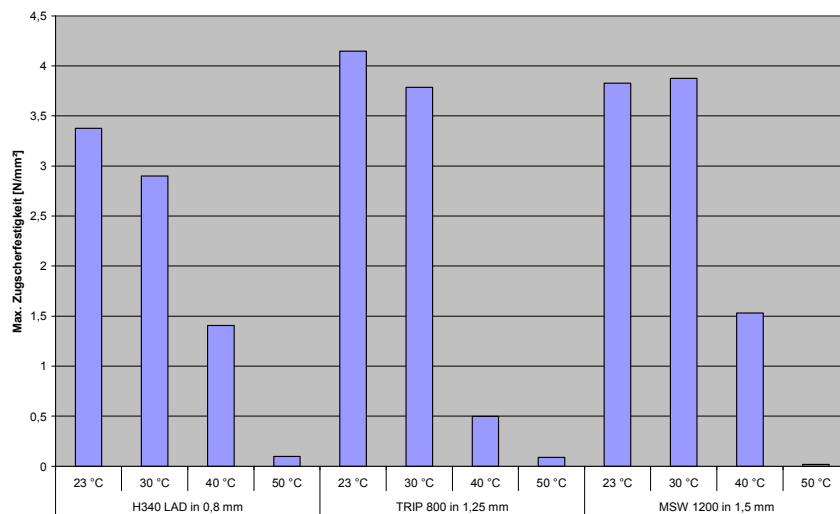


Abbildung 42: Prüfung von Zugscherproben geklebt mit Folienklebstoff Lohmann TM 10850 (analog DC VP 20745), der charakteristische Erweichungsbereich liegt um die 45 °C

6.2 Ermittlung der Prozessgrenzen

6.2.1 Bauteilziehtiefen

Alle untersuchten Kombinationen konnten mit den im Versuch ermittelten Einstellungsparametern zu einer Bauteiltiefe von 140 mm tiefgezogen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Blechwerkstoffe sowie unterschiedlicher verarbeiteter Blechdicken erfordert dies für jede Kombination die Anpassung der (in Gruppen gesteuerten) Plungerzylinderdrücke sowie der Wasserkastendrücke entsprechend *Abschnitt 6.1.1*.

6.2.2 Bauteilversagensarten

Reißer

Der Bauteilfehler Reißer ist in zwei unterschiedlichen Ausprägungen aufgetreten:

- Reißer im Bauteilboden an der Verstärkungsblechkante sowie
- Reißer im Bereich der Bauteilzarge.

Das Auftreten von Reißern an der Auslaufkante des Verstärkungsblechs spricht stark für eine durch Kerbwirkung induzierte Versagensproblematik. Dieses Versagen ist teilweise auch bei sehr geringen Ziehtiefen aufgetreten, so dass ein in diesem Bauteilbereich üblicherweise als Bodenreißer angenommenes Versagen mit den entsprechenden Ursachen allein nicht für diese Problematik verantwortlich sein kann. Die Vermutung der Kerbinduzierung wird durch das Auftreten des Risses und seinen Verlauf entlang der Verstärkungsblechkante weiter bestärkt. In *Abbildung 43* ist die Ausprägung eines solchen Versagens durch Reißen entlang der Verstärkungsblechkante dargestellt.

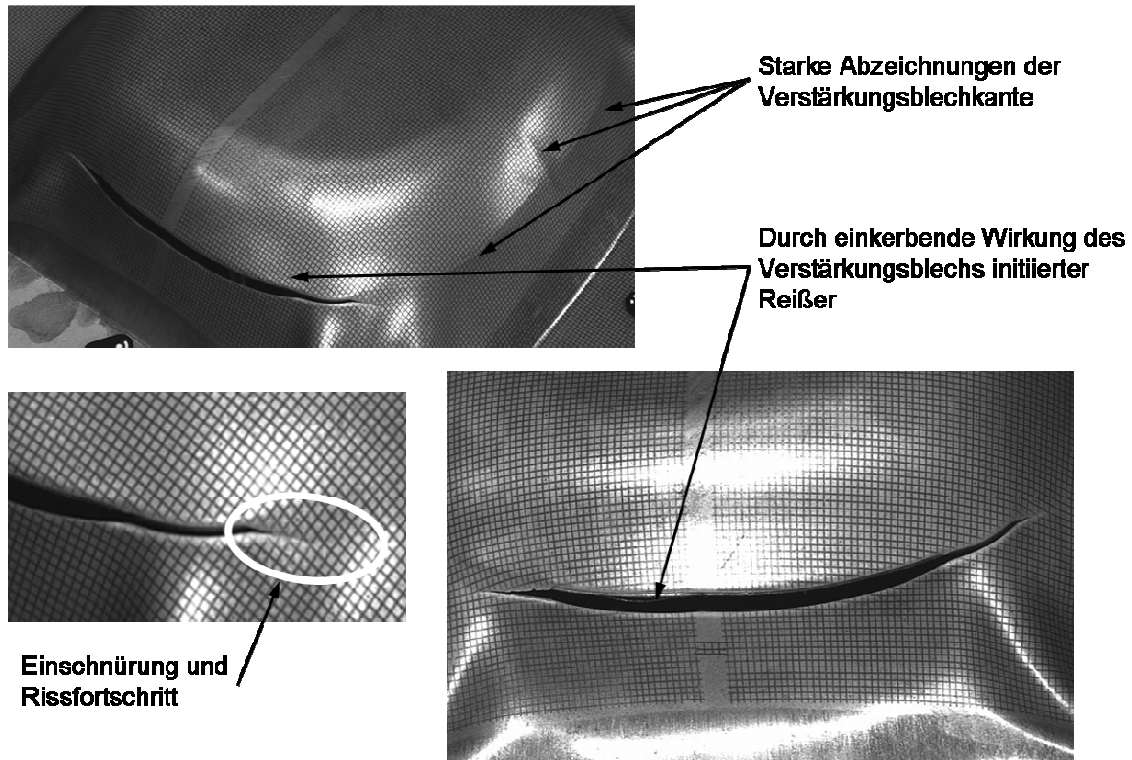


Abbildung 43: *Reißen durch Kerbwirkung des Verstärkungsblechs*

Bei dieser Kombination von H340 mit einer Grundblechdicke von $s_{0,GB} = 1,5 \text{ mm}$ und MSW1200 mit einer Verstärkungsblechdicke von $s_{0,GB} = 1,5 \text{ mm}$ (Bauteil HBB 2.41) sind neben dem Reißen auch noch die Einschnürung des Grundblechwerkstoffs im vorderen Bereich des Risses (Risswachstum) und ein deutliches Abzeichnen der Verstärkungsblechkante im noch intakten Bereich des Grundblechs zu sehen. Der Effekt, den das hydromechanische Tiefziehen in diesem Fall leisten soll, indem durch den allseitig wirkenden Mediumdruck das Grundblech mitsamt dem Verstärkungsblech an der Stempelkuppe anliegend umgeformt wird, wirkt sich gegenteilig aus: Bei dieser extremen Kombination kommt es durch den großen Widerstand des hochfesten Verstärkungsblechwerkstoffs zur Ausbildung eines „Hohlraums“ zwischen Stempelkuppe und Blechverbund im Bereich nahe der Verstärkungsblechkante. Der Werkmediumsdruck führt nun zu einem Anpressen des Grundblechs in Querrichtung zu dieser Kante, was ein (vermutlich scherendes) Versagen des Grundblechwerkstoffs zur Folge hat. Die Variation des Wasserkastendrucks hat bei dieser Kombination im Gegensatz zu anderen Kombinationen, bei denen ähnliche Reißen beobachtet wurden, nicht zu einem Verschieben dieser Prozessgrenze hin zu größeren erreichbaren Ziehtiefen geführt.

Bei der Verwendung von MSW 1200 als Verstärkungsblechwerkstoff mit einer Blechdicke von $s_{0,GB} = 3,0 \text{ mm}$ kommt es teilweise zu Schädigungen durch Reißen,

die zu 75 % um den Kuppenbereich des Bauteils umlaufen. Das o. g. Rissausbildungsszenario ist hierbei also nicht durch schlagartiges Abfallen der Umformkraft aufgrund des Versagens abgeschlossen. Die Kerbwirkung ist in den drei betreffenden Bereichen so stark ausgeprägt, dass alle drei Seiten einen durchgehenden Riss aufweisen. Diese Form des Reißers kam bei keiner der anderen Kombinationen vor. *Abbildung 44* zeigt diese Art des Reißers an der extremen Kombination H340 LAD 1,5 mm (GB) und MSW1200 3,0 mm (VB), allerdings noch in der Variante des ersten Zuschnitts (vgl. *Abschnitt 6.2.3*).

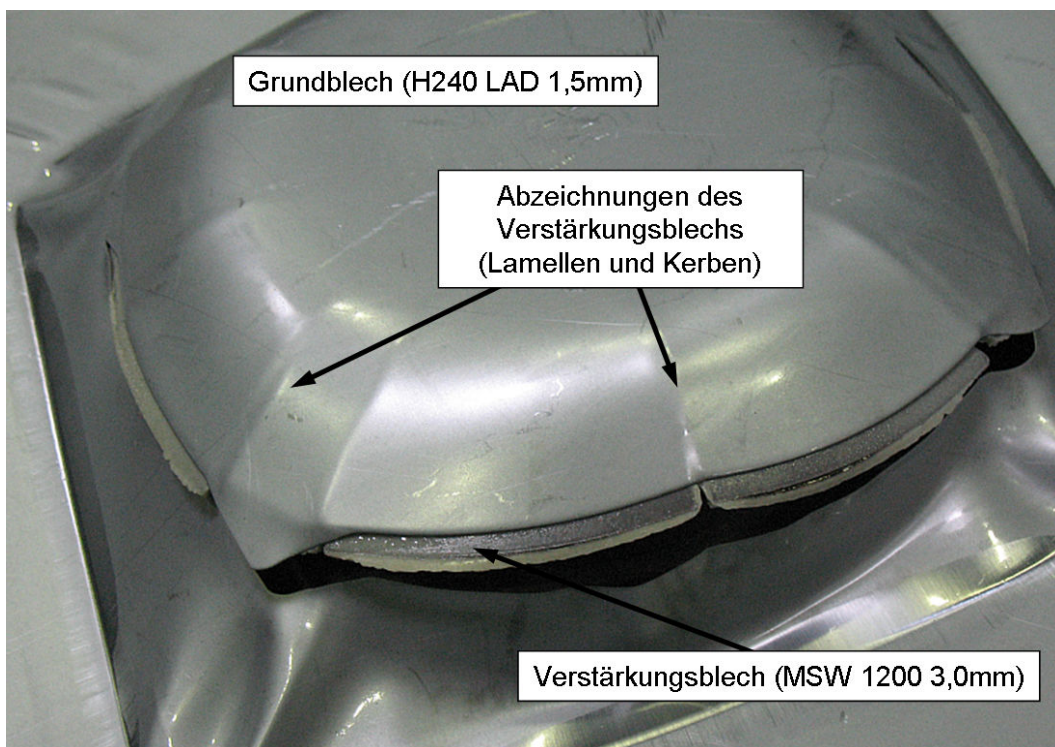


Abbildung 44: Zu 75 % umlaufender Reißer

Reißer im Bereich der Bauteilzarge sind meist als Folge einer (lokal oder global) zu hoch eingestellten Niederhalterkraft aufgetreten. Diese Kräfte führen zu schlechterem Nachfließverhalten aus dem Bauteilflansch sowie einer verstärkten Blechausdünnung im Bereich der Bauteilzarge. Verringert sich auf diese Weise der kraftübertragende Werkstoffquerschnitt, der die durch den Stempel eingeleitete Umformkraft zu Teilen durch die Zarge in den Flanschbereich überträgt, so kommt es irgendwann zur Unterschreitung des minimal erforderlichen Querschnitts, und das Bauteil reißt. Der Wasserkastendruck baut sich in diesem Zuge schlagartig durch die Mediumtension aufgrund der plötzlichen Undichtigkeit des Systems ab. Eine

Darstellung der Formänderungsvorgänge für diesen Bereich der Zarge mit Hilfe eines optischen Formänderungsanalysesystems ist nicht gelungen, da ein aufgetragenes Raster im Rahmen der Relativbewegung über den Kantenradius des Wasserkastens hinweg nicht in einem Maße unbeschadet aus der Umformung hervorzubringen war, das eine aussagekräftige Analyse möglich gewesen wäre.

Für die unterschiedlichen Materialien und Blechdicken wurden iterativ die optimalen Prozessparameter im Sinne des einzustellenden Wasserkastendrucks und der Druckeinstellung der Plungerzylindergruppen ermittelt. Die auf diese Weise gefundenen Werte konnten dann beim Wechsel auf eine andere Werkstoff/Blechdicken-Kombination eingestellt werden, so dass ohne einen erneuten Einarbeitungsprozess Gutteile unter reproduzierbaren Bedingungen hergestellt werden konnten. Die im Zargenbereich aufgetretenen Reiße sind in der Regel während der Einarbeitungsphasen entstanden, im späteren Betrieb zur Herstellung der weiter zu untersuchenden Bauteile sind vornehmlich Reiße im Bereich des Bauteilbodens aufgetreten.

Falten 2. Art in der Bauteilzarge

Falten 2. Art stellen sich bei Tiefziehprozessen in Bereichen freier Umformzonen ein. Diese Bereiche treten überall dort auf, wo der Bauteilwerkstoff keinen Kontakt zu den Werkzeugaktivflächen hat, also z. B. im Bereich vom Auslauf der Ziehringrundung bis zur Stempelkuppe. Diese Art der Faltenart tritt aufgrund der Werkzeuggestaltung (vgl. *Abschnitt 5.2.1*) beim Umformprozess zur Herstellung der stilisierten Federbeindomgeometrie in den Eckbereichen am Übergang zwischen Flansch und Zarge in geringem Maß unweigerlich auf. Hier wird ein relativ eckig ausgeführter Bereich (Ziehkante an der Wasserkastenöffnung) in einen kreisrunden Bereich in der Kuppe des Stempels überführt. Die o. g. freien Umformzonen sind eine Begleiterscheinung dieser Geometrieüberführung, so dass es in den Bauteilecken zu dieser Art der Faltenbildung kommt. Verstärkt wird diese Art der Faltenbildung zusätzlich durch den Wirkmediendruck, der das Bauteil von allen Seiten mit überlagert. Da sich im Bereich der Falten Hohlräume zwischen Stempel und Bauteil bilden und der Druck senkrecht auf der Bauteiloberfläche wirkt, also auch auf den sich ausbildenden Falten, kommt es ab Erreichen einer bestimmten Faltungstiefe nicht mehr zu einer Kompensation dieser Fehlerart, sondern zu einer Verstärkung.

Um einen einstufigen Umformprozess realisieren zu können, musste diese Art der Bauteilfehler in der beschriebenen Ausprägung in Kauf genommen werden. Die Geometrieangepassung war erforderlich, um lokal verstärkte Doppellagenbleche erfolgreich hydromechanisch umformen zu können. Die Falten bilden sich bei allen hergestellten Kombinationen in gleicher Anzahl und an den gleichen Stellen aus,

betreffen den lokal verstärkten Bauteilbereich sowie einen weiten Bereich vor dieser Zone jedoch nicht. An keinem Bauteil hat sich die Faltenbildung bis zur Verstärkungsblechkante ausgebildet, so dass für die Klebung keine Gefahr einer lokalen Schälwirkung von einem sich ausbeulenden Grundblech bestand. Die Analyse der Klebverbunde wird also durch diesen Bauteilfehler nicht eingeschränkt. Der Prozessablauf unter Verwendung von individuell für jeden Plungerzylinder angepassten Druckverläufen hat diese Fehlerart zwar leicht reduzieren können, bzw. die Prozessgrenze des Fehlerauftretens wurde nach hinten verschoben, diese minimale Verbesserung hat den enorm erhöhten Aufwand zur genauen Ermittlung der lokal benötigten Druckkurven aber nicht gerechtfertigt, zumal ein einstufiger Prozess unter den genannten Voraussetzungen ohne das Auftreten dieser Fehlerart nicht darstellbar ist.

Falten im Flanschbereich

Im Flanschbereich eines Tiefziehbauteils treten Falten vornehmlich aufgrund sich ausbildender tangentialer Druckspannungen auf (Falten 1. Art). Diese Problematik wird durch die vorherrschende Niederhalterkraft und die geometrische Ausgestaltung des Ziehrings in diesem Bereich beeinflusst. Bauteile, die geometrisch einer deutlichen Umformung mit Einzug über eine gekrümmte Ziehringkante ausgesetzt sind, neigen eher zur Ausbildung dieser Fehlerart. Als eine mögliche Maßnahme zur Reduzierung oder Vermeidung dieser Falten kann die Anpassung der Niederhalterkraft dienen. Im hier vorliegenden Fall kann überdies durch eine lokal unterschiedlich eingestellte Niederhalterkraft auf unterschiedlich stark ausgeprägtes Falten 1. Art reagiert werden. Dabei gilt es, den Prozesspunkt so zu treffen, dass die Kraft nicht so hoch ist, dass ein Nachlaufen des Materials gänzlich unterbunden wird, aber die Faltenbildung noch sicher unterdrückt oder in einem akzeptablen Maß gehalten werden kann. Die bei klassischen Tiefziehprozessen auftretende Problematik eines aufgrund in den Ziehspalt eingezogener Falten 1. Art verursachten Blockierens des Werkstoffs im Ziehspalt ist durch den grundsätzlich anderen Werkzeugaufbau (kein Ziehspalt im klassischen Sinne) nicht gegeben.

6.2.3 Zuschnittsoptimierung am Verstärkungsblech

Die Ausgestaltung bzw. Optimierung der Verstärkungsblechzuschnittsgeometrie verfolgt mehrere Ziele:

Die gezielte Beschichtung der Verstärkungsblechkante mit Klebstoff soll in diesem Bereich eine gute elasto-plastische Polsterwirkung erzielen, und scharfe Schnittgrate

an der Kante werden dabei zuverlässig umschlossen, damit sie keine Rissinitiatoren im Grundblech beim Umformen darstellen. Die VB-Kanten lassen sich zuverlässig bei allen Klebstoffvarianten mit definierter Schichtdicke beschichten. Die Analyse des Einflusses der Schichtdicke auf die Rissentstehung zeigte, dass die hauptsächlich eingesetzte Klebschichtdicke im Bereich von ca. $s_K = 0,3 \text{ mm}$ eine sehr gute Polsterwirkung hinsichtlich aller eingesetzten Verstärkungsblechdicken bis 1,5 mm ausübt. Dagegen sind sehr dünne Schichten in der Größenordnung von 0,1 mm als kritisch zu bewerten.

Ein weiteres Ziel ist durch die Anforderungen im Umformprozess definiert: Einerseits sollen die Verstärkungsbleche eine möglichst große Kontaktfläche zum Grundblech im Bereich der Federbeindomkuppe aufweisen, andererseits können zu schmal gewählte Entlastungskerben zu Aufkantungen der Lamellen und dem Abzeichnen des VBs auf dem Grundblech führen. *Abbildung 45* zeigt typische Aufkantungen, die im Zuge der Umformung des Blechverbunds entstehen, da die Lamellen und der dazwischen befindliche Klebstoff keinen Raum zwischen Stempel und Grundblech mehr haben.

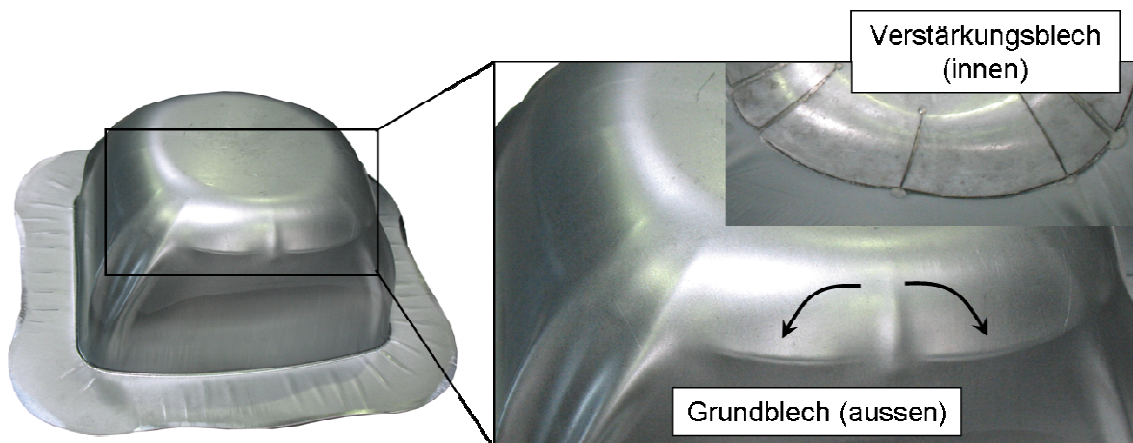


Abbildung 45: Abzeichnung des Verstärkungsblechs aus dem Grundblech

Die in der ersten Projektphase entworfene Zuschnittsgeometrie zielte auf eine gute Abdeckung der Kontaktfläche und damit eine optimale Kraffteinleitung ab. Der in den Entlastungskerben befindliche Klebstoff zusammen mit einem nicht optimalen Aufeinandertreffen der Lamellenkanten hat allerdings zu den genannten unerwünschten Begleiterscheinungen geführt.

Die Geometrie der Verstärkungsbleche hat weiterhin großen Einfluss auf eine mögliche Kerbwirkung im Verlauf des Umformprozesses. Unter Nutzung der Umformsimulation mit der Software AutoForm wurde hierzu die Geometrie durch das Einbringen von Lamellen und Bohrungen an den Ansatzpunkten dieser Lamellen

optimiert. Für diese Auslegung ist analog zu industriellen Anwendungsprozessen die Nutzung der FEM-Simulation gut geeignet. In *Abbildung 46* sind der erste sowie der optimierte Zuschnitt für die Verstärkungsbleche dargestellt. Die breiteren Entlastungskerbenn und die Bohrungen führen zwar zu einer Verringerung der Kontaktfläche des Verstärkungsblechs zum Grundblech, der Zugewinn an Sicherheit bei der umformtechnischen Herstellung ist allerdings als ausschlaggebend zu bewerten. Die Kreislöcher im Anfangsbereich einer Entlastungskerbe werden hierbei Bohrungen genannt, obwohl sie nicht durch Bohren, sondern mittels Drahtrodieren oder Laserstrahlschneiden eingebracht wurden. Die Untersuchungen zur Beschichtbarkeit im KTL-Prozess, dem statischen und dynamischen Bauteilverhalten und zur Korrosion haben überdies mit der optimierten Geometrie gute Ergebnisse gezeigt.

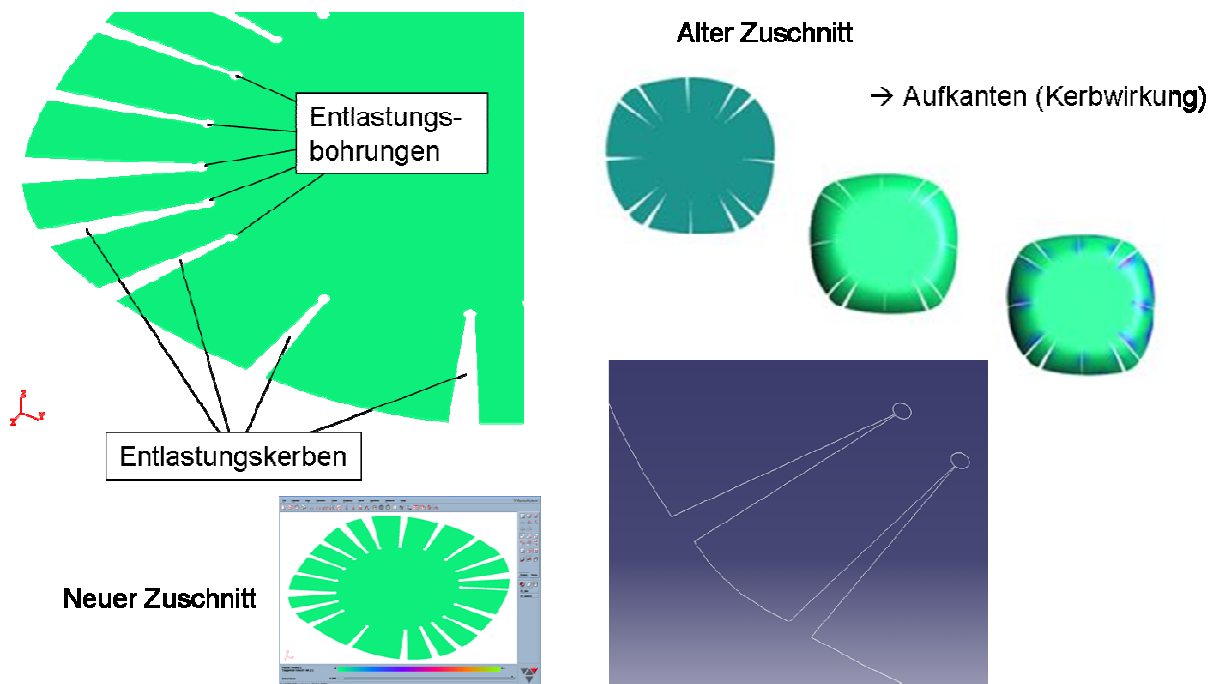
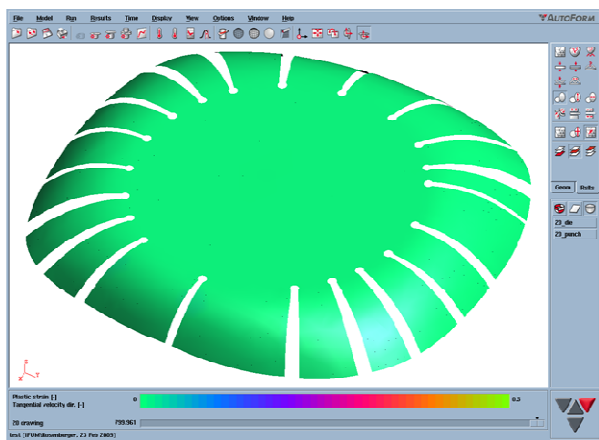


Abbildung 46: Alter und optimierter Zuschnitt

Die verbesserte Lage der Verstärkungsblechlamellen nach der Umformung ist in *Abbildung 47* dargestellt. Da auch nach abgeschlossener Ausformung der Bleche im Kuppenbereich Restabstände zwischen den Lamellen bestehen bleiben, hat der Prozess insgesamt an Robustheit gewonnen. In den statischen und dynamischen Untersuchungen wurde kein signifikant schlechteres Verstärkungsverhalten der optimierten Zuschnitte festgestellt.

Im Bereich der KTL-Beschichtung scheint diese Zuschnittsgeometrie positive

Auswirkungen zu haben. Trotz elektrisch isolierender Klebstoffschicht zwischen dem Grundblech mit der Bohrung zum Einhängen in das Gestell und zum Sicherstellen des elektrischen Kontakts weisen nach diesem Beschichtungsschritt auch die Verstärkungsbleche eine sehr gute Beschichtbarkeit mit KTL-Lack auf. Zu beobachten ist weiterhin, dass es an den Kanten der Verstärkungsblechlamellen durch die Umformung zu dauerhaften lokalen Bereichen elektrischen Kontakts gekommen ist. Eine im Vergleich zur ersten Geometrie erhöhte Anzahl von Lamellen könnte diesen Effekt positiv unterstützen.



Lage der VB-Segmente nach der Umformung

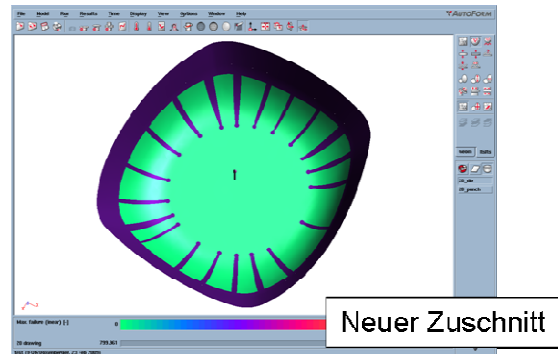
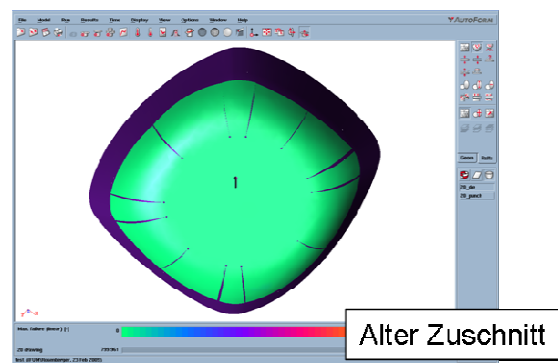


Abbildung 47: Lage der VB-Segmente nach der Umformung

6.2.4 Visioplastische Untersuchung der Umformvorgänge

Um umformtechnisch relevante Größen und Einflüsse an Bauteilen zu untersuchen, wurde die Methode der optischen Formänderungsanalyse genutzt. Im hier vorliegenden Fall wurde für die Durchführung dieser Analysen das System AutoGrid der Firma VIALUX verwendet. Es funktioniert nach folgendem Prinzip:

Ein regelmäßiges Quadratraster wird vor dem Umformvorgang elektrochemisch auf die Blechoberfläche gebracht. Das Bauteil wird anschließend umgeformt. Im Zuge dieser Umformung verzerrt das ursprünglich regelmäßige Raster. Ein System von

Kameras wird dann genutzt, um das verzerrte Raster auf dem Bauteil aufzunehmen. Das System kann aus den aufgenommenen Bildern dann über die Verzerrung und den Bezug zum vorher regelmäßigen Raster Größen wie Umformgrade, Formänderungszustände, Blechdünnungen usw. berechnen. Ein nach der Umformung schadensfreies oder nur wenig beschädigtes Raster ist dabei Voraussetzung für eine qualitative Beurteilung der o. g. Größen. Bei großen Relativbewegungen unter hohen Kontaktkräften zwischen Blech und Werkzeugaktivflächen kann es am Raster zu Verwischungen bzw. Schädigungen kommen, die eine qualitativ ausreichende Auswertung erschweren oder gar verhindern. Das System benötigt für die Rückberechnung bestimmte Mengen zusammenhängender Rasterpunkte, die in einem solchen Schädigungsfall nicht gefunden werden könnten. Der hier vorliegende Prozess weist aufgrund der Substitution des „Unterwerkzeugs“ durch ein Wirkmedium in dessen Kontaktbereich ein gut erhaltenes Raster auf. Der Blechbereich, der mechanischen Kontakt zur Ziehkante hat, kann dadurch allerdings unter bestimmten Voraussetzungen negativ beeinflusst werden, so dass das Raster an Qualität verliert und eine Auswertung erschwert wird.

In *Abbildung 48* ist ein Auszug aus einer Formänderungsanalyse eines lokal verstärkten stilisierten Federbeindoms dargestellt, dessen Umformung bei einer Ziehtiefe von ca. 83 mm aufgrund eines Reißers gestoppt wurde.

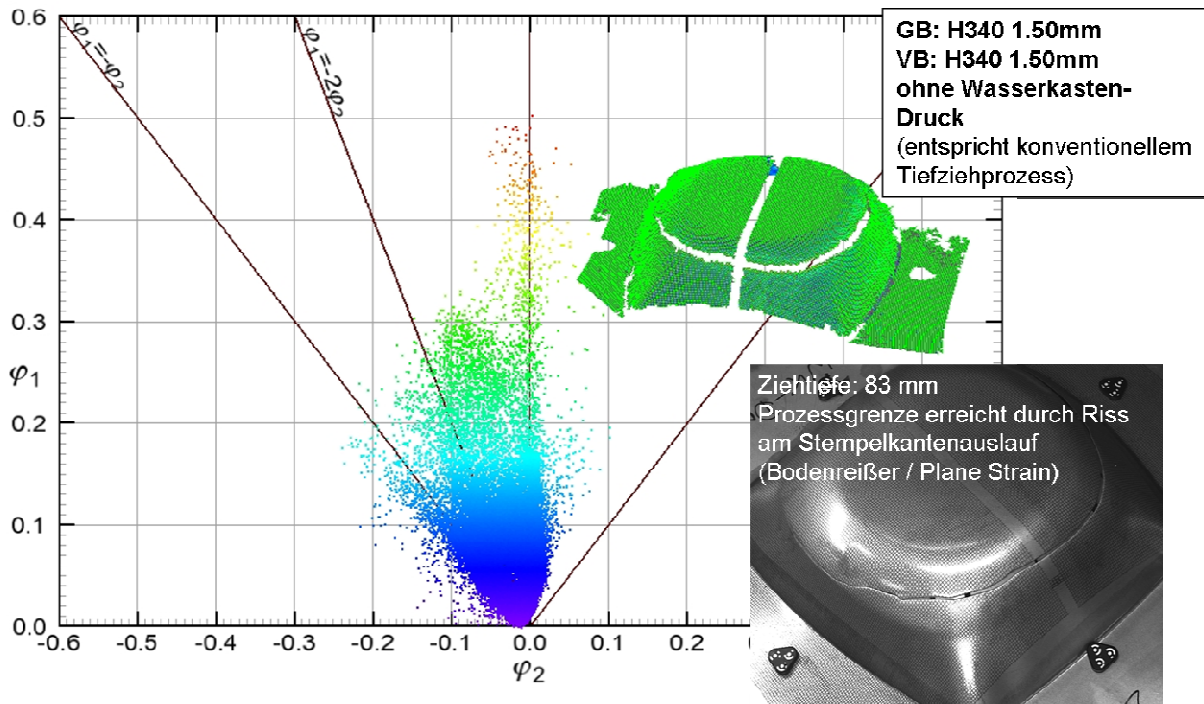


Abbildung 48: *Formänderungsanalyse an einem konventionell tiefgezogenen Bauteil*

Die aus dem durch Umformung verzerrten Raster zurückgerechneten Größen Haupt- und Nebenumformgrad sind im dargestellten Diagramm für jeden erfassten Rasterpunkt auf der Bauteiloberfläche berechnet worden. So lässt sich ermitteln, welchem Formänderungszustand die unterschiedlichen Bereiche des Bauteils unterliegen. Die rot markierten Punkte im Diagramm sind in der Nähe der aufgetretenen Risse detektiert worden. Sie erreichen einen Hauptumformgrad von bis zu ca. $\varphi_1 = 0,5$ und liegen auf der Achse $\varphi_2 = 0$, also im Bereich der ebenen Dehnung (plane strain). Dies und die im klassischen Tiefziehvorgang aufgetretene Lage des Reißers im Bereich der Stempelkantenrundung im Bauteilboden sprechen dafür, dass der Reißer als Bodenreißer aufgetreten ist. Diese Vermutung wird bei Betrachtung des vergleichbaren Diagramms aus dem hydromechanischen Tiefziehen eines lokal verstärkten Doppellagenblechverbunds bestätigt (Abbildung 49). Die analysierten Formänderungszustände zeigen in folgenden Bereichen deutliche Unterschiede: Zum einen sind die in den Randbereichen des Risses aufgenommenen Elemente einem Hauptumformgrad von bis zu ca. $\varphi_1 = 0,6$ unterworfen. Weiterhin liegt die Ansammlung dieser Punkte nicht mehr, wie im Diagramm aus dem klassischen Versuch, auf der Achse $\varphi_2 = 0$, sondern verschoben in Richtung $-\varphi_2$.

