Laboruntersuchung zur Prozess-stabilität beim Niet-Clinchen

Dissertation zur Erlangung
des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
Dr.-Ing.

vorgelegt

der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

von Dipl.-Ing. Marc Reinstettel
geboren am 18.09.1977 in Colmar / Frankreich

München, den 13.02.2007

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 14

2 Stand der Technik 17

2.1 Fügeverfahren 17

2.1.1 Mechanische Fügeverfahren 17

2.1.2 Thermische Fügeverfahren 26

2.1.3 Hybride Fügeverfahren 29

2.2 Fügeanlage 29

3 Zieldefinition und Aufgabenstellung 33

4 Prüfmethoden 37

4.1 Metallografische Untersuchungen 37

4.2 Festigkeitsuntersuchungen (Anhang 1) 37

4.2.1 Quasistatische Zuguntersuchungen 38

4.2.2 Zyklische Zuguntersuchungen 39

4.2.3 Crashtest am Fallprüfstand (Anhang 5) 42

5 Festigkeitsuntersuchungen 46

5.1 Festigkeitsuntersuchung ohne Klebstoff 46

5.1.1 Quasistatische Verbindungsfestigkeit 46

5.1.2 Zyklische Untersuchungen ohne Klebstoff (Anhang 4) 60

5.1.3 Crash-Tests (Anhang 5) 72

5.2 Festigkeitsuntersuchung mit Klebstoff 84

5.2.1 Quasistatische Verbindungsfestigkeit 85
5.2.2 Zyklische Verbindungsfestigkeit 90
5.2.3 Crash-Tests 95

6 Versuchsauswertung 100
6.1 Versuchsauswertung ohne Klebstoff 100
6.1.1 Quasistatische Verbindungsfestigkeit 100
6.1.2 Zyklische Verbindungsfestigkeit 101
6.1.3 Crash – Tests 103
6.2 Versuchsauswertung mit Klebstoff 104
6.2.1 Quasistatische Verbindungsfestigkeit 104
6.2.2 Zyklische Verbindungsfestigkeit 105
6.2.3 Crash – Tests 106
6.3 Zusammenfassung Versuchsauswertung 108

7 Weiterentwicklung beim Niet-Clinchen 114
7.1 Entwicklungsschritte des Fraunhofer Institut 115
7.2 Variantenentwicklung des Zielverfahrens Nietclinchen 116
7.2.1 Versuche mit Amboss und Amboss mit Außenring 117
7.2.2 Untersuchungen mit Matrizen aus dem Stanznieten 118
7.2.3 Untersuchungen mit dem Strukturklebstoff Betamate 1480 ... 120
7.2.4 Untersuchungen verschiedener Werkstoffpaarungen 121
7.2.5 Festigkeitsvergleich Stanznieten/Nietclinchen (Anhang 12) 122

8 Prozessschwankungen beim Nietclinchen 125

8.1 Methodik und statistische Grundlagen 125
8.1.1 Zielgrößen und Faktoren 125
8.1.2 Wechselwirkungen 126
8.1.3 Versuchsplan und Matrixexperimente 127
8.1.4 Vollständige faktorielle Versuchspläne 127
8.1.5 Fraktionelle faktorielle Versuchspläne 128
8.1.6 Versuchspläne nach G.Taguchi 130
8.1.7 Statistische Auswertung 132
8.2 Untersuchungen mittels statistischer Versuchsplanung .. 137
8.2.1 Umsetzung der Versuchspläne 137
8.2.2 Auswertung der Versuchspläne 144
8.2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen 150
8.3 FE-Simulation 157
8.3.1 Anpassung der Simulation 157
8.3.2 Einfluss der Niethärte 162
8.3.3 Sensitivitätsanalyse (Anhang 14) 164
9 Zusammenfassung 169
Literaturverzeichnis 171

Abkürzungen und Fachbegriffe

ACF	„**a** line **c f**rame“ Bezeichnung der Tucker Fachwerkzange
Almac	Produktname einer Nietbeschichtung gegen Korrosion
Betamate 1460	heißhärtender Strukturklebstoff auf Basis von Epoxidharz
BUS-Schnittstelle	Schnittstelle zur Kommunikation zweier Systeme
C-Bügel	Aufnahme für Nietspindel und Matrize; Bauteil eines Fügesystems, auch als Zange bezeichnet
Clinchen	Ist Durchsetzfügen ohne Hilfsfügeteil
E60	BMW-interne Bezeichnung der aktuell produzierten 5er Baureihe
E88	BMW-interne Bezeichnung der aktuel produzierten 1er Reihe
EBG	„**E**rst-**B**au-**G**ruppe“ eines Prototyps
F01	BMW interne Bezeichnung der nächsten 7er Reihe
FEM-Simulation	Computer-Simulation auf Basis der „**F**inite-**E**lemente-**M**ethode“
FIZ	„**F**orschungs- und **I**nnvations**z**entrum“ der BMW Group
GRAV	„**G**ewichts-**R**eduzierter-**A**luminium-**V**oderbau“

GS	„Group Standard“ von BMW mit allen Normen zu jeden Fügeverfahren (Anhang)
Halsdicke	Qualitätskriterium einer Clinchverbindung (Abb. 2-2)
Haltezeit	Zeitraum der Fixierung der zu fügenden Bauteile durch den Niederhalter
Härtklassen	Einteilung der Niethärte in Klassen (H2, H4, H6)
Hinterschnitt	Qualitätskriterium einer Stanzniet- und Clinchverbindungen (Abb. 2-1; 2-2)
HV 10	Vickers – Härte beim Einwirken von 10 kg
K.O. - Kriterium	Kriterium, bei dem ein betrachtetes Element aus vorher definierten Gründen ausscheidet
Kopfzug	Prüfverfahren zur Ermittlung der Festigkeit (GS-96012)
KTL-Beschichtung	„Kathodische-Tauch-Lackierung“ zum Korrosionsschutz von Karosserieteilen
Mischbauverbindung	Verbindung unterschiedlicher Werkstoffklassen
Niederhalter	fixiert die zu fügenden Bauteile und verhindert die ungewollte Verformung der Bauteile während des Fügevorgangs; Bauteil des Setzkopfes von Stanzniet- und Clinchanlagen
Nietkopfendlage	Qualitätskriterium einer Stanznietverbindung
Nietspindel	erzeugt eine translatorische Bewegung des Stempel und führt die Setzbewegung aus, Baugruppe eines Stanznietsystems
Normalverteilung	auch als Gaußverteilung bezeichnet

PFU	**P**rozess**f**ähigkeits**u**ntersuchung
QV	**Q**ualitäts**v**ereinbarung
WPS	Widerstandspunktschweißen
Restboden	Qualitätskriterium einer Stanzniet- und Clinch-verbindung (Abb. 2-2)
Scherzug	Prüfverfahren zur Ermittlung der Festigkeit (GS-96012)
SRC	„**s**elfpierce **r**iveting **c**ontrol“ Bezeichnung der Steuereinheit von Tucker Stanznietsystemen
SRF	„**s**elfpierce **r**iveting **f**eeder“ Bezeichnung der Zuführereinheit von Tucker Stanznietsystemen
SRT	„**s**elfpierce **r**iveting **t**orque“ Bezeichnung der Nietspindel von Tucker Stanznietsystemen
Standardabweichung	statistische Kenngröße
Stanznieten	mechanisches Fügeverfahren mit Stanzniet als Hilfsfügeteil ohne Vorlochen
Stempel	Bauteil des Setzkopfes von Stanzniet- und Clinchanlagen
TK	Abteilungsbezeichnung „**T**echnologie **K**arrosseriebau“
TRIP-Stahl	„Transition Induced Plasticity“; Stahlsorte, die beim Kaltumformen sehr stark verfestigt
Überdrückung	Weg des Stempels mit der Bauteiloberfläche als Nulllinie, durch Überdrückung wird die Nietkopfendlage bestimmt

HHSN	Halbhohlstanznieten
NC IWU	IWU Nietclinchen
CN TOX	TOX Clinchnieten
Cl	Clinchen
VSN	Vollstanznieten
HSF-BN	Blindnieten
FDS-SCH	„**f**low **d**rill **s**cew“ FDS Verschraubung
Pentaflow	Loch- und gewindeschneidende Schraube für Dünnbleche
WPS	Widerstandspunktschweißen
PRBS	Punk-Rührreibschweißen
PS	Plasmapunktschweißen
FWW	Faktoren Wechselwirkung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Karosserie des Z8 aus Aluminium [1] 14
Abbildung 1-2: CAD- Darstellung der aktuellen BMW 5er Rohkarosserie [1] 15
Abbildung 2-1: Prozessablauf Halbhohlstanznieten [14] 17
Abbildung 2-2: Prozessablauf Clinchen ohne Schneidanteil [14] 18
Abbildung 2-3: Prozessablauf TOX-Clinchnieten [56] 19
Abbildung 2-4: Prozessablauf IWU-Nietclinchen [42] 20
Abbildung 2-5: Flacher Amboss 20
Abbildung 2-6: Schliffbild einer Nietclinchverbindung 21
Abbildung 2-7: Prozessablauf Vollstanznieten [17] 22
Abbildung 2-8: Prozessablauf Blindnieten (selbstschneidend) [44] 23
Abbildung 2-9: Prozessablauf FDS-Verschraubung [19] 24
Abbildung 2-10: Prozessablauf PentaFlow-Verschraubung [35] 25
Abbildung 2-11: Aufbau des Widerstandpunktschweißens [22] 26
Abbildung 2-12: Prozessablauf Punkt-Rührreibschweißen [54] 27
Abbildung 2-13: Prozessablauf Plasmaschweißen [49] 28
Abbildung 2-14: Fachwerkzange mit Nietspindel und Adapter für die Roboteranbindung 30
Abbildung 2-15: Roboter KR200/2 [11] 32
Abbildung 3-1: Entstehung der Luftkanäle einer Stanznietverbindung 33
Abbildung 3-2: Stanznietverbindungen mit Luftkanälen im Klebstoff 34
Abbildung 3-3: IWU-Nietclinchverbindungen ohne Luftkanäle im Klebstoff 34
Abbildung 4-1: Schliffbild einer Widerstandspunktschweißverbindung 37
Abbildung 4-2: Probengeometrie für Scher- und Kopfzug [12] 38
Abbildung 4-3: Zugmaschine für quasistatische Zugversuche, Fa. Instrom (links) und Hydroimpulszylinder für zyklische Zugversuche, Fa. Schenk (rechts) 39
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Wöhlerlinie [9] 40
Abbildung 4-5: Wöhlerlinie (Clinchen der Fa. TOX) 41
Abbildung 4-6: Kraft-Energie-Weg-Diagramm Crash-Versuch 42
Abbildung 5-1: Kopfzugprobe Stanznietverbindung; stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts) 46
Abbildung 5-2: Schliffbild einer Stanznietverbindung 47

Abbildung 5-3: Nietclinchverbindung; stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts). 48
Abbildung 5-4: Schliffbild einer Nietclinchverbindung 48
Abbildung 5-5: TOX-Clinchnietverbindung; stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts) 49
Abbildung 5-6: Schliffbild einer TOX-Clinchnietverbindung 50
Abbildung 5-7: Clinchverbindung; stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts) 51
Abbildung 5-8: Schliffbild einer Clinchverbindung 51
Abbildung 5-9: Vollstanznietverbindung, stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts) 52
Abbildung 5-10: Schliffbild einer Vollstanznietverbindung 53
Abbildung 5-11: Blindnietverbindung, Nietkopf (links), Schließkopf (rechts) 54
Abbildung 5-12: Schliffbild einer Blindnietverbindung 54
Abbildung 5-13: FDS-Verschraubung, klemmblechseitig (links), schraubblechseitig (rechts) 55
Abbildung 5-14: Schliffbild einer FDS-Schraubverbindung 55
Abbildung 5-15: Schliffbild einer PentaFlow-Schraubverbindung 56
Abbildung 5-16: Oberfläche einer WPS-Verbindung / Schweißparameter 57
Abbildung 5-17: Schliffbild einer Punktschweißverbindung 57
Abbildung 5-18: Punkt-Rührreibgeschweißen; Oberseite (links), Unterseite (rechts) 58
Abbildung 5-19: Schliffbild einer Punkt-Rührreibverbindung 58
Abbildung 5-20: Plasmaschweißverbindung; Oberseite (links), Unterseite (rechts). 59
Abbildung 5-21: Schliffbild einer Plasmaschweißverbindung mit Rissen 59
Abbildung 5-22: Versagensbilder zyklisch geprüfter Halbhohlstanznietverbindungen 61
Abbildung 5-23: Versagensbilder zyklisch geprüfter Nietclinchverbindungen 62
Abbildung 5-24: Versagensbilder zyklisch geprüfter TOX-Clinchnietverbindungen 63
Abbildung 5-25: Versagensbilder zyklisch geprüfter Clinchverbindungen 64
Abbildung 5-26: Versagensbilder zyklisch geprüfter Vollstanznietverbindungen 65
Abbildung 5-27: Versagensbilder zyklisch geprüfter Blindnietverbindungen 66
Abbildung 5-28: Versagensbilder zyklisch geprüfter FDS-Verschraubungen 67
Abbildung 5-29: Wöhlerlinien PentaFlow-Verschraubung 68
Abbildung 5-30: Versagensbilder zyklisch geprüfter PentaFlow-Verschraubungen 69
Abbildung 5-31: Versagensbilder zyklisch geprüfter WPS-Verbindungen 70