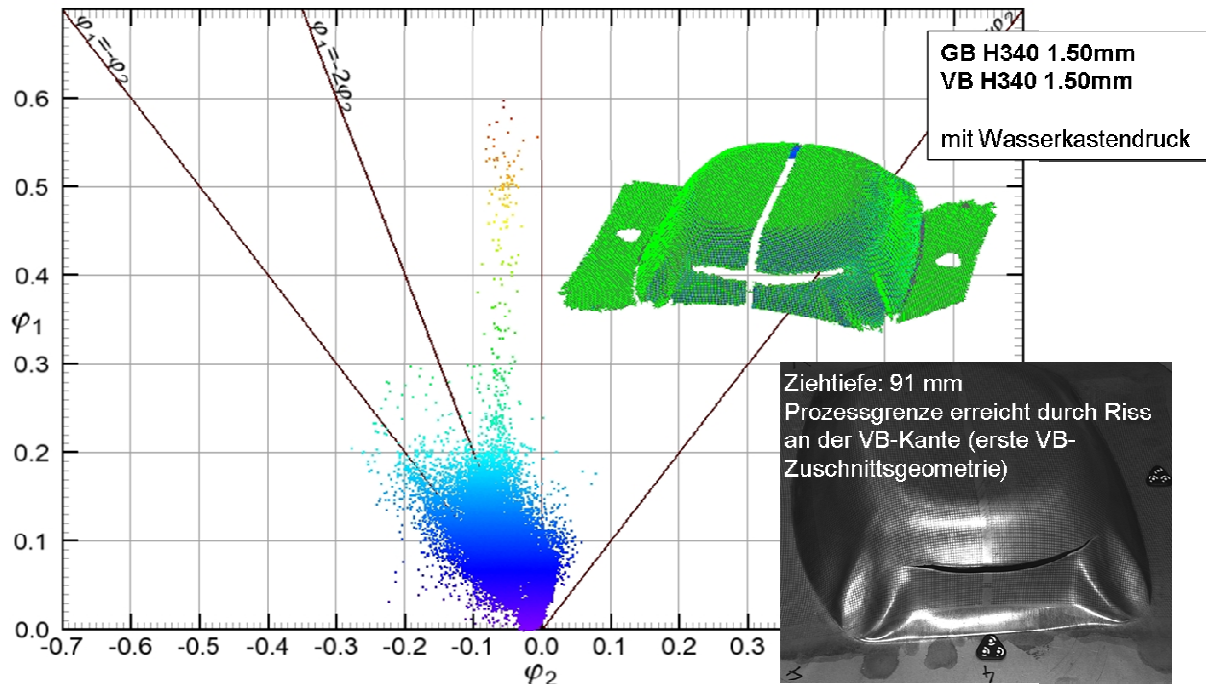


Abbildung 49: *Formänderungsanalyse an einem hydromechanisch tiefgezogenen Bauteil*

Es ist aufgrund dieser Unterschiede zu vermuten, dass im hydromechanisch überlagerten Umformprozess eine etwas größere Streckziehreserve vorhanden ist als im klassischen Prozess. Damit einher geht die Erfahrung, dass bei klassischen Tiefziehprozessen nach dem wirksamen Aufsetzen des Stempels und durch das anfängliche Festklemmen des Blechwerkstoffs im Niederhalterbereich zunächst ein Streckziehen im weiteren Bereich des späteren Bauteilbodens stattfindet, wohingegen der allseitig wirkende Druck beim hydromechanischen Tiefziehen eine gute flächige Einleitung der Umformkraft in größere Bereiche des Bauteils ermöglicht und damit die Ausstreckvorgänge eher reduziert auftreten. Diese etwas größere Streckziehreserve zeigte sich auch in minimal größeren Ziehtiefen, die bis zum Auftreten eines Reißers bei ansonsten identischen Werkstoff- und Blechdickenkombinationen erreicht werden konnten. Diese im Grundblechwerkstoff vorhandene Reserve trägt zu einer Erweiterung der Prozessgrenzen durch das hydromechanische Tiefziehen bei. Um diesen Vergleich jedoch abschließend bewerten zu können, müsste der klassische Tiefziehvorgang mittels eines Gegenhalters betrieben werden, welcher den Blechverbund mechanisch gegen die Stempelkuppe fixiert und der Umformbewegung in Form des Stempelwegs gekoppelt folgt. Dieser Aufbau war im hier verwendeten Werkzeugsystem nicht zu realisieren, da er einen erheblichen Aufwand zur Integration bewegter Werkzeugkomponenten erforderlich macht.

Eine weitere Auswertungsmöglichkeit bietet sich in der Berechnung der Blechdicke bzw. der Blechausdünnung. Im Zuge dieser Analyse lassen sich die Vermutung einer größeren Streckziehreserve sowie die Unterschiede in der Art der aufgetretenen Reißer bestätigen. In *Abbildung 50* sind die Analysen der berechneten Blechausdünnung aus dem hydromechanischen Prozess denen aus dem klassischen Tiefziehprozess ohne Wirkmediendruck gegenübergestellt.

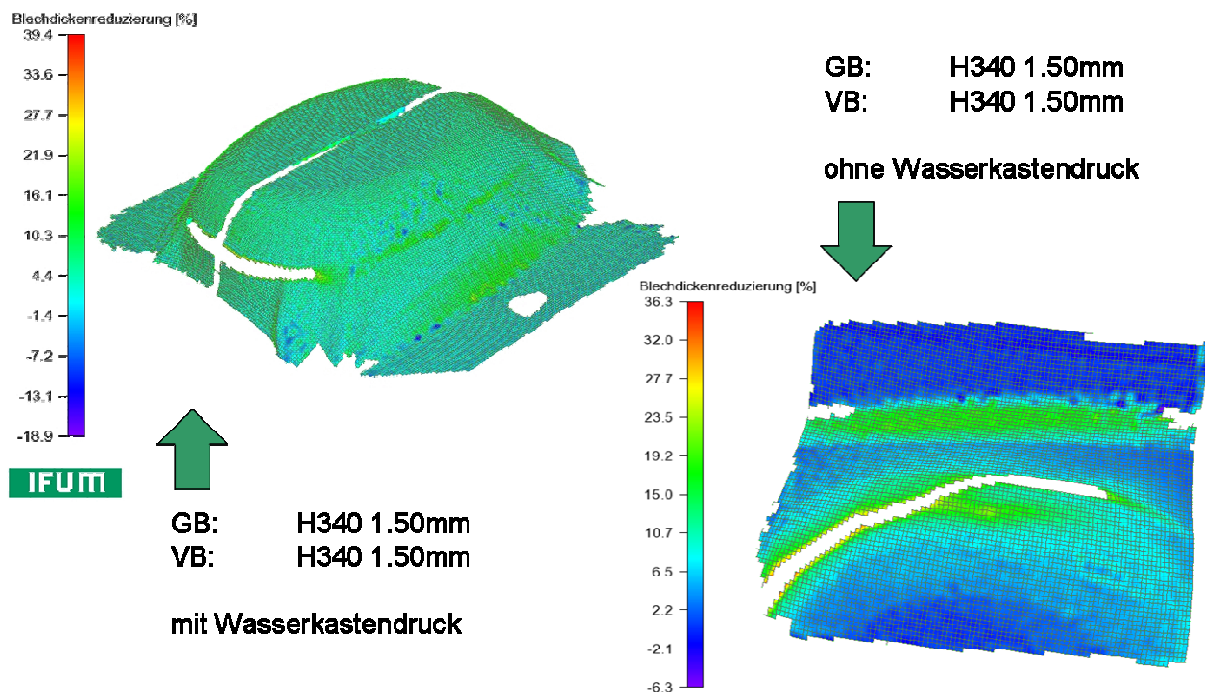


Abbildung 50: Vergleich der Blechausdünnung an hydromechanisch und konventionell hergestellten Bauteilen

Darin zeigt sich, dass die prozentuale Blechausdünnung im hydromechanisch tiefgezogenen Bauteil homogener verteilt ist. Beim klassisch tiefgezogenen Napf besteht eine deutliche Differenz der Blechausdünnungen in unterschiedlichen Werkstoffbereichen, und das Auftreten des Reißers ist in einer Zone lokal sehr großer Inhomogenität der Ausdünnungsverteilung festzustellen.

6.3 Untersuchung im Warmumformprozess

Um die Veränderung der Umformeigenschaften bei unterschiedlichen Umformtemperaturen abbilden zu können, wurden Tiefziehversuche entsprechend dem in Abschnitt 5.1.3 entwickelten und beschriebenen Versuchsaufbau

durchgeführt. Die Verarbeitungstemperaturen (Raumtemperatur, 45 °C und 90 °C) wurden durch Erwärmen der Rohlinge in einem Ofen und auf die jeweilige Temperatur eingestellte (beheizte) Werkzeugkomponenten eingestellt. Nach den Umformversuchen wurden diese Bauteile noch durch zwei Clinchpunkte gesichert. Dies wurde als unterstützende Maßnahme für die Verstärkungsbleche durchgeführt. Bei der hier verwendeten Geometrie konnte durch ein Ausformen sowie die Rückfederung des VB allein im Vorfeld nicht verlässlich sichergestellt werden, dass die Lagesicherung während des Aushärtens der Näpfe in ausreichendem Umfang gegeben ist. Daher sind alle Näpfe im Bereich des Stempelbodens mit zwei Clinchpunkten in identischer Lage unterstützt worden.

7 Experimentelle Untersuchungen an Bauteilen

In diesem Kapitel werden Untersuchungen an Bauteilen zusammengefasst, die nach der erfolgreichen experimentellen Umsetzung der Fertigungstechnologie „Hydro Bonded Blanks“ in einer größeren Bauteilserie hergestellt wurden. Dabei wurde besonderer Wert auf eine vergleichbare Bauteilkontur gelegt und eine einheitliche Ziehtiefe von 140 mm gewählt. Es kamen nur noch die Blechkombinationen aus Grundblechen H340 LAD in 1,5 mm Blechdicke und H220 YD in 1,15 mm Blechdicke sowie Verstärkungsbleche als TRIP 800 in 1,25 mm Blechdicke sowie H340 LAD in 1,5 mm Blechdicke zum Einstanz und als Klebstoffe wurden der Pulverklebstoff Evonik Vestamelt X1333 sowie der Folienklebstoff Lohmann DC VP 20745 eingesetzt, da diese Klebstoffe die insgesamt besten Verarbeitungseigenschaften zeigten. Die Bauteile wurden nach dem Umformen ausgehärtet und es wurden verschiedene weitere Untersuchungen an ausgewählten Bauteilgruppen durchgeführt.

7.1 KTL-Beschichtung unter Produktionsbedingungen

Die hergestellten Federbeindomgeometrien wurden im Werk Braunschweig der Volkswagen AG einer KTL-Behandlung in Anlehnung an die Bedingungen der Serienherstellung vergleichbarer Bauteile unterzogen. Zu diesem Zweck wurde der Bauteilflansch mit jeweils zwei Löchern versehen, um zum einen das Einhängen in die Trägerrahmen zu ermöglichen und zum anderen den zwingend erforderlichen elektrischen Kontakt sicherzustellen. In *Abbildung 51* sind beispielhaft vergleichbare KTL-Bäder und Trägerrahmen sowie der Ablauf der einzelnen Prozessschritte dargestellt.



Trägerrahmen



Bauteile im Trägerrahmen



KTL-Bäder

- Entfetten
- Spülen
- (Zinkphosphatierung)
- KTL-Beschichtung
- Spülen
- Ausfiltern von Lacküberresten
- Spülen

Trocknung / Einbrennen

Quelle:
HS Schoch

Abbildung 51: *KTL-Bäder und Trägerrahmen, KTL Prozessschritte*

Um eine Verunreinigung der KTL-Bäder zu vermeiden, die meist durch Badverschleppung einen gesamten Prozessstrang betrifft, sind Proben der Doppellagenverbunde mit den drei Projektklebstoffen im Vorfeld der Beschichtungsversuche im zuständigen Labor untersucht worden. Nach Feststellung der Unbedenklichkeit konnte eine Freigabe für alle drei Klebstoffe gegeben werden und die Beschichtungsversuche durchgeführt werden.

Grundsätzlich besteht beim vollflächigen Kleben eines Verstärkungsbleches auf einem Grundblechbereich kein elektrisch leitfähiger Kontakt zwischen den Blechen. Der Beschichtungsvorgang in der kathodischen Elektrotauchgrundierung erfordert jedoch einen elektrischen Kontakt zu allen Bauteilbereichen, auf denen sich der Lack abscheiden soll. Im Tauchprozess werden die zu beschichtenden Bauteile als Elektrode in einem Gleichstromprozess geschaltet und die Abscheidung des Lacks erfolgt nur auf der Kathode. Das „Verkrallen“ der Lamellen des Verstärkungsblechs im Grundblech im umgeformten Zustand hat offensichtlich zu einer ausreichenden Anzahl von elektrisch leitfähigen Kontaktstellen geführt, da sich auf allen Verstärkungsblechen der KT-Lack in guter Haftungsqualität abgeschieden hat. Die erzielte Lackbeschichtung und die nachfolgenden Untersuchungen zur beschleunigten Alterung werden im Kapitel 7.3 weiter beschrieben.

7.2 Beuluntersuchungen

7.2.1 Quasistatische Beuluntersuchungen an Federbeindomgeometrien

Die Beuluntersuchungen an Probekörperserien der Bauart stilisierter Federbeindom wurden quasistatisch durchgeführt. Dafür wurde ein vorhandener Beulprüfstand eingesetzt, der auf einer spindelgetriebenen Zug-Druck-Prüfanlage basiert. Der zur Anwendung gekommene Versuchsaufbau ist in *Abbildung 52* dargestellt.

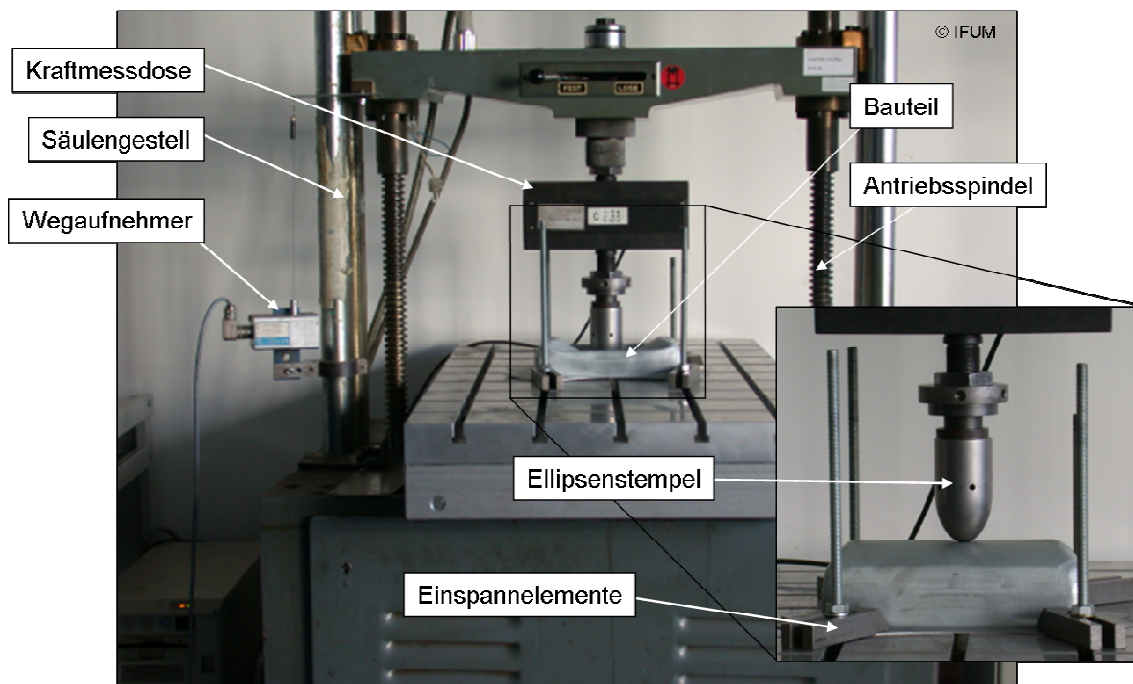


Abbildung 52: Versuchsaufbau für quasistatische Beulversuche

Während des Beulens fährt ein Stempel mit konstanter Geschwindigkeit auf das Bauteil, wobei die Beulkraft F_B sowie der Stempelweg s aufgenommen werden. Das Beulen der Näpfe erfolgt nach dem Aushärten des Klebstoffs sowie bei einigen Proben nach dem Durchlaufen eines VDA-Wechseltests, um anschließend die Qualität der Klebfuge zu beurteilen. Dadurch werden sowohl unbehandelte als auch beschleunigt gealterte Bauteile vergleichend hinsichtlich ihres Beulwiderstandes geprüft. Wenn die Prozessparameter zur Bauteilherstellung richtig gewählt wurden, sollte die Kante des Verstärkungsbleches keine Schwachstelle im Gesamtsystem hinsichtlich des Beulwiderstandes darstellen. Dies ist durch die experimentellen Beulversuche untersucht worden.

Abbildung 53 zeigt die Prozessabfolge beim Beulen sowie einen der beiden beobachteten Zustände der Falteneinbringung im Bauteilboden.

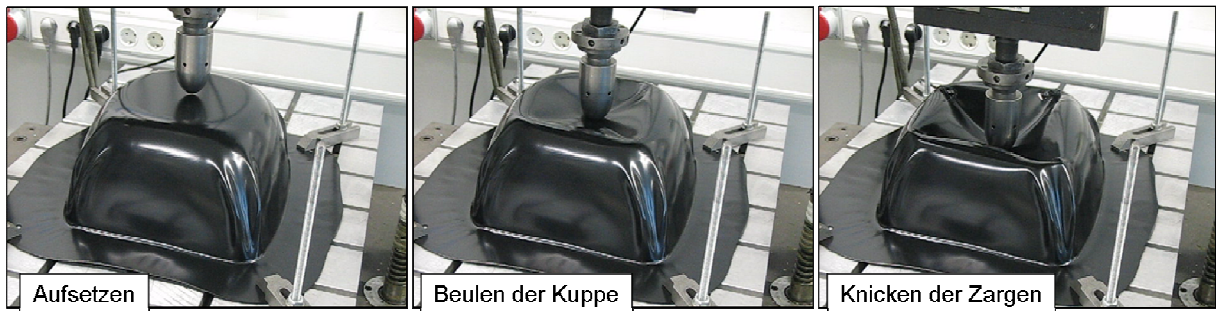


Abbildung 53: Prozessfolge beim quasistatischen Beulen von stilisierten Federbeindomgeometrien

Bei der quasistatischen Beulprüfung der stilisierten Federbeindomgeometrien haben sich zwei Beulbilder bzw. zwei charakteristische Verläufe der beim Beulen in das Bauteil eingebrachten Faltenbildung gezeigt, die in *Abbildung 54* dargestellt sind und im Folgenden näher beschrieben werden.

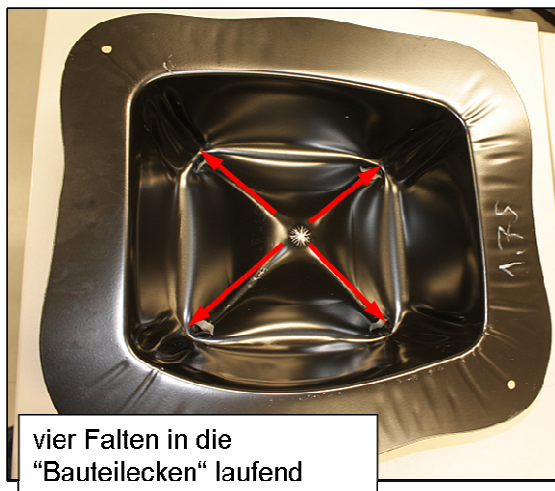


Abbildung 54: *Faltungsbild beim quasistatischen Beulen stilisierter Federbeindomgeometrien*

Im ersten Fall laufen von Beginn der Beulung an vier Falten in die vier Bauteilecken und wachsen bis zum Ende des Beulversuchs weiter an. Im zweiten Fall stellen sich zwei Falten in der gleiche Weise ein, eine weitere läuft jedoch nicht in eine der Bauteilecken, sondern in die Mitte eines der Seitenbereiche. Trotz dieses geometrisch unterschiedlichen Verhaltens konnte ein signifikanter Unterschied in den Beulkraftverläufen der beiden Szenarien nicht festgestellt werden. Auch ein früheres oder späteres Ablösen des VBs wurde bei keinem der Szenarien durchgehend

festgestellt. Die Untersuchung der unterschiedlichen Beulszenarien hat keine Gründe für die speziell eintretenden Beulverläufe gezeigt, weshalb deren jeweiliges Eintreten als stochastisch verteilt angenommen wird.

In *Abbildung 55* sind die Verläufe der Beulkraft über der Beultiefe für zwei unverstärkte Federbeindomgeometrien aus den Werkstoffen H340 LAD und H220 YD gegenübergestellt.

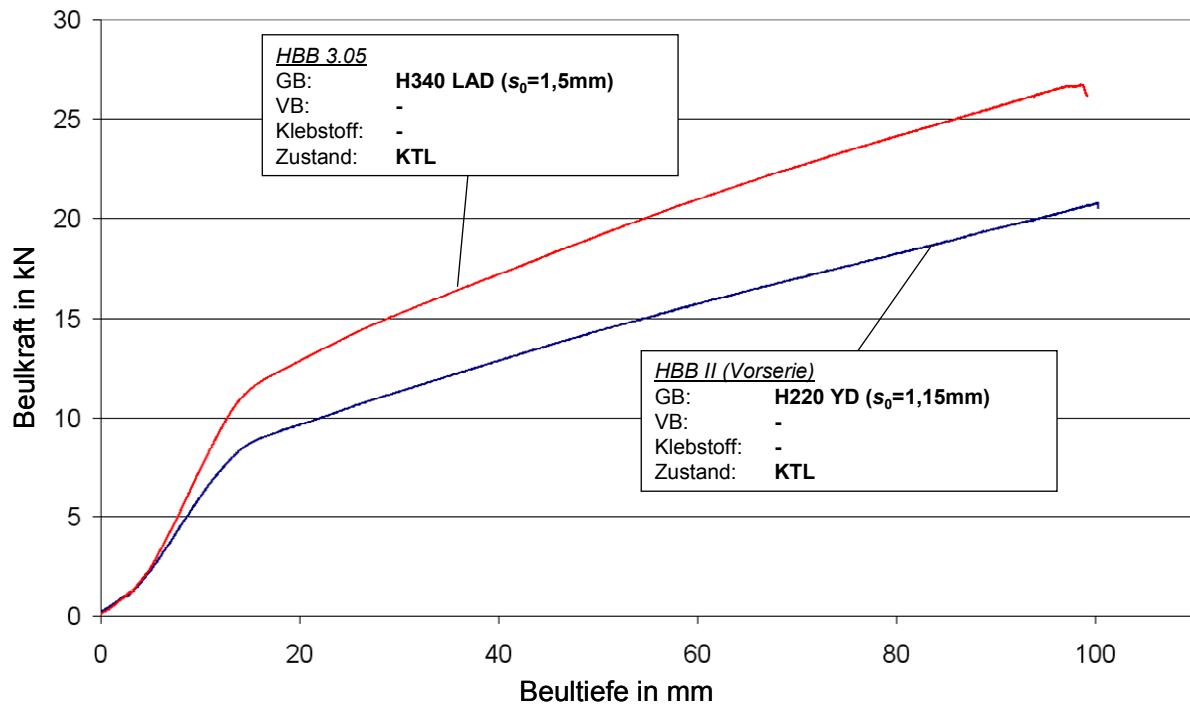


Abbildung 55: Quasistatische Beulprüfung an unverstärkten Grundblechen

Der Beulkraftverlauf unterscheidet sich erwartungsgemäß durch etwas größere Kraftwerte beim Beulen des Napfs aus H340, was neben dem größeren Beulwiderstand aus dem festeren Material auch durch eine größere Blechdicke begründet ist. Nach dem Aufsetzen des Ellipsoidorns, der als Beulkörper genutzt wurde, steigt die Beulkraft zunächst leicht und dann relativ steil an. Der leichte Anstieg zu Beginn zeigt den elastischen und reversiblen Anteil der eingebrachten Verformung im Bauteilboden. Anschließend ist der steile Anstieg bis zu einer Beultiefe von ca. 18 mm mit einer plastischen Verformung des Bauteilbodens verbunden, der jedoch noch nicht zum Ausbilden der o. g. Faltenstruktur führt, sondern den Bauteilboden relativ gleichmäßig eindrückt. Nach Überschreitung dieses Punktes bilden sich die Falten in der beschriebenen Art und Weise aus und werden im weiteren Verlauf des Beulversuchs weiter nach unten gedrückt. Diese Ausbildung

der Falten bleibt bis zum Erreichen der maximalen Beultiefe von 100 mm bestehen und wird nicht von Prozessen, wie beispielsweise einem Einknicken der Bauteilzarge, begleitet. Die Beulkraft steigt dabei stetig weiter, aber weniger steil als zu Beginn der Messung an.

Im Vergleich des Beulkraftverlaufs des unverstärkten Bauteils aus H340 LAD ist der Verlauf eines mit TRIP 800 verstärkten Bauteils in *Abbildung 56* dargestellt.

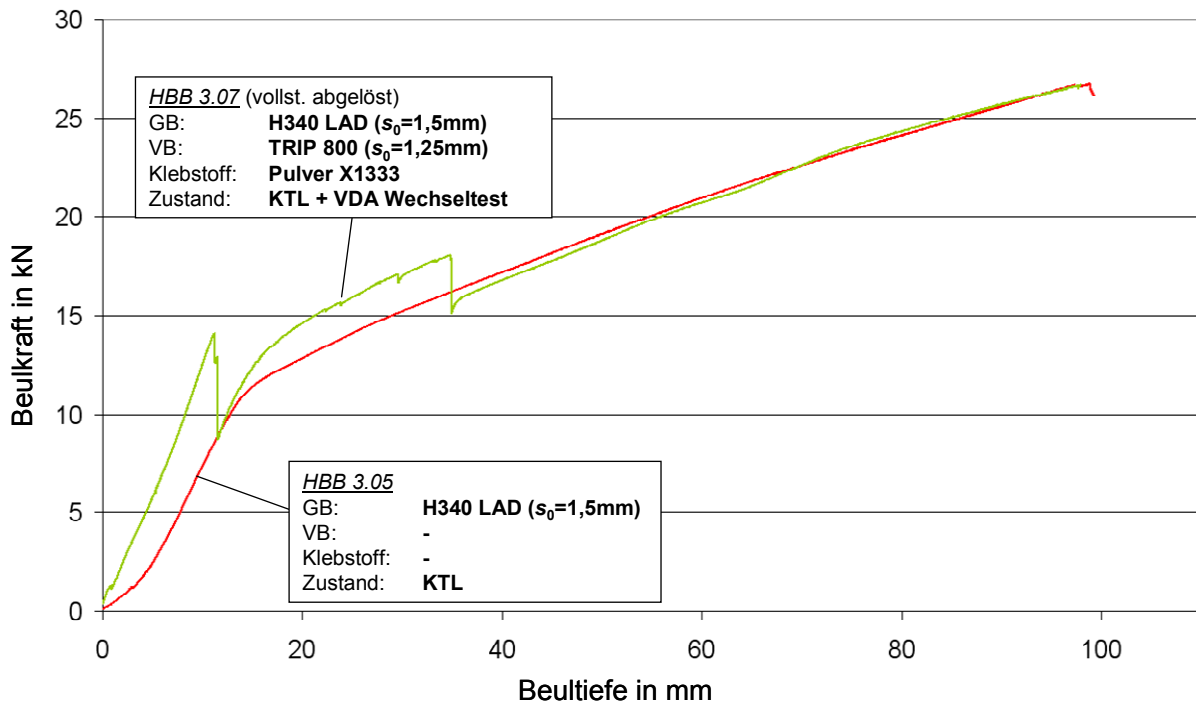


Abbildung 56: Quasistatische Beulprüfung H340 LAD verstärkt und unverstärkt

Der darin gezeigte Beulkraftverlauf des verstärkten Bauteils zeigt eine vollständige Ablösung des Verstärkungsblechs in zwei Stufen. Die Untersuchung der Beulkraftverläufe bzw. das Ablösen des Verstärkungsblechs findet bei Beultiefen statt, die im Anwendungsfall (am Beispiel Federbeindom) ein Versagen des Bauteils zu Folge hätten. Im Einsatz eines solchen Bauteils ist plastische Deformation gleichbedeutend mit einem Versagen. Um die Klebverbunde zusammen mit dem Umformverfahren zu qualifizieren, werden die Beulkraftverläufe allerdings bis zu einer Beultiefe von 100 mm aufgenommen.

Grundsätzlich ist bei allen untersuchten Proben eine sequenzielle Ablösung des Verstärkungsblechs zu beobachten, welches sich in stufenweise sprunghaftem Abfall der Beulkraft erkennen lässt. Im o. g. Beispiel ist es in zwei Ablösestufen zu einer vollständigen Ablösung gekommen, in anderen Fällen ist nach mehreren

Kraftabfällen allerdings auch bei Erreichen der maximalen Beultiefe noch eine (Rest-) Anhaftung des Verstärkungsblechs zu verzeichnen. Erwartungsgemäß verhalten sich Bauteile mit vollständig abgelöstem Verstärkungsblech ab dem Erreichen der Ablösung wie ein unverstärktes Bauteil.

In *Abbildung 57* sind exemplarisch die Beulkraftverläufe der TRIP-verstärkten Grundbleche in den unterschiedlichen Klebstoffsystemen gegenübergestellt. Neben dem Bauteil mit dünnerem und weicherem Grundblech aus H220 YD in 1,15 mm Blechdicke mit einer geringeren Steigung im Diagramm als die verstärkten Varianten mit Grundblech H340 LAD in 1,5 mm Blechdicke zeigen die Bauteile mit dem Verstärkungsblech ein weitgehend lineares Verhalten bis zu ersten Ablöseerscheinungen des Verstärkungsblechs. Das Ablösen der hochfesten Verstärkungsbleche tritt teilweise ab einer Beultiefe von 10 mm ein und erfolgt schrittweise in mehr oder weniger ausgeprägten Schritten, erkennbar an den Einbrüchen im Kraftverlauf. Beim Folienklebstoff DC VP 20745 löst das Verstärkungsblech früher ab, als bei den Bauteilen mit Pulverklebstoff X1333, was den Untersuchungen an Kleinproben entspricht. Jedoch treten bei beschleunigt gealterten Proben ebenfalls Ablöseerscheinungen ab etwa 10 mm beulverformung auf.

Als Tendenz zeigt dabei der Pulverklebstoff X1333 zu Beginn der Beulung eine stärker versteifende Wirkung im Vergleich zum Folienklebstoff, die sich auch bei den später noch beschriebenen zyklischen Versuchen bei Aufnahme der Kennlinien bestätigte.

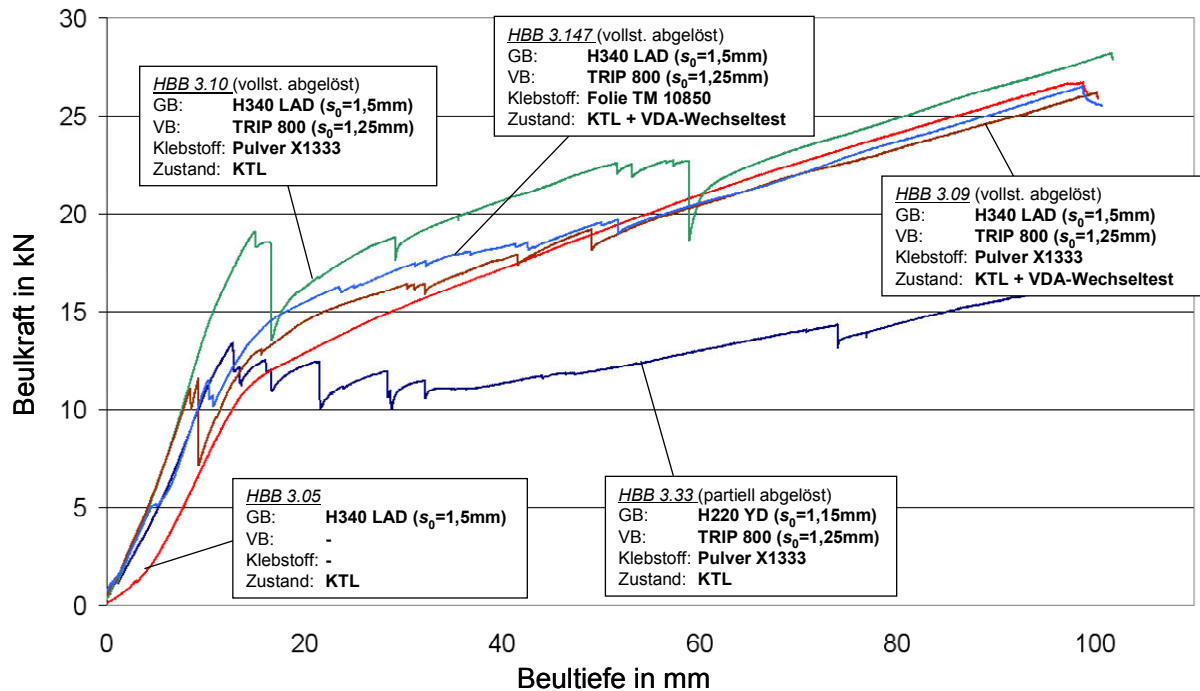


Abbildung 57: Übersicht quasistatische Beulprüfung an unterschiedlichen Kombinationen

Ein signifikanter Unterschied konnte im Beulverhalten zwischen den Proben, die dem VDA-Wechseltest ausgesetzt waren, im Vergleich zu nicht behandelten Proben gleicher Kombinationen nicht festgestellt werden.

7.2.2 Quasistatische Beuluntersuchungen an warmumgeformten Rechteckgeometrien

Die Beuluntersuchungen an den Rechteckgeometrien wurden auf der gleichen Anlage und nach dem gleichen Versuchsaufbau wie die Untersuchungen der Federbeindomgeometrien durchgeführt. Die verwendete Geometrie des Ellipsendorns ist zu der bei den hochdynamischen Untersuchungen identisch. Der Versuchsaufbau sowie die unterschiedlichen Stadien einer Beulsequenz sind in *Abbildung 58* gezeigt.



Abbildung 58: Prozessabfolge beim quasistatischen Beulen eines warmgeformten Rechtecknapfs

Bei den quasistatischen Beuluntersuchungen an Rechteckgeometrien aus verstärkten Doppellagenblechverbunden wurden, wie in *Abbildung 59* dargestellt, drei spezifische Ablösungssequenzen des Verstärkungsblechs festgestellt:

- Ein partielles mittiges Ablösen des VB in unmittelbarer Umgebung der Grundblechkontaktzone mit dem Beulstempel, in den Randbereichen bleibt der Klebeverbund bestehen.
- Ein partielles Ablösen des Verstärkungsblechs von einer Hälfte des Bauteilbodens, in der anderen Hälfte bleibt der Klebeverbund bestehen
- Ein vollständiges Ablösen mit Herausfallen des VB aus dem GB.



Abbildung 59: Versagensarten beim quasistatischen Beulen eines warmgeformten Rechtecknapfs

Ein qualitativer Unterschied in den Beulkraftverläufen, verursacht durch die unterschiedlichen Versagensarten, konnte nicht festgestellt werden.

Die Klebstoffvariante X1333 wurde im beheizbaren Tiefziehwerkzeug bei Raumtemperatur (ca. 20 °C) und bei 90 °C umgeformt. In beiden Fällen hat sich das Verstärkungsblech partiell abgelöst. Der gemessene Kraftverlauf des Bauteils, das bei 90 °C umgeformt wurde, zeigt zu Beginn einen etwas länger andauernden steilen Beulkraftanstieg (*Abbildung 60*). Eine solche Tendenz ließ sich allerdings über alle

warmumgeformten Rechtecknäpfe nicht erkennen, so dass bei ansonsten recht ähnlichen Beulkraftverläufen eine signifikante Verbesserung der Steifigkeitseigenschaften bzw. der Haltbarkeit des Blechverbundes nicht besteht.

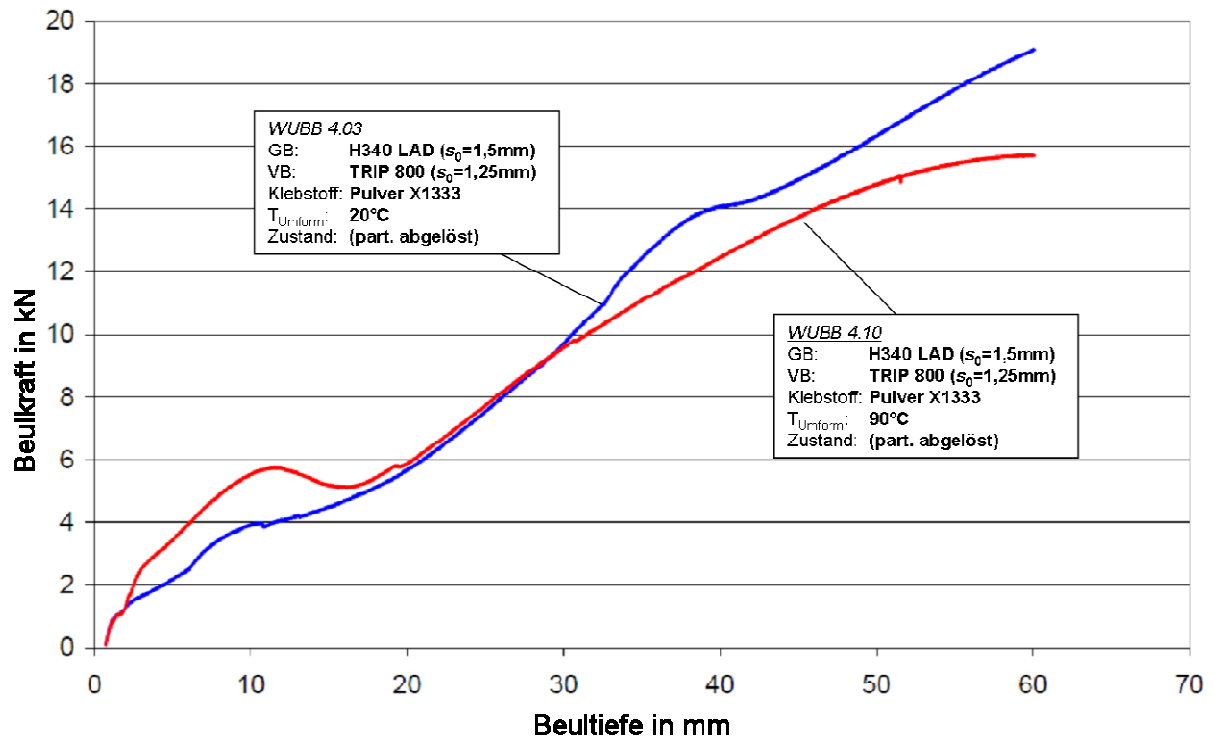


Abbildung 60: Umformtemperaturabhängige Beulkraftverläufe – Klebstoff X1333 – Raumtemp., 90 °C

In der Aushärtungsphase hat sich allerdings gezeigt, dass die Blechverbunde, die warmumgeformt wurden, weniger stark dem Verlust des Verstärkungsblechs aufgrund der bestehenden Spannungen durch die Rückfederung unterliegen. Es scheint sich also, bezogen auf die Prozesskette, speziell beim Durchlaufen der zur Aushärtung angewendeten Temperaturbereiche ein positiver Effekt durch die vorherige Warmumformung erzielen zu lassen.

Für die Untersuchung von Rechteckbauteilen aus Blechverbunden, die mithilfe des Klebstoffs HCM 555 bei Raumtemperatur und bei 45 °C hergestellt wurden, lassen sich die gleichen Erkenntnisse wie beim Klebstoff X1333 gewinnen: Eine deutliche Verbesserung der Festigkeit oder der Haltbarkeit des Verbundes kann anhand der Beulkraftverläufe nicht ermittelt werden. Bei beiden Temperaturvarianten treten bei ansonsten nahezu Übereinstimmung der Verläufe stufenweise Kraftabfälle aufgrund von Ablösungserscheinungen auf, wie *Abbildung 61* zeigt. Der Zeitpunkt und die Intensität dieser Ablösungen ist allerdings nicht reproduzierbar charakteristisch einer der Temperaturen zuzuordnen. Die Ablösungen sind in beiden Fällen als partielle

Ablösungen des VBs aufgetreten.

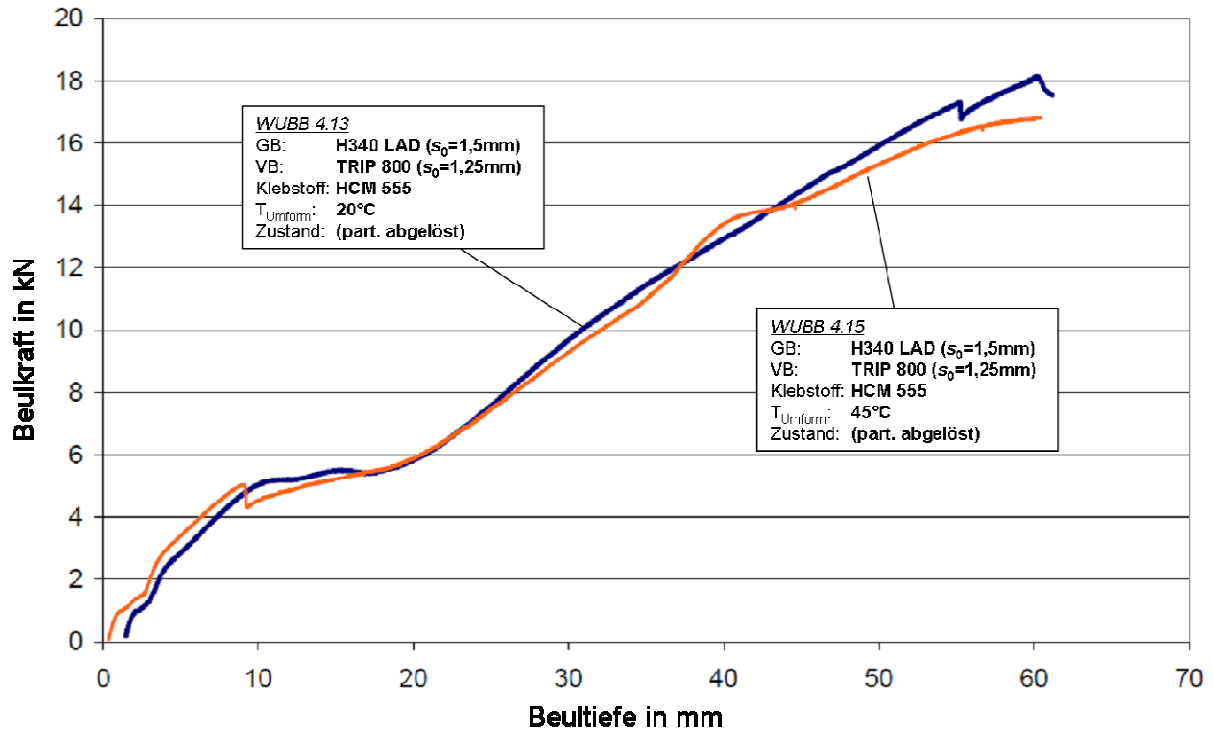


Abbildung 61: Umformtemperaturabhängige Beulkraftverläufe –
Klebstoff HCM 555 - Raumtemp., 45 °C

Diese Erkenntnisse werden auch durch die Beulkraftverläufe bei Verwendung der Folien-Klebstoffvariante TM10850/DC VP 20745 bei Raumtemperatur und 45 °C bestätigt. Im Gegensatz zu den hochdynamischen Versuchen ist bei dieser Art der Bauteilprüfung ein Unterschied anhand der Verarbeitungsform der Klebstoffe (Pulverauftrag / Folie) nicht zu erkennen. Auch die o. g. Variante zeigt für die unterschiedlichen Temperaturen einen nahezu identischen Verlauf der Beulkräfte. Bei beiden Bauteilen hat eine partielle Ablösung des VBs stattgefunden. *Abbildung 62* zeigt die entsprechenden Beulkraftverläufe.

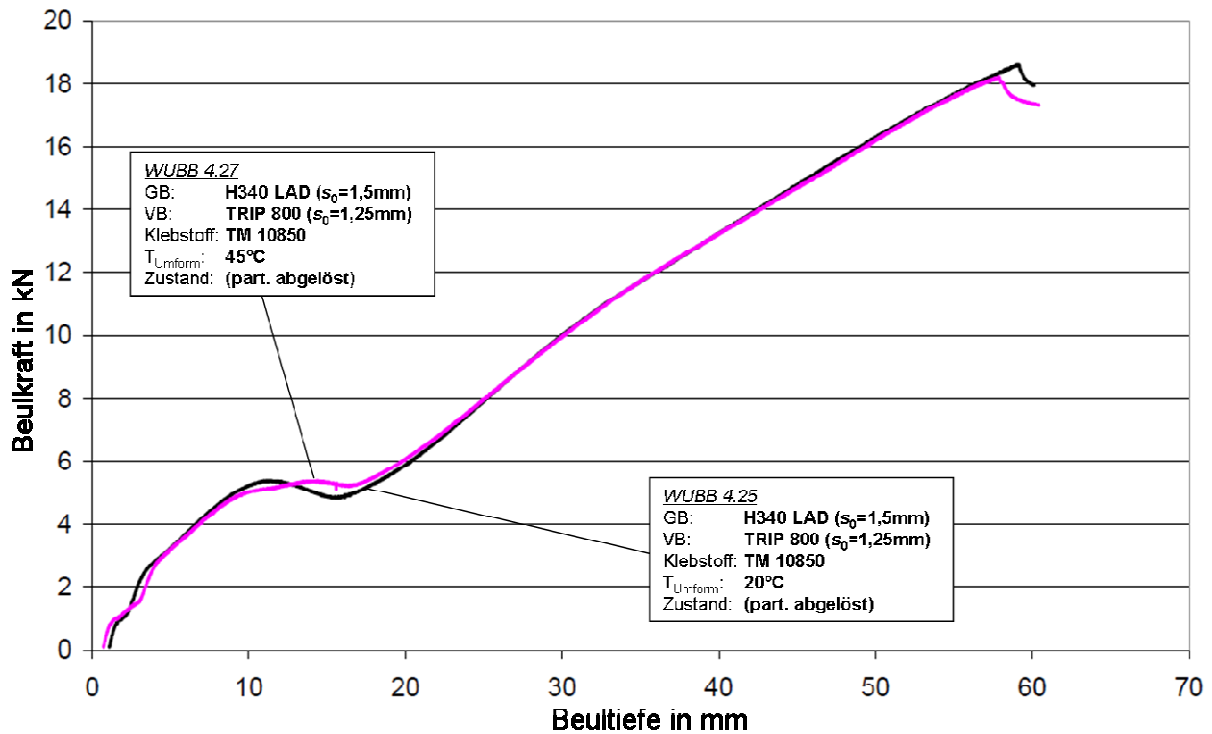


Abbildung 62: Umformtemperaturabhängige Beulkraftverläufe –
Klebstoff TM 10850 - Raumtemp., 45 °C

Ein Vergleich der Beulkraftverläufe im Hinblick auf die drei zum Einsatz gekommenen Klebstoffsysteme wurde bei RT als Referenz-Umformtemperatur durchgeführt und in *Abbildung 63* gegenübergestellt. Insgesamt liegen die Beulkraftverläufe für alle Klebstoffvarianten leicht gestreut in einem so engen Band, dass charakteristische Unterschiede in Beulsteifigkeit der Verbunde oder der Haltbarkeit des Verstärkungsblechs nicht festgestellt werden können.

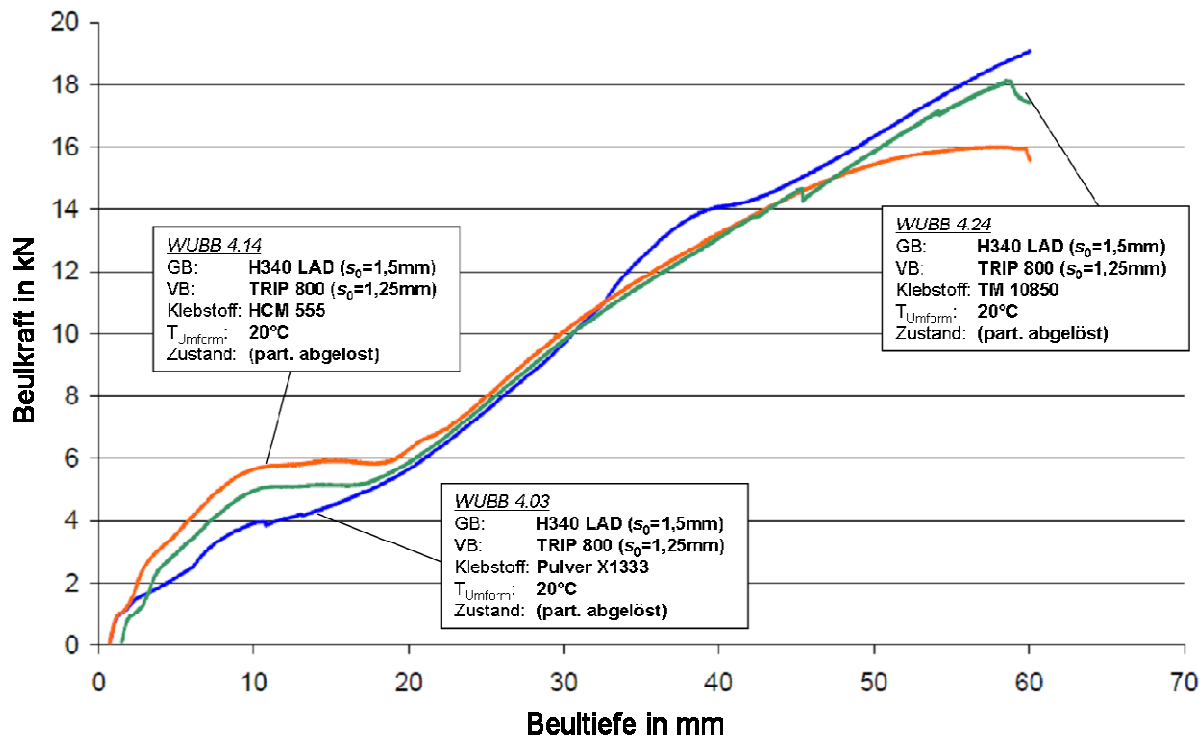


Abbildung 63: Vergleich der Beulkraftverläufe der drei Klebstoffvarianten bei Raumtemperatur

Ein Vergleich bei Warmumformtemperaturen ist hier aufgrund der Unterschiede in der klebstoffspezifisch erforderlichen Temperatur (45 °C und 90 °C) nicht durchgeführt worden.

7.2.3 Hochdynamische Beuluntersuchungen

Die Beanspruchungsgeschwindigkeit hat einen großen Einfluss auf die Beanspruchungs- und Versagensart von Werkstoffen und gefügten Werkstoffkombinationen [Hom87, FOSTA P477, Hab03, Sch06]. Stehen bei der quasistatischen Beanspruchung praktisch alle Möglichkeiten der mechanischen Verformung zur Verfügung, so sind die Verformungsmöglichkeiten mit wachsender Beanspruchungsgeschwindigkeit stark behindert, und es stellt sich eine geschwindigkeitsabhängige zusätzliche Steifigkeit in der Probe bzw. im Bauteil ein. In einem Fallturm (siehe *Abbildung 64*) konnten Bauteile aus der zweiten großen Umformserie mit einheitlicher Ziehtiefe von 140 mm, die durch hydromechanisches Tiefziehen hergestellt wurden mit hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit vergleichend untersucht werden. Dabei wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit zu den quasistatischen Beuluntersuchungen die identische kinematische Konfiguration

durch Einbeulen mit einem Dorn (Geometrie im Kuppenbereich identisch zur Dorngeometrie aus den statischen Versuchen) zentrisch und senkrecht in den verstärkten Bodenbereich eines am Flansch fixierten Napfes gewählt...



Abbildung 64: Fallturm für Crashversuche mit den Federbeindomgeometrien, einheitliche Prüfmass von 190 kg und Fallhöhe bis zum Auftreffen der Dornkuppe auf den verstärkten Bauteilboden von 1,5 m

Diese Anordnung entspricht nicht der einer typischen Crash-Konfiguration eines Federbeindomes in einer Karosseriestruktur, da hier die Randbedingungen durch die umliegende Karosserie, in die ein Federbeindom integriert ist, eine wesentliche Rolle spielen würden. Die zur Verfügung stehende Geometrie als stilisierter Federbeindom ist lediglich ein Beispielbauteil für die Fertigungstechnik mit hydromechanisch unterstützter Bonded Blank Technik und die Bauteilversuche sollten insbesondere das Verhalten des verstärkten Bauteilbereichs und der Klebschicht bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten aufzeigen. Daher wurde der Prüfaufbau analog zu den quasistatischen Versuchen mit deutlich einfacheren Randbedingungen für die vergleichende Untersuchung gewählt. Nach Vorversuchen wurden die einheitliche Fallhöhe bei 1,50 m und die Gesamtmasse der Bombe mit Dorn bei 190 kg festgelegt. Dies resultiert in einer Auftreffgeschwindigkeit von typisch 5,1 m/s beim Passieren der Lichtschranken kurz vor dem Einschlag des Dorns auf dem

Bauteilboden. Die Hochgeschwindigkeits-Laserlichtschranken dienen der Messung der Fallgeschwindigkeit und starten die Messwertaufnahme der Kraftmessdose sowie die Aufzeichnung der Videokamera mit High-Speed Bildern. In der nachfolgenden Tabelle sind wesentliche technische Daten des Fallwerks und der Messeinrichtungen dargestellt.

Tabelle 4: Fallwerk und Messeinrichtungen zur Untersuchung des hochdynamischen Bauteilverhaltens

Fallwerk und High-Speed Zubehör	
Gesamthöhe	6 m
Zulässige Probenhöhe	< 1,5 m
Lichte Weite zwischen den Führungsstangen	390 mm
Impaktormasse	135 – 300 kg
Prüfgeschwindigkeit (nur durch Erdbeschleunigung)	ca. 7 m/s
Erreichbare kinetische Energie (bei $v_{\max} = 7$ m/s)	7,5 – 17,6 kJ
Kraftmessdose	600 kN
Messwerterfassung	1 Mhz
Digitale Hochgeschwindigkeitskamera	40.500 Bilder/s

Die Probekörperaufnahme auf einer quadratischen Stahlplatte (500 mm x 500 mm) dient dem Aufspannen der Näpfe auf der Kraftmessdose und wurde mit zahlreichen Bohrungen versehen, damit die im Napf enthaltene Luft nicht durch einen Aufpumpeffekt zu einem Zusatzwiderstand bei der Deformation führt. Die Luft kann daher beim Aufschlagen des Dornes seitlich an der Kraftmessdose entweichen.

Die *Abbildung 65* gibt eine Übersicht der im Wesentlichen untersuchten Probekörper. Die Resthöhe im Zentrum des Napfes, die nach dem Einschlagen des Dornes verbleibt, gibt Aufschluss über die Gesamtdeformation und den Widerstand, den der Probekörper der Aufprallenergie von 3,06 kJ entgegengesetzt hat und die zur plastischen Verformung sowie Dissipation in Wärme geführt hat. In einigen Fällen löste sich das Verstärkungsblech teilweise oder vollständig ab, die besten Resultate erzielen Proben, bei denen sich nur die Lamellen des Verstärkungsbleches lösen, der großflächig geklebte Bodenbereich jedoch weitgehend am Grundblech haftet und sich ebenfalls mit dem Faltenmuster verformt. Durch dieses Verhalten wird deutlich mehr Energie verzehrt und eine größere Resthöhe im Vergleich erzielt. Ein vollständiges Ablösen wurde häufig bei dem Pulverklebstoff X1333 beobachtet, der auch das steifere und sprödere System darstellt und die starken Bauteilverformungen weniger gut mitmacht. Durch einen ersten Haftungsverlust bildet sich relativ schnell eine Delamination vom Grundblech aus und die hochfesten

Verstärkungsbleche lösen ab.

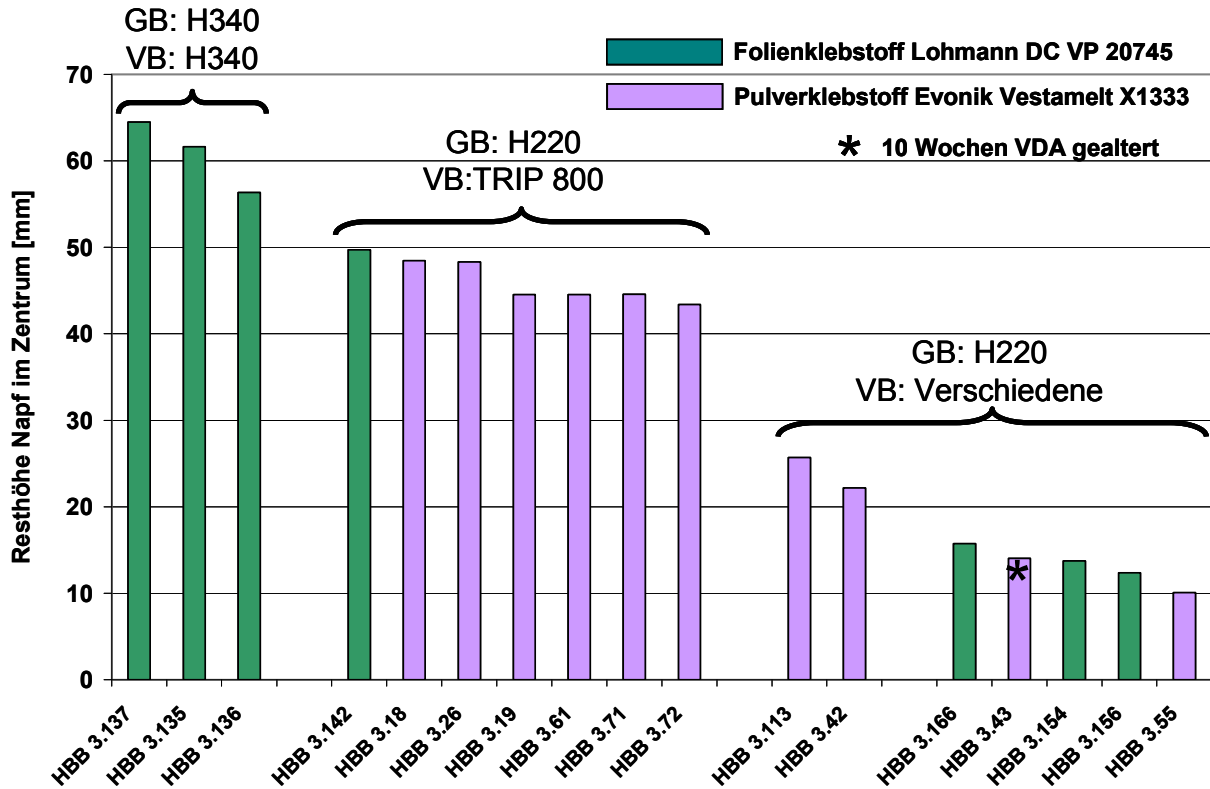


Abbildung 65: Vergleich der Resthöhen bei einer Probekörperauswahl aus verschiedenen Blechkombinationen und zwei Klebstoffen

Das Bauteilverhalten soll am Beispiel von Einzelbildern aus der Videosequenz der High-Speed-Aufzeichnung erläutert werden. In *Abbildung 66* ist *oben links* der Zustand des Probekörpers unmittelbar vor dem Einschlag der Dornkuppe auf dem Boden des Napfes zu sehen. Eine tausendstel Sekunde später (*oben Mitte*) deformiert der Boden und der Beulvorgang beginnt. Wenige tausendstel Sekunden später ist ein gleichmäßiges Einbeulen des Übergangs vom Rand des Bodens in den Zargenbereich zu erkennen, wo sich ein 4-Falten Beulmuster ausbildet (*oben rechts*).

Dabei stellt sich durch den Einbeulvorgang am Übergang zwischen Boden und Zarge mit einem engen Deformationsradius eine ausgeprägte Schälbeanspruchung am Verstärkungsblech und dem sich abschälenden Grundblech ein.

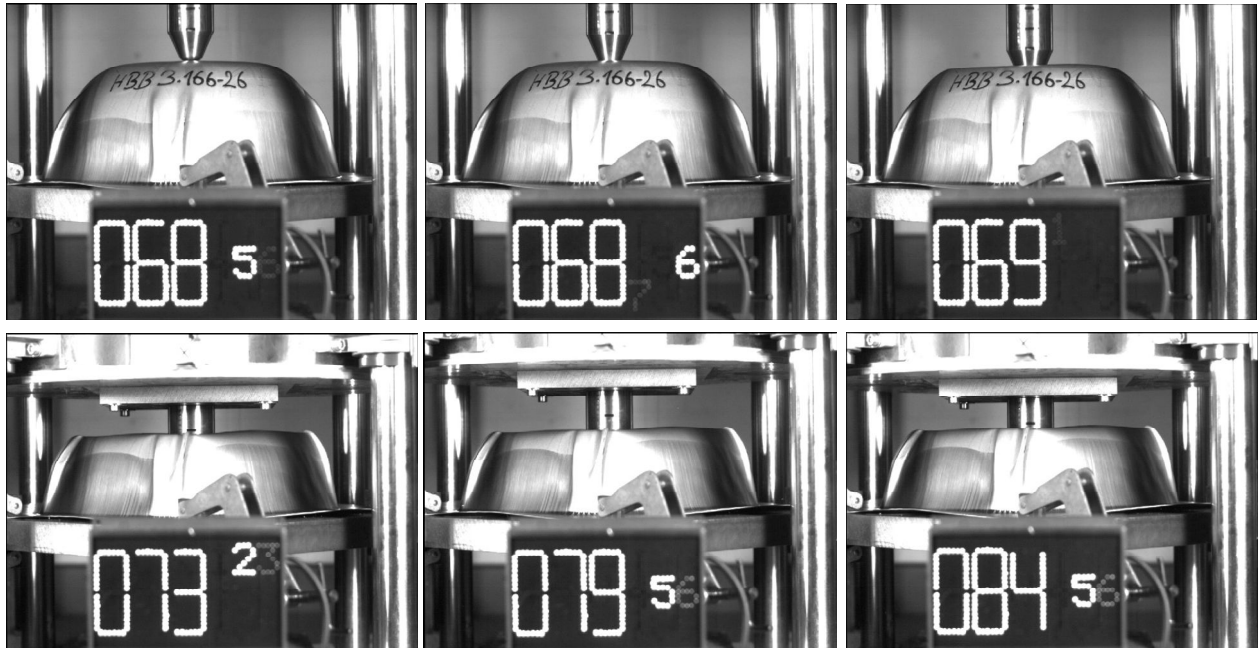


Abbildung 66: Phasen des Einschlags und der Probekörperreaktion beim 4-Faltenbeulen (Probe HBB 3.166)

In der unteren Bildreihe der *Abbildung 66* ist der stark verformte Zustand dargestellt. Im *Bild unten links* ist die tiefste Position von Dorn und eingetauchter Konfiguration aus Kraftmessdose, Aufnahmeplatte und deformiertem Bauteil erreicht. Danach beschleunigen alle Bestandteile wieder nach oben, die Bombe mit Dorn hebt vom deformierten Bauteil ab und erreicht einen oberen Umkehrpunkt (*unten Mitte*). Im letzten Bild dieser Sequenz (*unten rechts*) ist der zweite Einschlag aus niedriger Fallhöhe zu sehen, der zu keiner wesentlichen weiteren Deformation der Probe führt.

Neben dem beschriebenen 4-Faltenbeulmuster kommt es auch zur Ausbildung eines 3-Faltenbeulmusters. Bei dessen Betrachtung ist ein unstabileres Bauteilverhalten in den High-Speed Sequenzen zu beobachten. Am Beispiel der Probe HBB 3.156 soll dies analog betrachtet werden. Wieder ist im ersten Bild der Zustand kurz nach Triggern der Signalverarbeitung dargestellt (*Abbildung 67 oben links*). Im *Bild oben Mitte*, nur eine tausendstel Sekunde später, ist bei genauer Analyse schon eine beginnende Deformation zum instabilen 3-Faltenmuster zu erkennen, die im *Bild oben rechts* dann in eine starke Einfaltung der Bauteilseite mündet. Dieses Versagensverhalten führt zu einem Steifigkeitsverlust und einer deutlich kleineren Resthöhe des Bauteiles, im *Bild unten links* ist die stärkste Deformation von Probe und Kraftmessdose mit Aufspannvorrichtung erreicht, an der Markierung des Dorns ist die starke Deformation des Bauteilbodens abzulesen, da nur noch der obere Teilstrich erkennbar ist. Wieder federt die ganze Konfiguration anschließend nach oben, die Bombe hebt mit dem Dorn vom Bauteil ab und erreicht im *Bild unten Mitte*

den oberen Scheitelpunkt der Bewegung. Aus niedriger Fallhöhe senkt sich die Bombe mit Dorn zum zweiten Einschlag auf das Bauteil (*unten rechts*).