Abbildung 5-32: Versagensbilder (zyklisch) Punkt-Rührreibschweißen 71
Abbildung 5-33: Versagensbilder zyklisch geprüfter Plasmaschweißverbindungen 72
Abbildung 5-34: Crash-Verhalten von Halbhohlstanznietverbindungen; Bewertung 73
Abbildung 5-35: Hohe Schwankungen beim Crash-Verhalten von Nietclinchverbindungen; Bewertung 74
Abbildung 5-36: Crash-Verhalten von Clinchnietverbindungen; Bewertung 75
Abbildung 5-37: Kraft-Weg-Diagramm aus den Crash-Untersuchungen clinchgenieteter Profile 75
Abbildung 5-38: Crash-Verhalten von Clinchverbindungen; Bewertung 76
Abbildung 5-39: Crash-Verhalten von Vollstanznietverbindungen; Bewertung 77
Abbildung 5-40: Crash-Verhalten von Blindnietverbindungen; Bewertung 78
Abbildung 5-41: Crash-Verhalten von FDS-Verschraubungen; Bewertung 79
Abbildung 5-42: Crash-Verhalten von PentaFlow-Verschraubungen; Bewertung ... 80
Abbildung 5-43: Crash-Profil ohne Deckel 80
Abbildung 5-44: Crash-Verhalten von WPS-Verbindung; Bewertung 81
Abbildung 5-45: Crash-Verhalten von Punkt-Rührreibverbindungen; Bewertung 82
Abbildung 5-46: Crash-Verhalten von Plasmaschweißverbindungen; Bewertung ... 83
Abbildung 5-47: Scherzugproben nach dem Zugversuch; Versagensbild 85
Abbildung 5-48: Versagensbild der Scherzugproben – IWU-Nietclinchen 86
Abbildung 5-49: Versagensbild der Scherzugproben – TOX-Clinchnieten 87
Abbildung 5-50: Scherzugproben nach dem Zugversuch; Versagensbild – Clinchen 88
Abbildung 5-51: Versagensbild der Scherzugproben – Widerstandspunktschweißen 89
Abbildung 5-52: Versagensbild zyklisch geprüfter Halbhohlstanzniet-Scherzugproben 90
Abbildung 5-53: Versagensbild zyklisch geprüfter IWU-Nietclinch-Scherzugproben 91
Abbildung 5-54: Versagensbild (zyklisch) TOX-Clinchniet-Scherzugproben (Mischbruch) 92
Abbildung 5-55: Versagensbild zyklisch geprüfter Scherzugproben; Ermüdungsbruch (links), Halsriss (rechts)-Clinchen 93
Abbildung 5-56: Versagensbild zyklisch geprüfter Scherzugproben 94

Abbildung 5-57: Crash-Verhalten von Halbhohlstanznietverbindungen; Bewertung 95
Abbildung 5-58: Crash-Verhalten von Nietclinchverbindungen; Bewertung 96
Abbildung 5-59: Crash-Verhalten von Nietclinchverbindungen; Bewertung 97
Abbildung 5-60: Crash-Verhalten von Clinchverbindungen; Bewertung 98
Abbildung 5-61: Crash-Verhalten von WPS-Verbindungen; Bewertung 99
Abbildung 6-1: Übersicht der im Versuch ermittelten quasistatischen Festigkeiten (ohne Klebstoff) mit Streubreite 100
Abbildung 6-2: Versuchsdiagramm aller Fügeverfahren im Vergleich der Scherzugfestigkeit 102
Abbildung 6-3: Versuchsdiagramm aller Verfahren im Vergleich 103
Abbildung 6-4: Versuchsdiagramm aller Verfahren (mit Klebstoff) im Vergleich 104
Abbildung 6-5: Ergebnisse aus den zyklischen Festigkeitsuntersuchungen 105
Abbildung 6-6: Oberlast der Fügeverfahren bei 10^5 Lastwechseln 105
Abbildung 6-7: k-Faktoren der fünf geprüften Fügeverfahren 106
Abbildung 6-8: Versuchsdiagramm aller Fügeverfahren im Vergleich 107
Abbildung 6-9: Vergleich Festigkeitsuntersuchung 108
Abbildung 7-1: Risse im Unterblech bei einem Randabstand von weniger als 10mm 115
Abbildung 7-2: Verbindung mit Amboss und Außenring (Tiefe 0,5mm, Durchmesser 10mm) 117
Abbildung 7-3: Mit Matrize (Tiefe 1,6mm, Durchmesser 10mm) gefügte Verbindung 118
Abbildung 7-4: Verbindung mit Betamate 1480 (Haltezeit 0,5s) 120
Abbildung 7-5: Fügematrix (grün gekennzeichnete Verbindungen sind fügbar) 122
Abbildung 7-6: Ergebnisse aus den quasi -statischen Untersuchungen 123
Abbildung 7-7: Wöhlerkurven mit zugehörigen Vertrauensbereichen 124
Abbildung 7-8: Bruchbilder Nietclinchen; rechts zyklisch, links quasistatisch) 124
Abbildung 8-1: Vollständiger faktorieller 2^k-Versuchsplan mit k=2 128
Abbildung 8-2: Fraktioneller faktorieller 2^{k-p}-Versuchsplan 129
Abbildung 8-3: Maximal mögliche Auflösung / Bewertung der Auflösung [2] 130
Abbildung 8-4: Kombination zweier orthogonaler Felder nach G. Taguchi 131
Abbildung 8-5: Standardnormalverteilung und zugehörige Eingrenzungen 133
Abbildung 8-6: 2^2-Versuchsplan mit vier Faktorstufenkombinationen 134

Abbildung 8-7: Konstanten, Faktoren und Zielgrößen 137
Abbildung 8-8: Faktor Winkel 138
Abbildung 8-9: Faktor Spalt 138
Abbildung 8-10: Faktor Überdrückung 139
Abbildung 8-11: Verbindungen aus dem Versuchsumfang (rot eingekreist) 139
Abbildung 8-12: Versuchsmatrix nach G. Taguchi 141
Abbildung 8-13: fraktioneller faktorieller Versuchsplan 143
Abbildung 8-14: Statistische Kenngrößen aus dem Versuchsplan nach G. Taguchi 144
Abbildung 8-15: Effekte und Signifikanzen aus dem Versuchsplan nach G. Taguchi 146
Abbildung 8-16: statistische Kenngrößen aus dem fraktionellen faktoriellen Versuchsplan 147
Abbildung 8-17: Effekte / Signifikanzen aus dem fraktionellen faktorieller Versuchsplan 149
Abbildung 8-18: Effekte des Versuchsplans nach Taguchi 150
Abbildung 8-19: Effekte des faktoriellen fraktionellen Versuchsplans 151
Abbildung 8-20: Berechnete Fließkurven für H340LAD 157
Abbildung 8-21: Abgleich Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,4) 158
Abbildung 8-22: Abgleich Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,6) 158
Abbildung 8-23: Überlagerung Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,4) 159
Abbildung 8-24: Abgleich Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,4) 160
Abbildung 8-25: Abgleich Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,6) 160
Abbildung 8-26: Überlagerung Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,4) 161
Abbildung 8-27: Einfluss der Niethärte (Niet 5,3x4,0, Überdr. -0,6) 162
Abbildung 8-28. Hohlraumbildung bei zunehmender Niethärte (Umformgrad) 163
Abbildung 8-29: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bzgl. Hinterschnitt mit Stahl H340 LAD 164
Abbildung 8-30: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bzgl. Halsdicke 166
Abbildung 8-31: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bzgl. Restboden 168

1 Einleitung

Die Basis sind widerstandspunktgeschweißte Stahl-Karosserien. Stähle werden weiterentwickelt, um höhere Festigkeit zu erreichen (z.B. höchstfeste warmumzuformende Blechwerkstoffe).
Dadurch besteht die Möglichkeit , Materialdicke zu reduzieren und gleichzeitig eine Gewichtsreduzierung der gesamten Karosserie zu erreichen.
Parallel zu der Weiterentwicklung der Stahlwerkstoffe werden neue Leichtbauwerkstoffe entwickelt. Eine dieser neuen Leichtbaumaterialgruppen bilden die Aluminiumlegierungen. Ein Vorteil von Aluminium ist das gegenüber Stahl geringere Gewicht. Um dieses Gewichtspotenzial voll auszunutzen, gibt es verschiedene Konzepte für Vollaluminium-Karosserien (Abb. 1-1). Die heutigen Entwicklungen bewegen sich aufgrund des großen Preisunterschiedes (Durchschnittspreis für Aluminium: 2,6 €/kg, für Stahl: 0,6 €/kg) in Richtung Mischbau.

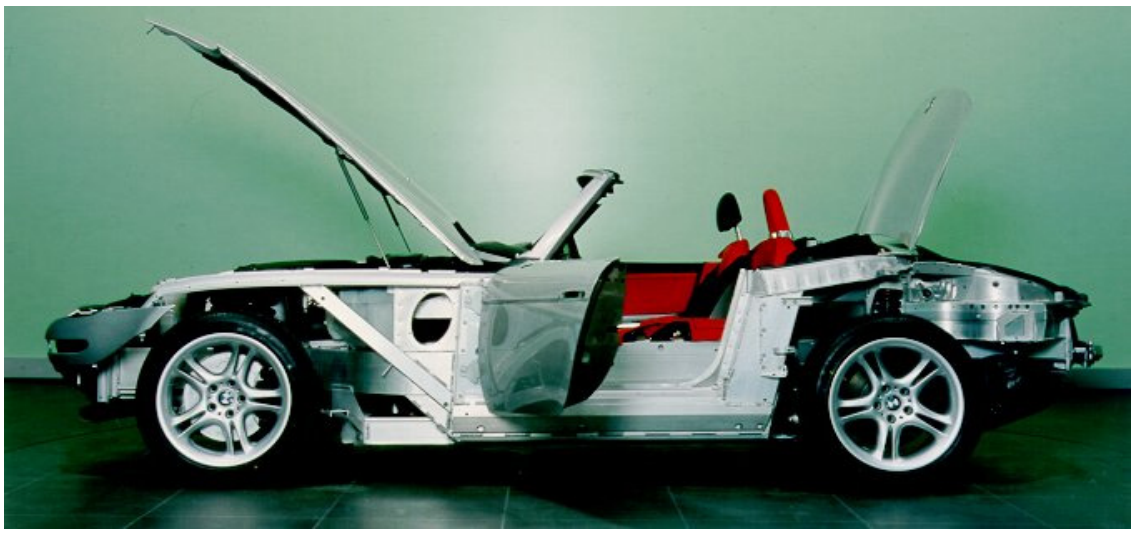


Abbildung 1-1: Karosserie des Z8 aus Aluminium [1]

Der aktuelle BMW 5er ist zum Beispiel mit einem GRAV, d.h. gewichtsreduzierten Aluminium Vorderbau – konstruiert.

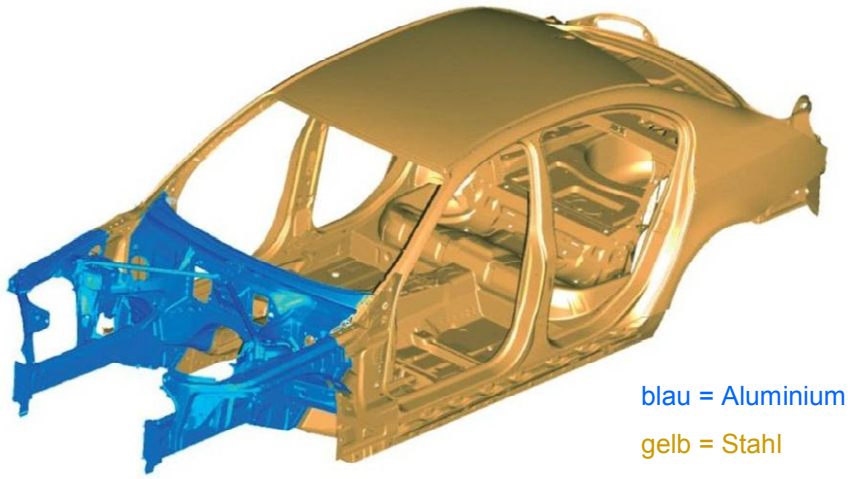


Abbildung 1-2: CAD- Darstellung der aktuellen BMW 5er Rohkarosserie [1]

Um derartige innovative Materialkonzepte in Serie umsetzen zu können, mussten auch die Verbindungstechnik in Richtung der kalten Fügetechniken weiterentwickelt werden.
Stand der Technik für das Fügen von Mischbauverbindungen ist heute der Einsatz der Verfahren Halbhohlstanznieten oder Clinchen als Hybridverfahren d.h. in Kombination mit dem Einsatz von Klebstoffen.

Es gibt im Automobilbau auch noch andere Möglichkeiten für Mischbau-verbindungen. Die Basis stellt immer der Stahl dar, da er am besten das Gleichgewicht aus Festigkeit, Kosten und Umformverhalten vereint. Es gibt die Alternative, Stahl mit CFK oder Magnesium zu fügen. Dem Gewichtsvorteil stehen die höheren Kosten als bei Aluminium, gegenüber. Außerdem gibt es mehr Korrosionsprobleme. Deswegen wird im zweiten Teil dieser Arbeit (ab Kapitel 7) ausschließlich der Mischbau Stahl/Aluminium thematisiert.

Im Automobilbau wird aus Kostengründen eher eine 5000er-Aluminiumlegierung (Al,Mg) als eine 6000er-Legierung (Al,Mg,Si) verwendet. Konkret handelt es sich bei dieser Arbeit um ein EN AW 5042 mit einer Blechdicke von 1,5 mm. Die Blechdicke ist angepasst worden, um eine optimale Steifigkeit der Karosserie zu

erreichen. Im Anhang 6.5 befindet sich ein Datenblatt mit den Kennwerten des verwendeten Werkstoffes.

Die Wahl des richtigen Fügeverfahrens ist sehr materialabhängig. Für Aluminium-Verbindungen, z.B.: Frontklappen bis Blechdicken von ca. 1,0 mm wird zurzeit das Clinchen bevorzugt. Bei dickeren Aluminium- bzw. Mischverbindungen (Stahl/Aluminium) stellt das teurere Stanznieten, das aber deutlich höhere Festigkeitswerte liefert, den heutigen Stand der Technik dar.
Zur Nacharbeit dieser beiden Verfahren eignet sich das Blindnieten sehr gut. Es verfügt über eine höhere Kopfzugfestigkeit bei gleicher Scherzugfestigkeit.
Bei beiden Verfahren kommt oft die Kombination mit Strukturklebstoff zum Einsatz. Der Vorteil einer solchen Kombination ist neben gesteigerten Festigkeitswerten eine geringere Korrosionsanfälligkeit der Verbindung.

Im Rahmen der Entwicklung neuer mechanischer Fügeverfahren arbeitet die BMW Group eng mit externen Partnern zusammen. Das bestehende Patent für das Nietclinchverfahren wurde am Dresdner Fraunhofer Institut, institutsteil des IWU, entwickelt. Um eine breitere Verfahrensbasis zu vergleichen, werden die Untersuchungen nicht nur für die Standardverfahren Stanznieten und Clinchen sondern auch für das Zielverfahren Nietclinchen realisiert, sowie für eine Anzahl ausgewählter neuer punktförmiger Fügeverfahren.

In dieser Arbeit wird auf alle punktförmigen Fügeverfahren, die Aluminium-verbindungen fügen können und Roboterfähig sind, eingegangen. Es sind 11 Verfahren, die man in kalte und warme Fügetechnik unterscheiden kann. In der kalten Fügetechnik findet man die Verfahren mit Niet (Halbhohlstanznieten, Vollstanznieten, TOX Clinchnieten, IWU Nietclinchen, Blindnieten), ohne Niet (Clinchen) und die Schraubverbindungen (FDS-, PentaFlow-Verschraubung). Bei den warmen Fügeverfahren sind es das Widerstands, Plasmapunkt und Punkt-Reibrührschweißen.