Abbildung 67: Phasen des Einschlags und der Probekörperreaktion beim 3-Faltenbeulen (Probe HBB 3.156)

Im Nachfolgenden sind die beschriebenen Bauteile mit ihren Kraft/Zeit-Verläufen dargestellt. Der Erstschlag des Dorns führt zu einem steilen Kraftanstieg bis zu einem Bereich zwischen 20 und 25 kN, der von einem ersten Kraftabfall etwa 0,025 s nach dem Kontakt zu einer starken Deformation des Bodenrandes mit seinen relativ großen Radien (Übergang ebener Boden zur Zarge) mit einer ersten Ablösung der dortigen Verstärkungslamellen zu einem Steifigkeitsverlust führt und den großen Radius verliert. Durch die Ausbildung des deutlich kleineren Radius (Übergang eingebulter Boden zur Zarge) wächst die Steifigkeit wieder an, und die erforderliche Kraft zur Deformation steigt wieder an. In diesem Bereich ist der größte Unterschied zwischen den beiden Faltenbeulmustern erkennbar. Das 4-Faltenbeulmuster ist stabil ausgebildet und deutlich steifer als das in eine Bauteilseite gelaufene 3-Faltenbeulmuster. An den Messwerten ist eine Differenz der Widerstandskraft von ca. 7 kN abzulesen. Nach ca. 0,05 Sekunden ist der maximale Deformationszustand der ganzen Konfiguration aus Bauteil, Kraftmessdose und Aufspannung erreicht, und die ermittelte Kraft fällt steil ab. Im weiteren Verlauf sind die Reaktionen des Bauteilsystems dargestellt, die Bombe mit Dorn verliert durch Beschleunigung nach oben den Kontakt zum deformierten Bauteil und schlägt erst nach ca. 0,15 s wieder aus niedriger Fallhöhe ein. Die Kraftmessungen liefern in allen Fällen Werte unter 10 kN. Während die verschiedenen Faltenformen bei quasistatischer Beanspruchung

keine nennenswerten Widerstandsunterschiede zeigen, erkennt man beim Crash mit einer Aufprallgeschwindigkeit des Dornes von 5,1 m/s deutliche Unterschiede im Beulwiderstand, siehe *Abbildung 68*.

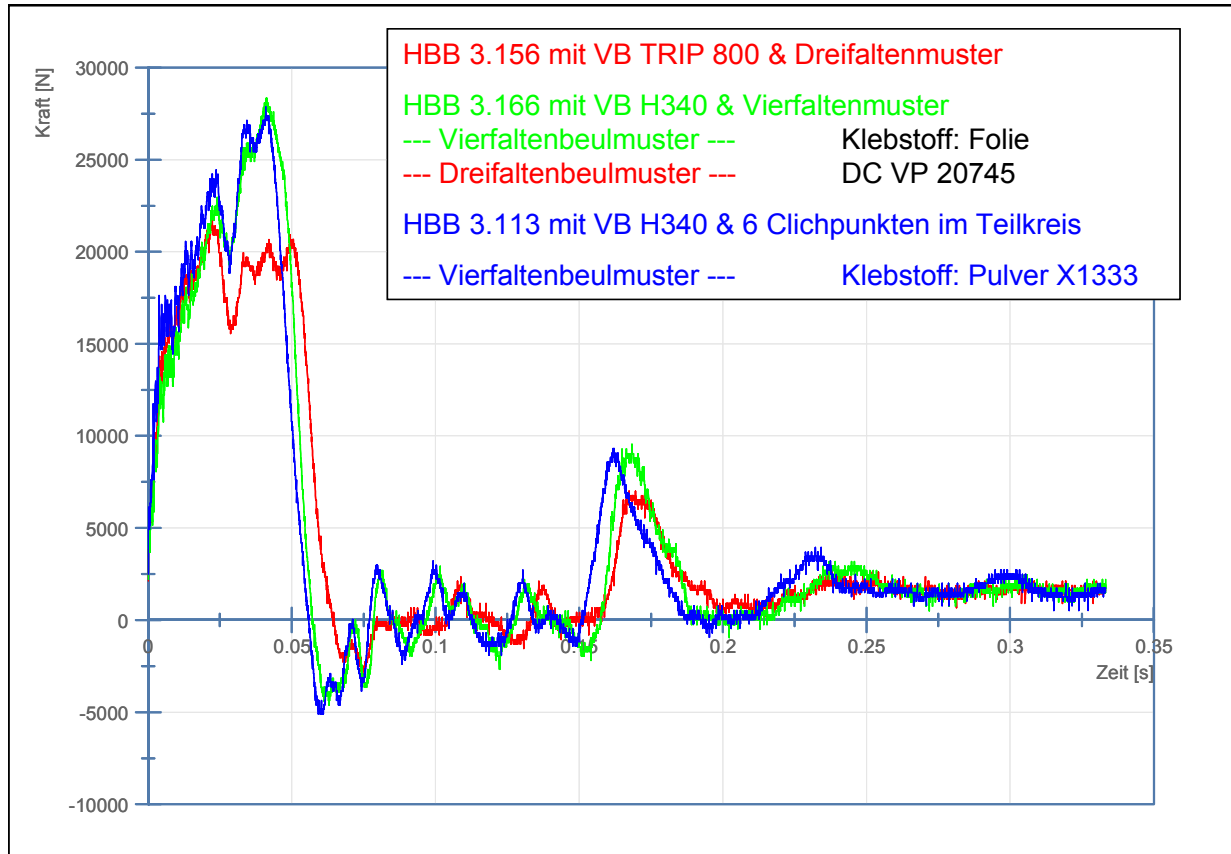


Abbildung 68: Vergleich der Kraftverläufe bei unterschiedlichen Beulmustern im Crashversuch, das Dreifaltenbeulmuster (rot) führt zu geringerer Energieaufnahme; alle Verstärkungsbleche lösen sich nur im Lamellen-Randbereich vom Grundblech (H220)

Die Ausbildung der verschiedenen Faltenbeulmuster könnte möglicherweise durch eine günstige oder ungünstige Ausrichtung der Bleche (Grund- und Verstärkungsblech) zueinander beeinflusst sein, wenn sich die anisotropen Eigenschaften verstärkt auswirken. Es wurden jedoch keine systematischen Untersuchungen zur Wirkung der Walzrichtungseinflüsse der Bleche bei den Bauteilversuchen unternommen. Die Bauteilqualität bezüglich Flanscheinzug, Faltenbildung und Ausformung gaben keine Anhaltspunkte bezüglich eines wesentlichen Einflusses. Bei der Serienherstellung wurde auf die Walzrichtung daher nicht explizit geachtet.

Im gleichen Diagramm ist der Kraftverlauf einer weiteren Probe (blauer Kraft-Zeit-Verlauf) mit der gleichen Blechkombination, jedoch anderem Klebstoff (Pulver

X1333) und einem zusätzlichen Muster aus mechanischen Fügepunkten (6 Clinchpunkte auf einem Teilkreis in der Nähe des Lochkreises des Verstärkungsbleches) dargestellt, das einen analogen Verlauf zur Probe HBB 3.166 mit 4-Faltenbeulmuster zeigt und das Verstärkungsblech, im Gegensatz zu mehreren Proben mit dem Pulverklebstoff X1333, durch die mechanische Verstärkung nicht durch völliges Ablösen verliert.

Eine Betrachtung zum Einfluss der beiden Grundblechwerkstoffe ist in Abbildung 69 dargestellt. Das dickere und steifere Grundblech H340 (braun) zeigt den steileren Kraftanstieg, die Deformation der Gesamtkonfiguration ist jedoch beim dünneren und weicheren Grundblech H220 um etwa 0,015 s später abgeschlossen. Die Verwendung des Verstärkungsbleches H340 in 1,5 mm in beiden Fällen führt nach dem Einbeulen des großen Radius am Übergang Bauteilboden zur Zarge ab etwa 0,025 s nicht mehr zu einem weiteren starken Kraftanstieg bei der Kombination aus gleichen Blechwerkstoffen (H340 mit H340). Das dünnere und weichere Grundblech kann jedoch noch einen Steifigkeitsanstieg (von niedrigerem Niveau) erzielen. Nach Entlastung und Rückfederung der Bombe mit Abheben schlägt die Bombe beim zweiten Mal aus niedrigerer Fallhöhe früher ein, als bei der Probe mit dem dickeren und steiferen Grundblech.

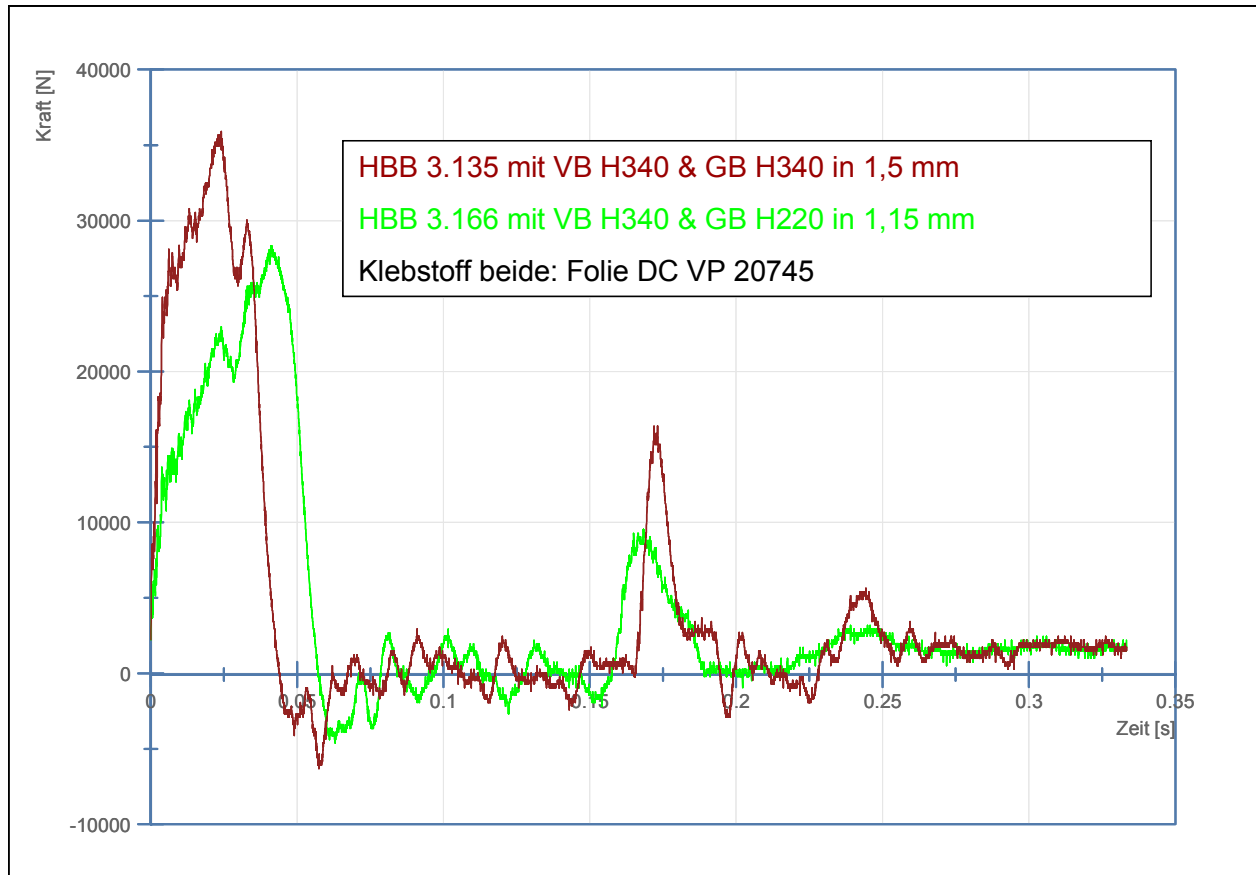


Abbildung 69: Vergleich der Kraftverläufe mit unterschiedlichen Grundblechen im Crashversuch

In *Abbildung 70* ist das erwünschte Deformationsverhalten am Beispiel des Napfes mit der größten Resthöhe (HBB 3.135 mit 61,7 mm) noch einmal dargestellt, unmittelbar nach dem Einschlagen bildet sich ein 4-Faltenmuster aus, der enge Deformationsradius führt zur stark schälenden Beanspruchung der Lamellen des Verstärkungsbleches und diese delaminieren Schritt für Schritt vom Grundblech. Durch die zähe Haftung des Klebstoffs am Grundblech tritt keine schlagartige großflächige Delamination am Verstärkungsblech auf, sondern die Deformation des Grundblechbodens wird auf den Verbund übertragen und die Verstärkung trägt zum Energieverzehr vollständig bei. Die Deformation des Bauteils wird daher auf verhältnismäßig hohem Niveau gestoppt und es verbleibt die größte Resthöhe im Vergleich. Die eingesetzte Blechkombination aus Grundblech H340 in 1,5 mm mit dem gleichen Werkstoff als Verstärkungsblech trägt zu diesem gutmütigen Bauteilverhalten entsprechend bei.

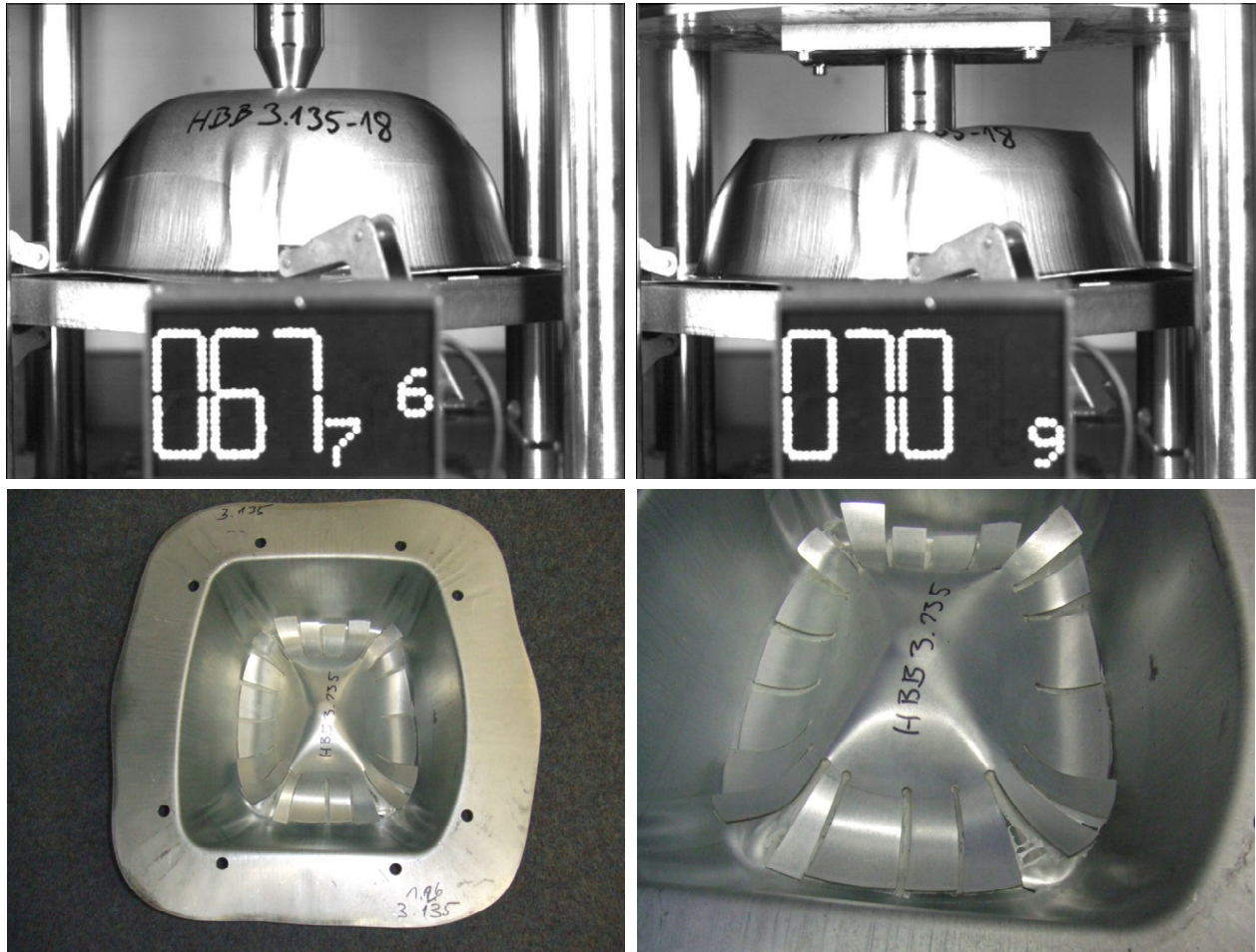


Abbildung 70: Bauteil mit maximaler Resthöhe bei 5,1 m/s und 190 kg durch starke Verformung des Doppellagenbereichs, nur die Lamellen im Randbereich sind durch die geometriebedingte Kinematik vollständig abgelöst

Zur Untersuchung des Einflusses von beschleunigt gealterten Proben ist im Bild 71 die Kombination aus Grundblech H220 in 1,15 mm und Verstärkungsblech TRIP 800 in 1,25 mm mit dem Pulverklebstoff X1333 in einem Kraft-Zeit-Diagramm dargestellt. Die Verläufe liegen weitgehend übereinander, eine geringfügig geringere Maximalkraft beim ersten Schlag ist beim gealterten Probekörper zu verzeichnen. Auch das Ablöseverhalten des Verstärkungsbleches ist ähnlich, es wird eine geringe Resthaftung des Bleches am Grundblech beim gealterten Probekörper registriert, während der ungealterte Probekörper das Verstärkungsblech vollständig verloren hat.

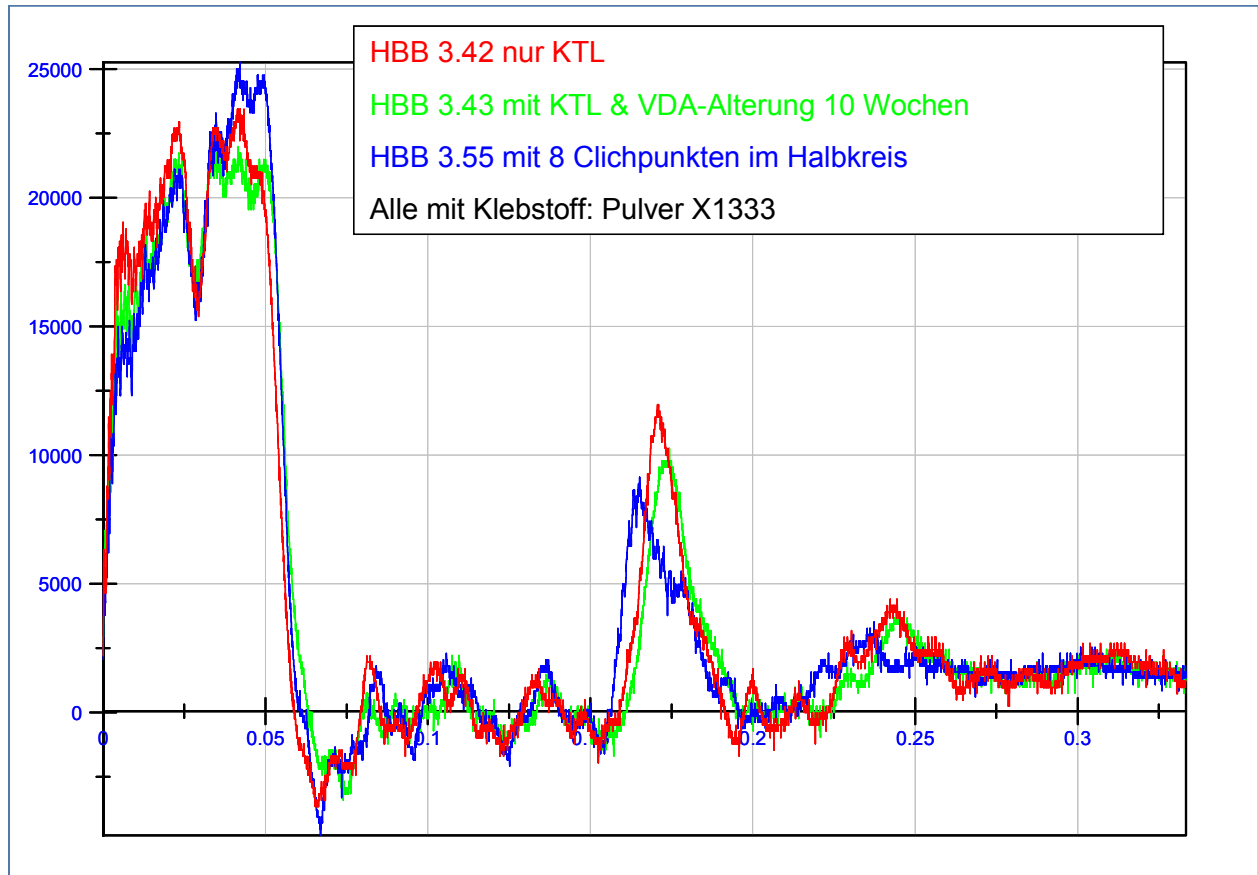


Abbildung 71: *Vergleich der Kraftverläufe zum Einfluss der Alterung mit dem 10 Wochen VDA modif. Test im Crashversuch, Grundblech jeweils H220 in 1,15 mm, der Napf 3.55 ist ungealtert, jedoch nach dem Tiefziehen und vor der Aushärtung mit 8 Clinchpunkten im Halbkreis zusätzlich mechanisch fixiert worden*

Weiterhin ist im Diagramm der Verlauf von einer Probe mit einem Clinchmuster dargestellt, die für Aushärteversuche mit Clinchpunktfixierung präpariert wurde. Die in einem Halbkreis auf den Verstärkungsblechlamellen angeordneten Clinchpunkte verbessern tendenziell den Verbund beim Beulen am Übergang zwischen ebenem Boden und Zarge, sorgen daher auch für einen erhöhten Widerstand beim Weiterbeulen nach einem ersten Abschälen des Verstärkungsblechbereiches (Einbruch der Kraft bei etwa 0,025 s). Durch die nur teilweise (Halbkreis) zusätzliche mechanische Verbindung ist der Versteifungseffekt jedoch begrenzt, und das Ablöseverhalten entspricht dem der gealterten Probe; die mit Clinchpunkten versehene Hälfte sorgte für eine gemeinsame Deformation von Grund- und Verstärkungsblech in diesem Probekörperbereich.

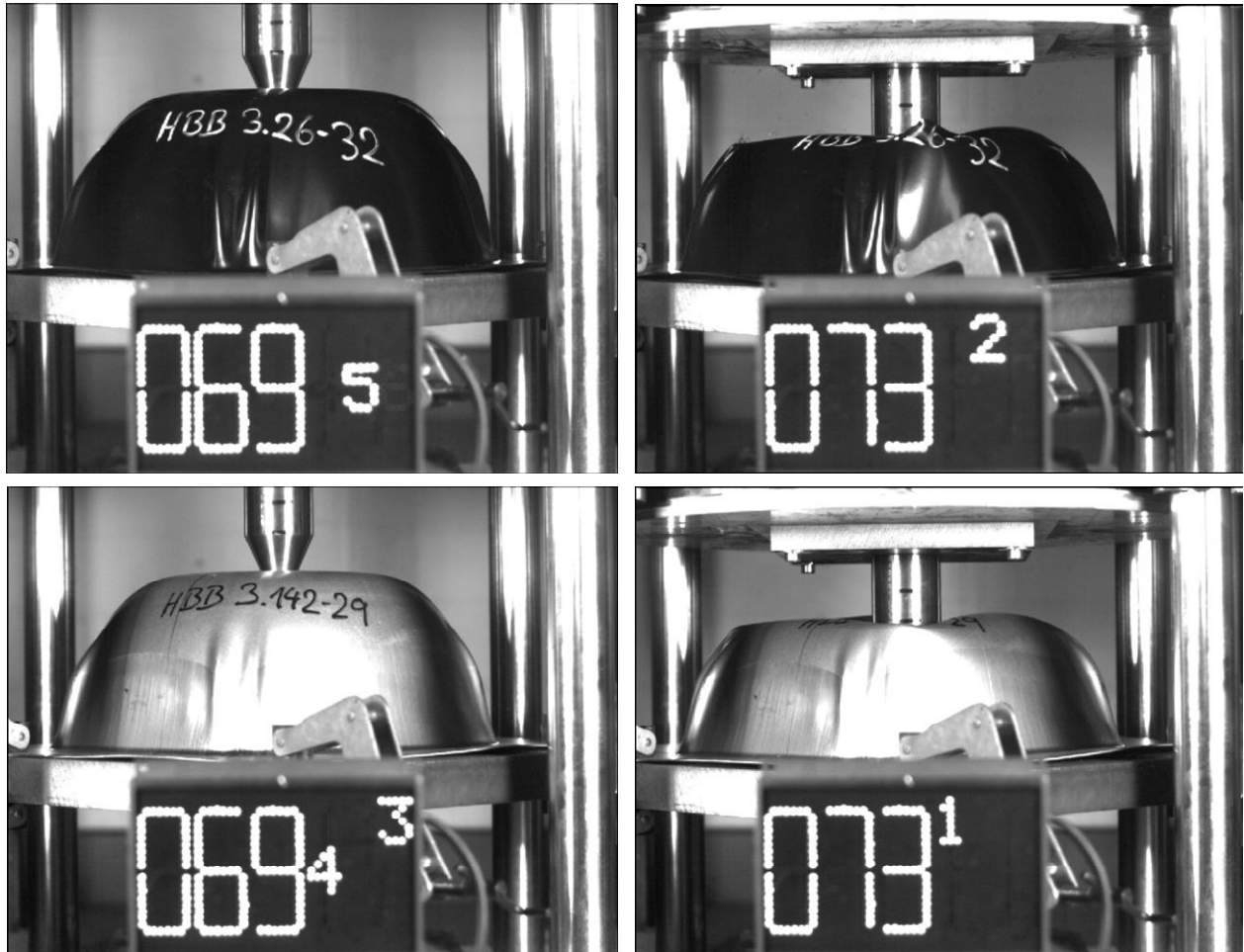


Abbildung 72: Vergleich der Klebstoffe am Beispiel der Kombination GB H340 VB TRIP 800, oben HBB 3.26 mit Pulverklebstoff X1333, unten HBB 3.142 mit Folienklebstoff DC VP 20745

Am Beispiel der Blechkombination aus mittelfestem Grundblech H340 in 1,5 mm mit dem hochfesten Verstärkungsblech TRIP 800 in 1,25 mm soll noch einmal generell der Einfluss der beiden untersuchten Klebstoffe auf das Bauteilverhalten diskutiert werden. In *Abbildung 72* und *Abbildung 73* sind die Bauteildeformationen und die Kraft-Zeit-Verläufe dargestellt. Beide Probekörper zeigen ein nahezu identisches Deformationsverhalten, die Resthöhen sind gleichartig, und die Kraftverläufe liegen gut übereinander. Der einzige gravierende Unterschied ist das vollständig gelöste Verstärkungsblech beim HB 3.26 mit dem Pulverklebstoff, das sich offensichtlich jedoch erst nach dem Abklingen des Erstschlages vom Grundblech abgeschält hat, sonst wären die Kraftverläufe stärker voneinander abgewichen.

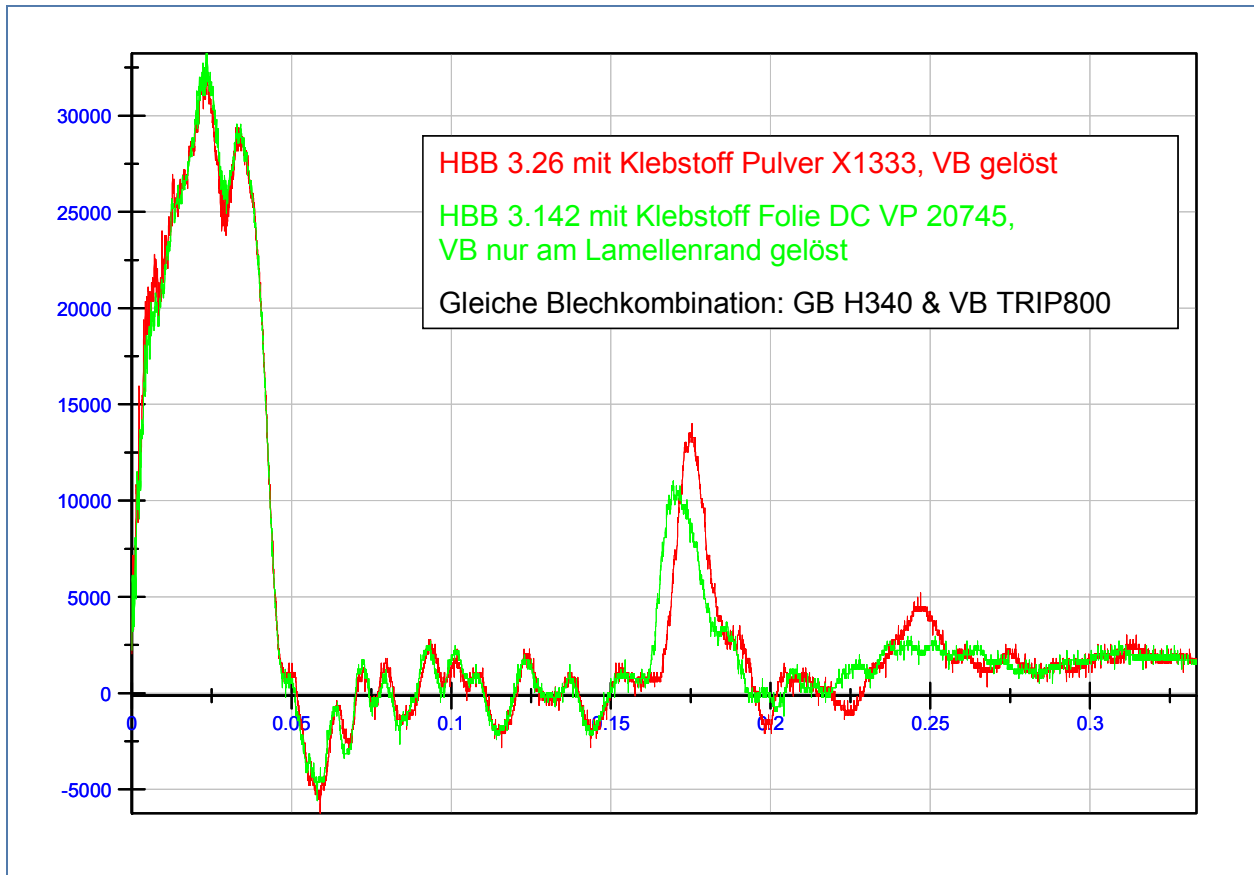


Abbildung 73: Vergleich der Kraftverläufe zum Einfluss der Klebstoffe im Crashversuch, Bleche jeweils GB H340 in 1,5 mm, VB TRIP 800 in 1,25 mm, Verlauf weitgehend identisch, jedoch lösen die Verstärkungsbleche beim Pulverklebstoff X1333 ab und verbleiben in der Folienvariante DC VP 20745 am Grundblech

Das Deformations- und Ablöseverhalten spiegelt die Klebstoffelastizität bzw. Klebstoffsprödigkeit wieder. Der Pulverklebstoff X1333 erzielte zwar die höheren Klebfestigkeiten in den Kleinteilversuchen, kann jedoch aufgrund seines relativ sprödharten Verhaltens bei Raumtemperatur nur eine begrenzte Umformung ertragen und neigt zum Delaminieren auf den verzinkten Oberflächen der Blechwerkstoffe. Im Gegensatz dazu erlaubt der Folienklebstoff DC VP 20745 mit seiner weicheren Konsistenz auch im vernetzten Zustand die hohen lokalen Verformungen mit deutlich verringerter Delamination von den verzinkten Blechen und führt zu einem guten Energieverzehr bei Crashbeanspruchungen im untersuchten Geschwindigkeitsbereich.

7.3 Korrosionsuntersuchungen

Die beschleunigte Alterung von Bauteilen kann durch verschiedenartige thermische oder korrosive Beanspruchungen hervorgerufen werden. Zum Schutz vor Alterung wurde eine Anzahl Bauteile in einem Serienprozess mit der kathodischen Tauchlackierung beschichtet, siehe Kapitel 7.1. Dem Verstärkungsblechrand kommt sowohl bei der Beschichtung mit Schutzlack als auch beim korrosiven Angriff besondere Bedeutung zu.

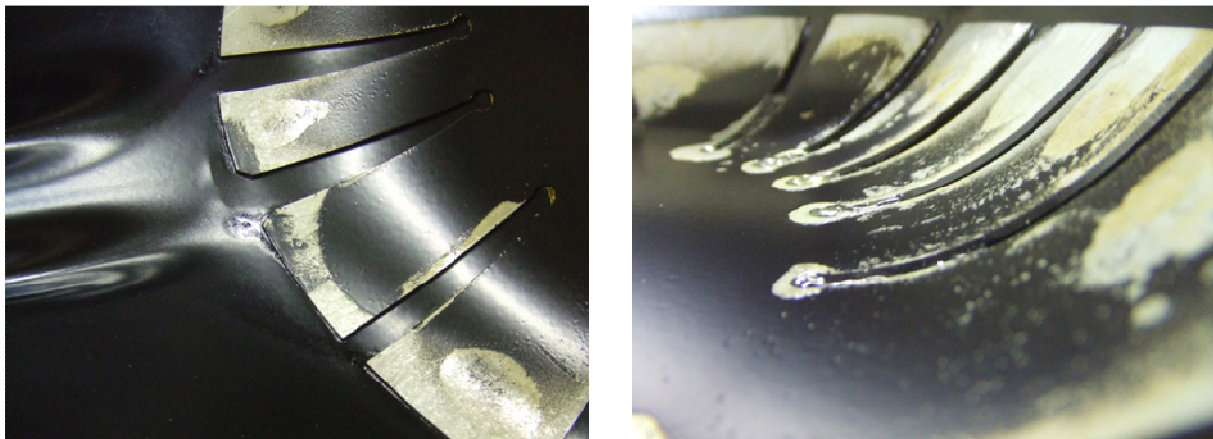


Abbildung 74: Klebung der Randlamellen des Verstärkungsbleches beim Pulverklebstoff Vestamelt X1333

Die Lamellen sind bei Bauteilen mit Pulverklebstoff teilweise nicht mit KTL beschichtet, weil dort schon eine dünne Schicht angeschmolzener Klebstoff durch Pulverumgriff als Kunststoffbeschichtung anhaftet; im Bild rechts ist eine unzureichende Anbindung der Lamellen an das Grundblech zu beobachten, was durch starke Rückfedereffekte begründet ist.