2 Stand der Technik

2.1 Fügeverfahren

2.1.1 Mechanische Fügeverfahren

Das Referenzverfahren Halbhohlstanznieten

Beim Halbhohlstanznieten werden zwei oder mehr Bleche in einem durchgehenden Stanz- und Umformvorgang vernietet. Der Prozess benötigt dabei keine vorgestanzten Löcher, aber eine zweiseitige Zugänglichkeit.

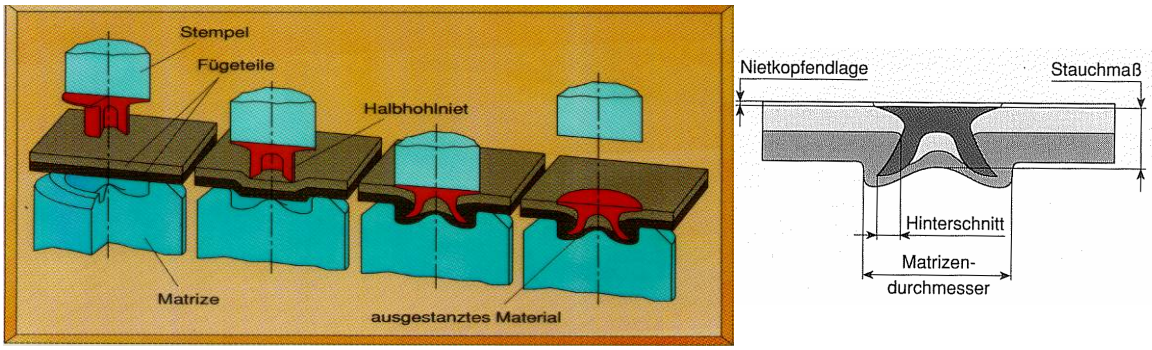


Abbildung 2-1: Prozessablauf Halbhohlstanznieten (rechts) Prüfungskriterien (links) [14]

Der Stanzniet (ALMAC beschichtet, Anhang 10) durchschneidet, nach Aufsetzten eines Niederhalters, das obere Blech und verspreizt sich im darunter liegenden Blech (Abbildung 2-1). Der erzielte Hinterschnitt des Nietschafts im unteren Blech ist für die Festigkeit der Verbindung maßgebend. Bei mehr als zwei Fügeteilen durchschneidet der Stanzniet alle oberen Blechlagen und verspreizt sich ausschließlich im untersten Blech.

Die Fügekräfte von bis zu 60 kN werden durch den Stempel übertragen. Für das Verspreizen des Stanznietes ist eine Formmatrize verantwortlich.

Vor dem eigentlichen Setzvorgang werden die zu fügenden Bleche mittels einer Vorspanneinheit, dem Niederhalter fixiert.

Die verwendeten C-Rahmen-Zangen können sowohl stationär, als Handzange oder als Roboterzange eingesetzt werden.

Das Halbhohlstanznieten ist ein etabliertes, im Einsatz befindliches Fügeverfahren. Es eignet sich daher als Referenz zu den untersuchten Verfahren.

Clinchen

Das Clinchen wird als ausgereiftes, korrosionssicheres Verfahren vielfach im Karosseriebau eingesetzt. Beim Clinchen oder Durchsetzfügen werden die zu fügenden Bleche in einem durchgehenden Umformvorgang kraft- und formschlüssig miteinander ver-bunden (siehe Abbildung 2-2). Dabei wird zwischen Durchsetzfügen mit und ohne Schneidanteil unterschieden. Das Clinchverfahren benötigt ebenso eine zweiseitige Zugänglichkeit.
Das am verbreiteste Verfahren verläuft ohne Schneidanteil, d.h. die Fügepartner werden an den Kanten der Clinchpunkte nicht durchtrennt. Die hierbei angewandte Punktgeometrie ist der Rundpunkt. Als Clinchwerkzeuge dienen Roboter- oder Handzangen sowie stationäre Vorrichtungen. Die Fügekräfte werden pneumatisch, hydraulisch, pneumohydraulisch oder servoelektrisch erzeugt. Ein großer Vorteil dieses Fügeverfahrens ist ein Fügepunkt ohne Zusatzwerkstoff, da es keine Hilfsfügeteil gibt.

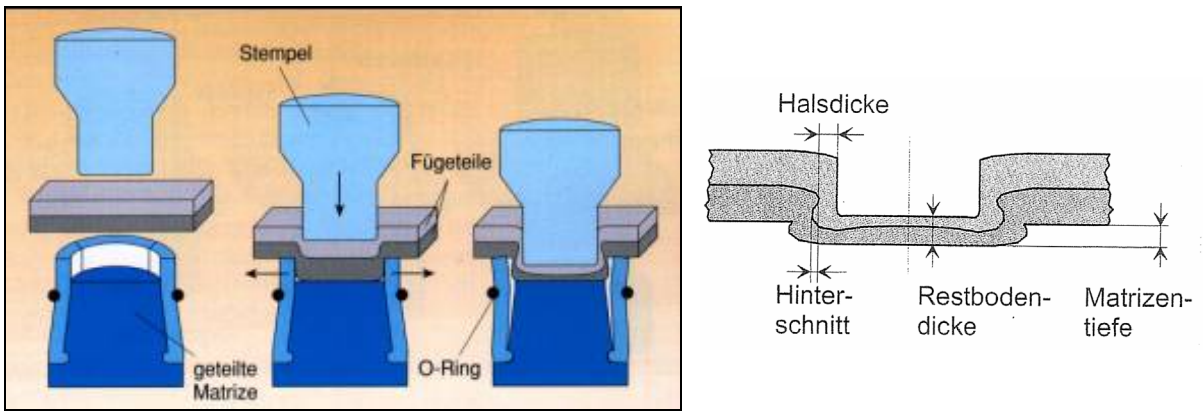


Abbildung 2-2: Prozessablauf Clinchen ohne Schneidanteil (rechts) Prüfungskriterien (links)[14]

1. Die beiden Fügeteile liegen auf der Matrize auf. Gehalten durch den Niederhalter. Der Stempel ist zurückgefahren.
2. Der Stempel durchsetzt das obere Blech, das verdrängte Material der beiden Fügeteile fließt dabei in die Matrize. Die Matrize kann entweder geteilt oder einteilig aufgebaut sein.
3. Durch den Druck des Stempels wird das Material zwischen Stempel und Matrize verdrängt und fließt zur Seite weg.

TOX-Clinchnieten

Das von der Firma TOX Pressotechnik GmbH entwickelte Clinchnieten (Abbildung 2-3) stellt eine Kombination aus Stanznieten und Clinchen dar und benötigt eine zweiseitige Zugänglichkeit.
Das Hilfsfügeteil, wird ähnlich wie der herkömmliche Stanzniet gefügt. Der Prozess kommt ohne Schneidanteil aus.

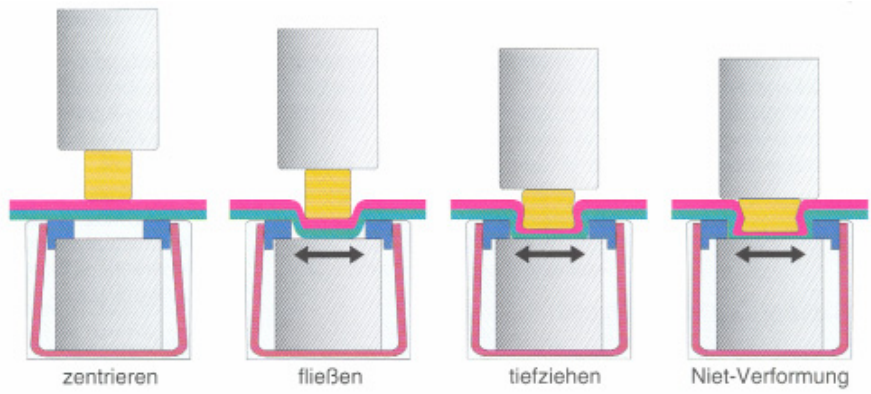


Abbildung 2-3: Prozessablauf TOX-Clinchnieten [56]

Ein symmetrischer Vollniet wird unter Zuhilfenahme einer vierteiligen Matrize plastisch verformt. Der Niet wirkt dabei auf die Fügepaarung vorerst ähnlich wie ein Clinchstempel. Der Blechwerkstoff wird tiefgezogen. Zusätzlich zum umgebenden Material übernimmt der Niet auch eine weitere Haltefunktion. Ein Vorteil dieser Verbindungstechnik gegenüber dem Halbhohlstanzniet ist die einfache und störungsfreie Zuführung des Fügelementes, wegen der Axialsymmetrie. Die Beschichtung des Hilfsfügeteiles wird durch den hohen Umformgrad stark beansprucht. Gegenüber dem Halbhohl Stanzniet tritt eine deutlich größere Oberflächenvergrößerung an der Stirnfläche des Niets auf, woraus eine Schichtdickenverringerung mit geringerer Korrosionsstabilität resultiert.

IWU-Nietclinchen

Das Nietclinchen (Abbildung 2-4) des Fraunhofer IWU Institutteil Dresden, benötigt wie das TOX- Clinchnieten, auch eine zweiseitige Zugänglichkeit. Es stellt ebenfalls eine Kombination aus Stanznieten und Clinchen ohne Scheidanteil dar, wobei die Matrize durch einen flachen Amboss ersetzt wird (Abbilung 2-4).

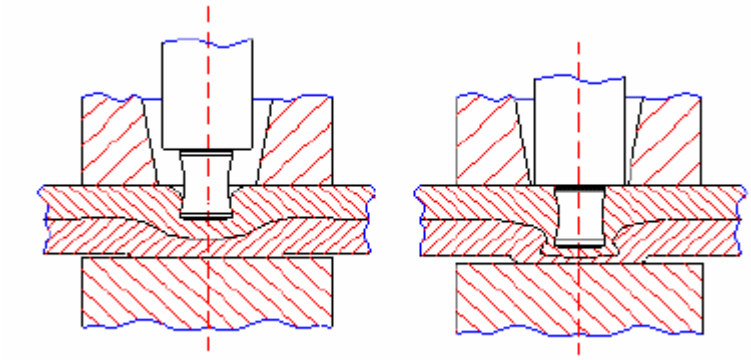


Abbildung 2-4: Prozessablauf IWU-Nietclinchen [42]

Wenn die Ausführung des Nietes mit Senkkopf gewählt wird (Abb. 2-5) sind Oberflächenvergrößerungen und Korrosionsgefahr vergleichbar mit dem Halbhohlstanznieten. Die Koaxialitätsanforderung zwischen Stempel und Matrize entfällt nicht, normale Anforderungen sind ≤ 0,2 mm beim Nietclinchen viel größer. Dadurch wird der Einrichtaufwand geringer sowie die Prozessunsicherheit nimmt ab.

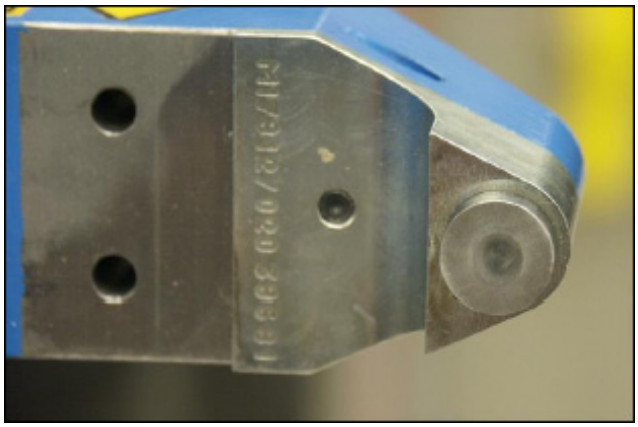


Abbildung 2-5: Flacher Amboss

Die matrizenseitige Erhebung des Bleches ist durch den Einsatz des flachen Ambosses deutlich geringer als der Schließkopf bei den anderen Verfahren, dadurch optisch ansprechend, leicht zu reinigen und gut lackierbar.

Abbildung 2-6: Schliffbild einer Nietclinchverbindung

Für den Einsatz des Nietclinchens genügt eine leicht modifizierte Standard-Nietzange, was sich günstig auf die Ersatzteilversorgung auswirkt.
Allerdings muss der Niet gegenüber konventionellen Halbhohlstanznieten mit relativ hoher Setzkraft gefügt werden. Beim Halbhohlstanznieten ist die Gefahr eines Matrizenbruches durch Einsatz des Amboss nicht mehr gegeben.

Vollstanznieten

Beim Vollstanznieten werden zwei oder mehr Bleche ohne Vorbohroperation mit Vollstanznieten gefügt. Vor dem eigentlichen Stanznietvorgang werden die zu fügenden Bleche mittels einer Vorspanneinheit (Niederhalter) zusammengehalten. Danach drückt der Nietstempel den Niet durch die zu fügenden Bleche. Die Fügekraft wird hydraulisch oder elektrisch aufgebracht. Dabei durchdringt der Niet die Fügeteile und dient als Schneideelement. Der durch gestanzte Restboden (Butzen) fällt unten heraus. Auf Grund einer bestimmten Konturgeometrie der Matrize wird Fügematerial vom unteren Blech fließend in die noch freie Ringnut des Nietes gepresst (Abbildung 2-7).

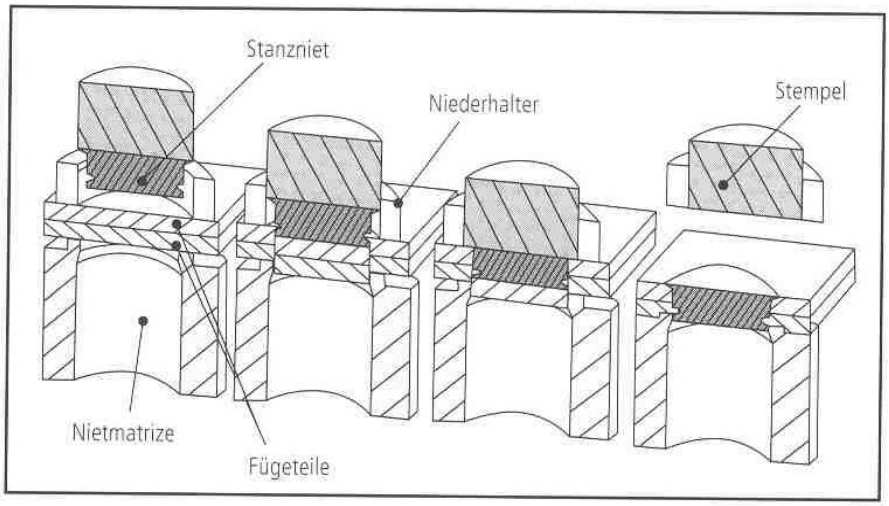


Abbildung 2-7: Prozessablauf Vollstanznieten [17]

Die Nietzangen, die als C-Rahmen (C-Bügel) konzipiert sind, können sowohl stationär als auch als Hand- oder Roboterzange eingesetzt werden.
Nachteilig ist die zweiseitig erforderliche Zugänglichkeit des Werkzeuges. Dadurch ist es notwendig, die Bauteile konstruktiv anzupassen.