Im Bereich der Lamellen besteht eine besonders kritische Zone für korrosiven Angriff durch die radial angeordneten Schlitze und die durch starke Rückfederungseffekte teilweise unzureichende klebtechnische Anbindung der Lamellen an das Grundblech. Durch die zyklische Beanspruchung der Probekörper mit einer Schädigung durch Anriss und Rissausbreitung vom Rand- bzw. Lamellenbereich des Verstärkungsbleches werden Bereiche geöffnet, die offensichtlich auch von den Vorbereitungsbadern zur KTL-Beschichtung und dem wasserbasierten Lack selbst unterwandert wurden. Dies wurde bei vielen der mit KTL beschichteten Probekörper beobachtet und deutet auf eine unzureichende Klebung speziell der Lamellen auf dem Grundblech hin. Dies ist durch die erhebliche Rückfederneigung der Lamellen begründet, die im Aushärtvorgang nach der Umformung durch Erhitzen und Aufschmelzen des Klebstoffs in einer Heißpresse mit Anpressdruck über den Stempelkopf erfolgte, der auch bei der Umformung zur Ausformung des

Verstärkungsbereichs benutzt wurde. Durch die ansonsten freien Randbedingungen (fehlender Gegendruck, keine Flanschfixierung durch Niederhalter) und reduzierten Anpressdruck der Heizpresse konnten die Probekörper nicht perfekt maßhaltig ausgehärtet werden, speziell Defizite der Klebung im Bereich der Lamellen stellten sich in einzelnen Bauteilbereichen ein, *Abbildung 74* rechts.

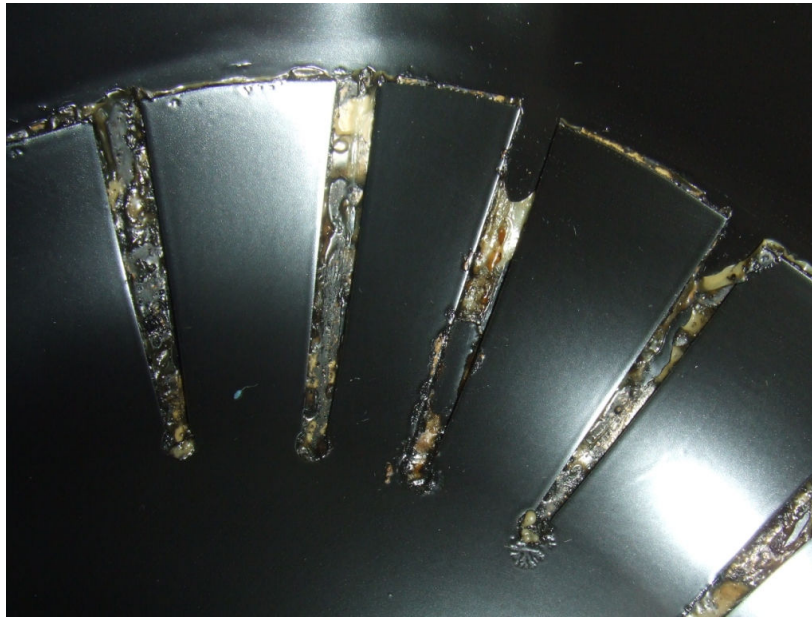


Abbildung 75: Klebung im Lamellenbereich von Tiefziehnapfen mit Folienklebstoff DC VP 20745

Der Folienklebstoff, der in den Schlitten des Verstärkungsbleches nicht extra ausgeschnitten wurde, bedeckt das Grundblech. Die unregelmäßige Struktur, *Abbildung 75*, entsteht durch den Faltenwurf der Klebefolie beim Tiefziehen und durch Einfall der Falten beim Wiederaufschmelzen in der Wärmebehandlung zur KTL-Trocknung.

Die zähflüssige Schmelzviskosität der eingesetzten Klebstoffe im heißen Zustand zur Anbindung an die metallischen Substrate bedingt eine begrenzte adhäsive Haftung und auch eine eingeschränkte Dichtwirkung gegen dünnflüssige Medien, wie wässrige Vorbereitungsbäder zur KTL-Lackierung, den Tauchlack selbst oder auch wässrige korrosive Medien im Praxiseinsatz der geklebten Bauteile. In *Abbildung 76* ist der Zusammenhang zwischen nieder- und hochviskosen Flüssigkeiten auf rauen Oberflächen dargestellt. Die niedrigviskose Flüssigkeit benetzt die tiefen Oberflächenstrukturen, während der zähflüssige Stoff nur die erhabenen Spitzen der Oberfläche benetzen und damit keine ausgeprägte Dichtwirkung gegen eindringende oder unterwandernde Medien aufbauen kann.

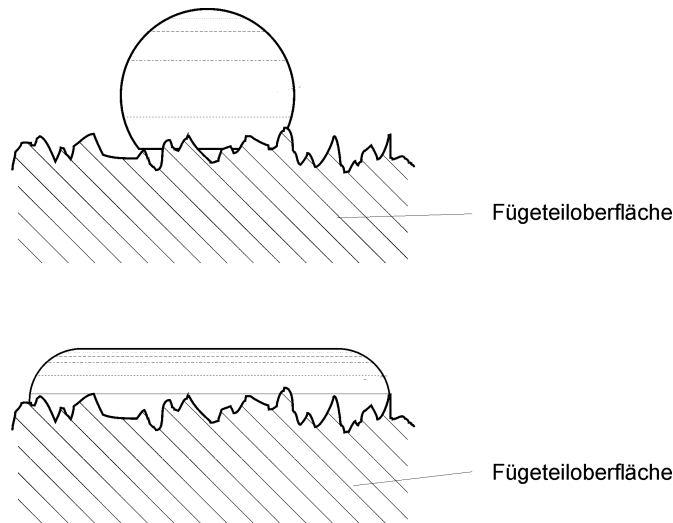


Abbildung 76: *Effekt der Benetzungsfähigkeit unterschiedlich viskoser Flüssigkeiten nach [Hab09]*

Im Falle der hydromechanisch tiefgezogenen Bauteile sollte neben der Lackierfähigkeit in rohbauptypischen Serienprozessen auch die Beständigkeit gegen starken korrosiven Angriff untersucht werden. Eine Methode, die ursprünglich zur Untersuchung der Lackhaftung für die Automobilfertigung entwickelt wurde, wird heute auch häufig in der Klebtechnik angewendet. Ein modifizierter Klimawechseltest nach VDA 621-415 [VDA82] besteht in einem Wochenzyklus aus einem Tag Klimawechsel, zunächst warmfeucht, gefolgt von trocken-heiß, gefolgt von einem Herunterkühlen auf Minustemperaturen bis -20 °C mit abschließendem Auftauen. Nach zwei Tagen bei Standardbedingungen wiederholt sich diese dreitägige Sequenz, um die Woche mit einem Tag Salzsprühen mit einer 5 %-igen NaCl-Lösung abzuschließen, siehe *Abbildung 77*.

Dieser Wochenzyklus wurde zehn Wochen lang durchgeführt. Wegen der relativ großformatigen Bauteile und zur Sicherstellung der ausreichenden Exposition des Wechselklimas und der Salznebelbeaufschlagung innerhalb der Näpfe wurden in zwei Versuchsreihen nacheinander insgesamt zwei mal acht Bauteile über 20 Wochen beschleunigt gealtert werden. Dabei wurden Bauteile aus der abschleißenden großen Bauteilserie mit KTL beschichtet und beide Klebstoffe berücksichtigt.

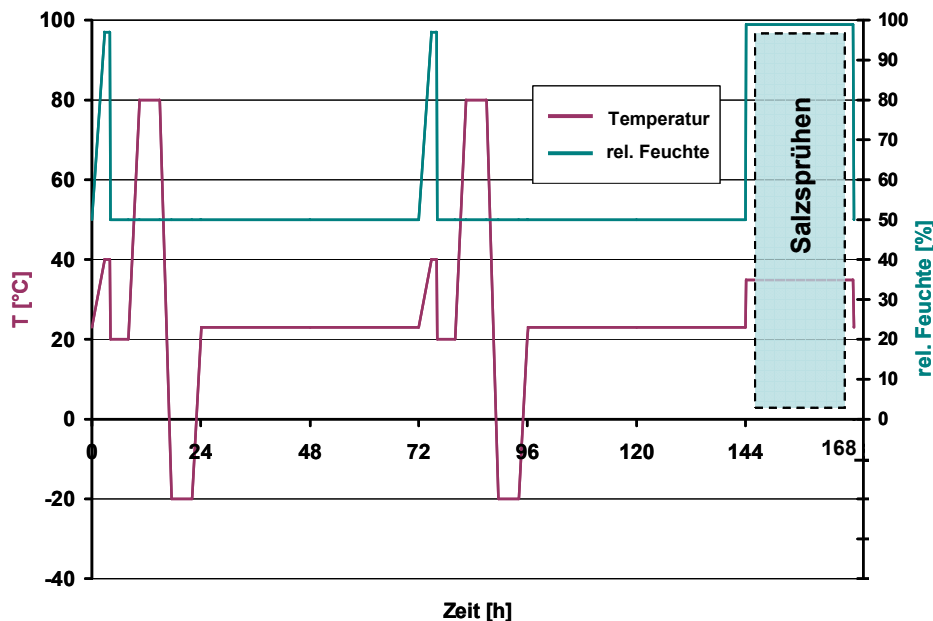


Abbildung 77: *Temperatur- und Feuchteprofil des einwöchigen Klimawechselzyklus mit einem Tag Salzsprühen in 5 %-iger Natrium-Chlorid-Lösung als modifizierter VDA 621-415*

Die Probenahme für Schlitze zur Beurteilung von korrosivem Angriff auf den Blechwerkstoffen erfolgt nach beschleunigter Alterung und einer zyklischen Beanspruchung im Bereich der Lamellen des Verstärkungsbleches, auch mit Übergang zum geschlossenen Bodenbereich des Verstärkungsbleches. Die so beschleunigt gealterten Bauteile sollten für vergleichende Untersuchungen und abschließend durch Trennen des Verstärkungsbleches vom Grundblech auch einer technischen Analyse der Grenzschichten zwischen Klebstoff und Substraten zugänglich gemacht werden.

Die Analyse des Eindring- bzw. Unterwanderungsverhaltens der Lackvorbereitungsbäder und des Tauchlacks selbst zeigte bei vielen Bauteilen eine ausgeprägte Unterwanderung der Lamellen auf dem gesamten Umfang, während der flache Boden im Innenbereich des Lochkreises am Verstärkungsblech in der Regel nicht sichtbar durch Flüssigkeiten unterwandert wurde. Lackabscheidungen treten daher noch im Bereich der Löcher des Verstärkungsbleches auf. Die starke Unterwanderung im Lamellenbereich der Verstärkungsbleche ist hauptsächlich auf die Umformung mit einem lokalen Haftungsverlust durch Relativbewegungen und Rückfederungseffekte zurückzuführen. Entsprechend wurde bei Bauteilen mit dem härtesten Verstärkungsblech TRIP 800 der Effekt besonders deutlich und häufiger beobachtet, während Verstärkungen mit der mittelfesten Blechgüte H340 LAD

bessere Anformungen bei Entnahme aus der Presse zeigten und weniger ausgeprägte Verfärbungen im Bereich der Lamellen aufwiesen.

Die jeweils zehnwöchige Lagerung in Klima- und Salzsprühkammer überstanden die Bauteile zunächst ohne optisch sichtbare Korrosion (Rotrost), lediglich starke Salzurückstände hafteten den Bauteilen an.



Abbildung 78: Probenahme aus einem beschleunigt gealterten Tiefziehnapf im verstärkten Bodenbereich (HBB 3.06, GB H340, VB TRIP 800, Vestamelt X1333, KTL, VDA modif. 10 Wochen, zyklisch getestet auf ± 3 kN-Horizont)

Bei einer anschließenden Probenahme aus beschleunigt gealterten Näpfen wurden jedoch Korrosion zwischen den Blechen, angegriffene Zinkschichten und auch teilweise angegriffener Grundwerkstoff unter den Zinkschichten beobachtet. In den nachfolgenden Schliffbildern sind diese Effekte beispielhaft dargestellt, eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen den beiden untersuchten Klebstoffvarianten (Pulverklebstoff Vestamelt X 1333 und Folienklebstoff DC VP 20745) konnte nicht festgestellt werden, da beide Klebstoffe einen ausgeprägten hochviskosen Hotmelt-Charakter aufweisen. Die Dichtwirkung gegen wässrige Medien ist daher nur unvollkommen ausgeprägt

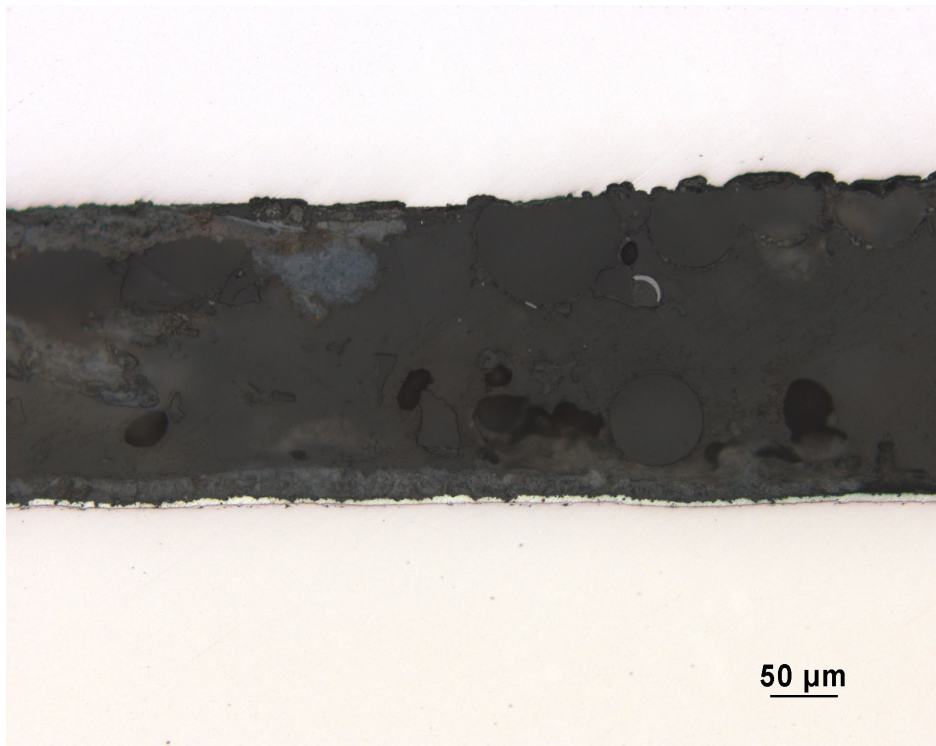


Abbildung 79: Schliffbild einer Klebung aus HBB 3.06, Entnahmestelle H.6-3, die Zinkschicht am Substrat oben ist nicht mehr zu erkennen, unten angegriffen

In Bild 79 ist die Entnahmestelle H.6-3 am äußeren Randbereich der Verstärkungsblechlamellen dargestellt. In diesem Bereich besteht die Gefahr einer unzureichenden Anbindung des Verstärkungsbleches an das Grundblech, da durch die hohe Rückfederneigung des hochfesten Verstärkungsbleches aus TRIP 800 in 1,25 mm Stärke in mehreren Fällen beim zweiten Klebeschritt in der Bauteilherstellung keine perfekte Klebung erzielt werden konnte. Es bildeten sich daher teilweise Kavitäten zwischen den geringfügig hochstehenden Verstärkungsblechlamellen und dem Grundblech aus, die nicht durch verlaufenden Klebstoff im heißen Zustand gefüllt werden konnten. Das Grundblech verliert daher teilweise die Klebeschichtung, wird von den Vorbereitungsbadern der KTL-Beschichtung jedoch nur teilweise erreicht, und der KT-Lack dringt nicht bis zu allen ungeschützten Stellen vor. In der beschleunigten Alterung über 10 Wochen im Wechselklima und Salzsprühnebel können eingedrungene korrosive Medien eine entsprechende Korrosion hervorrufen. Am Verstärkungsblech aus TRIP 800 (Bildrand unten) ist die Zinkschicht noch erkennbar, jedoch teilweise angegriffen. Am Grundblech aus H340 LAD (oberer Bildrand) ist eine Zinkschicht nicht mehr erkennbar. Die unterschiedlich ausgeprägte Korrosion ist hauptsächlich auf die Beschichtungstechnik zurückzuführen. Das Verstärkungsblech wird in ebenem

Zustand mit Klebstoff beschichtet und in einem ersten thermischen Schritt angeschmolzen. Damit wird eine intensive Beschichtung des Bleches erzielt, die sich in den meisten Fällen als besser auf dem Blech haftend herausgestellt hat als die Klebung zur Gegenseite, dem Grundblech. Die Haftung der Klebung zur Doppellage durch erneutes Aufschmelzen der Klebstoffschicht ist durch unterschiedliche Randbedingungen, wie etwa Lufteinschlüsse, verringert und versagt unter mechanischer Beanspruchung in deutlich mehr Fällen adhäsiv als auf der erstmalig beschichteten Blechseite.

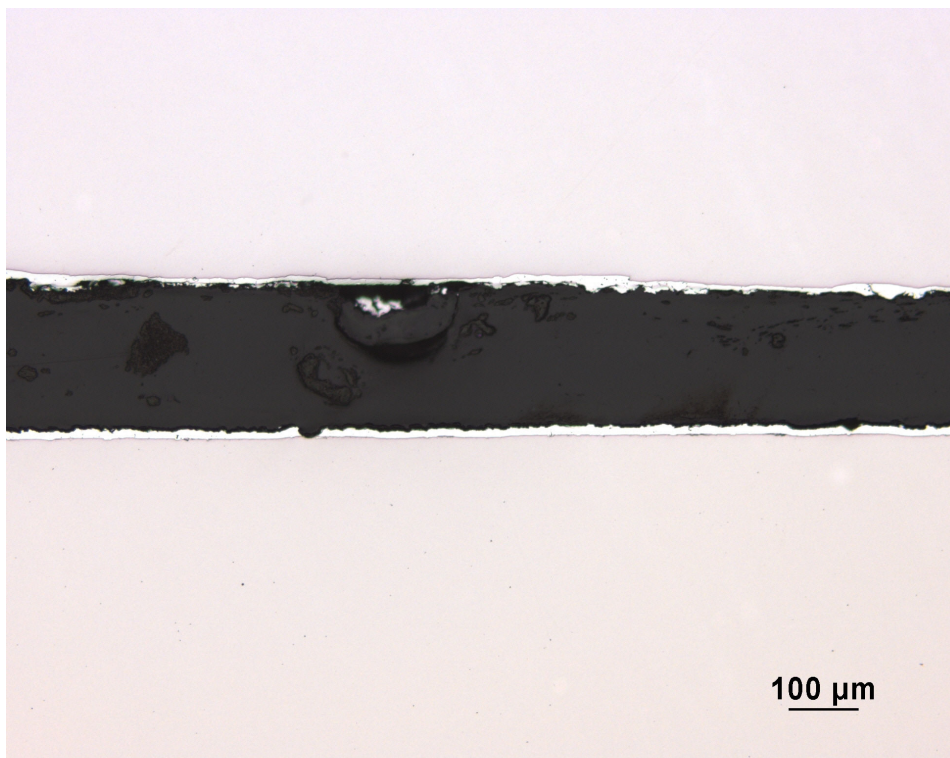


Abbildung 80: Schliffbild einer Klebung aus HBB 3.06, Entnahmestelle H.6-4

Im Bild 80 ist das Schliffbild einer Probe aus der Entnahmestelle H.6-4 aus demselben beschleunigt gealterten und anschließend zyklisch getesteten Napf HBB 3.06 dargestellt. Im Gegensatz zur Entnahmestelle (H.6-3) aus dem äußeren Lamellenbereich sind hier beide Zinkschichten erhalten, ein offensichtlich geringerer korrosiver Angriff hat stattgefunden, weil die Stelle weiter innen im wenig verformten Bodenbereich ohne Rückfedereffekte offensichtlich besser geklebt wurde. Jedoch liegt die Entnahmestelle auch im Lamellenbereich des Verstärkungsbleches, dass während der Umformung eine Relativbewegung in tangentialer Richtung erfahren hat und durch die Schlitzung des Verstärkungsbleches generell noch eine große Angriffsfläche für Korrosion bietet.

Auf der Suche nach Korrosionsprodukten wurden auch an geöffneten Proben Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop (REM) und einer zugehörigen EDX-Einheit³ zur spektralen Analyse durchgeführt. Dafür wurde die elektrisch nichtleitende Klebstoffschicht mit Gold bedampft, um sie für das Verfahren leitfähig zu machen. In Bild 84 ist die Struktur der geöffneten Klebschicht aus Folienklebstoff DC VP 20745 in der Übersicht dargestellt. Weiterhin ist das EDX-Spektrum einer Messstelle auf dem Bild hinterlegt. Das Spektrum zeigt neben den Metallen Fe und Zn auch Chlor aus der Beaufschlagung mit Salznebel und einen hohen Sauerstoffanteil von 31.55 Mass.-%.

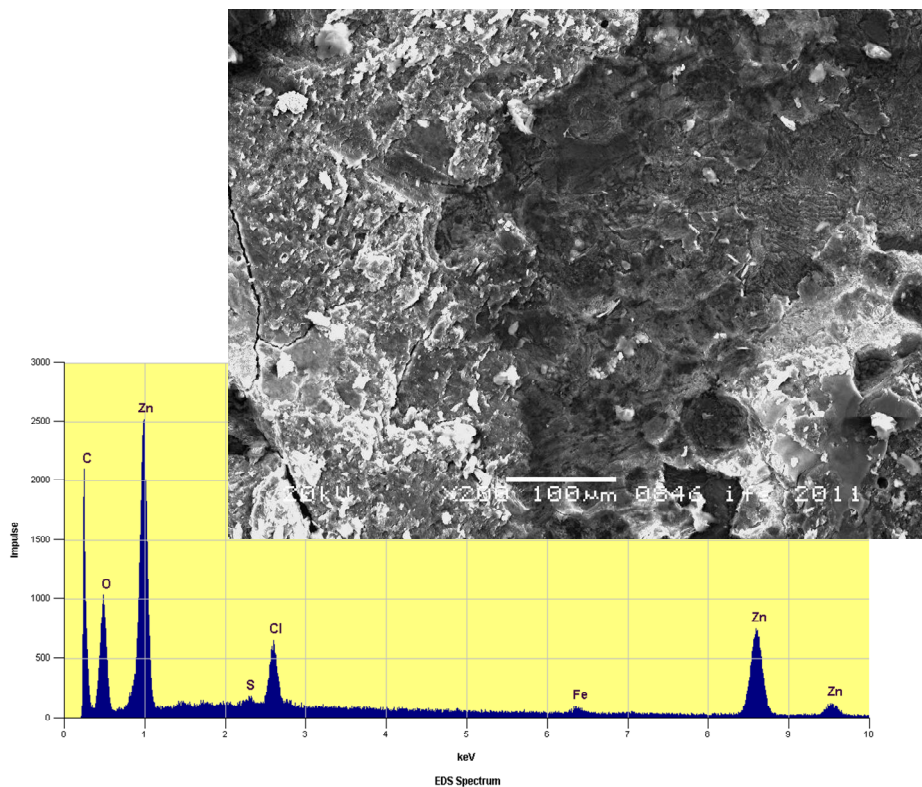


Abbildung 81: *Überblick einer geöffneten Probe mit Klebstoffbeschichtung und KT-Lackresten im REM, die EDX-Messung liefert die Elemente Cl mit 3.52 Mass.-% und Sauerstoff mit 31.55 Mass.-%*

An einer anderen Stelle (Abbildung 82) ist auch das Element Phosphor aus dem Phosphatierungsbad zur KTL-Vorbereitung gemessen worden. Dies ist ein weiterer Beleg für eine Klebschichtunterwanderung durch diese wässrige

³ energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)

Beschichtungslösung. Der Sauerstoffanteil in dieser Probe ist jedoch mit 7.43 Mass.-% erheblich niedriger als der Durchschnitt aller gemessenen Proben.

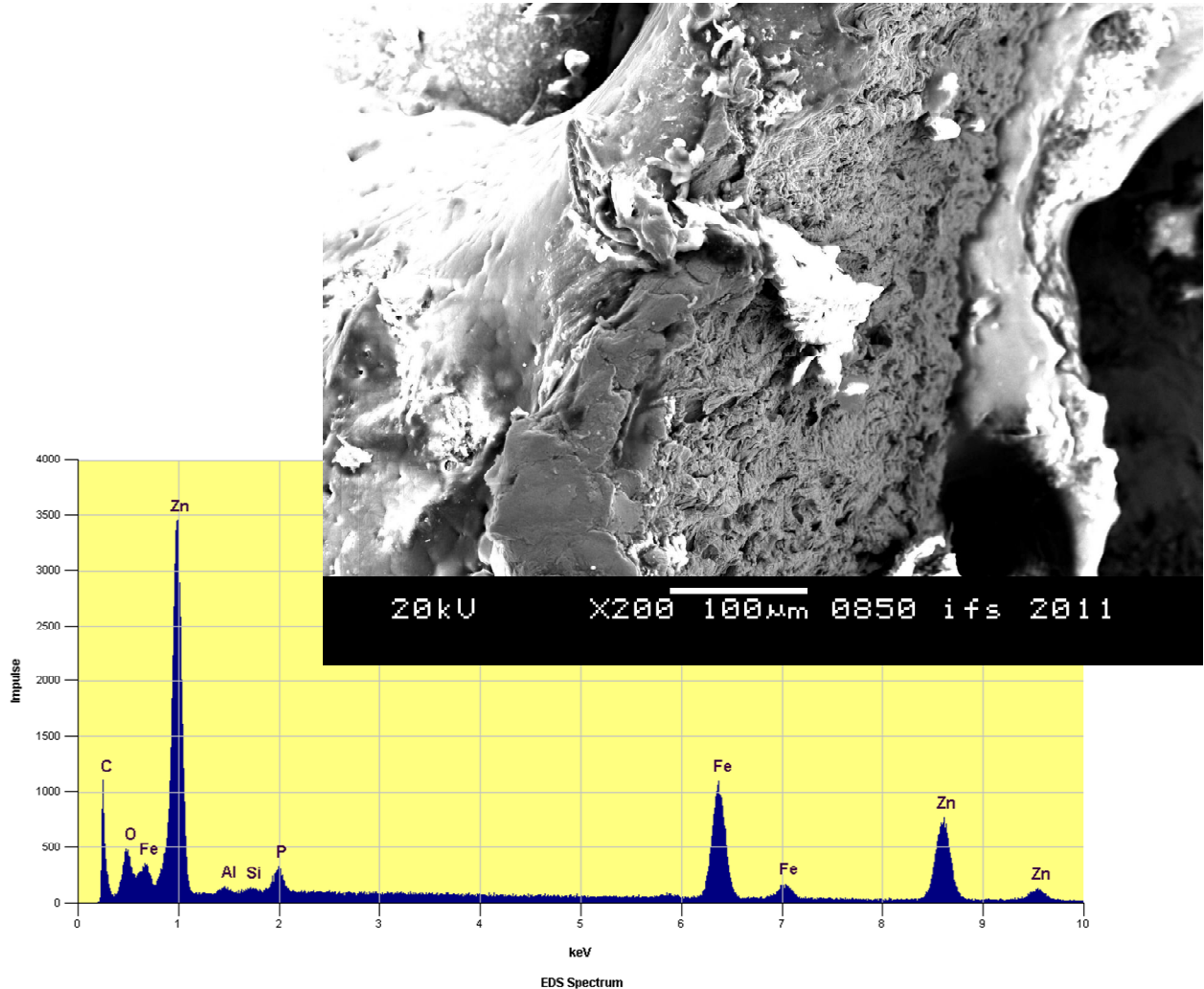


Abbildung 82: EDX-Spektrum an einer Stelle mit Phosphorablagerungen (1.26 Mass.-%) aus der Phosphatierung zur KTL-Vorbereitung mit geringem Anteil an Sauerstoff (7.43 Mass.-%)

Die Betrachtung einer beschleunigten Alterung im Klimawechseltest mit korrosiver Salznebelbeaufschlagung nach VDA 621-415 lieferte trotz Serien-KTL-Beschichtung der Bauteile die Erkenntnis, dass die betrachteten Klebstoffe für sich betrachtet in der derzeitigen Verfahrenstechnik eine zu geringe Abdichtwirkung gegen wässrige Medien aufbauen und der Beschichtungsprozess auf wässriger Basis derzeit keinen absolut zuverlässigen Schutz gegen Korrosion darstellt.

7.4 Zyklische Bauteiluntersuchungen

Neben den quasistatischen und hochdynamischen Beuluntersuchungen sollten auch zyklische Versuche an Bauteilen in der Federbeindomgeometrie, gefertigt mit der Hydro Bonded Blanks Technik, durchgeführt werden. Die Bauteilproben sollten in Anlehnung an zyklische Untersuchungen an Rechteckknäpfen im Projekt FAT/AVIF A 195 durchgeführt werden. Dort wurde eine Kraffteinleitungsstange mittig senkrecht in den verstärkten Bodenbereich eingebaut (fest verschraubt) und der Napf am Flansch auf einem Spannungsfeld fixiert. Die Kraffteinleitungsstange wurde durch einen Hydropulser angetrieben. Im vorliegenden Projekt wurde eine analoge Fixierung und Lasteinleitung mittig in den verstärkten Boden realisiert.

Durch die zur Verfügung stehende zyklische Maschine mit vier relativ eng angeordneten Säulen mussten die Probekörper geringfügig am Flansch besäumt werden (bis zu 30 mm breiter Beschnitt), was für die Steifigkeit des Bauteils jedoch keine signifikante Einbuße bedeutet, da das Bauteil im Wesentlichen durch die vom Ziehring aufgeprägte Kante am Übergang zur Zarge stabilisiert wird. Am Bauteil verbleibt genug Flanschbreite zur Fixierung der Proben auf einer Aufnahmeplatte (390 mm x 390 mm) zur Kraftmessdose, die ein reproduzierbares Lochmuster zur Aufnahme mit Schrauben M10 erhielt, das hauptsächlich in den Napfecken angeordnet wurde. Der Flanschbereich ist dort sehr eben und rechtwinklig ausgeführt, wohingegen sich an den langen Kanten Abweichungen vom rechten Winkel eingestellt haben. Ein Aufpressen durch weitere Fixierungen an den Seiten hätte starke Biegemomente im Bauteil zur Folge. Die Fixierung mit insgesamt acht Schrauben M10 wurde daher als ausreichend stabil für das zu erwartende Lastniveau erachtet und durch die Versuche auch bestätigt. In *Abbildung 83* ist die Konfiguration in der servohydraulischen Prüfmaschine dargestellt. Die Prüfeinrichtung ist in der Lage, zyklische Lasten bis zu 60 kN mit einer Frequenz von 0 bis 50 Hz aufzubringen.



Abbildung 83: Hydro Bonded Blanks Bauteile im zyklischen Test im Prüffeld des ifs, Konfiguration mit Kraftmessdose und Aufnahmeplatte oben sowie Hydropulser mit Lasteinleitungsstange von unten in den Bauteilboden

Durch eine symmetrische Schwingspiellast sollten auf zwei Lasthorizonten Bauteilversuche bis zu einem einheitlichen Versagenskriterium gefahren werden. Der Rechtecknapf, der schon bei den erwärmten Umformversuchen mit anschließender quasistatischer Beulung beschrieben wurde, unterscheidet sich gegenüber dem durch hydromechanische Umformung hergestellte Bonded Blank Napf hauptsächlich durch seine Größe und den völlig ebenen Boden stark gegenüber dem Rechtecknapf. Der Boden bildet trotz Verstärkungsblech eine relativ weiche und verformungsfähige Struktur, die schon bei verhältnismäßig geringen Kräften im Bereich bis 5 kN Doppelamplitude zu hohen Wegamplituden unter der beschriebenen zyklischen Beanspruchung führt.

Nach Vorversuchen wurden die Lasthorizonte bei 2 kN und 3 kN gewählt, um die Wegamplituden begrenzt zu halten und trotzdem im Zeitfestigkeitsbereich zu relativ hohen Lastspielzahlen zu gelangen. Nach Vorversuchen wurde eine Strategie zur schwerpunktmäßigen Beurteilung der Klebschichtschädigung im Bauteil gewählt, da davon ausgegangen werden konnte, dass die Blechwerkstoffe im Gegensatz zu den Klebstoffen nicht die limitierenden Faktoren in der zu untersuchenden Verbindung sein würden. Durch die geometrische Anordnung der festen Einspannung der Doppellagen im Zentrum des verstärkten Bodens kann die Klebschicht dort praktisch nicht versagen, eine Rissentstehung wird daher immer am Verstärkungsblechrand

erwartet. Die Rissfront kann sich aufgrund der bauteilbedingten Spannungszustände mit ausgeprägten Rückfederungseffekten im tiefgezogenen Bauteil durch die Verwendung von mittel- bis hochfesten Blechgüten durch eine schrittweise Delamination von den außen liegenden Verstärkungsblechlamellen bis in den zentralen Bodenbereich des Verstärkungsbleches nach innen hin fortpflanzen.

Speziell am Übergang vom ebenen Boden zum ausgerundeten Bodenbereich mit Klebungen der Verstärkungsblechlamellen bestand am Verstärkungsblech durch einen vorhandenen Lochkreis eine gut reproduzierbare Möglichkeit, den lateralen Abstand zwischen Grund- und Verstärkungsblech durch Tiefenmessungen vergleichend quantitativ zu erfassen. Eine Delamination, beginnend an den Verstärkungsblechlamellen, führt durch ein Auffedern analog einer zentral eingespannten Blatt- oder Tellerfeder zu einem größeren Abstand zwischen den außen liegenden Federelementen. Das Prinzip der Tiefenmessung am Lochkreis ist in 84 dargestellt.