Blindnieten (selbstschneidend)

Der Blindniet wird im Karosseriebau bei einseitiger Zugänglichkeit eingesetzt. Ein wesentlicher Nachteil ist der Aufwand für das Vorlochen der beiden Fügepartner und dabei besonders das nur aufwändig realisierbare axakte Fluchten der Bohrungen.

Um dem zu entgehen, wurde mit dem „selfpiercing“ Blindniet ein Fügeelement entwickelt, welches das kostenintensive Vorbohren einspart. Mittels einer Schneidkante am Kopf des Zugdorns werden die Fügepartner im gleichen Arbeitsgang gelocht und gefügt (Abbildung 2-8). Bei diesem Verfahren ist gegenüber dem herkömmlichen Blindnieten eine Matrize und somit beidseitige Zugänglichkeit der Fügeteile notwendig. Weitere Nachteile dieser Fügetechnik sind die hohen Betriebskosten und die beidseitige Störkontur (ungeeignet für Sichtpunkte).

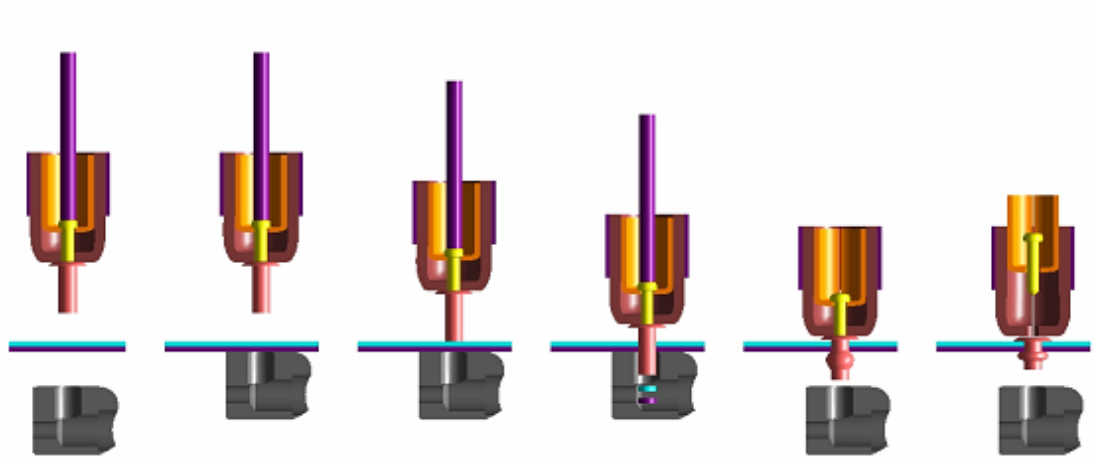


Abbildung 2-8: Prozessablauf Blindnieten (selbstschneidend) [44]

FDS-Schraubverbindung

Bei der FDS-Verschraubung handelt es sich um eine lochbildende- und gewindefurchende Fügemethode (siehe Abbildung 2-9) mit einseitiger Zugänglichkeit. Die „Flow Drill Screw“ (FDS) des Herstellers EJOT erzeugt zunächst unter hoher Drehzahl (2000-6000 min^{-1}) und hoher Andrückkraft (600-2000 N) durch Reibungswärme ein Loch.
Nach Umschalten auf geringere Drehzahl wird durch das Schraubengewinde in den zähflüssig erwärmten Blechdurchzug ein Mutterngewinde eingeformt. Die Gewindehöhe liegt deutlich üder der Blechdicke, dies ist mit üblichen Blechschrauben nicht herstellbar. Es ergeben sich somit hohe Lösemomente.

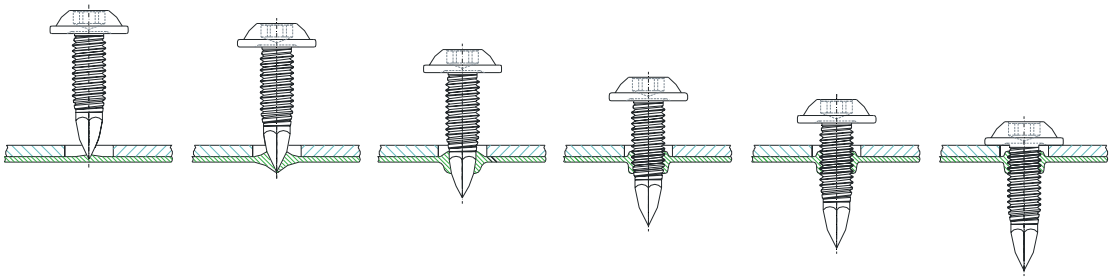


Abbildung 2-9: Prozessablauf FDS-Verschraubung [19]

Dieses Fügeverfahren bietet mit der einseitigen Zugänglichkeit einen entscheidenden Vorteil gegenüber anderen mechanischen Fügeverfahren.

PentaFlow-Schraubverbindung

Ähnlich der FDS-Verschraubung, der Firma EJOT handelt es sich bei dem von der Firma BETZER entwickelten Verfahren um eine loch- und gewindefurchende Fügemethode mit ebenso einseitiger Zugänglichkeit. Eine Direktverschraubung, die auf der Technologie des Gewindefurchens beruht, wird realisiert.
Die Pentaflow-Schraube zeichnet sich durch eine Fünfkantabflachung im unteren Gewindebereich aus, welches zur Verringerung des Reibanteiles am Eindrehmoment und zur Formung des Gewindes im Blechdurchzug dient. Der Ablauf dieses Verfahrens ist in Abbildung 2-10 schematisch dargestellt. Genau wie bei der FDS-Verschraubung liegt der entscheidende Vorteil dieses Verfahrens in der einseitigen Zugänglichkeit und der Spanlosigkeit. Als Nachteile sind allerdings die nicht gegebene Verwendbarkeit in Sichtbereichen und die hohe Verletzungsgefahr zu bemerken sowie die Entstehung von Aluminium-Staub beim eigentlichen Fügeprozess.

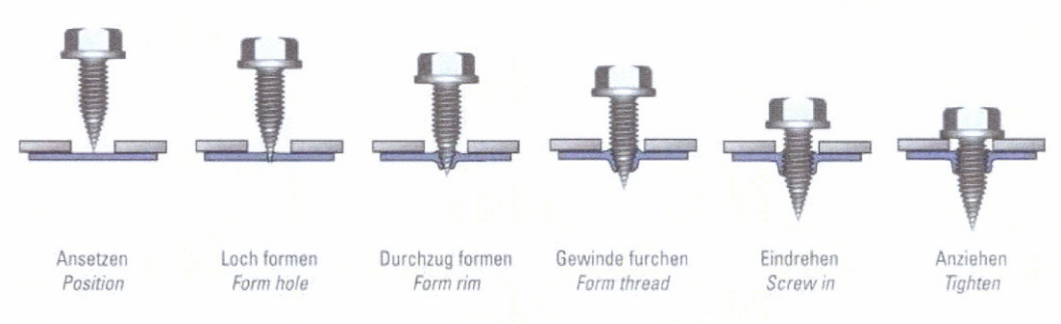


Abbildung 2-10: Prozessablauf PentaFlow-Verschraubung [35]

Gegenüber der FDS-Verschraubungstechnik der Firma EJOT zeichnet sich die PentaFlow Schraube durch geringere Anpresskräfte (≥ 800 N) und Drehzahlen aus. Dies ermöglicht den Einsatz von Akku-Schraubern ab einer Drehzahl von ca. 500 U/min. Weiteres Unterscheidungsmerkmal zur FDS-Verschraubung sit die deutlich geringere thermische Beeinflussung der Fügepartner. Darüber hinaus ist mit der Pentaflow-Schraube ein wiederholtes Lösen und Anziehen realisierbar.

2.1.2 Thermische Fügeverfahren

Widerstandspunktschweißen

Das WPS ist eine etablierte und kostengünstige Fügetechnik zum Fügen von Stahl. Es ermöglicht die effektive und prozess-sichere Herstellung von Stahlkarosserien. Als besondere Vorteile sind die Werkzeugflexibilität und die weitgehende Eignung für Sichtpunkte hervorzuheben. Bei Aluminium ist dieses Fügeverfahren jedoch nur bedingt einsetzbar, da durch Verschleißerscheinungen der Elektrodenkappen der Wartungs- und Kostenaufwand (Fräsen und Polieren der Elektrodenkappen) rapide steigt. Weiter steigen die Ausrüstungsinvestitionen durch die extremen Anlaufströme.

Beim Widerstandspunktschweißen werden die zu verbindenden Bauteile durch Kupferelektroden örtlich zusammengepresst (zweiseitige Zugänglichkeit). Durch den Stromfluss erfolgt eine starke Erhitzung der Bauteile an der Berührungsstelle infolge Joule'scher Widerstandserwärmung, bis dort ein schmelzflüssiger Bereich, die Schweißlinse, entsteht. Nach dem Erkalten des Materials ist zwischen den Bauteilen eine linsenförmige stoffschlüssige Verbindung entstanden. Abbildung 2-11 stellt den Aufbau des Widerstandpunktschweißens schematisch dar.

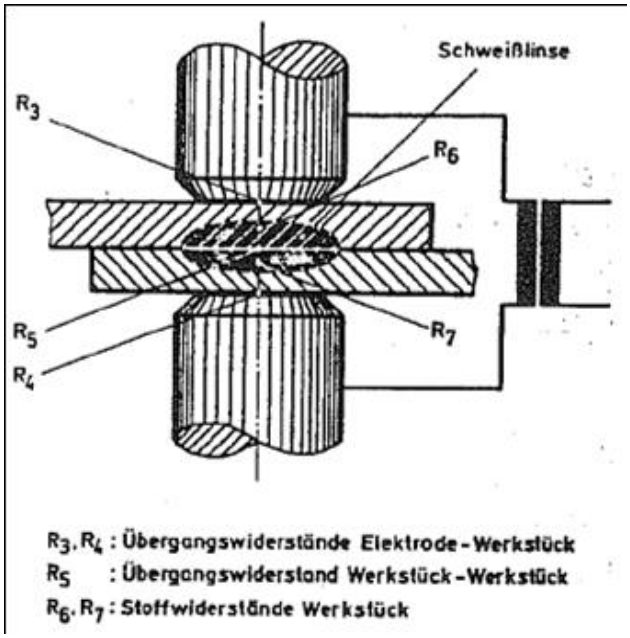


Abbildung 2-11: Aufbau des Widerstandpunktschweißens [22]

Die Berechnung erzeugter Wärmemenge nach dem Joule'schem Gesetz:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

Die erzeugte Wärmemenge Q ist abhängig vom Schweißstrom I, dem Gesamtwiderstand R und der Schweißzeit t. Der Gesamtwiderstand R setzt sich aus den Stoffwiderständen der Elektroden, den Stoffwiderständen der Bauteile und den Kontaktwiderständen zusammen.
Die elektrische Leitfähigkeit von Aluminium ist 3,4-mal höher als bei Stahl. Dies bedeutet, dass beim Schweißen sehr hohe Stromstärken verwendet werden müssen, um trotz des geringen Widerstands genügend Wärme zum Aufschmelzen des Materials zu erzeugen.

Punkt-Rührreibschweißen

Das heutige Widerstandspunktscheißen von Aluminium weist Nachteile auf. So ist der Verschleiß der Elektrodenkappen sowie der hohe Bedarf an elektrischer Leistung (Durchbrechen der Oxidschichten/ Kühlung) negativ zu beurteilen.
Einen Ausweg stellt das Punkt-Rührreibschweißen dar. Die durch Reibung erzeugte Hitze verschweißt die Fügematerialien punktförmig. Dazu fährt ein rotierendes Werkzeug zur Erzeugung der Reibungshitze mit definierter Vorschubkraft in das stempelseitige Material (Abbildung 2-12).

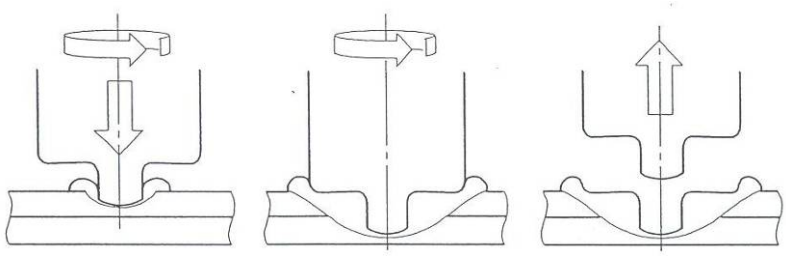


Abbildung 2-12: Prozessablauf Punkt-Rührreibschweißen [54]

Matrizenseitig wirkt ein Gegenhalter (zweiseitige Zugänglichkeit erforderlich). Das von der Reibungshitze aufgeweichte Material erfährt einen plastischen Fluss und wird gleichzeitig, infolge der anhaltenden Vorschubkraft und Rotation des Werkzeuges „verrühert". Anschließend fährt der Stempel in die Ausgangsposition zurück. Infolge des nicht mehr benötigten Schweißstroms, Kühlung und Aufbereitung von Elektrodenkappen, entfallen diese Kostenpunkte. Ein weiterer

Vorteil des Punkt-Rührreibschweißens ist der gegenüber Widerstandspunktschweißen (WPS) weniger ausgeprägte Wärmeverzug am Material. Nachteilig ist der vom Stift des Werkzeuges erzeugte zylindrische Hohlraum, welcher eine starke Kerbwirkung begünstigt, was auf eine relativ geringe Dauerschwingfestigkeit schließen lässt. Wird die Taktzeit mit Widerstandspunktschweißen verglichen, so ist diese beim Punktreibschweißen größer als beim Widerstandspunktschweißen.

Plasmapunktschweißen

Das Plasmapunktschweißen, stellt ein neues Verfahren dar. Hierbei wird Plasma durch Hochspannung gezündet und mittels eines Lichtbogens zum Werkstück übertragen (Abbildung 2-13). Die örtliche Wärmeinbringung führt zum Verschmelzen des Materials. Das bei diesem Verfahren zugeführte Schweißgas ist ein Gemisch aus 10% Argon und 90 % Helium.