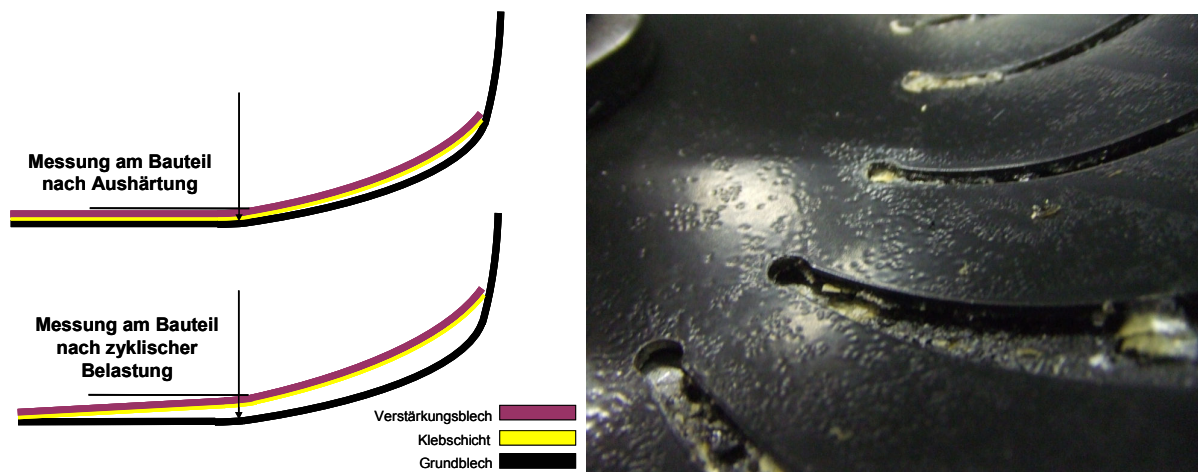


Abbildung 84: *Prinzip Tiefenmessungen am Lochkreis des Verstärkungsbleches (links), sichtbare Schädigung mit Auffedern des VBs am Lochkreis der auslaufenden Schlitze zwischen den Lamellen durch zyklische Beanspruchung (rechts)*

Als ein einheitliches Kriterium für einen Schädigungsfortschritt mit der vorhandenen Messwerterfassung wurde der Steifigkeitsverlust der Probe durch den anwachsenden Blatt- oder Tellerfedereffekt genutzt. Dafür wurde eine neu zu testende Probe zunächst am Lochkreis an ausgewählten Punkten durch Tiefenmessungen zwischen VB und GB vermessen und in die zyklische Prüfmaschine eingespannt. Aus dem kraftfreien Zustand wurde eine quasistatische Kennlinie durch eine langsame kraftgeregelte Sinusschwingung (0,01 Hz) bis zum

gewählten Lasthorizont aufgenommen. Dieser Versuch liefert die Steifigkeit gegen Herausziehen und Hineindrücken des verstärkten Doppellagenbodens an der ungeschädigten Probe. Nach Auswertung der erreichten Verformungen wurden die Weggrenzen zum Abschalten des zyklischen Versuchs um jeweils 1 mm nach außen verlegt, und der zyklische Versuch kraft geregelt mit einem sinusförmigen Verlauf auf dem gewählten Lasthorizont gestartet.

Durch beginnende Schädigung und schrittweise Delamination versagt die Klebschicht vom Randbereich des Verstärkungsbleches (Lamellen) nach innen zum vollgeklebten Boden des Napfes und verliert dabei an Steifigkeit. Dabei wächst die Wegamplitude an und verletzt nach einer individuellen Lastspielzahl das aus der Kennlinie zu Beginn des Versuchs ermittelte und gesetzte Weggrenzenkriterium an der oberen oder unteren Grenze. Der Versuch wird dadurch gestoppt und die Probe kraftfrei gefahren. Vor dem Ausspannen wird wieder eine quasistatische Kennlinie der geschädigten Probe mit dem gewählten Lasthorizont aufgezeichnet. Nach dem Ausbauen der Probe wird abschließend wieder der Abstand zwischen Verstärkungsblech und Grundblech am Lochkreis des Bauteilbodens durch Tiefenmessungen bestimmt. In den nachfolgenden Bildern sind für zwei verschiedene Proben mit unterschiedlichen Lasthorizonten die Kennlinien und Tiefenmessungen einmal exemplarisch dargestellt.

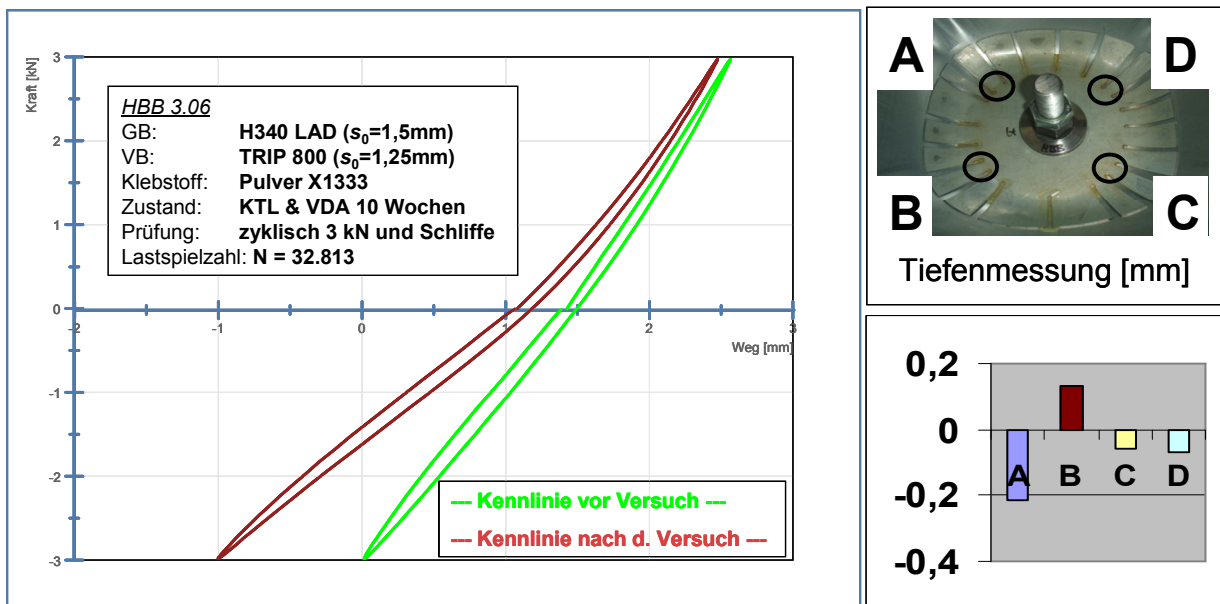


Abbildung 85: Kennlinien eines Hydro Bonded Blank Bauteils (HBB 3.06) mit dem Pulverklebstoff X1333 vor und nach dem zyklischen Versuch mit 3 kN Doppelamplitude, der flachere Verlauf (grün) kennzeichnet den Steifigkeitsverlust

Als reproduzierbare Messpunkte wurden je zwei Messstellen am Lochkreis in den gekennzeichneten Positionen (A bis D) ausschließlich in den Bauteilecken ausgewählt und je zwei Messwerte gemittelt. In den Bildern 86 und 87 sind die Kennlinien und Tiefenmessungen für zwei Beispielbauteile mit gleicher Blechkombination, jedoch unterschiedlichen Klebstoffen dargestellt.

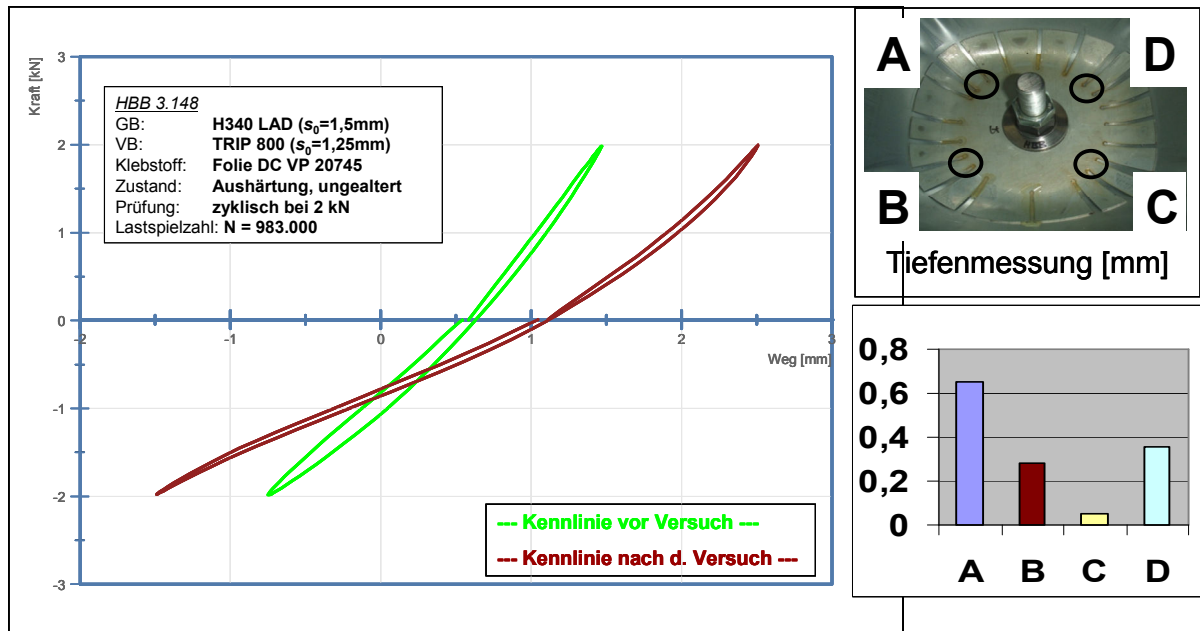


Abbildung 86: Kennlinien eines Hydro Bonded Blank Bauteils (HBB 3.148) vor und nach dem zyklischen Versuch mit 2 kN Doppelamplitude mit Folienklebstoff Lohmann DC VP 20745

Beim Vergleich der Kennlinien vor dem zyklischen Versuch fällt die etwas steilere Hysterese der Probe HBB 3.06 auf, die bei 2 kN im Zugbereich (negative Werte im Diagramm) lediglich 1 mm vertikale Verformung zeigt, während die Probe HBB 3.148 bei 2 kN im Zugbereich etwa 1,3 mm verformt. Im Druckbereich ist die Steifigkeit jedoch annähernd gleich. Beide Hysteresen erreichen bei 2 kN etwa 1 mm Vertikalverformung. Der Kennlinienvergleich für jede Probe zwischen, vor und nach dem zyklischen Versuch zeigt die Bauteilschädigung durch flacher verlaufende Hysteresen mit deutlich größeren Verformungen an. Die Tiefenmessungen am Lochkreis spiegeln generell den Schädigungszustand durch Anwachsen der Messtiefe ebenfalls wieder, jedoch geben sie kein so einheitliches Bild, wie der Kennlinienvergleich jeder Probe. Dies ist der Komplexität des Bauteils geschuldet, da es in den unterschiedlichen Bereichen schrittweise versagt. Zunächst werden die Klebbereiche am Rand mit den 20 Lamellen am Umfang abgelöst, danach erfolgt ein Risswachstum in den ebenen Bodenbereich.

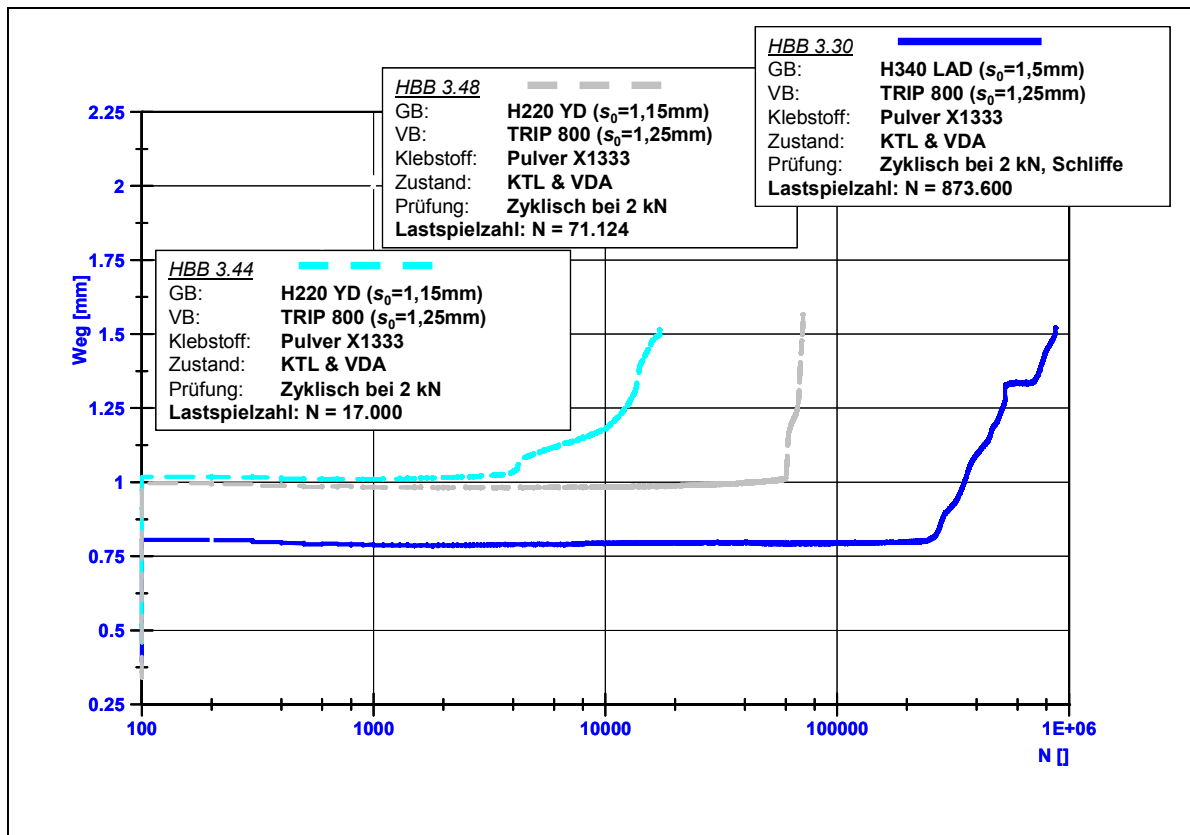


Abbildung 87: Schädigungsfortschritt als Verlauf der Wegamplituden an Hydro Bonded Blank Bauteilen mit Pulverklebstoff X1333 nach Alterung bei 2 kN Lasthorizont, verschiedene Grundbleche

Am Amplitudenverlauf der zyklischen Versuche ist dieser Schädigungsfortschritt abzulesen. In Bild 88 sind die Verläufe von drei Bauteilen mit dem Pulverklebstoff X1333 und dem Verstärkungsblech TRIP 800 auf einem 2 kN-Horizont dargestellt. Diese relativ niedrige Belastung lässt die Bauteilprobe relativ lange Zeit in einem ungeschädigten Zustand, bis ein Versagen der Verstärkungsblechlamellen einen Anstieg in der Wegamplitude hervorruft, die in vielen Fällen zu einem stufenartigen Plateau führt, auf dem die Probe mit vergrößerter Amplitude schwingt, jedoch das einheitliche Versagenkriterium noch nicht erreicht. Diese Stufe ist in einer mehr oder weniger ausgeprägten Form bei allen Bauteilproben im Weg-Amplitudenverlauf zu erkennen. In der mittleren Kurve im Bild 88 tritt beim Bauteil HBB 3.48 nach einem sehr stabilen Amplitudenverlauf ein sehr schnelles Versagen durch wachsende Delamination zwischen Klebschicht und Grundblech ein. Eine geringfügige Stufenbildung ist jedoch auch hier zu erkennen. Bei Bauteilen mit einem Lasthorizont von 3 kN liegen die Lastspielzahlen deutlich niedriger, siehe *Abbildung 88*.

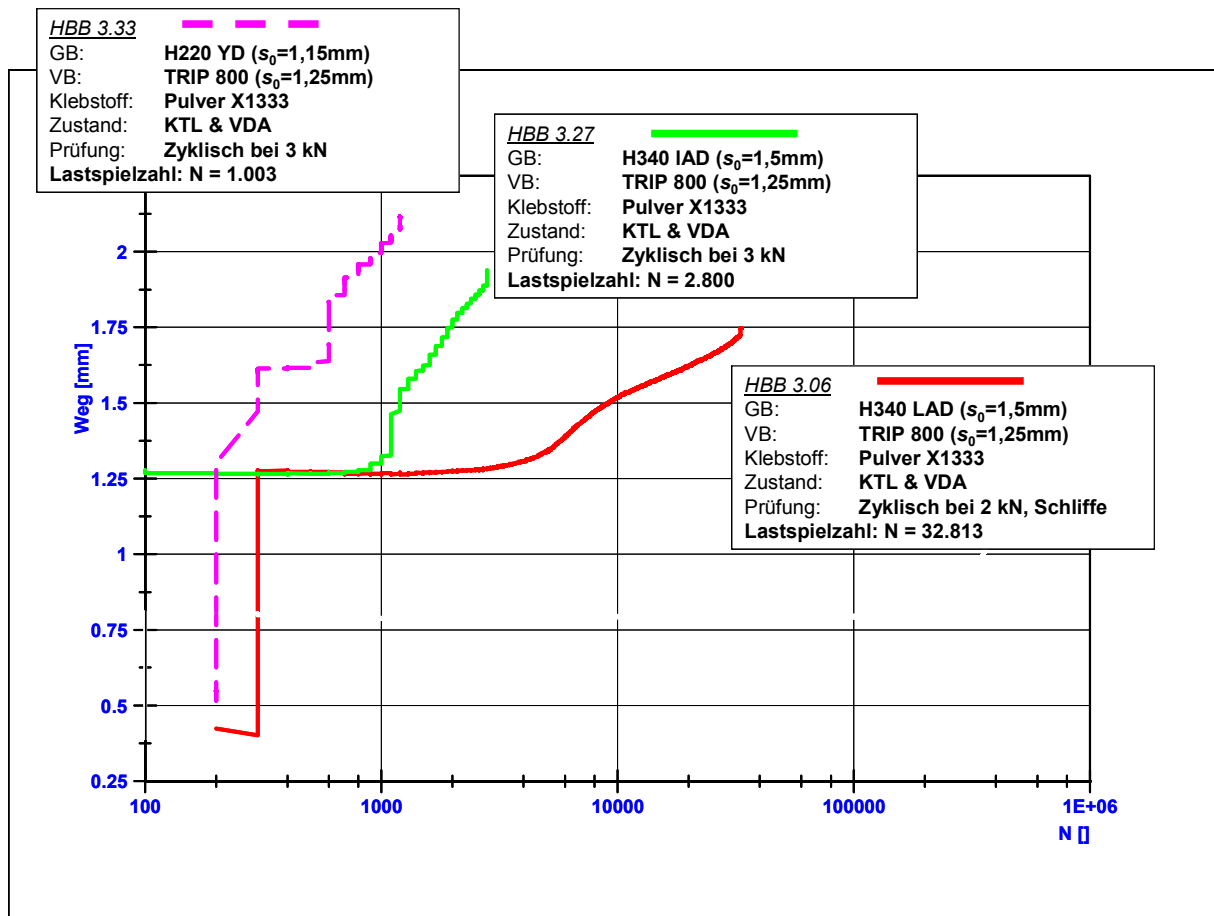


Abbildung 88: Schädigungsfortschritt als Verlauf der Wegamplituden an Hydro Bonded Blank Bauteilen mit Pulverklebstoff X1333n nach Alterung bei 3 kN Lasthorizont, verschiedene Grundbleche

Die Stufenbildung ist stets erkennbar, die unterschiedliche Ausprägung kann mit einem unterschiedlich schnellen Einzelversagen der 20 Verstärkungsblechlamellen zusammenhängen. Erst wenn der größte Anteil der Verstärkungslamellen gelöst ist, setzt sich die Rissbildung in die Ebene fort und ein deutlicher Blatt- oder Tellerfedereffekt stellt sich ein. Die Probe verliert zunehmend an Steifigkeit, die in den Versuchsreihen einheitlich durch das Weggrenzenkriterium zu einem Beenden des Versuches führt. Die gewählten Wegbegrenzungen wurden aus praxisnahen Erwägungen gewählt, ein höheres Weggrenzenkriterium hätte zu etwas höheren Lastspielzahlen geführt, ein vollflächiges Risswachstum war aufgrund der Einspannung nicht möglich. Ein Versagen mit Bruch des Grundbleches wurde in einem Fall (Probe HBB 3.144 bei etwa $N = 2.2$ Mio.) erzielt. In *Abbildung 89* sind ausgewählten Amplitudenverläufe von Bauteilproben mit Folienklebstoff DC VP 20745 dargestellt.

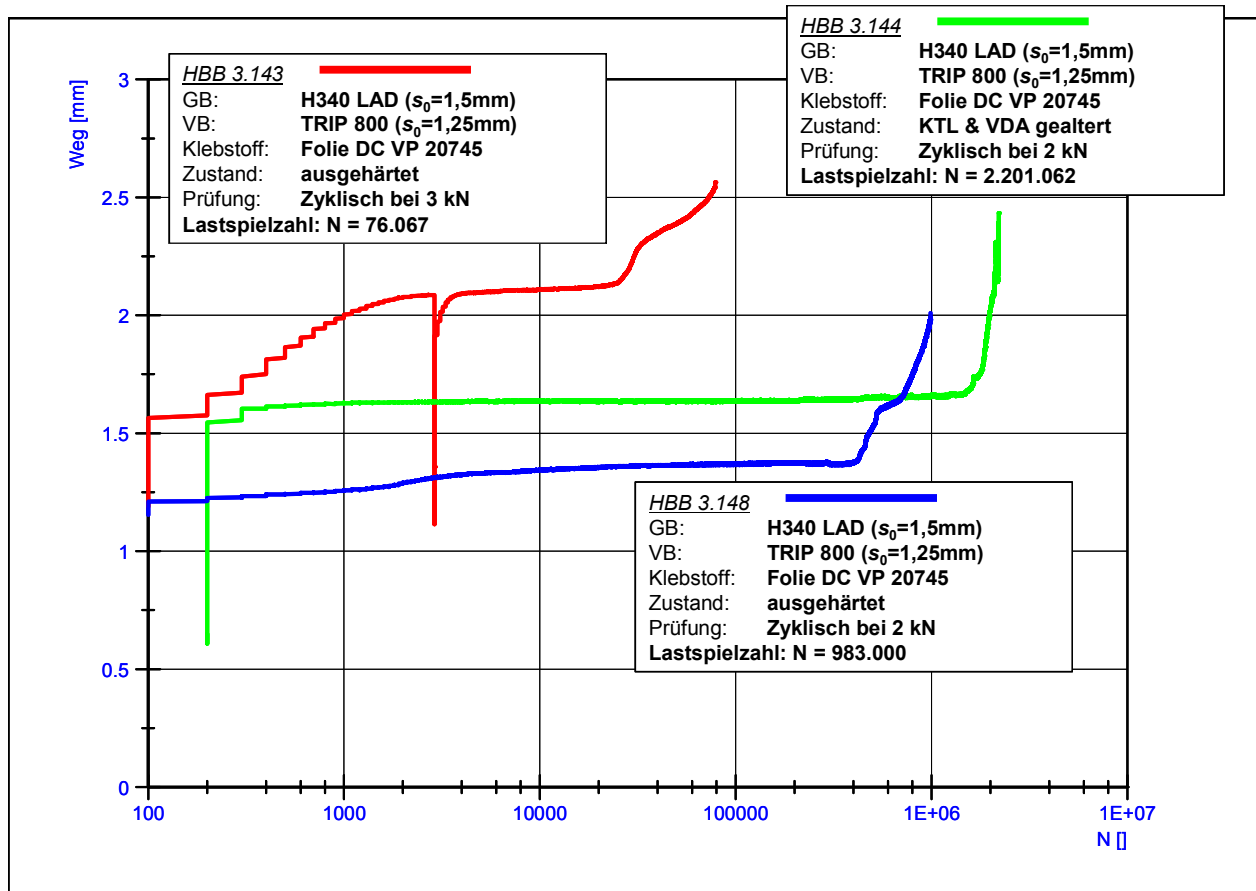


Abbildung 89: Schädigungsfortschritt als Verlauf der Wegamplituden an Hydro Bonded Blank Bauteilen mit Folienklebstoff DC VP 20745 bei verschiedenen Lasthorizonten und Alterungszuständen

In *Abbildung 90* sind die untersuchten Bauteilproben mit ihren erzielten Lastspielzahlen in einem Diagramm dargestellt. Proben mit dem Grundblech aus H340 LAD in 1,5 mm Blechdicke liegen auf einem höheren Lastspielniveau als Proben mit dem Grundblech aus H220 YD. Auch führt eine statistische Auswertung zu einem etwas flacheren Verlauf der Bauteilproben aus den dünneren und weicheren Grundblechen im Zeitfestigkeitsbereich.

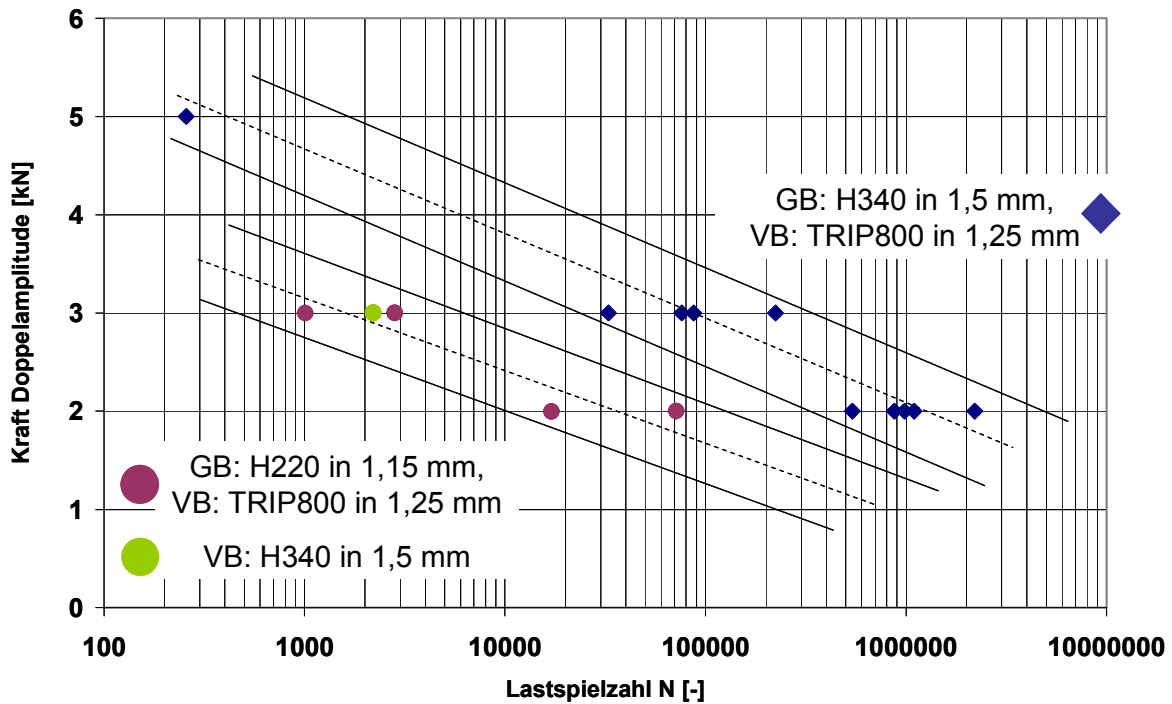


Abbildung 90: Überblick zu zyklisch getesteten Näpfen aus im Wesentlichen zwei Blechkombinationen GB H340 mit VB TRIP800 und GB H220 und VB TRIP800 (niedrigeres Lastspielniveau) im Zeitfestigkeitsbereich

Eine Betrachtung von ungealterten Proben gegenüber den nach VDA 621-415 über zehn Wochen beschleunigt gealterten Proben ist in *Abbildung 91* dargestellt. Eine einheitliche Tendenz kann nicht hergeleitet werden. Eine nach VDA gealterte Probe erzielte die größte Lastspielzahl mit Bruch im Grundblech, was grundsätzlich eher bei ungealterten Proben erwartet wurde. Der Einfluss der Alterung auf das Schädigungsverhalten ist zumindest aus den durchgeführten Versuchen nicht klar erkennbar.

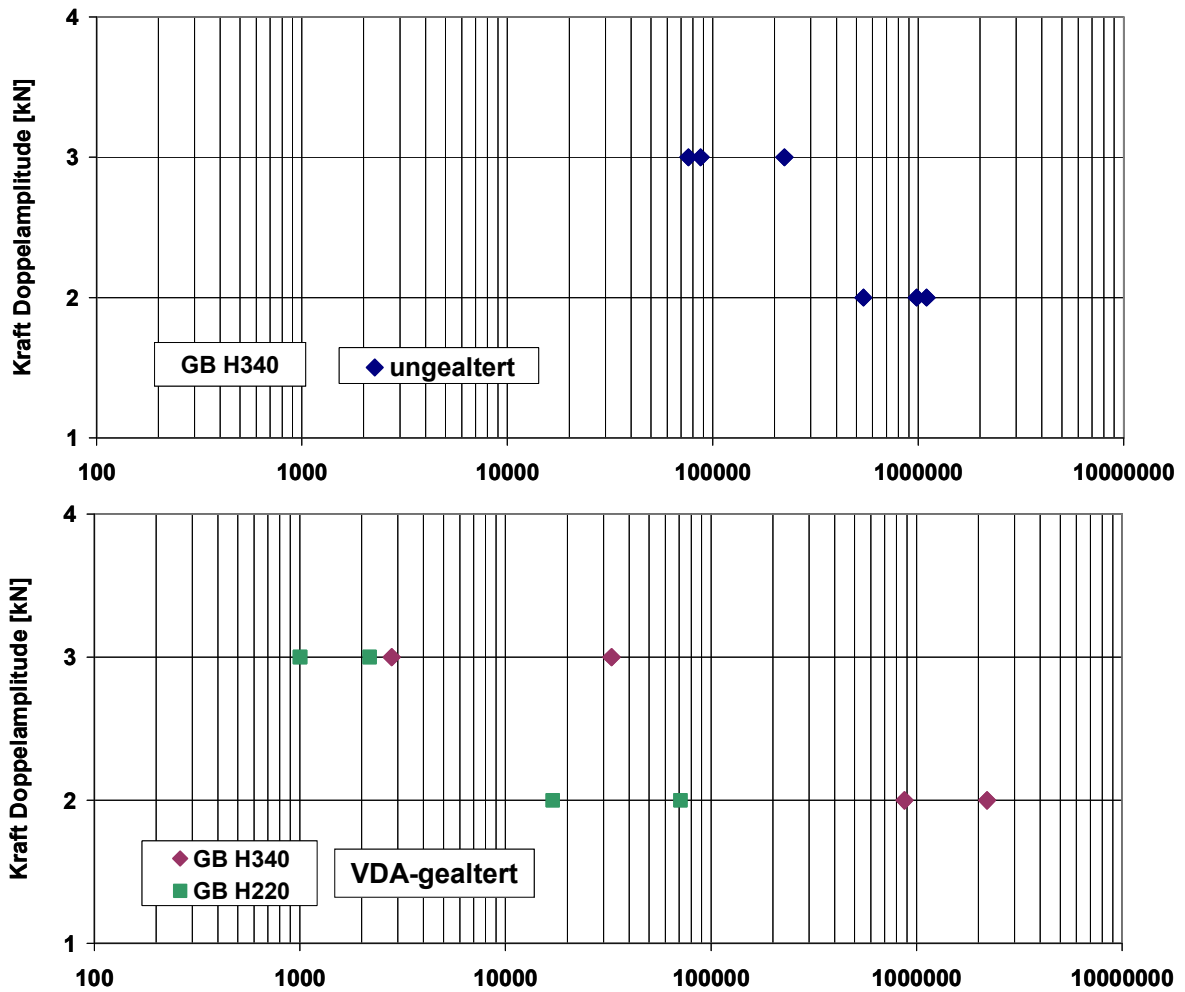


Abbildung 91: Überblick zu zyklisch getesteten Näpfen im ungealterten und im 10 Wochen VDA-gealterten Zustand mit zwei verschiedenen Klebstoffen

Ein Vergleich der Klebstoffe im untersuchten Testfeld ist in *Abbildung 92* zusammengefasst. Insgesamt wurden nur wenige Proben mit Folienklebstoff untersucht. Sie finden sich jedoch im Streuband der mit Pulverklebstoff gefügten Proben wieder und deuten auf kein ausgeprägt abweichendes Verhalten hin.

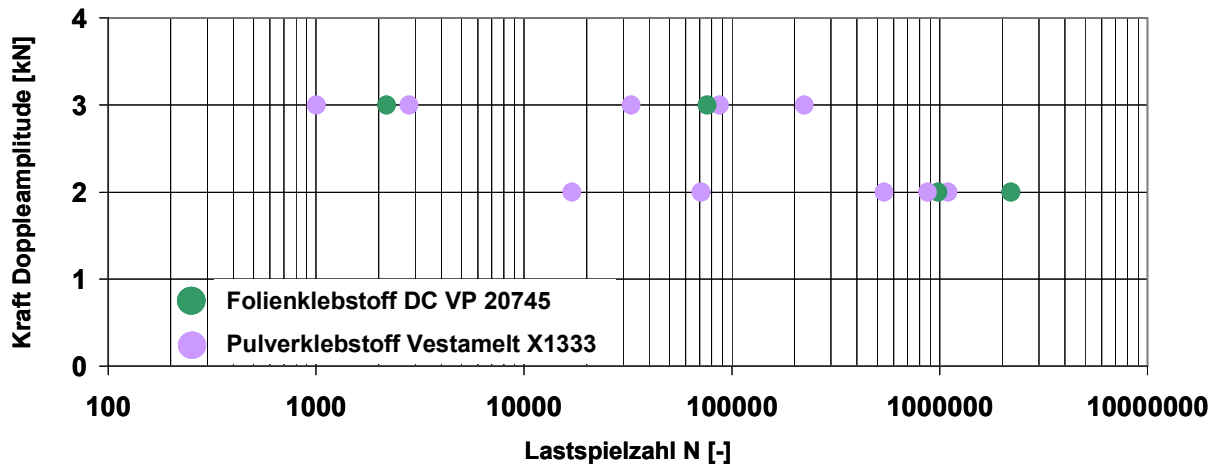


Abbildung 92: Erzielte Lastspielzahlen nach Klebstoffen sortiert

Die Klebstoffe verhalten sich daher schwingungstechnisch sehr ähnlich, obwohl sich die vernetzten Klebstoffschichten, wie beim Vergleich der Kennlinien gezeigt, in der resultierenden Bauteilsteifigkeit unterscheiden. Zusammenfassend konnte über die schwingungstechnische Beanspruchbarkeit der untersuchten Klebstoffe in der betrachteten Bauteilgeometrie die Aussage gewonnen werden, dass ein Schmelzklebstoff in dieser komplexen Anwendung ein zufriedenstellendes Versagensverhalten zeigt. Die ausgeprägt auftretenden adhäsiven Brüche beginnen an den Verstärkungsblechlamellen und setzen sich später schrittweise im Bodenbereich fort. Eine ausgeprägte Stufe im Weg-Amplitudenverlauf deutet auf ein Versagen des Lamellenkranzes im Verstärkungsblechbereich hin. Danach wächst die Delamination in den zentralen Bodenbereich und führt zu einer verminderten Steifigkeit.

7.5 Zerstörungsfreie Bauteiluntersuchungen mit ultraschallangeregter Thermografie

Die Klebungen von Verstärkungen im Bereich der Karosseriefertigung nach dem hier untersuchten Bonded Blanks Prinzip - mit Klebfixiertechnik, Umformen und abschließendem Härten des Klebstoffs - zeichnen sich durch eine vollflächige Anbindung aus, deren Verbindungsqualität nur unzureichend durch visuelle oder taktile Kontrollen geprüft werden kann. Speziell der Zustand nach dem Umformen und Härten der Klebstoffe durch Wärme im KTL-Trocknungsprozess kann Delaminationen in einzelnen Bauteilbereichen hervorrufen. Eine teilweise Delamination der Verstärkungsblechlamellen wurde schon an einzelnen Bauteilen

beschrieben und konnte bei den vorliegenden Geometrien verhältnismäßig einfach visuell an den Lamellenkanten qualitativ und auch durch Dickenmessungen quantitativ bestimmt werden. Im Bodenbereich ist die taktile Bauteilvermessung jedoch aufwändiger und bei komplexen Praxisbauteilen im Serienprozess kaum noch handhabbar.

Zur Untersuchung der Verbindungsqualität in den verschiedenen Fertigungsschritten wurde im Vorhaben die aktive Thermografie genutzt. Diese Technik der zerstörungsfreien Materialprüfung lässt sich aufgrund der robusten Wirkungsweise verhältnismäßig unaufwändig in die Prozesskette aus Kleben und Umformen integrieren. Für klebtechnische Anwendungen eignet sich besonders die ultraschallangeregte Lockin-Thermografie, wie verschiedene Autoren gezeigt haben. [Gio00, Zwe00, Mei01, Zäh03, Has04, Has06]. Defekte in der Klebschicht zwischen Fügeteilen werden bei dieser Technik durch auftretende Reibungseffekte in Folge der mechanische Belastung mit eingekoppeltem hochenergetischen Ultraschall deutlich stärker thermisch angeregt als kontinuierliche Klebschichten mit vollständiger adhäsiver und kohäsiver Anbindung. Aufgrund der Wärmeleitung durch die Fügepartikelwerkstoffe können die Fehlstellen dann als lokale transiente Temperaturunterschiede (im mK-Bereich) mit einer hochempfindlichen Infrarotkamera an der Oberfläche detektiert werden. Speziell die im Automobilbereich vielfach verwendeten Feibleche bieten aufgrund des geringen Wandstärkenbereichs zwischen 0,6 mm und 2 mm und deren gute thermische Leitfähigkeit ideale Voraussetzungen für die Anwendung des Verfahrens.

Das Prinzip der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie ist in Abbildung 93 dargestellt.

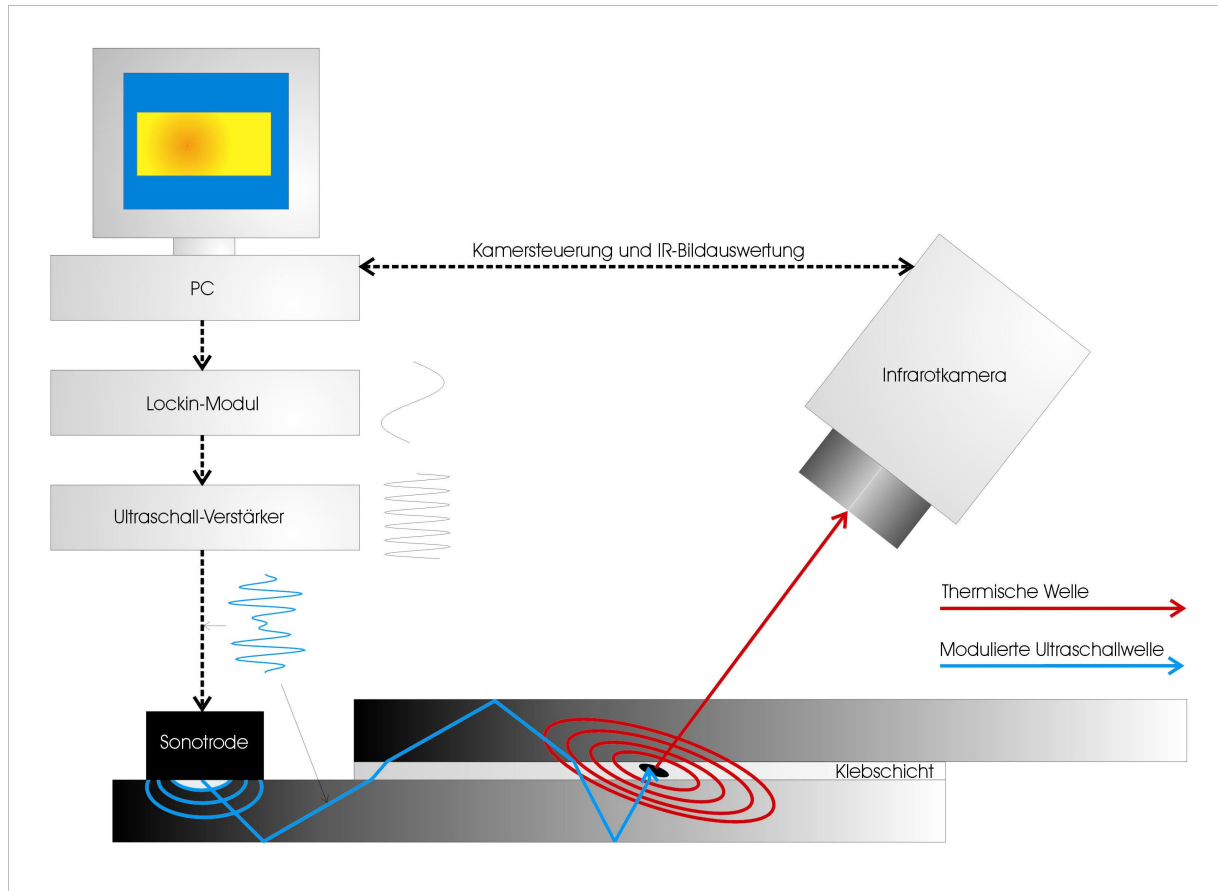


Abbildung 93: Prinzip der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie zur zerstörungsfreien Bewertung von Klebverbindungen

Bei der ultraschallangeregten Thermografie wird über eine angekoppelte Sonotrode ein hochenergetisches amplitudenmoduliertes (u. U. zusätzlich frequenzmoduliert) Ultraschallsignal in das geklebte Bauteil eingeleitet. Die daraus resultierende mechanische Belastung verteilt sich mittels Körperschallausbreitung im Bauteil und führt bei intakter Anbindung zwischen Fügeteilen und Klebschicht aufgrund von Hystereseeffekten zu einer geringen globalen Erwärmung der gesamten Struktur. Fehlstellen in der Klebung bzw. in der Grenzschicht zum Substrat erzielen aufgrund von Reibungseffekte ein deutlich höheres Temperaturniveau. Die resultierenden lokalen transienten Temperaturunterschiede können dann zur Fehlstellendetektion genutzt werden. Die Lockin-Technik nutzt darüber hinaus eine Fourier-Transformation um die aufgezeichnete thermische Antwort des Bauteils pixelweise in eine Phasenlagendifferenz zwischen Anregung und Antwort umzuwandeln. Somit erhält man statt einer Temperatursequenz ein Phasenwinkelbild, das deutlich einfacher auszuwerten ist, und darüber hinaus deutlich störungsunanfälliger gegenüber Umgebungseinflüssen ist. In den Phasenbildern (in Grauwert- oder

Fehlfarbdarstellung) sind Fehlstellen also als lokale Signaländerungen, hell/dunkel hervorgehobene Bereiche zu erkennen. Der Kontrast kann in den farb- oder schwarz/weiß-Darstellung durch eine geeignete Skalierung variiert werden.

Die im Vorhaben untersuchten Bauteile als hydromechanisch unterstützt tiefgezogene Bonded Blank Näpfe bieten durch ihren Aufbau und die Art der Fertigungsreihenfolge einige Vorteile zur Untersuchung der Klebschicht und deren Anbindung an die Bleche mit dem Ultraschall-Lockin Verfahren (US-Lockin). In *Abbildung 94* ist der am ifs genutzte Messaufbau mit einer Hydro Bonded Blank Bauteilprobe dargestellt. Die Probekörperaufnahme und gleichzeitig auch die Schalleinleitung werden über den Flansch realisiert. Der Sonotrodenkopf an der Rückseite eines Rahmens wird über eine selbstklebende Aluminiumfolie als Koppelmedium pneumatisch auf den Flansch aufgedrückt.

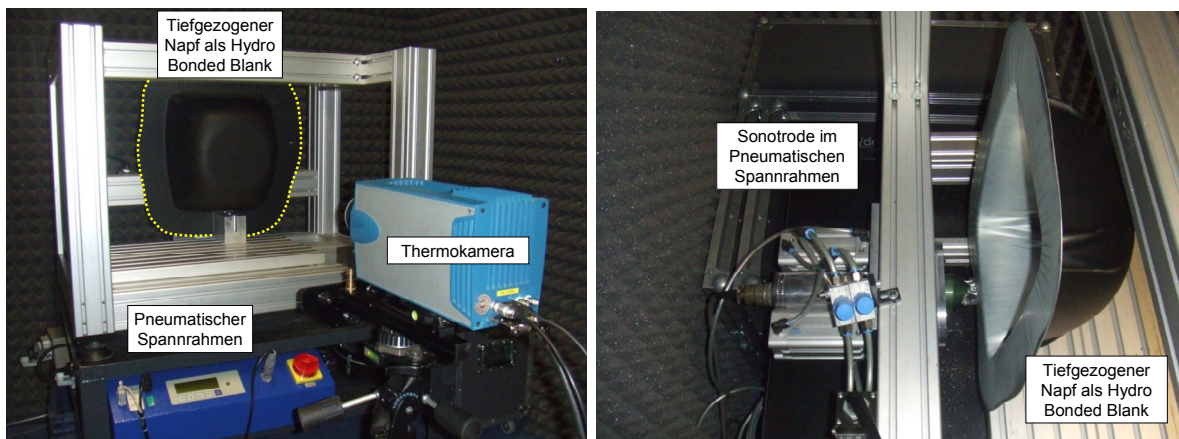


Abbildung 94: *Einsatz der Ultraschall-Lockin-Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung an hydromechanisch tiefgezogenen Bonded Blank Näpfen, Blick der Thermografiekamera auf den äußeren Grundblechbereich (links), Einspannung im pneumatischen Rahmen mit Ultraschalleinleitung über Sonotrode (rechts)*

Die Aluminiumfolie hat sich als ein günstiges Koppelmedium für diese Art der zerstörungsfreien Prüfung herausgestellt. Die Bonded Blank Bauteile wurden bevorzugt in der lackierten Form mit schwarzer KTL untersucht, Bauteile ohne Lackierung wurden einseitig auf der Außenfläche des Grundbleches mit einem schwarzen Mattlack lackiert. Die lackierte Oberfläche emittiert IR-Strahlung nahezu optimal und vermeidet aufgrund der guten Absorption Reflexionen an der Oberfläche durch infrarote Streustrahlung. Hieraus resultiert ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis und somit eine verbesserte Detektion der Fehlstellen.

Als Vorversuche zur grundsätzlichen Eignung des Verfahrens im Vorhaben wurden eben geklebte Doppellagen mit eindeutig identifizierbaren Fehlstellen präpariert,

siehe Abbildung 95 Auf einem Grundblech wurden drei kreisförmige Abschnitte aus silikonisiertem Papier mit einem Durchmesser von 30 mm unter einer Folienklebschicht aus TM 10850/DC VP 20745 so positioniert, dass sie nach dem Aufkleben des Verstärkungsbleches noch einwandfrei in ihrer Position auf dem Bauteil identifiziert werden konnten, Abbildung 95 *rechts*.

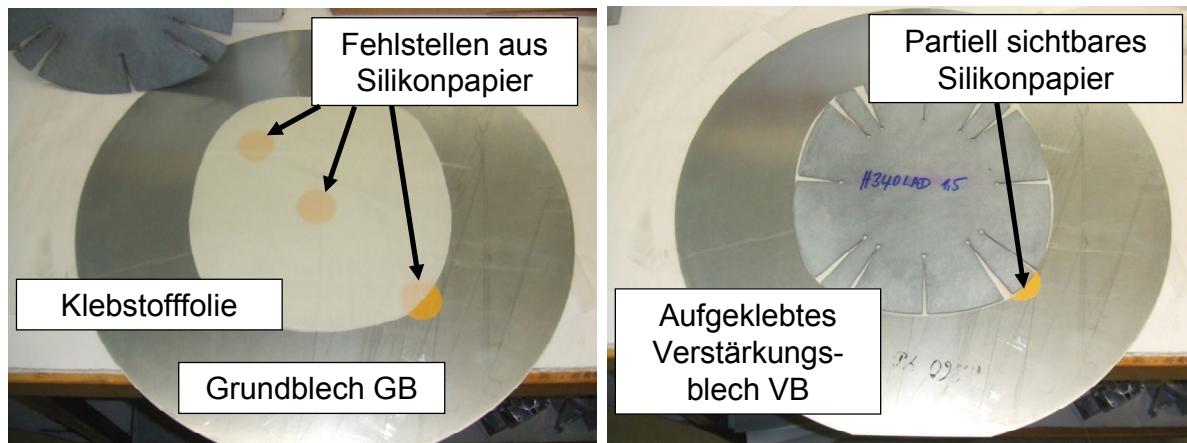
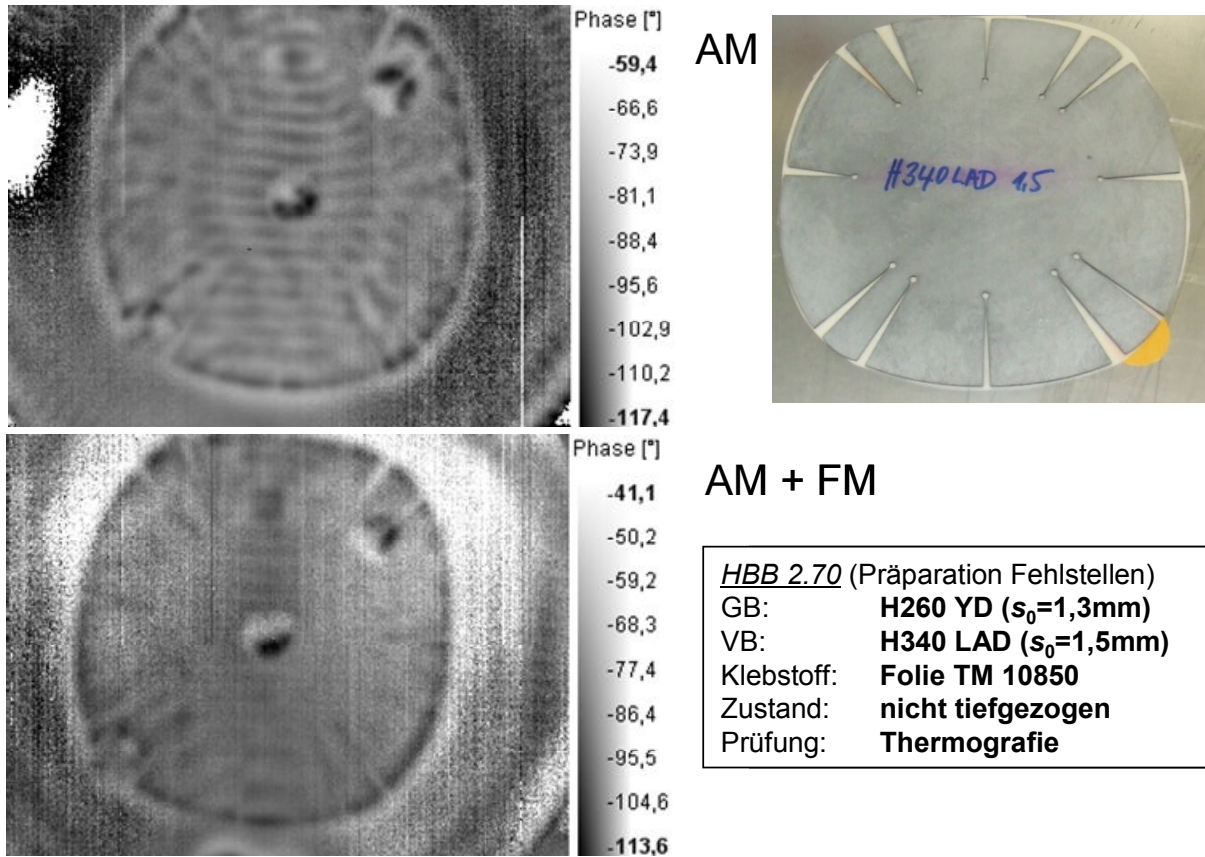


Abbildung 95: Fehlstellenpräparation an einem Doppellagenblech

Silikonisiertes Papier dient in der Klebtechnik als Trennpapier bei der Herstellung von Haftklebstoffen und wird auch überall dort eingesetzt, wo ein Ankleben von Substanzen zuverlässig verhindert werden soll. Die Oberflächenenergie ist sehr niedrig und verleiht dem beschichteten Papier eine stark entnetzende Oberfläche. Durch diese Eigenschaft wird eine adhäsive Anbindung der zugeschnittenen Silikonpapierenden an den definierten Stellen im präparierten Bauteil verhindert. Diese Fehlstellen sollten mit dem Verfahren der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie eindeutig detektiert werden. In *Abbildung 96* ist das Ergebnis der Untersuchungen an der ebenen Doppellage dargestellt. Mit zwei verschiedenen Signalformen der Ultraschallanregung (Amplitudenmodulation AM und iener Kombination aus Frequenz- und Amplitudenmodulation FM/AM) wurden Thermografiebilder aufgenommen und verarbeitet. Im oberen Phasenbild mit AM fällt noch ein deutliches Muster aus stehenden Wellen auf, die drei Fehlstellen sind jedoch schon gut zu erkennen. Mit der Methode der überlagerten Amplituden- und Frequenzmodulation können diese stehenden Wellen gut eliminiert werden und die Fehlstellen treten gegenüber den einwandfrei geklebten Bereichen zwischen den Blechen deutlicher hervor.



HBB 2.70 (Präparation Fehlstellen)	
GB:	H260 YD ($s_0=1,3\text{mm}$)
VB:	H340 LAD ($s_0=1,5\text{mm}$)
Klebstoff:	Folie TM 10850
Zustand:	nicht tiefgezogen
Prüfung:	Thermografie

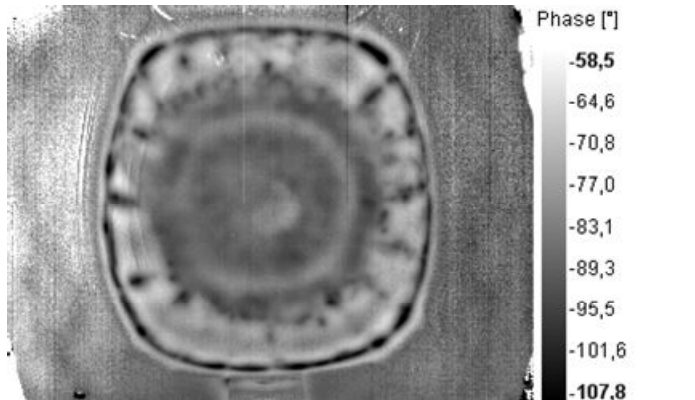
Abbildung 96: Detektion der Fehlstellen im US-Lockin-Phasenbild

Die erfolgreiche Detektion der Fehlstellen wurde am Probekörper mit einer Grundblechdicke von 1,3 mm mit den Verfahrensparametern nach *Tabelle 5* erzielt.

Tabelle 5: Parameter der Ultraschall angeregten Lockin-Thermografie

Signalform Ultraschall	Amplitudenmodulation AM	Frequenz- und Amplitudenmodulation FM & AM
Lockinfrequenz	0,1 Hz	0,1 Hz
Einschwingperioden	1	1
Messperioden	4	4
Amplitude ($P_{\max}= 2,2 \text{ kW}$)	25 %	15 %
Signalform	Sinus	Sinus
Ultraschallfrequenz	19 kHz	18 kHz - 22 kHz

Im nächsten Schritt wurden ausgewählte tiefgezogene dreidimensionale Bauteile am verstärkten Bauteilboden untersucht. In *Abbildung 97* ist ein Bauteil mit KTL-Beschichtung und einem Grundblech aus H220 YD in der Blechdicke von 1,15 mm dargestellt, das nach der KTL-Beschichtung mit der Ultraschall angeregten Lockin-Thermografie aufgenommen und anschließend im Fallwerk hochdynamisch im Beulversuch getestet wurde. Dabei hat sich das Verstärkungsblech weitgehend vom Bauteil gelöst und im direkten Vergleich der Bruchflächen im geklebten Bereich können verschiedene Merkmale der Bauteilklebung wiedererkannt werden. Die Schlitze des Verstärkungsbleches sind weitgehend im Phasenbild erkennbar. An Stellen mit sichtbarer Lackunterwanderung der Lamellen ist der Kontrast des Thermografiebilds geringer und deutet auf eine unzureichende Anbindung der Lamellen an das Grundblech hin. Durch die Lackunterwanderung war offensichtlich ein Spalt zwischen den geklebten Bauteilbereichen vorhanden, der teilweise mit Lack beschichtet wurde. Der zentrale Bodenbereich weist folgende Merkmale auf: Ein weitgehend homogener Bereich deutet auf eine insgesamt gute Klebung hin, genau im Zentrum ist die Besonderheit eines kohäsiven Defekts der Klebschicht zu erkennen. Die Ursache hierfür ist eine offensichtlich nicht perfekt geklebte dickere Klebschicht aus zwei dünnen Folien (DC VP 20745) und somit im klebtechnischen Aufbau dieses Bauteils zu finden. Dieser Delaminationsfall ist örtlich schon im Thermografiebild zu erkennen, gleichwohl kann man aus dem Thermografiebild nicht entnehmen, welche Schicht genau betroffen ist, da es hier im speziellen Fall um insgesamt drei adhäsiv angebundene Schichten geht, eine zusätzliche Verbindungsebene mehr zwischen den beiden Klebefolien. Die Auflösung zur Detektion war jedoch nicht Ziel der thermografischen Untersuchung der Bauteile, und müsste in folgenden Projekten weiter untersucht werden.



<i>HBB 3.154</i> (vollst. abgelöst)	
GB:	H220 YD ($s_0=1,15\text{mm}$)
VB:	TRIP 800 ($s_0=1,25\text{mm}$)
Klebstoff:	Folie DC VP 20745
Zustand:	KTL
Prüfung:	Thermografie & Fallturm



Abbildung 97: Ultraschall-Lockin-Phasenbild von Napf 3.154 im Vergleich zum geöffneten Napf nach der Prüfung im Fallturm bei 5,1 m/s

An einem weiteren Bauteil mit gleicher Blechkombination ist in Abbildung 98 eine homogene Klebstoffschicht aus dem Pulverklebstoff X1333 betrachtet worden. Der ebene Bodenbereich ist homogen geklebt und zeigt keine Auffälligkeiten im Thermografiebild. Im Lamellenbereich des Verstärkungsbleches ist jedoch wieder Lackunterwanderung aufgetreten, so dass hier ebenfalls von einem mit Fehlstellen behafteten Bauteilbereich ausgegangen werden musste. Das hochfeste Verstärkungsblech aus TRIP 800 ist beim Aushärtvorgang im Lamellenbereich etwas zurückgefедert und unter den Lamellen sind Kavitäten entstanden. Der ebene Bodenbereich war jedoch nicht betroffen.

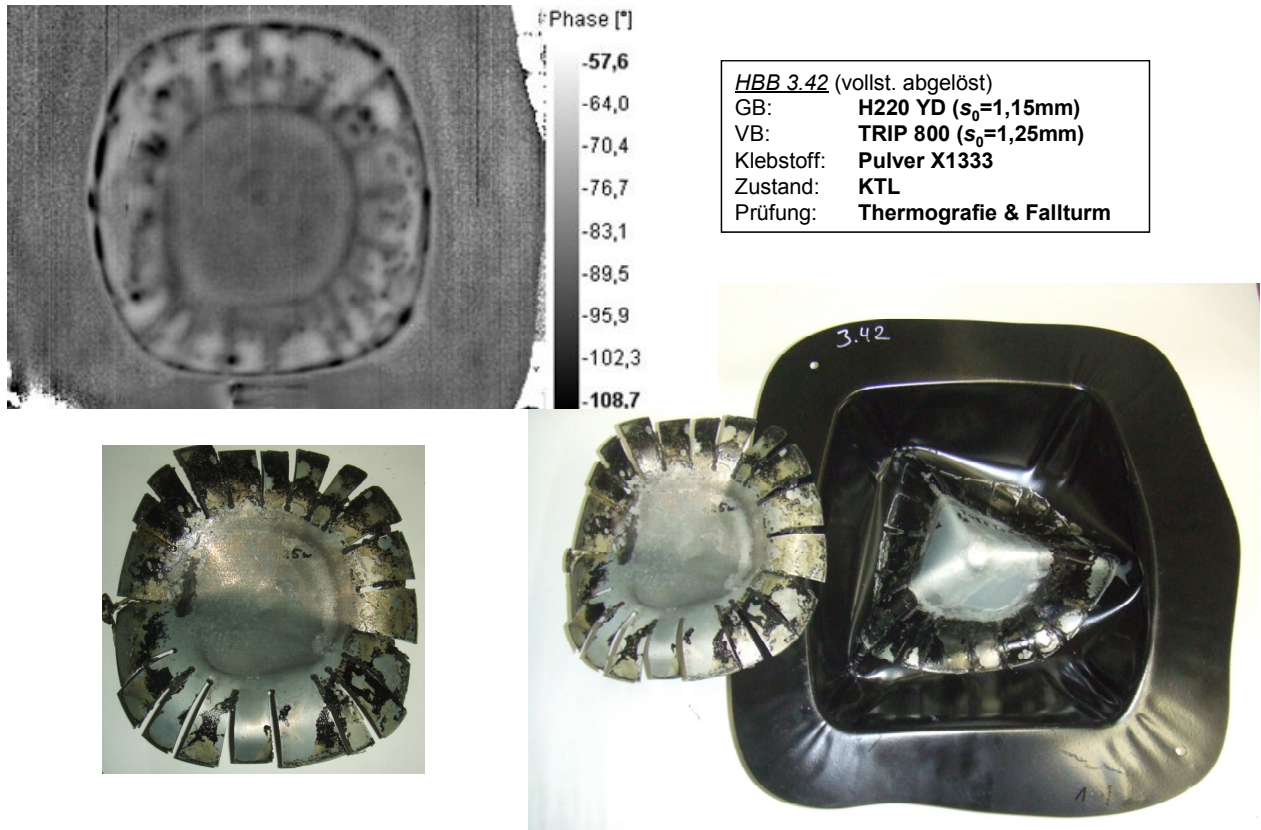
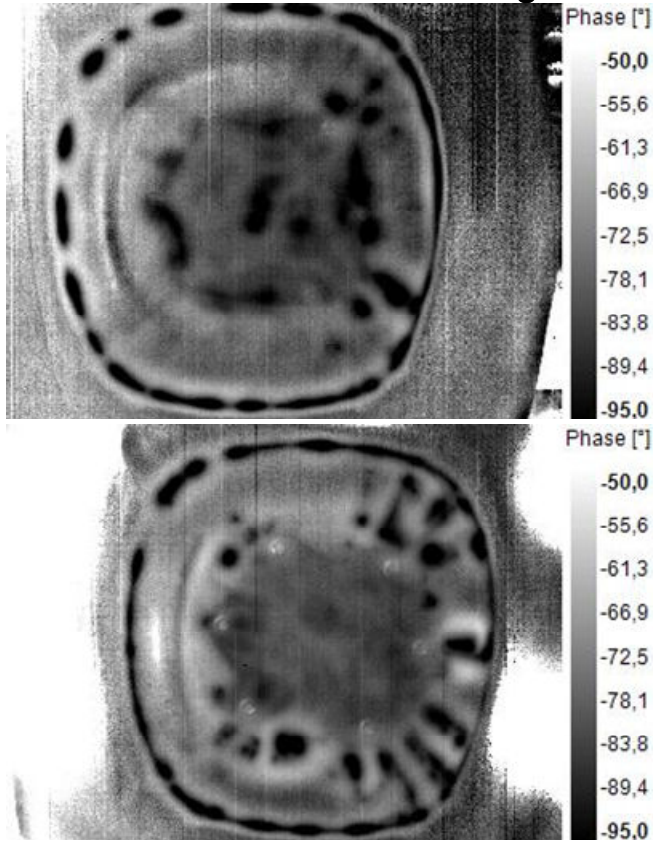


Abbildung 98: US-Lockin-Phasenbild von Napf HBB 3.42 im Vergleich zum geöffneten Napf nach der Prüfung im Fallturm bei 5,1 m/s

Die Entlastung der Bauteile im gekrümmten Randbereich des Verstärkungsbleches für den zweiten Schritt der klebtechnischen Bauteilfertigung zum Vernetzen der Klebschicht wurde im Vorhaben stichpunktartig durch den Einsatz der Clinchtechnik untersucht. An ausgewählten Bauteilen wurden verschiedenartige Muster aus Clinchpunkten nach dem Tiefziehen eingebracht. So zusätzlich fixiert wurden einige Bauteile in einem Umluftofen ausgehärtet, wohingegen die meisten Bauteile im Vorhaben im gepressten Zustand in einer Heizpresse ausgehärtet wurden, um eine maximal mögliche Bauteilqualität zu erhalten. Die Bauteilkombinationen aus höherfesten- bis hochfesten Verstärkungsblechen machte dieses Vorgehen notwendig.

Die Bauteile mit Clinchpunkten in unterschiedlichen Mustern wurden alle nach dem Clinchen mit der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie geprüft und dann ohne weitere Fixierung im Umluftofen bei 180 °C über 30 Minuten gehärtet. Nach dem Abkühlen der Bauteile wurden wieder Thermografie-Bilder aufgenommen und verarbeitet. Im *Abbildung 99* ist ein Vergleich der Thermografiebilder vor- und nach der Ofenhärtung im Kontext des geöffneten Bauteils dargestellt.

HBB 3.113 vor Ofenhärtung



HBB 3.113 (nur Lamellen abgelöst)
 GB: **H220 YD** ($s_0=1,15\text{mm}$)
 VB: **H340 LAD** ($s_0=1,5\text{mm}$)
 Klebstoff: **Pulver X1333**
 Zustand: **6 Clinchpunkte**
 Prüfung: **Thermografie & Fallturm**

HBB 3.113 nach Ofenhärtung



Abbildung 99: Vergleich der US-Lockin-Phasenbilder von Napf 3.154 mit 6 Clinchpunkten auf einem Radius nahe dem Lochkreis des VB vor und nach einer freien Ofenhärtung ohne weitere Fixierung, Napf nach der Prüfung im Fallturm bei 5,1 m/s

Ein Muster aus sechs Clinchpunkten, gleichmäßig verteilt auf dem Umfang eines Teilkreises mit einem Radius etwas geringer als der Lochkreis des Verstärkungsbleches, stellte sich als die wirksamste Methode zur Verstärkungsblechfixierung heraus. Gleichwohl zeigen auch die Thermografiebilder schon vor dem Aushärten des Bauteils HBB 3.154 eine unregelmäßige Klebstruktur der Pulverklebstoffschicht im Bauteilboden. Diese Unregelmäßigkeiten wurden offensichtlich nur teilweise im Zentrum des Bauteilbodens durch eine Homogenisierung über erneutes Aufschmelzen und Neubenetzen der Klebschicht während der Ofenhärtung beseitigt, die Phasenlagen im Thermografiebild deuten im Bereich außerhalb des Clinchpunkt-Teilkreises auf Haftungsfehler am Übergang zu

den Lamellen des Verstärkungsbleches. Der äußere Bereich mit geschlitzten Lamellen ist vor der Ofenhärtung kaum sichtbar, schon im dem Umformvorgang haben sich die Lamellen offensichtlich vom Grundblech teilweise gelöst. Nach dem Aufschmelzen und Vernetzen des Klebstoffs sind die Lamellen im rechten Bauteilbereich zwar nicht perfekt geklebt, jedoch ist deutlicher die geschlitzte Struktur erkennbar. Die Betrachtung einer mechanisch unterstützen Fixierung durch Clinchpunkte legt eine sinnvolle Anordnung solcher Fixierhilfen nahe, Bauteile mit nur einem zentralen Clinchpunkt erwiesen sich als ungeeignet zur VB-Fixierung.