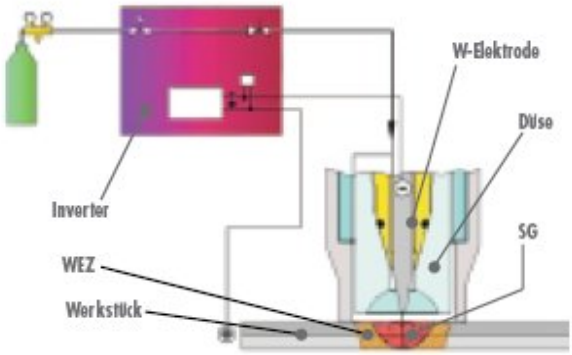


Abbildung 2-13: Prozessablauf Plasmaschweißen [49]

Der größte Vorteil dieses Fügeverfahrens ist, dass lediglich einseitige Zugänglichkeit benötigt wird. Darüber hinaus sind die kurze Prozesszeit, die einfache Handhabung und die Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Materialpaarungen und Wandstärken positiv zu bewerten.
Des Weiteren sind die hohe Energiedichte und große Einbrandtiefe bei geringem Wärmeverzug aufgrund der hohen Schweißgeschwindigkeit kennzeichnende Merkmale.
Die Verbindung wird ohne Zuführung von Schweißzusatzwerkstoffen hergestellt. Dies führt zu Nachteilen wie Rissbildungen im Schweißpunkt, Verformungen des

Schweißpunktes selbst sowie ein problematisches Ver-halten bei Lufteinschlüssen zwischen den Blechen. Auch erfordert ein Anlegieren von Schweißspritzern an der Wolfram-Nadel ein häufiges Reinigen.

2.1.3 Hybride Fügeverfahren

Die kalte Fügetechnik kann durch Einsatz mit Festigkeitsklebstoff hinsichtlich der drei Lasteinleitungsarten (quasistatisch, zyklisch, Crash) kombiniert werden. Bei einer Kombination mit einem derartigen Strukturklebstoff dienen die Fügepunkte eher als Heftpunkte. Bei der warmen Fügetechnik ist ein Einsatz von Klebstoff kritisch. Bis jetzt konnte eine Kombination erst beim Widerstandspunktschweißen realisiert werden. Aber mit der kalten Fügetechnik bleibt der Prozess stabiler als beim Schweißen.

2.2 Fügeanlage

Heutzutage sind in der Produktion 80% der Stanznietzangen Roboterzangen. Es wird ein Standard aus der Produktion verwendet, um die Prozessschwankungen beim Nietclinchen zu testen. Diese Tucker-Zange und der Kuka-Roboter werden im Folgenden in einigen Sätzen beschrieben.

Tucker Stanznietsystem

Das verwendete Stanznietsystem der Firma Tucker setzt sich aus Steuereinheit, Zuführeinheit, Nietspindel und C-Bügel zusammen. Die einzelnen Komponenten sind modular austauschbar.

Steuereinheit :

Die Steuereinheit ist in einem Schaltschrank integriert. Als Bedienungs-oberfläche wird ein Industrie-PC eingesetzt. Das System arbeitet weggesteuert (nicht kraftgesteuert). Zur Prozessüberwachung werden Blechdicken- und Nietlängenmessungen durchgeführt. Zusätzlich wird bei jedem Fügevorgang der Kraft-Weg-Verlauf mit einer hinterlegten Hüllkurve abgeglichen.

Zuführeinheit :

In der Zuführeinheit (Nietbunker) werden die Niete bereitgestellt. Je nach Nietgröße beträgt das Fassungsvermögen bis zu 20.000 Stück. Nach der Vereinzelung werden die Niete per Druckluft über einen bis zu 10 m langen flexiblen Schlauch zur Nietspindel transportiert.

Nietspindel

Die Nietspindel vom Typ SRT 80 SX führt die Setzbewegung aus. Als Antrieb wird ein drehzahlgeregelter Servomotor (400V/50Hz) verwendet. Die Steuerspannung wird von der Steuereinheit bereitgestellt. Über ein verspanntes Getriebe und einem Planetengewinderollentrieb wird die Rotations- in die Translationsbewegung des Stempels umgewandelt. Der maximale Öffnungshub beträgt 140 mm. Die Hubgeschwindigkeit wird mit 96 mm/s angegeben.

Mit der SRT80-Spindel können die Niete mit einer Maximalkraft von 60 kN gesetzt werden. Die Spindel kann auf unterschiedlichen Zangengeometrien montiert werden.

Nietspindel SRT 80 SX:	
Öffnungshub max.:	140mm
Hubgeschwindigkeit:	96mm/s
Fachwerkzange ACF:	
Ausladung:	403mm
Gewicht:	60kg
Zul. Belastung:	60kN

Abbildung 2-14: Fachwerkzange mit Nietspindel und Adapter für die Roboteranbindung

Fachwerkstanznietzange (C-Bügel):

Der C-Bügel [Abb. 2-14] wird rein spanend aus hochfestem Stahl gefertigt. Aufgrund der Fachwerkstruktur beträgt das Gewicht lediglich 60 kg. Die maximale Ausladung beträgt 403 mm. Konstruiert wurde die Zange für eine maximale Belastung von 60 kN.
Trotz der Aufweitung der Zange bleiben Stempel und Matrize während des gesamten Fügevorganges stets in einer Flucht. Aufnahmen für Matrize und Nietspindel sind standardisiert. Die Anbindung der Zange an den Roboter erfolgt über einen Adapter.

Weiterentwicklungen

Die aktuell eingesetzten Systeme haben folgende Nachteile:

- Hohe Invest- und Wartungskosten
- Taktzeit 1,5 s langsamer als ein Schweißpunkt
- Setzkraft für Nietclinchverbindungen zu gering (60 kN)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde deshalb gemeinsam mit Systemherstellern ein neues Lastenheft entwickelt und umgesetzt. Entwicklungsziel war ein System, welches die zukünftigen Ansprüche der 5er, 6er, 7er Produktlinien bei BMW erfüllt. Die Zange hat:

- Neue Spindel mit einer Setzkraft von 80 kN bei doppelter Geschwindigkeit
- Neues Nietzuführkonzept, mit der die Taktzeit um 0,7 Sekunden reduziert wird
- Neuer Bunker, Steuerung, C-Bügel wo die Möglichkeit besteht, die Investkosten um 30% zu reduzieren

Kuka KR200/2

Der KR200/2 ist ein sechsachsiger Industrieroboter für Punkt- und Bahnsteuerungsaufgaben. Er besteht aus einem feststehenden Grundgestell, auf dem sich um eine senkrechte Achse das „Karussell“ mit Schwinge, Arm und Hand dreht. Die Hand dient mit ihrem Anbauflansch zur Aufnahme von Werkzeugen.

KR200/2:

Nenntraglast:	200kg
Zusatzlast:	80kg
Reichweite max.:	2645mm
Wiederholgenauigkeit:	±0,3mm
Anzahl der Achsen:	6
Gewicht:	1120kg

Abbildung 2-15: Roboter KR200/2 [11]

Die Nenn-Traglast von 200 kg wird bei einer maximalen Armausladung von 2645 mm erreicht. Eine Zusatzlast von 80 kg kann am Arm angebracht werden. Last und Eigengewicht der Gelenkkomponenten werden durch ein in sich geschlossenes Gewichtsausgleichssystem statisch weitgehend ausgeglichen. Die Grundkörper der beweglichen Hauptbaugruppen bestehen aus Leichtmetallguss. Gelenke und Getriebe sind weitgehend spielfrei und werden von bürstenlosen Servomotoren angetrieben (400V/50Hz). Die Wiederholge-nauigkeit beträgt ±0,3 mm. Die zugehörige Steuerungs- und Leistungselektronik (KR C1) ist in einem Steuerschrank untergebracht. Die Bedienung und Programmierung erfolgt über einen Standard-Industrie-PC oder über ein daran angeschlossenes Control Panel (KCP).

3 Zieldefinition und Aufgabenstellung

Mischbauverbindungen werden derzeit mittels Halbhohlstanznieten als Hybridverfahren in Kombination mit Kleben ausgeführt. Der Vorteil des Halbhohlstanznietens gegenüber dem Clinchen ist die höhere Festigkeit der gefügten Verbindungen.

Einer der Nachteile des Halbhohlstanznietens ist die Bildung von Luftkanälen in dem aufgetragenen Klebstoff. Die Luftkanäle wirken sich nachteilig auf die Korrosionsbeständigkeit aus, wodurch ein Abdichten der Fügeverbindungen notwendig ist. Die Luftkanäle entstehen in der ersten Phase des Fügevorgangs. Bevor das Oberblech durchgestanzt ist, entsteht ein Spalt zwischen Oberblech und Unterblech. Dieser Spalt ist der Ausgangspunkt dieser Luftkanäle in dem Klebstoff. Abbildung 3-1 zeigt die Entstehung eines solchen Spaltes und Abbildung 3-2 die Luftkanäle einer gefügten Stanznietverbindung.

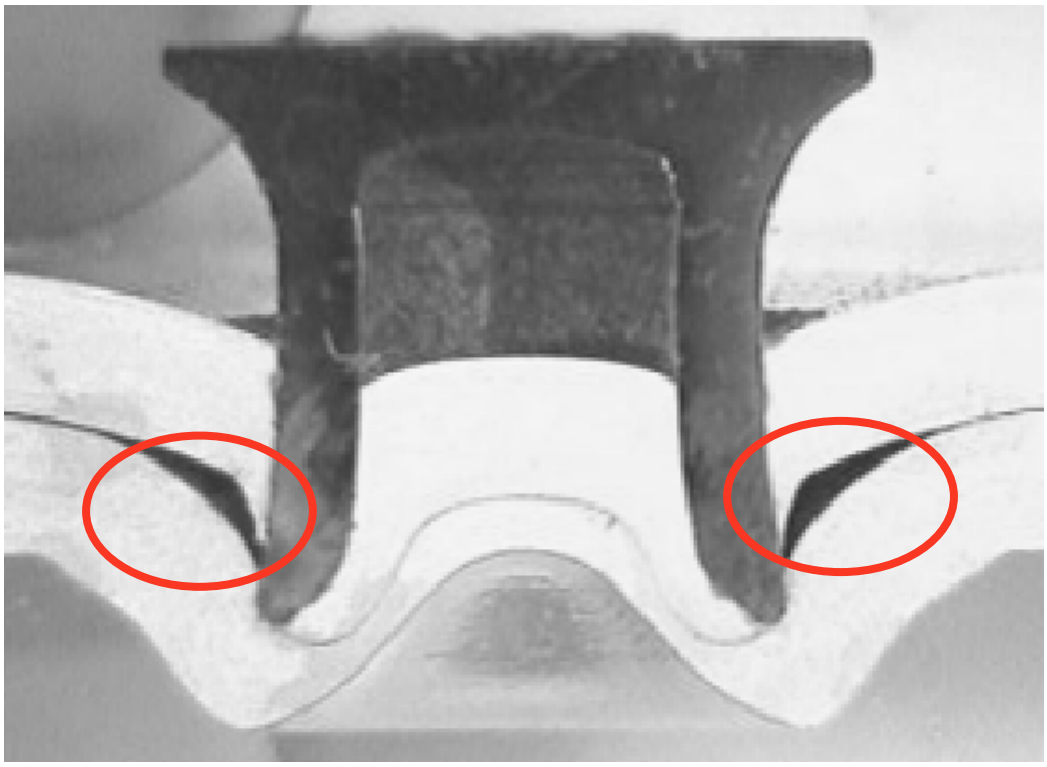


Abbildung 3-1: Entstehung der Luftkanäle einer Stanznietverbindung

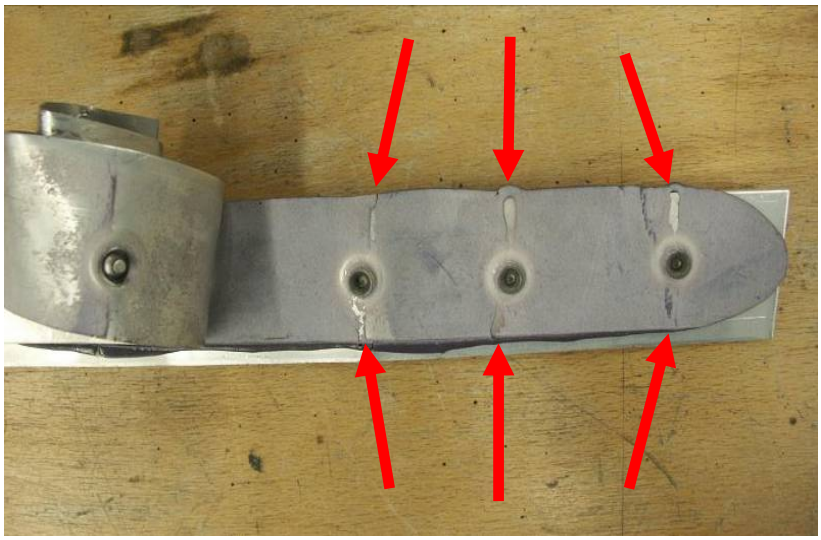


Abbildung 3-2: Stanznietverbindungen mit Luftkanälen im Klebstoff

Es wurden neue Niete und Fügeverfahren entwickelt, die den Vorteil haben, dass diese Luftkanäle nicht mehr auftreten. Dies wurde erreicht, in dem das obere Blech der Fügeverbindung nicht mehr durchgestanzt wird, sondern der Niet das Ober- und Unterblech nur verformt und im Oberblech verbleibt, ohne dieses zu durchstanzen.
Ein neues Verfahren, bei dem der oben genannte Vorteil erreicht wird, ist das Nietclinchen.

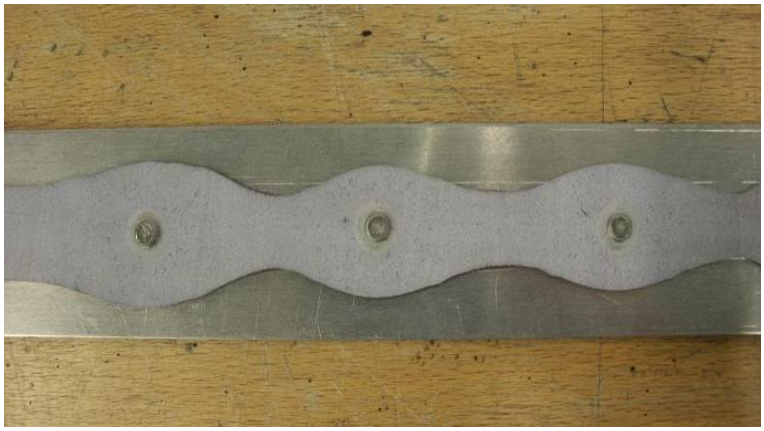


Abbildung 3-3: IWU-Nietclinchverbindungen ohne Luftkanäle im Klebstoff

Eine Aufgabe dieser Arbeit besteht darin, das Nietclinchen bezüglich der Festigkeit gegenüber den herkömmlichen Fügeverfahren für punktförmige Verbindungen zu charakterisieren. Die dafür angewendeten Prüfmethoden sind in Kapitel 4 dargestellt und in den Kapiteln 5/6 die gewählte

Festigkeitsuntersuchung/ -bewertung. Es werden quasistatische und zyklische Festigkeitskennwerte generiert und auch Vergleiche an Crashproben realisiert.
Um eine breitere Verfahrensbasis zu vergleichen, werden diese Untersuchungen nicht nur für die Standardverfahren Stanznieten und Clinchen und das Zielverfahren Nietclinchen realisiert, sondern auch für eine Anzahl ausgewählter neuer punktförmiger Fügeverfahren.

Auf die weitere Variantenentwicklung des Zielverfahrens Nietclinchen wird in Kapitel 7 eingegangen.

Für eine spätere Serienproduktion muss eine Aussage bezüglich der Prozessstabilität getroffen werden (Kap. 8).
Zusätzlich zu den fügetechnischen Untersuchungen an Blechstreifen (Laborproben) werden Versuche an realen Bauteilen durchgeführt, um beispielsweise den Einfluss von Bauteilspannungen zu berücksichtigen. Solche Untersuchungen bedeuten einen großen Aufwand und sind zeitlich sehr spät in einem Projekt möglich.
Ein weiterer Aufgabenschwerpunkt ist, diejenigen Parameter zu ermitteln, die den größten Einfluss auf die Prozessschwankung haben. Dies soll möglichst im Labor mit einem minimalen Untersuchungsaufwand erreicht werden. Als Beispiel für eine signifikante Haupteinflussgrößen auf den Fügeprozess, die im Labor untersucht werden kann, ist die Schwankung der Materialdicke zu erwähnen.
Durch die Anwendung des mathematischen Modells von Taguchi und einem fraktionellen faktoriellen Versuchsplan wird das Untersuchungsprogramm auf ein Minimum reduziert.

Zusätzlich sind die Prozesseinflussgrößen, deren Untersuchung im Labor einen schwer zu realisierenden Untersuchungsaufwand erfordern, mit Hilfe von FEM-Simulation auf ihren Einfluss zu prüfen. Als Beispiel hierfür ist die Schwankung der Nietlänge zu nennen (Kap. 8.3).

Das Nietclinchen wurde ausgewählt, da mit der Vermeidung der Luftkanäle im Klebstoff (siehe Abb. 3-2) und dem damit sicher unterbundenen Zugang von Elektrolyt ein quantitativer Sprung in der Korrosionsstabilität verbunden ist.

Zur umfassenden Bewertung neuer Verfahren gehören quantitative Aussagen zur Korrosion. Diese schließen aber alle Einflussgrößen im System ein, z.B. auch die Stabilität des Stahlnietes im Aluminiumblech, welche wiederum wesentlich durch die Optimierung der Nietbeschichtung bestimmt wird.

Zum einen ist dieser Untersuchungsaufwand hoch, zum anderen wird davon ausgegangen, dass die in dieser Arbeit im Fokus stehende Prozesstabilität beim Fügen kaum beeinflusst wird.

Deshalb wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf Korrosionstest verzichtet.

4 Prüfmethoden

4.1 Metallografische Untersuchungen

Um die Qualität eines Fügepunktes zu beurteilen, genügt eine äußerliche Betrachtung durch das Auge nicht. Für zielführende Aussagen müssen daher metallographische Untersuchungen gemacht werden. Dabei wird der Fügepunkt in der Mitte durchtrennt, in Kunstharz fixiert und schließlich in mehreren Schleifvorgängen poliert.
Ein zusätzliches Ätzen der polierten Oberfläche mittels HCL-Lösung hebt Materialgrenzen und Wärmeeinflusszonen hervor.

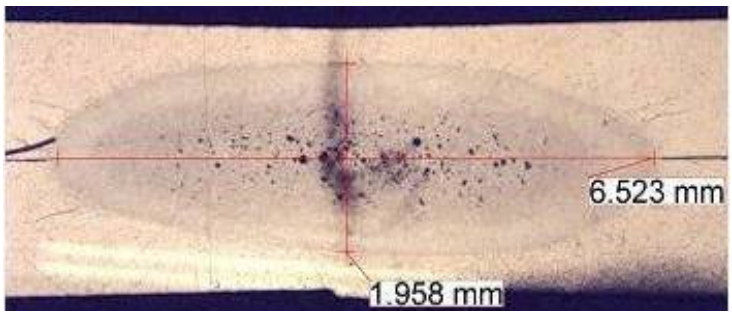


Abbildung 4-1: Schliffbild einer Widerstandspunktschweißverbindung

Anschließend wird der Fügepunkt ausgemessen und mit geforderten Mindestwerten aus dem Hause BMW verglichen. Zugleich können Fügefehler wie Mikrorisse erkannt werden.

4.2 Festigkeitsuntersuchungen (Anhang 1)

Hinsichtlich der Festigkeit ist neben der quasistatischen auch die zyklische Festigkeit von Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die erreichbaren Festigkeiten an Kopf- und Scherzugproben ermittelt. Die ver-wendete Probengeometrie entsprach der firmeninternen Norm (Abb. 4-2), die verwendeten Prüfmaschinen sind in Abb. 4-3 dargestellt. Alle Scher-, Kopf- und Crashproben die im Kap. 5 und 6 geprüft werden, sind mit EN AW 5042 1,5 mm, 1,5 mm hergestellt.

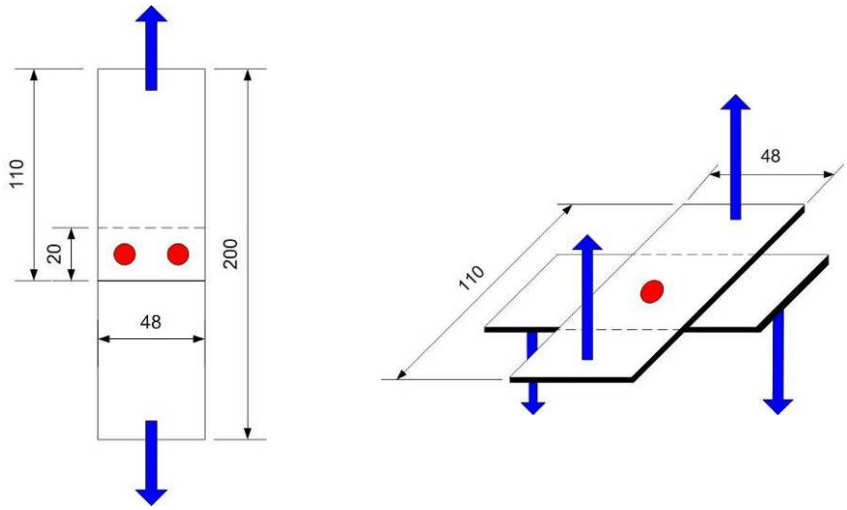


Abbildung 4-2: Probengeometrie für Scher- und Kopfzug [12]

4.2.1 Quasistatische Zuguntersuchungen

Die zu untersuchenden Scher- und Kopfzugproben wurden bis zum Bruch belastet. Die Zuggeschwindigkeit betrug 10 mm/min.

Ein mit der Zugmaschine gekoppeltes Untersuchungsprogramm nahm die Messresultate auf und stellte diese graphisch in einem Kraft-Weg-Diagramm dar.

Beim Scherzug wie beim Kopfzug werden die maximale Bruchkraft sowie das Bruchbild betrachtet. Pro Serie werden fünf Proben geprüft. Um Erkenntnisse über die Schwankung in der Festigkeit zu erlangen, ist es in der Fügetechnik notwendig, Realteile zu untersuchen.

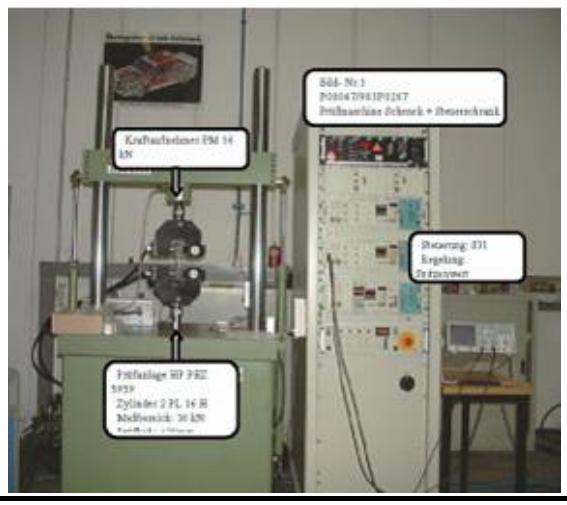


Abbildung 4-3: Zugmaschine für quasistatische Zugversuche, Fa. Instrom (links) und Hydroimpulszylinder für zyklische Zugversuche, Fa. Schenk (rechts)

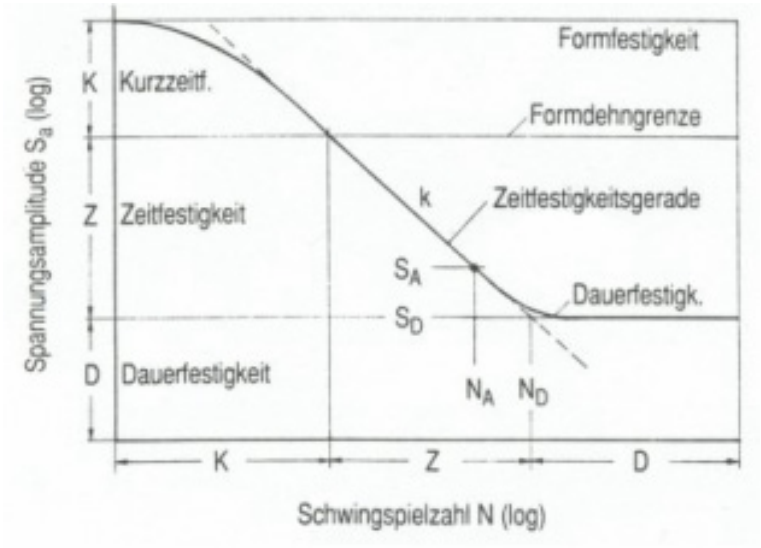
4.2.2 Zyklische Zuguntersuchungen

Mit Hilfe einer Prüfmaschine der (Abbildung 4-3) wurden Dauer-schwingversuche an Scherzugproben durchgeführt. Belastet wurden die Proben mit Zugschwellbelastung bei einer Frequenz von etwa 45 bis 55 Hz. Das Spannungsverhältnis ($_{min}$/ $_{max}$) betrug 0,1.

Ein mit der Prüfmaschine gekoppeltes Untersuchungsprogramm zeichnete die jeweiligen Lasthorizonte und zugehörigen Lastwechselzahlen auf. Die Proben wurde bis zum völligen Versagen (Probenbruch) belastet.

Aus diesen Werten wurden Wöhlerdiagramme erstellt, die gemeinsam mit der optischen Bewertung der Bruchlage Aussagen über die zyklische Festigkeit ermöglichen. Die Auftragung der Wöhlerlinien erfolgte im doppellogarithmischen Netz.

Diese Wöhlerlinien kennzeichnen den Übergang vom Zeit- in den Dauerfestigkeitsbereich bei wechselnder Schwellbelastung (Abbildung 4-4).
Um die Fügetechniken vergleichen zu können wurde für jedes Verfahren die Oberlast (vorgegebene Maximalkraft bei schwellender Beanspruchung) bei einer Schwingspielzahl von 10^5 Lastwechseln (Dauerfestigkeit) ermittelt.
Als weiteres Vergleichskriterium wurde der k-Faktor herangezogen. Dieser beschreibt den Anstieg der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich. Ein großer k-Faktor ist positiv zu beurteilen, da dieser in der Gleichung der Wöhlerlinie zu einem flachen Anstieg der Zeitfestigkeitsgeraden führt.



$$N_A = N_D \cdot (\frac{S_A}{S_D})^{-k} \qquad (2)$$

Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Wöhlerlinie [9]

In den Diagrammen (siehe Laborbericht Nr. 03231232 im Anhang 4) sind je Verfahren drei Wöhlerlinien für drei verschiedene Versagenswahrscheinlichkeiten aufgetragen. Während für den Vergleich der einzelnen Verfahren stets die 50%-Linie herangezogen wird, kennzeichnen die 10% bzw. 90%-Linien die Dauerfestigkeiten, die bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 10% bzw. 90% vorliegen.
Ein weiteres Bewertungskriterium ist das Bruchbild (Material- oder Verbindungsbruch) der Proben.

Das heißt, mit niedrigerer angestrebter Versagenswahrscheinlichkeit sinkt auch die Dauerfestigkeit SD. Aus den drei Wöhlerlinien wird das so genannte Streumaß Ts wie folgt ermittelt:

$$T_s = 1 : \frac{S_{10}}{S_{90}} \qquad (3)$$

Dieses Streumaß stellt einen Sicherheitsfaktor dar, welcher durch das Ver-hältnis der Oberlasten mit den Wahrscheinlichkeiten von 10 und 90 Prozent gekennzeichnet ist.

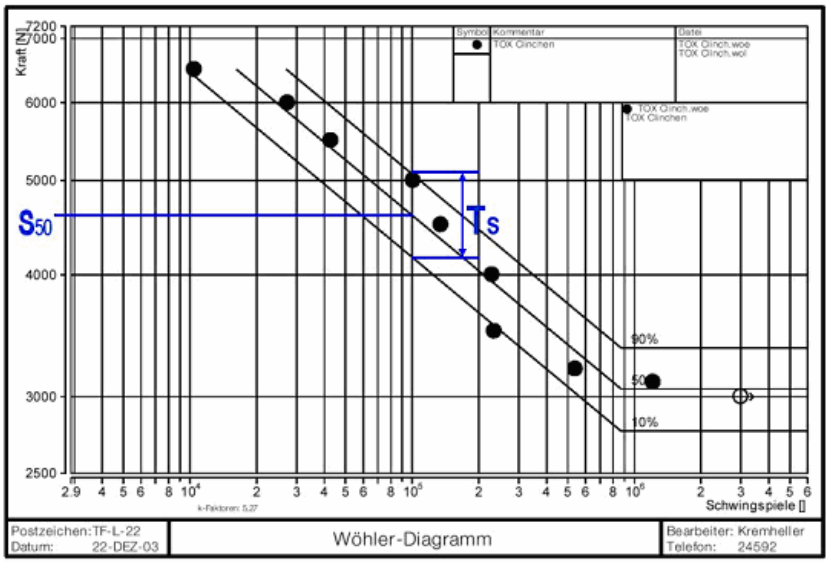


Abbildung 4-5: Wöhlerlinie (Clinchen der Fa. TOX)

4.2.3 Crashtest am Fallprüfstand (Anhang 5)

Der Fallschlitten besitzt eine Masse von 500 kg und wird aus einer Höhe von 890 mm beschleunigt. Im freien Fall erreicht die Fallmasse so eine Auftreffgeschwindigkeit von 15 km/h. Nach einer, im Vorfeld festgelegten, Deformationslänge von 100 mm erfolgt die Energieeinleitung in die sogenannte Notbremsröhre. Dieser Test ist firmenintern, um eine gute Vergleichbarkeit zu erreichen.