Die Untersuchungen mit der ultraschallangeregten Thermografie zeigen die prinzipielle Einsatzfähigkeit des Verfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung von in Bonded Blank Technik hergestellten Bauteilen. In praktisch allen Stadien der Fertigung kann die Anbindung der Klebschicht an die Bleche und damit die Bauteilqualität überprüft werden. Fehlerhafte Klebungen speziell in mit großem Radius umgeformten Bereichen am Übergang zwischen Bauteilboden und Zarge neigen bei der untersuchten Geometrie und Blechkombination zum Ablösen des Verstärkungsbleches vom Grundblech. Abgelöste Bereiche können dann sehr schnell und einfach identifiziert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts wurden im hydromechanischen und im klassischen Tiefziehverfahren lokal verstärkte Doppellagenblechverbunde umformtechnisch hergestellt. Neben einer stilisierten Federbeindomgeometrie, in deren Kuppe ein Verstärkungsblech eingebracht ist, sind Untersuchungen an Bauteilen mit Rechteckgeometrie durchgeführt worden. Dabei sind als Grundblechwerkstoffe H 340 LAD in einer Blechdicke von $s_{0,GB} = 1,5$ mm und H220 YD in einer Blechdicke von $s_{0,GB} = 1,15$ mm zum Einsatz gekommen. Auf ihre Eignung als Verstärkungsblechwerkstoff sind wiederum H 340 LAD in einer Blechdicke von $s_{0,VB} = 1,5$ mm, TRIP 800 in einer Blechdicke von $s_{0,VB} = 1,25$ mm, sowie MSW1200 in Blechdicken von $s_{0,VB} = 1,5$ mm und $s_{0,VB} = 3,0$ mm untersucht worden.

Weiterhin wurde die zweistufige Klebtechnik zum Fügen der Doppellagen mit neuartigen reaktiven Schmelzklebstoffen untersucht und parallel mit einem in der Anwendungsforschung der Bonded Blanks Technik schon früher zum Einsatz gekommenen Klebstoffsystem vergleichend untersucht. Die prozesstechnischen Anforderungen der Bonded Blank Technik an die Klebstoffe und die unproblematische Integration der Klebtechnik in die bestehenden Fertigungslinien im Rohbau der Fahrzeugindustrie wurde dabei besonders berücksichtigt. Es zeigte sich, dass alle untersuchten Klebstoffe im Vorhaben prinzipiell für die zweistufige Klebtechnik für Bonded Blanks geeignet sind. Sie lassen sich in den Applikationsformen als feines Pulver im Pulversprühprozess oder in Folienform unproblematisch auf die Bleche auftragen, können durch einfache thermische Prozesse als klebfreie Beschichtung in einem lagerfähigen Zustand flexibel in der Produktion vorgehalten und in einem einfachen thermischen Pressenvorgang zur Doppellage gefügt werden.

Die neuen Klebstoffe (Nolax HCM555, Pulverklebstoff und Lohmann DC VP 20745 als Folie) bringen für den Umformvorgang die gleichen positiven Eigenschaften in Form einer festen Kunststoffschicht mit, wie das früher untersuchte System (Pulverklebstoff Evonik Vestamelt X1333). Die Verstärkungsblechkante kann durch einfache Prozesstechnik in die feste Klebstoffschicht mit einer typischen Stärke zwischen 0,2 bis 0,4 mm eingebettet werden und wirkt im Umformvorgang wie ein Polster, das die starke Kerbwirkung der Blechkante auf das Grundblech deutlich verringert. Gleichwohl zeigen die im Vorhaben untersuchten hochfesten Werkstoffe und Blechstärken bis zu 3 mm Grenzen auf, die auch durch eine deutliche Vergrößerung der Klebstoffschichtdicke nicht sinnvoll erweitert werden können, weil zu dicke Klebschichten nachteilig bei weiteren Bauteileigenschaften (wie z. Bsp. bei Kriechdeformationen) wirken. Alle Klebstoffe erhielten eine Versuchsfreigabe für den KTL-Serienbeschichtungsprozess bei einem OEM der Fahrzeugindustrie, da keine

schädigende Wirkung auf die Vorbereitungsbäder und die Lackierung selbst zu befürchten sind.

Der sich im KTL-Prozess anschließende Lackeinbrennprozess bei typischerweise 180 °C über etwa 30 Minuten wird generell prozesseffizient zur Nachvernetzung der Klebstoffe genutzt. An dieser Stelle im Prozess sind Besonderheiten in der Klebtechnik von Bonded Blanks oder Hydro Bonded Blanks mit reaktiven Schmelzklebstoffen zu berücksichtigen. Zur Aktivierung der thermisch blockierten reaktiven Komponenten muss eine Starttemperatur überschritten werden, die oberhalb des Schmelzklebprozessfensters liegt und damit eine Erweichung des Klebstoffs bedingt. Sind aus dem Umformprozess noch zu hohe Rückfederanspannungen in geklebten Bauteilbereichen vorhanden, können sich unzulässige Bauteilverformungen im heißen Zustand einstellen, die durch die Klebstoffe allein nicht zu verhindern sind. So wurden speziell beim hochfesten Verstärkungsblech aus TRIP 800 häufig geringfügige Ablöseerscheinungen der Verstärkungsblechlamellen am Übergang des ebenen Bodens zur Zarge beobachtet.

Zur Vermeidung einer hohen Rückfederneigung im Bauteil sollte die Umformtechnik daher sinnvoll ausgelegt werden und Bereiche mit hohem Streckziehanteil nicht durch Klebtechnik alleine verstärkt werden. Eine Lösung zum wirksamen Fixieren und Entlasten der Klebschicht in Bereichen erhöhter Rückfederneigung wurde exemplarisch mit der Clinchtechnik untersucht. Es zeigte sich, dass sinnvoll angeordnete Clinchpunkte eine starke Rückfederung im Bauteil weitgehend vermeiden können, eine bauteilangepasste Optimierung konnte jedoch im Vorhaben nicht näher untersucht werden.

Die Klebstoffe mit einem hohen Anteil an thermoplastischem Material bringen daher viele Vorteile zum Einsatz in der Bonded Blank- sowie der Hydro Bonded Blank Technik mit. Sie haben jedoch auch Nachteile wie ein schmelzklebstofftypisches adhäsives Versagen auf den feuerverzinkten Oberflächen und bieten gegenüber wässrigen Medien keine ausgeprägte Dichtwirkung, was an Bauteilen zu begrenzter Unterwanderung durch Lackiervorbereitungs- und Lackierbäder führte und in diesen Bereichen auch einen korrosiven Angriff durch Tausalze in den beschleunigten Alterungsuntersuchungen nach sich zog.

Mit einem Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung konnte projektbegleitend auch die Bauteilqualität bezüglich der klebtechnischen Anbindung untersucht und typische Bauteilfehler wie die vorher beschriebene Ablösung der Verstärkungsblechlamellen an Bonded Blanks detektiert werden. Das Verfahren der Ultraschall angeregten Lockin Thermografie bietet grundsätzlich sehr gute Voraussetzungen zur Kontrolle einer ausreichenden Anbindung der Klebschichten an die Bleche und sollte für diesen Einsatzzweck gezielt weiter untersucht werden, um verhältnismäßig einfach

Erkenntnisse über den Zustand der Bauteile in den verschiedenen Stadien der Fertigung zu erhalten.

Um die erforderlichen Umformversuche für das hydromechanische Tiefziehen durchführen zu können, musste ein vorhandenes Werkzeugsystem, basierend auf den vorliegenden Anforderungen, in Teilen modifiziert und in Teilen neu aufgebaut werden. Insbesondere der Stempel erforderte einen kompletten Neuaufbau, um die geplante Bauteilgeometrie abbilden zu können, vor allem aber aufgrund der geforderten Möglichkeit zur Verarbeitung unterschiedlicher Verstärkungsblechdicken. In diesem Zuge wurde ein Konzept des modularen Stempelaufbaus entwickelt und umgesetzt. Mit Hilfe der Umformsimulation wurde die Stempelgeometrie unter Beachtung der Prozessparameter beim hydromechanischen Tiefziehen optimiert.

Die Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Umformung der Doppellagenblechverbunde durch die Anwendung des hydromechanischen Tiefziehens konnte im Bereich der Gesamtbauteilumformung nachgewiesen werden. Der Effekt der im Wasserkasten allseitig wirkenden Drucküberlagerung des Bauteils hat sich im Hinblick auf einen Umformprozess mit größerer Streckziehreserve positiv ausgewirkt, was im Rahmen von Formänderungsanalysen nachgewiesen wurde. Hierfür sind geometriegleiche Bauteile identischer Werkstoff- und Blechdickenkombinationen in den unterschiedlichen Klebstoffsystemen hergestellt worden, die mit Drucküberlagerung im hydromechanischen Verfahren oder ohne Drucküberlagerung im klassischen Tiefziehprozess hergestellt und entsprechend untersucht wurden. Die Vergrößerung der Streckziehreserve begründet sich in einer homogeneren Kraftereinleitung in den Blechverbund, da durch das Andrücken an den Stempel die Reibung im Bereich des anliegenden Blechs erhöht wird.

Eine leichte Verringerung der durch das Verstärkungsblech in das Grundblech induzierten Kerbwirkung zeigte sich in teilweise größeren Bauteilziehtiefen, die bis zum Auftreten des Bauteilversagens in Form eines Reißers an der Verstärkungsblechkante erreicht werden konnten. Prozentual am stärksten kommt dieser Effekt bei den extremeren Werkstoff- und Blechdickenkombinationen (wie beispielsweise GB H 340 LAD in 1,5 mm als Kombination mit MSW1200 in 3,0 mm) zum Tragen, die allerdings eine Umformung bis auf die im Projekt vordefinierte Ziehtiefe von 140 mm nicht erreichen konnten. Daher wurde beispielsweise die genannte Kombination auch nicht in die weiteren Untersuchungen mit einbezogen.

Eine deutliche Erweiterung der Prozessgrenzen konnte durch die simulationsgestützte Optimierung der Verstärkungsblechzuschnitte nachgewiesen werden. Durch die optimierte Auslegung der Zuschnittsgeometrien mit größeren Entlastungskernen (und dadurch kleineren Lamellen) sowie dem Vorsehen von kreisförmigen Entlastungselementen im Auslauf der Kerben konnte eine

Verringerung der vom Verstärkungsblech durch Kontakt der Lamellen untereinander und ein Abzeichnen auf dem Grundblech verursachten Kerbwirkung beobachtet werden. Diese Prozessgrenzenerweiterung hat sich in größeren schadensfrei erreichbaren Ziehtiefen und einem robusteren Umformprozess gezeigt.

Da die Verbesserung der Umformeignung der Klebstoffe bei erhöhten Temperaturen nachgewiesen werden sollte, kam ein beheizbares Tiefziehwerkzeugsystem zur Herstellung von Rechtecknäpfen zum Einsatz. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden lokal verstärkte Doppellagenbleche zunächst im Ofen bis auf 45 °C (für die Polyurethanklebstoffe) bzw. 90 °C (für den reaktiven Co-Polyamid) erwärmt und dann im Werkzeug, das mittels integrierter Heizelemente auf die gleichen Temperaturen einstellbar ist, umgeformt. Das Bauteilverhalten wurde bei der anschließenden finalen Aushärtung und im Rahmen von Beultests untersucht. Dabei konnte eine Verbesserung der Verbundhaltbarkeit von warm umgeformten Doppellagenblechen in der finalen Aushärtungsstufe nachgewiesen werden. Eine Veränderung des Steifigkeitsverhaltens erwärmt umgeformter Bauteile konnte in den Beulversuchen jedoch nicht beobachtet werden.

Aus den Erfahrungen des Projektes heraus sollte die Weiterentwicklung der Klebstoffe für die strukturelle partielle Verstärkung durch die Kombination von Kleb- und Umformtechnik ansetzen und Polymermaterialien mit noch höheren Reaktivanteilen, tendenziell geringeren thermoplastischen Effekten und grundsätzlich auch verbesserter Eignung für stärkere Blechbeölungen auf Eignung für diese anspruchsvolle technologische Aufgabe betrachten. Das unter anderem anhand der Erkenntnisse in diesem Projekt nachgewiesene Potenzial der Bonded Blank Technologie könnte in zukünftigen Arbeiten im Rahmen der Erweiterung des Anwendungsspektrums umgesetzt werden. Als mögliche Ansatzpunkte dafür könnten nicht geschlossene bzw. nicht rotationssymmetrische Strukturen oder Bauteile durch diese Technologie bezüglich eines weiteren Freiheitsgrades zur Realisierung des Fahrzeugleichtbaus profitieren und auch dort die Möglichkeit, bestehende Werkzeuge nur geringfügig überarbeiten zu müssen, genutzt werden. Diese Strukturen und Bauteile könnten durch diese Technologie in ihren Eigenschaften und in der Verarbeitbarkeit verbessert werden. Sowohl die Weiterentwicklung der Bonded Blanks Technik als auch die möglichen prozesstechnischen Vorteile durch die Weiterentwicklung und Nutzung hydromechanischer Prozesse können dazu einen Beitrag leisten. Die in den letzten beiden Jahrzehnten stark angestiegene Derivatisierung in Bereichen der Fahrzeugproduktion (Flexibilisierung des Leichtbaus) oder der Herstellung anderer Massengüter könnten von einer Weiterentwicklung der Technologie stark profitieren.

9 Literaturverzeichnis

- [Bay94] Bay, N.; Jensen, S. S.; Malberg, M. P.; Grauslund, S.:
„FORMING LIMITS IN HYDROMECHANICAL DEEP DRAWING“.
Annals of the CIRP 43.: 253–256, 1994
- [Beh06] Behrens, B.-A.; Dilger, K.; Hübner, S.; Milch, M.; Wedemeier, A.;
Wisner, G.:
„WIRTSCHAFTLICHER LEICHTBAU DURCH DEN EINSATZ VON GEKLEBTEN
DOPPELAGENBLECHEN (BONDED BLANKS)“
Tagungsband EFB-Kolloquium 2006, Konstruktionskonzepte der
Gegenwart und Zukunft – Herausforderungen an die Blechbearbeitung,
7./8. März 2006, Fellbach
- [Beh06a] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Milch, M.; Sann, B.; Böhm, S.; Wedemeier,
A.; Wisner, G.:
„AUFFEDERUNG BEI GEKLEBTEN DOPPELAGENBLECHEN“
VDI-Z 148 (2006), Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, Nr. 1/2, S. 59 –
61.
- [Beh07] Behrens, B.-A.:
„Handbuch DER UMFORMTECHNIK –GRUNDLAGEN, TECHNOLOGIEN,
MASCHINEN“
Springer-Verlag Berlin, 2007 ISBN: 978-3-540-23441-8
- [Beh10] Behrens, B.-A.:
„PROZESSKETTE IM AUTOMOBILBAU – VOM WERKSTOFF ZUM PRODUKT“
Vorlesungsskript, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen,
Leibniz-Universität Hannover, 2010
- [Böh04] Böhm, S.; Dilger, K.; Wisner, G.; Deiler, G.; Milch, M.:
„HERSTELLUNG UND EINSATZ GEKLEBTER BONDED BLANKS“
Große Schweißtechnische Tagung 2004, Band 215, Hannover,
Magdeburg (2004)
- [Brä00] Bräunling, S.; Gehrke, J.; Kleinert, H.; Liebrecht, F.:
LEICHTBAUKONSTRUKTION DURCH PATCHWORKTECHNIK
Konferenz-Einzelbericht: DVS-Berichte, Band 209, S. 245-247
Düsseldorf (2000)

- [Die03] Diedrich, J.; Donhauser, C.; Stopp, R.; Bär, C.; Heinrich, M.:
HYDROPATCHWORK – GEKLEBTE HALBZEUGE BEIM AHU
UTF-Science (II/2003)
- [Dil04] Dilger, K.; Böhm, S.; Thoms, V.; Lau, P.:
UNTERSUCHUNGEN ZUM UMFORMVERHALTEN VON MIT REAKTIVEN HOTMELTS
VORBESCHICHTETEN FEINBLECHEN UND HALBZEUGEN
EFB Abschlussbericht, Band 215, Hannover (2004)
- [Doe02] Doege, E.; Deiler, G.:
ANWENDUNGSPOTENTIALE UND PROZESSGRENZEN FÜR DIE
UMFORMTECHNISCHE HERSTELLUNG VON STEIFIGKEITSOPTIMIERTEN
BAUTEILEN AUS DOPPELLLAGENBLECHEN (BONDED BLANKS)
FAT-Schriftenreihe Nr. 173, Frankfurt am Main, 2002
- [FAT06] FAT-Schriftenreihe 199:
„ANWENDUNGSPOTENZIALE UND PROZESSGRENZEN DER KLEBTECHNIK FÜR
DIE UMFORMUNG VON DOPPELLLAGENBLECHEN“
Abschlussbericht, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.,
Frankfurt am Main, 2006
- [FOS02] N. N.:
„UNTERSUCHUNGEN ZUM CRASHVERHALTEN GEKLEBTER UND
HYBRIDGEFÜGTER STAHLBLECHVERBINDUNGEN“
Abschlussbericht FOSTA P477, Studiengesellschaft
Stahlanwendungen e. V., Düsseldorf, 2002
- [Gas02] Gassan, J.; Harwick, W.:
DAS MECHANISCHE VERHALTEN VON KLEBVERBINDUNGEN IM CRASHFALL;
Adhäsion - Kleben & Dichten 46, 2002, S. 30-33
- [Gio00] Giorleo, G.; Meola, C.; Squillace, A:
„THE USE OF LOCK-IN THERMOGRAPHY IN INDUSTRIAL APPLICATIONS;
NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION, Vol. 16, 2000, p. 15-29
- [Has04] Hasenberg, D.; Dilger, K.; Böhm, S.; Zweschper, T.; Busse, G.:
CHARAKTERISIERUNG VON KLEBVERBINDUNGEN MITTELS
FREQUENZMODULIRTER ULTRASCHALLTHERMOGRAFIE,
DACH Jahrestagung, ZfP in Forschung, Entwicklung, Anwendung,
Salzburg, 2004

- [Has06] Hasenberg, D.:
„ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG GEKLEBTER VERBINDUNGEN MITTELS
ULTRASCHALL ANGEREGTER THERMOGRAFIE“,
Dissertation TU Braunschweig, 2006
- [Her84] Herold U.:
„VERBESSERUNG DER FORM- UND MAßGENAUIGKEIT KREISZYLINDRISCHER
WERKSTÜCKE AUS UNTERSCHIEDLICH VERFESTIGTEN WERKSTOFFEN DURCH
HYDROMECHANISCHES TIEFZIEHEN“.
Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dortmund (1984)
- [Hom87] Homayun, M.:
„VERHALTEN METALLISCHER WERKSTOFFE IM BEREICH HOHER
VERFORMUNGSGESCHWINDIGKEITEN“
Diss. RWTH Aachen, 1987
- [Hor98] Hora, P.:
„NUMERISCHE SIMULATIONSVERFAHREN IN DER UMFORMTECHNIK –
AUTOGRAPHIE UMFORMTECHNIK III“
ETH, Zürich, 1998
- [Hüt01] Hütte, H.:
UNTERSUCHUNGEN ZUM RÜCKFEDERungsverhalten HOCHFESTER
STAHLBLECHWERKSTOFFE BEIM TIEFZIEHEN“
Dissertation, Universität Hannover, Hannover (2001)
- [Kai07] Kaiser, W.-D.; Füssel, U.:
FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN UND BELASTUNGSBEDINGTE VERÄNDERUNGEN
IN GRENZFLÄCHEN GEKLEBTER MISCHVERBINDUNGEN AUS BESCHICHTETEN
FEINBLECHEN MIT 2-K-KLEBSTOFFEN
Abschlussbericht IGF-Nr. 14236 BR
- [Kle97] Kleinert, H.; Liebrecht, F.; Bräunling, S.:
MATERIALEINSPARUNGEN DURCH PATCHWORK-TECHNIK“
In: Adhäsion – Kleben & Dichten; Band 41, Heft 6, S. 35-37 (1997)
- [Kle03a] Kleber, W.: R.:
„50 JAHRE PULVERLACKIERUNG“
Berichtsband der Deutschen Forschungsgesellschaft für
Oberflächenbehandlung e. V. (DFO) 2003, Düsseldorf. S. 3-19

- [Kle03b] Kleinert, H.; Bräunling, S.; Liebrecht, F.; Jansen, I.; Häßler, R.:
„PATCHWORK BONDING IN AUTOMOTIVE INDUSTRY PRODUCTION -
PATCHWORKKLEBEN - PARTIELLE VERSTÄRKUNG VON BLECHBAUTEILEN FÜR
FAHRZEUGE“
Swissbonding 2003, S. 142-154
- [Kor03] Korves, L.; Mohrbacher, H.:
TAILORED BLANKS – OPTIMIERTE BLECHE FÜR DEN AUTOMOBILBAU;
ThyssenKrupp Techforum Nr. 12; S. 30-33 (2003)
- [Lam08] Lamprecht, K.:
„WIRKMEDIENBASIERTE UMFORMUNG TIEFGEZOGENER VORFORMEN UNTER
BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG MAßGESCHNEIDERTER HALBZEUGE“
Dissertation Universität Erlangen, 2008
- [LAN90] Lange, K.
UMFORMTECHNIK – BAND 3: BLECHBEARBEITUNG.
Springerverlag 1990
- [Lüh11] Lühning, A.; Peschka, M.; Behrens, B.-A.; Rosenberger, J.; Pielka, T.:
„ENTWICKLUNG EINER PROZESSKETTE ZUR HERSTELLUNG PARTIELL VER-
STÄRKTER BLECHSTRUKTUREN DURCH NEUARTIGE BASISKLEBSTOFFE UND
DARAN ANGEPASSTE VERARBEITUNGSTECHNIKEN“
GEMEINSAME FORSCHUNG IN DER KLEBTECHNIK 2011“; 22.-23.02.2011,
Frankfurt, S. 23-24
- [Mei01] Meinschmidt, P.:
„FRÜHZEITIGE HAFTUNGSFEHLER- UND KORROSIONSERKENNUNG MIT DER
ONLINE-THERMOGRAFIE“
Thermografie-Kolloquium, 2001
- [Mer03] Mertens, A.; Koch, M.:
TAILORED BLANKS: GESCHICHTE EINES ERFOLGS
In: Stuttgarter Lasertage Tagungsband SLT'03; S. 169-172 (2003)
- [Mil07] Milch, M.:
„TIEFZIEHEN VON GEKLEBTEN DOPPELLAGENBLECHEN“
Dissertation Leibniz Universität Hannover, 2007
- [Müt06] Mütze, S.:
GLEITZIEHBIEGEN VON PROFILN AUS FEINBLECH
Dissertation IFUM, Leibniz Universität Hannover, 2006

- [Neu06] Neugebauer, R.; Mauermann, R.; Menzel, S.; Standfuß, J.:
„PATCHWORK BLANKS - EINE NEUE HALBZEUGPHILOSOPHIE“
2007, Blech, Rohre, Profile, Jahrg. 54, 2007 Nr. 5, S. 10-12
- [Oeh01] Oehler, G; Kaiser, F.:
SCHNITT-, STANZ UND ZIEHWERKZEUGE
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001
- [Pie10] Pietschmann, J.:
„INDUSTRIELLE PULVERBESCHICHTUNG - GRUNDLAGEN, ANWENDUNGEN,
VERFAHREN“
Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 3. Aufl. 2010
- [Sch03] Schulze, B.; Bräunlich, H.:
KLEINE SERIEN IM BLICK MIT DOPPEL-PLATINEN-TECHNOLOGIE“
In: Blech In Form Heft 4 (2003)
- [Sem02] Semmler, S.:
„EINFLUSS DER PROZESSPARAMETER AUF DAS HYDROMECHANISCHE
UMFORMEN MIT VORFORMEN DER PLATINE“
Forschungsberichte, Technische Universität München, 2002
- [Sie01]. Siegert K, Aust M:
„TIEFZIEHEN VON BLECHFORMTEILEN BEI EXTREMEN HYDRAULISCHEN
GEGENDRÜCKEN.“
Kolloquium Wirkmedien Blechumformung, Dortmund (2001)
- [Sch05] Schmid, G.: S.:
„UNTERSUCHUNGEN DER EIGENSCHAFTEN GEKLEBTER BAUTEILE AUS
STAHLBLECH UNTER SCHLAGARTIGER BEANSPRUCHUNG“
Dissertation TU Braunschweig, 2005
- [Slt99] Schulte, S.:
UMFORMSIMULATION ALS FESTER BESTANDTEIL DES
PRODUKTENTSTEHUNGSPROZESSES BEI AUDI
16. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, (25.-26.02.1999)
- [Sma96] Smatloch, C.:
„ENTWICKLUNG EINES NUMERISCH EINSTELLBAREN WERKZEUGSYSTEMS FÜR
DAS TIEF- UND STRECKZIEHEN“
Dissertation, Universität Dortmund, Shaker Verlag, Aachen (1996)

- [Spr06] Springub, B.:
SEMI-ANALYTISCHE BETRACHTUNG DES TIEFZIEHENS
ROTATIONSSYMMETRISCHER BAUTEILE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER
MARTENSITEVOLUTION
Dissertation IFUM, Leibniz Universität Hannover, 2006
- [Sta85] Stalman, A.P.:
„NUMERISCHE SIMULATION DES TIEFZIEHPROZESSES“
Dissertation, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen,
Universität Hannover, 1985
- [Ste07] Steinke, P.:
„FINITE-ELEMENTE-METHODE – RECHNERGESTÜTZTE EINFÜHRUNG“
Springer Verlag, 2. Auflage, 2007
- [Thy08] N. N.
THYSSEN KRUPP PATCHWORK BLANKS – DIE LÖSUNG ZUR LOKALEN
VERSTÄRKUNG
Thyssen Krupp Tailored Blanks GmbH, Informationsbroschüre 08/2008
- [Tsc05] Tschätsch, H.:
„PRAXIS DER UMFORMTECHNIK – ARBEITSVERFAHREN, MASCHINEN,
WERKZEUGE“
8. aktualisierte und erweiterte Auflage, Vieweg Verlag
Wiesbaden 2005
- [VDA82] VDA 621-415:
„PRÜFUNG DES KORROSIONSSCHUTZES VON
KRAFTFAHRZEUGLACKIERUNGEN BEI ZYKLISCH WECHSELNDER
BEANSPRUCHUNG“
Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), Frankfurt/Main, 1982
- [Wis08] Wisner, G.; Thiele, R.; Böhm, S.; Dilger, K.:
“ASPECTS OF ADHESIVE BONDING USING THE BONDED BLANKS METHOD IN
BODY-IN-WHITE MANUFACTURING FOR LIGHTWEIGHT CONSTRUCTIONS.”
Automotive Adhesives, Sealants and Coatings 2008, 10.-11.06.2008,
Stuttgart, Smithers Rapra Technology Ltd., Shawbury, UK, 6 pages
- [Zäh03] Zäh, M. F.; Schlickerrieder, K.; Mosandl, Th.:
“Zerstörungsfreie Prüfverfahren und ihre Eignung für die Klebtechnik ”
Adhäsion - Kleben & Dichten, Band 47, Heft 6, 2003, S. 26-30

- [Zwe00] Zweschper, Th.:
“ZERSTÖRUNGSFREIE UND BERÜHRUNGSLOSE CHARAKTERISIERUNG VON
FÜGEVERBINDUNGEN MITTELS LOCKIN THERMOGRAFIE ”
ZfP-Zeitung, Artikel-Nr. 71, 2000

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2005)

Nr.	Titel	Preis / €
187	Zell- und molekularbiologische Untersuchungen zur DNS-schädigenden Wirkung des Rußkerns in einem Multi-Dose-Modell zur Erfassung von Dosis-Schwellenwert, 2005	34,-
188	Verwertung von Kunststoffbauteilen aus Altautos -Analyse der Umwelteffekte nach dem LCA-Prinzip und ökonomische Analyse, 2005	45,-
189	Darstellung des Schwingungsverhaltens von Fahrzeug-Insassen - Symbiose aus Experiment und Simulation, 2005	45,-
190	Elektromagnetische Feldverteilung und Einkopplungen bei Mobilfunkbetrieb im Kraftfahrzeug, 2005	45,-
191	Leichtbau mit Hilfe von zyklischen Werkstoffkennwerten für Strukturen aus umgeformten höherfesten Feinblech, 2005	30,-
192	Grundsatzuntersuchung zum quantitativen Einfluss von Reifenbauformen und -ausführung auf die auf die Fahrstabilität von Kfz bei extremen Fahrmanövern, 2005	45,-
193	Bewertung der Wirkung von Nutzfahrzeugkollektiven auf Spurrinnen und Ermüdung, 2005	28,-
194	Ermittlung der aktuellen Konzentration und Verteilung von Platingruppenelementen (PGE), 2005	30,-
195	Neue Wege des Effektmonitorings für partikelgebundene Schadstoffe in Dieselabgasen, Hemoglobin adducts of dinitropyrenes as a marker for Diesel emission exposure in humans (Nutzung von Dinitropyren-Hämoglobinaddukten als Biomarker für Dieselabgasexposition), 2005	39,-
196	Bewertung lokaler Berechnungskonzepte zur Ermüdungsfestigkeit von Punktschweißverbindungen , 2005	30,-
197	Berechnungsmethoden für die Lebensdauerabschätzung von MSG- bzw. lasergeschweißten Kehlnähten dünnwandiger Stahlblechstrukturen, 2005	30,-
198	Verbesserung der Prognosefähigkeit der Crashsimulation aus höherfesten Mehrphasenstählen durch Berücksichtigung von Ergebnissen vorangestellter Umformsimulation, 2005	30,-
199	Anwendungspotentiale und Prozeßgrenzen der Klebtechnik für die Umformung von Doppel-lagenblechen, 2006	76,-
200	Thermisches Fügen für die stahlintensive Hybridbauweise im Fahrzeugleichtbau, 2006	76,-
201	Lufthygienische Beurteilung von Pkw-Innenraumfiltern, 2006	96,-
202	Vergleich verschiedener Konzepte der Bodensimulation und von drehenden Rädern zur Nachbildung der Straßenfahrt im Windkanal und deren Auswirkung auf Fahrzeuge, 2006	40,-
203	Methodischer Ansatz im Stahlleichtbau am Beispiel Federbein/Dämpfer, 2006	50,-
204	Innovative Nfz-Konzepte - Gesamtwirtschaftliche Effekte durch Einführung schwerer und langer Lkw, 2006	45,-
205	Technische Kompatibilität von innovativen Nutzfahrzeugkonzepten auf den kombinierten Verkehr Straße/Schiene sowie den Containerverkehr, 2006	50,-
206	Größenaufgelöste physikalische und chemische Bestimmung von elementarem und Organischem Kohlenstoff in Nanopartikeln, 2006	55,-
207	Erstellung einer VHDL-AMS-Modellbibliothek für die Simulation von Kfz-Systemen, 2006	50,-

208	Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, 2006	50,-
209	Innovative Nfz-Konzepte - Akzeptanzuntersuchungen zur Einführung und zum Einsatz Innovativer Nutzfahrzeuge, 2007	40,-
210	Das Konzept des Situationsbewusstseins und seine Implikationen für die Fahrsicherheit, 2007	50,-
211	FAT-Richtlinie Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation, 2007	40,-
212	Innovative Nfz-Konzepte - Wirtschaftlichkeitsanalyse EuroCombi, 2007	35,-
213	Störfestigkeit von Fahrzeugelektronik bezüglich ESD und Impulseinkopplung, 2007	40,-
214	Betriebsfeste Bemessung von mehrachsig belasteten Laserstrahlschweißverbindungen aus Stahlfeinblechen des Karosseriebaus, 2007	40,-
215	Örtlich ertragbare Beanspruchungen bei Spannungskonzentrationen in Karosseriebauteilen aus hoch- und höherfesten Stählen, 2008	35,-
216	Auswirkung der Berücksichtigung lokaler Größen des E-Moduls im Hinblick auf die verbesserte Auslegung umgeformter Karosserieblechstrukturen aus Stahl, 2008	35,-
217	Aktueller Stand und Trends in der CFK-Berechnung im Fahrzeugbau, 2008	49,-
218	In-vitro-Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von an Dieselpartikel gebundenen polyaromatischen Kohlenwasserstoffen und Nitropyrenen, 2008	35,-
219	Bewertender Vergleich der aktuellen Empfehlungen zu den Luftqualitätsgrenzwerten NO ₂ + Evidenz-basierter Vergleich der epidemiologischen Studien 2002-2006 zu Gesundheitseffekten durch NO ₂ , 2008	40,-
220	Fahrdynamische Analyse innovativer Nfz-Konzepte (EuroCombi), 2008	49,-
221	Entwicklung einer Methode zur vergleichenden Bewertung von Schwingfestigkeitsversuchen mit gefügten Stahlblechen in Abhängigkeit des Versagensverhaltens, 2009	40,-
222	Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw, 2009	35,-
223	Entwicklung einer Prüfspezifikation zur Charakterisierung von Luftfedern, 2009	35,-
224	Klimatische Daten und Pkw-Nutzung - Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa, USA, China und Indien, 2009	35,-
225	CO ₂ -Einsparung durch Verflüssigung des Verkehrsablaufs - Abschätzung staubedingter CO ₂ -Emissionen und von Reduktionspotentialen durch Verbesserung des Verkehrsablaufs, 2009	35,-
226	Modellbasierte Systementwicklung, 2009	50,-
227	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünobleche aus Stahl, 2010	40,-
228	Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010	35,-
229	Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010	40,-
230	Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010	40,-
231	Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2010	kostenloser Download
232	Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011	kostenloser Download

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2011

VDA | Verband der
Automobilindustrie

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de
www.vda-fat.de