Jede Crashprobe wurde mit 16 Fügepunkten gefügt. Nach dem Fügen der Profile wurde eine Triggerung (Aussparung) am oberen Flanschende nachträglich angebracht, um das Profil zu schwächen und somit einen definierten Versagensbeginn zu gewährleisten. Nachfolgend wurden eine 4 mm starke Grundplatte sowie ein 1,5 mm dickes Deckblech angeschweißt.

Die Auswertung erfolgt nach folgender Reihenfolge, weil wenn die Visuelle Prüfung ein positives Ergebnis zeigt auch zu erwarten ist, dass die Energieaufnahme aus Punkt 2 in Ordnung ist.

1. Visuelle Überprüfung:
   - der Fügepunkte
   - der Faltenbildung (die Bildung von kleinen Falten zeugt von einem hohen Energieabsorptionsvermögen)

2. Auswertung Kraft-Energie-Weg-Diagramm:
   - Mittelwert und Standardabweichung der Energieabsorption
   - Kurvenverlauf

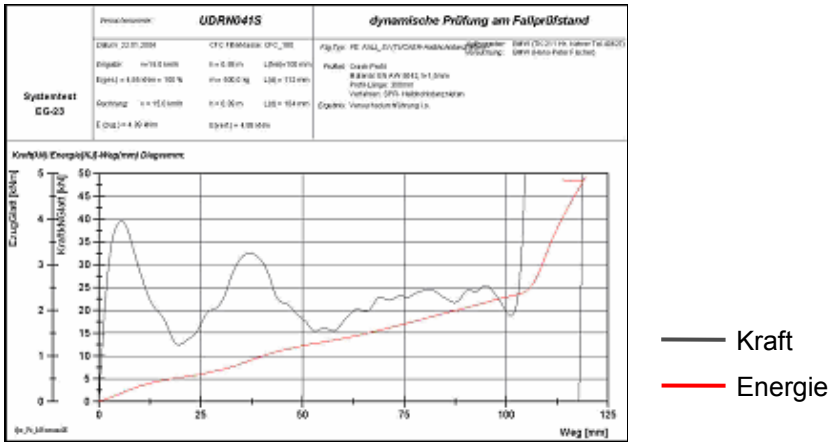


Abbildung 4-6: Kraft-Energie-Weg-Diagramm Crash-Versuch

Die Beschleunigung wird über Sensoren gemessen, die im Schwerpunkt der Fallmasse angeordnet sind. Daraus wird mit Hilfe des Bewegungsgesetzes von Newton die Kraft zu jedem Zeitpunkt errechnet:

$$F = m \cdot a \qquad (4)$$

Der Verlauf der Energie wird analog Formel (4) als Produkt aus Kraft und Weg ermittelt:

$$W = F \cdot s = m \cdot a \cdot s \qquad (5)$$

Darüber hinaus wird mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera je Verfahren ein Crash-Vorgang aufgezeichnet. Dies erleichtert, gemeinsam mit den Fotos der zerstörten Profile, die visuelle Bewertung.
Eine Bewertung vom Kraft-Weg-Diagramm ist möglich: Wenn die ersten zwei Ausschläge auf dem Diagramm groß sind, kann von einer großen Energieaufnahme geredet werden. Ein weiteres Ansteigen der Kurve im weitern Verlauf des Diagramms zeigt das die Fügepunkte weitesgehend intakt bleiben, eine waagerechter Verlauf würde auf ein versagen hinweisen. Grundsätzlich ist die Fläche unterder Kurve die der Energieabsorbtion. Daher kann ebenfalls von einer hohen Energieaufnahme gesprochen werden, wenn wenig Fügepunkte versagt haben.
Der Crash-Körper (Probenzeichnung siehe Anhang 5.1) besteht aus einem Doppel-Z-Profil und einer Boden- und Deckplatte von 4 mm bzw. 1,5 mm.
Wie in Abbildung ersichtlich, wurden an jedem Profil 16 Fügepunkte – acht Punkte je Seite – gesetzt.

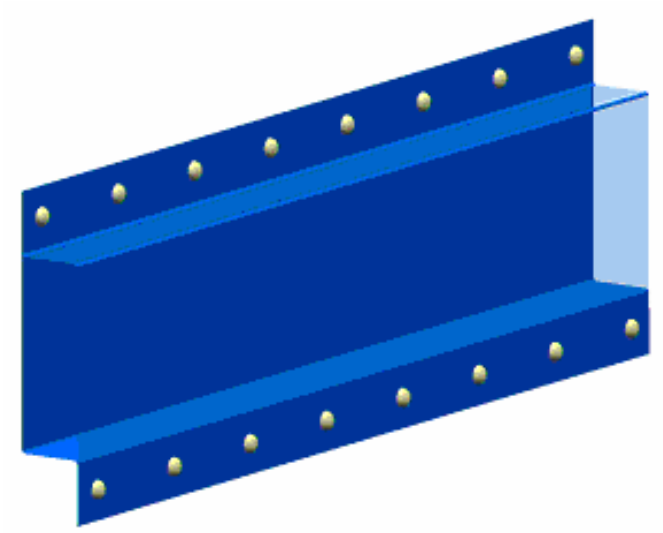


Abbildung 4-7: CAD-Darstellung eines Profils für Crash-Tests auf dem Fallprüfstand, ohne Ober- und Unterplatte

In aufsteigender Reihenfolge werden alle Verfahren bezüglich der drei folgenden Kriterien bewertet und miteinander verglichen:

- Energieaufnahme der Profile.Diese wird nach einer Deformationslänge von 90mm gemessen, um bei allen geprüften Fügetechniken einen reproduzierbaren Wert zu erhalten.
- Kurvenverlauf der jeweiligen Kraft-Weg-Diagramme.
  Hierbei ist ein möglichst gleichmäßig ansteigender Messwertverlauf mit geringen Amplitudenschwankungen bzw. Oberschwingungen erstrebenswert. Dieser spiegelt sich in einer homogenen Faltenbildung wieder. Die Bewertung aller Fügeverfahren wird in einer Ranking-Liste festgehalten.

- Anzahl der geöffneten Verbindungspunkte.
  Zum Schluss werden die zerstörten Profile gegenübergestellt. Dabei ist vor allem die Anzahl der geöffneten Punkte von Interesse. Das Ergebnis wird in eine Ranking-Liste eingetragen.

Die so genannte Beulkraft, welche der Kraft entspricht, die der Träger der Fallmasse bis zum Faltungsbeginn entgegenbringt, wird durch das Maximum der Kraft-Weg-Kurve zu Beginn gekennzeichnet. Ebenso wie die Energie-aufnahme

wird dieser Wert aus der tabellarischen Zusammenstellung der Messwerte entnommen, um Ableseungenauigkeiten zu vermeiden.

5 Festigkeitsuntersuchungen

5.1 Festigkeitsuntersuchung ohne Klebstoff

5.1.1 Quasistatische Verbindungsfestigkeit

Halbhohlstanznieten (Datenblatt: Anhang 4)

Die Proben zur Untersuchung dieses Verfahrens wurden von der Fa. Tucker hergestellt. Gefügt wurden Kopf- und Scherzugproben mit Halbhohlnieten der Abmessung C 5,3 x 5,0 - H4 (GS 96001-1 [A]) und einer Setzkraft von 42,5 kN. Die verwendeten Niete sind mit einer Almac-Beschichtung gegen Korrosion geschützt.

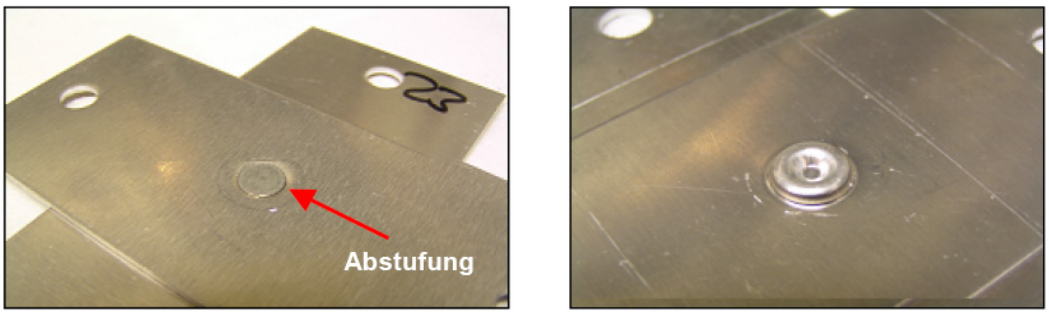
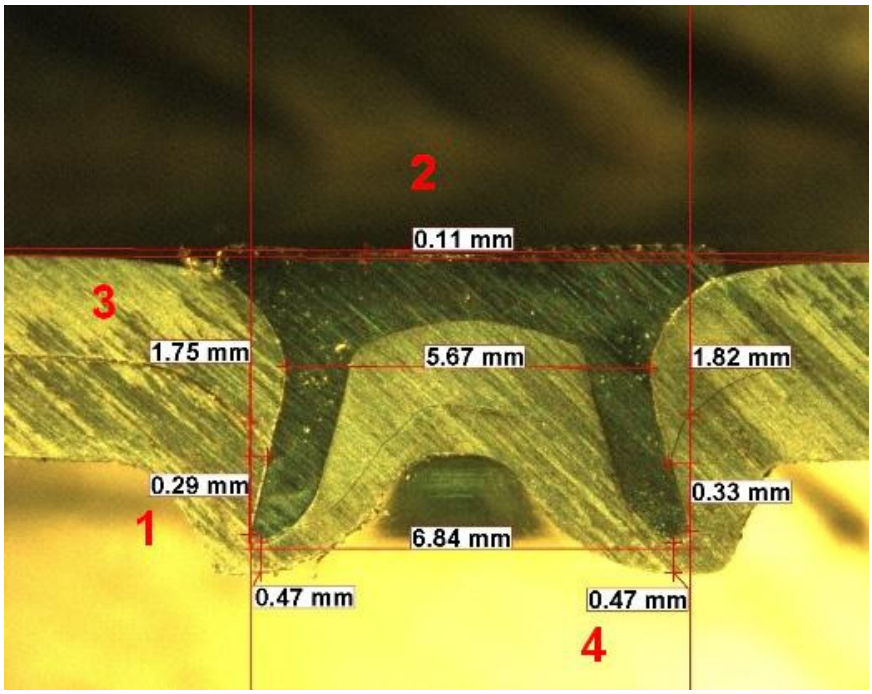


Abbildung 5-1: Kopfzugprobe Stanznietverbindung; stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts)

Die Festigkeit der Halbhohlstanznietverbindungen wird nahezu ausschließlich über Hinterschnitt und Höhe des Hinterschnitts erzeugt. Die Restbodendicke ist hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit von Bedeutung.

Die angefertigten Schliffbilder erfüllen die firmeninterne Norm(GS 96001-2 [B]) Anhang 8.1. Auf dem Schliffbild (1 Hinterschnitt, **2 Nietendkopflage, 3 Höhe des Hinterschnitts, 4 Restbodendicke**
Abbildung 5-2) sind keinerlei Beanstandungen zu ersehen.



1 Hinterschnitt, 2 Nietendkopflage, 3 Höhe des Hinterschnitts, 4 Restbodendicke
Abbildung 5-2: Schliffbild einer Stanznietverbindung

Im Kopfzug erzielten die Halbhohlstanznietverbindungen eine mittlere Festigkeit von 2,1 kN. In der Scherzugprüfung wurde im Durchschnitt Festigkeit von 6,8 kN erreicht.

IWU-Nietclinchen

Für die Festigkeitsuntersuchungen wurden die Proben mit Nieten der Abmessung
5,3 x 4,0 - H4 Matrizenlos gefügt. Die Setzkraft betrug 45 kN. Wie die Halbhohlstanznieten auch, sind die Nietclinch-Nieten mit einer Almac-Beschichtung versehen.

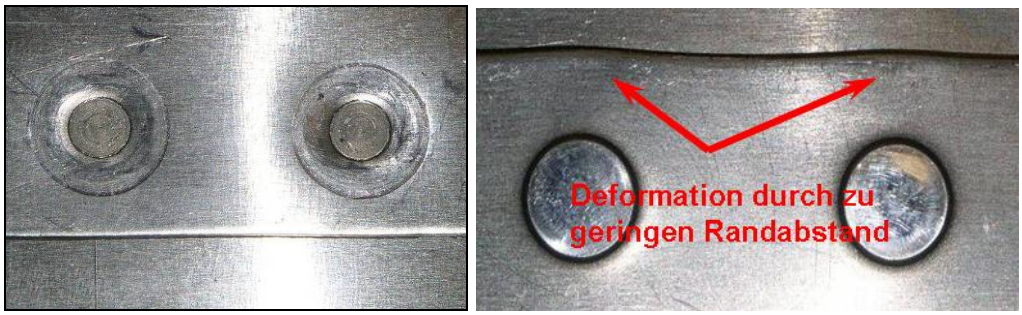


Abbildung 5-3: Nietclinchverbindung; stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts)

Bei der Durchsicht der Proben ist neben dem flachen Fügepunkt vor allem die starke Deformation des matrizenseitigen Bleches auffällig. Zurückzuführen ist dies auf eine starke Umformung der Bleche bei zu geringem Randabstand. Das verdrängte Fügematerial wird hauptsächlich in der Blechebene radial nach außen verdrängt. Eine flache Matrize mit einer geringeren Tiefe könnte diese Deformationen reduzieren.

In der Schliffbildanalyse zeigt sich, dass die von BMW geforderten Sollwerte für Hinterschnitt (0,2mm), Halsdicke (0,25mm) und Restboden (0,15mm) erreicht werden konnten (Abbildung 5-4: Schliffbild einer Nietclinchverbindung).

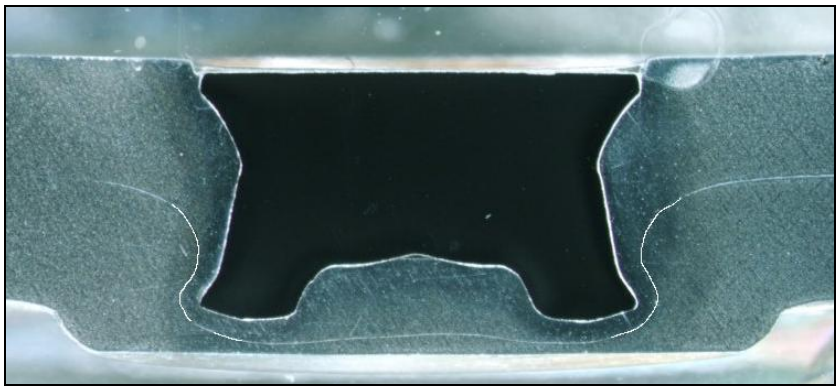


Abbildung 5-4: Schliffbild einer Nietclinchverbindung

Eine Steigerung des festigkeitsrelevanten Hinterschnittes durch andere Werkzeugpaarungen allein scheint schwierig. Das Fließverhalten der Werk-stoffe kann anhand des flachen Ambosses nur geringfügig beeinflusst werden. Verbindungsoptimierungen können nur durch geänderte Nietgeometrien er-zeugt werden.
Im Scherzug konnte eine Verbindungsfestigkeit von durchschnittlich 5,9 kN erreicht werden. Dies sind rund 1,0 kN weniger als bei Halbhohlstanznietver-bindungen. Im Kopfzug wurde ein Mittelwert 1,1 kN erzielt, was lediglich 50 Prozent der Festigkeit von Halbhohlstanznietverbindungen entspricht.

TOX-Clinchnietverbindung

Das Clinchnietverfahren der Fa. TOX ist neben dem Clinchen und Nietclinchen ein weiteres Fügeverfahren, das die Verbindung rein umformtechnisch realisiert. Die untersuchten Proben wurden mit einem zylinderförmigen Clinchniet Ø 5 mm und Länge 5 mm gefügt. Die Niete sind mit einer Zinkschicht vor Korrosion geschützt .

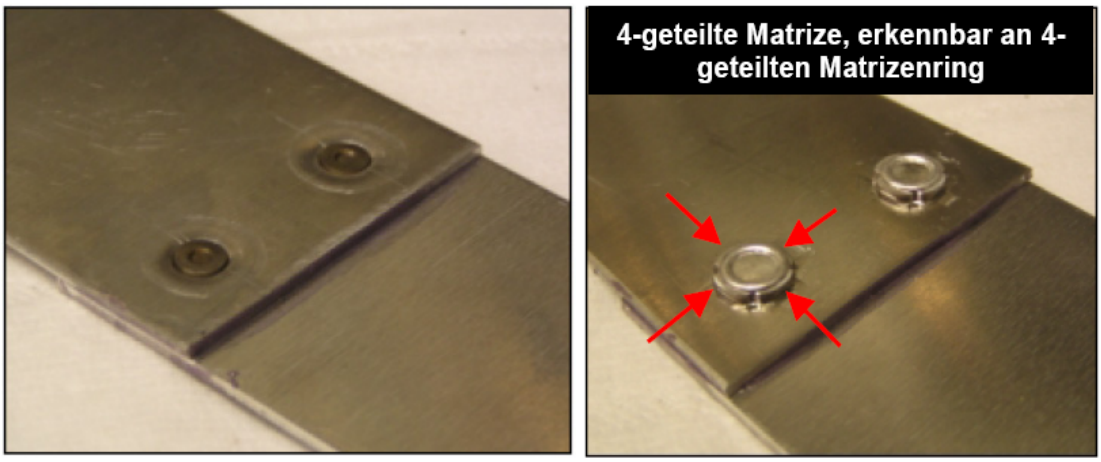


Abbildung 5-5: TOX-Clinchnietverbindung; stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts)

Ein markantes Merkmal der bei TOX gefertigten Proben ist die Prägung durch die vierteilige, auch zum Clinchen eingesetzte Matrize (Abbildung 5-5).

Aufgrund der Matrizengeometrie kann der Hinterschnitt im Clinchpunkt bzw. der Clinchanteil vergrößert werden, was zu einer Erhöhung der Verbindungsfestigkeit führt.

Trotz der 45 kN Setzkraft ist im Gegensatz zum Nietclinchen des Fraunhofer Institutes keine Deformation an den gefügten Proben zu erkennen (Matrizeneinfluss). Zurückzuführen ist dies auf die spezielle Form der Matrize, die Raum für verdrängtes Material schafft. Ein Auswandern des Materials zum Rand hin findet nicht statt. Der Werkstoffffluss ist überwiegend axial ausgerichtet.

In der Kopfzugprüfung wurde eine mittlere Festigkeit von 1,6 kN erreicht. Die deutlich höhere Kopfzugfestigkeit gegenüber dem Nietclinchen kann auf den größeren Hinterschnitt zurückgeführt werden.

Die im Scherzug erreichte Festigkeit entspricht mit durchschnittlich 5,9 kN dem Niveau der Nietclinchverbindungen.

Ein Schliffbild einer TOX-Clinchnietverbindung zeigt Abbildung 5-6.

Abbildung 5-6: Schliffbild einer TOX-Clinchnietverbindung

Clinchen

Die in den Untersuchungen verwendeten Proben wurden mit dem standardisierten Clinchpunktdurchmesser von 8 mm und einer Setzkraft von 42 kN gefügt. Die Untersuchungen sind mit einer Zange der Firma TOX durchgeführt worden.

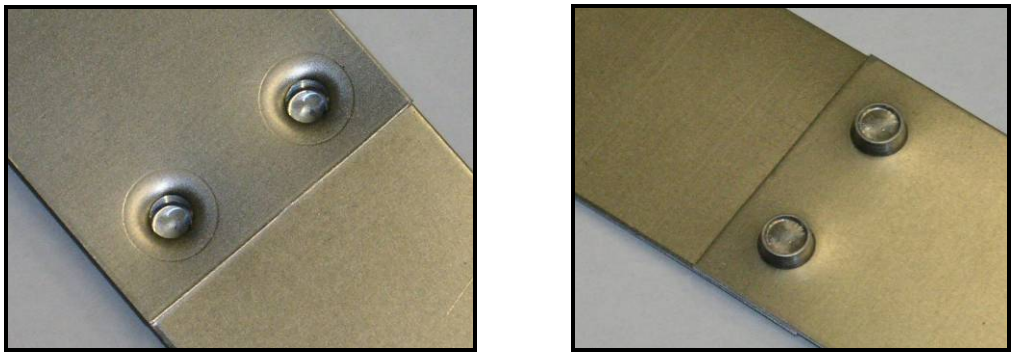


Abbildung 5-7: Clinchverbindung; stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts)

Wie Abbildung 5-7 zu entnehmen ist, wiesen die Bleche keinerlei Verformungen der Blechkanten oder der Materialoberfläche auf.
Im Schliffbild zeigt sich, dass die von BMW geforderten Mindestwerte (GS96006 [E]) für Hinterschnitt (0,13mm), Halsdicke (0,2mm) und Restboden (0,1mm) erreicht werden. Risse sind nicht erkennbar (Anhang 8.2).

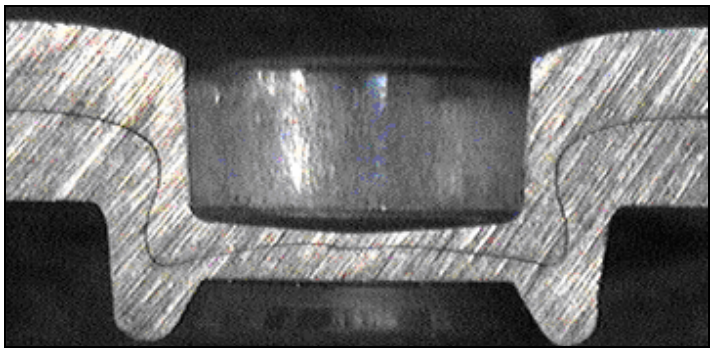


Abbildung 5-8: Schliffbild einer Clinchverbindung

In der Kopfzugprüfung wurde im Mittelwert eine Festigkeit von 2,0 kN und im Scherzug 4,9 kN erreicht. Gegenüber den nietgeclinchten und clinchgenieteten Proben ist die Scherfestigkeit somit rund 1 kN geringer. Im Kopfzug liegt das Clinchen nahezu gleichauf mit dem Stanznieten (2.1 kN).

Vollstanznieten

Die Proben für die Festigkeitsuntersuchungen dieses Verfahrens wurden von der Fa. Kerb Konus hergestellt. Die Kopf- und Scherzugproben wurden mit einem Niet Ø 4,0 mm und einer Länge von 3,0 mm gefügt [C]. Die verwendeten Niete sind mit einer SnNi-Beschichtung gegen Korrosion geschützt. Die Setz-kraft betrug 30 kN.

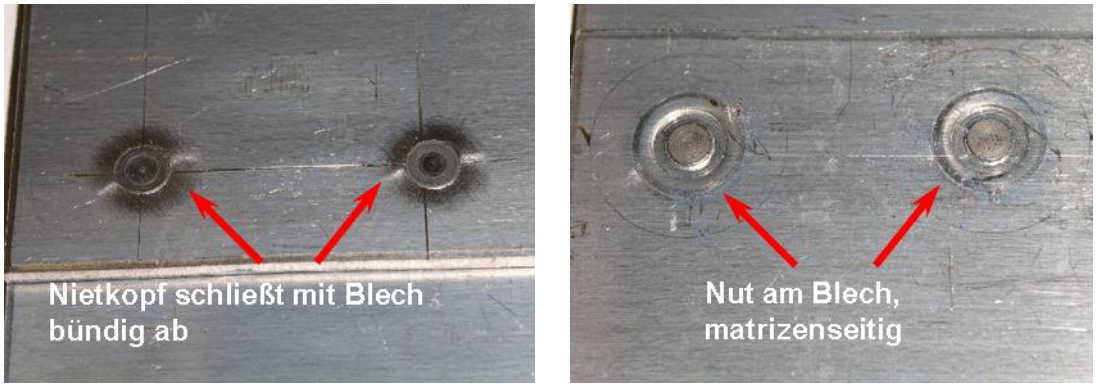


Abbildung 5-9: Vollstanznietverbindung, stempelseitig (links), matrizenseitig (rechts)

Auffällig ist der bündige Abschluss des Nietkopfes mit dem stempel- und matrizenseitigen Blech (Abbildung 5-9). Dies hat Vorteile in der Montage.
Wie in Abbildung 5-10 zu erkennen, besitzt das schließkopfseitige Blech eine leichte Vertiefung (Nut). Grund ist die besonders ausgeformte Matrize, die als Gegenhalter des Stempels fungiert und das Fließen des Materials in die eigentliche Schaftnut unterstützt.

Mit durchschnittlich erreichten 4,0 kN Scher- und 0,8 kN Kopfzugfestigkeit markiert Vollstanznieten das untere Ende im quasistatischen Festigkeitsvergleich. Dabei ist zu beachten, dass beim Vollstanznieten das matrizenseitige Blech begrenzt primär die Festigkeit, da der Formschluss in der Ringnut gegenüber dem großen Konusbereich am stempelseitigen Blech die Schwachstelle darstellt. Die (GS96001-5 [D]). Abbildung 5-10 zeigt ein Schliffbild einer Vollstanznietverbindung.

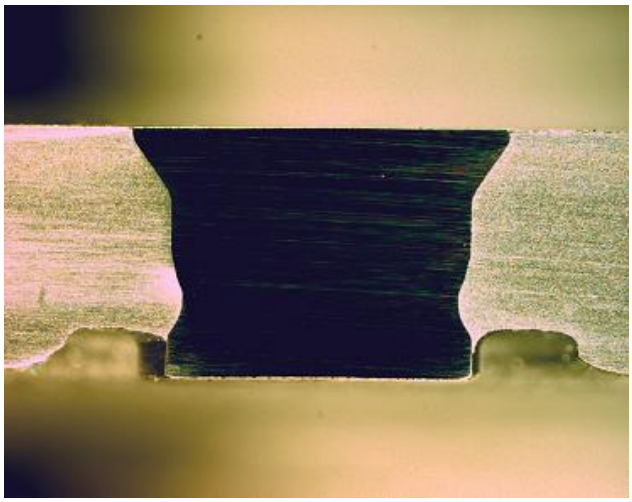


Abbildung 5-10: Schliffbild einer Vollstanznietverbindung

Blindnieten (selbstschneidend, Datenblatt: Anhang 2)

Die Proben wurden mit dem Blindniet FSD 4813 gefügt. Dieser Niet verfügt über die stabilste Niethülse der derzeit angebotenen Blindniete der Fa. Tucker. Um die Festigkeit der Verbindung schon vorab zu erhöhen, wurde der her-kömmliche Nietdorn des Nietes durch den längeren Nietdorn eines Blind-Nietes FSD 4815 ersetzt. Dadurch ist der Spannbereich bezüglich der Werkstoffdicke besser angepasst als beim Blindniet FSD 4813.

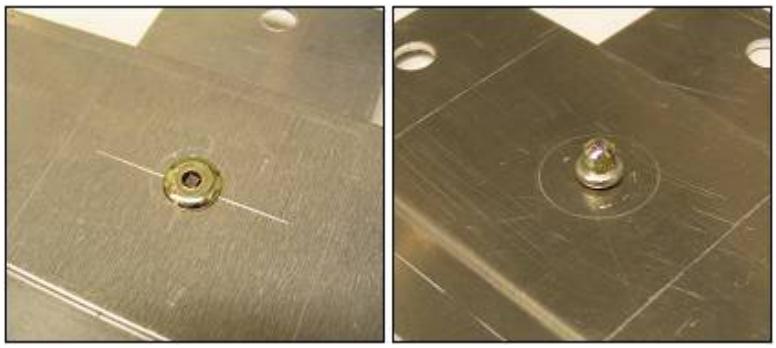


Abbildung 5-11: Blindnietverbindung, Nietkopf (links), Schließkopf (rechts)

Wie in Abbildung 5-12 zu ersehen, verfügt der Niet über eine geringe Nietkopfhöhe. Schließkopfseitig ist ein Einsatz in Teilsichtbereichen gänzlich ungeeignet, da der Schließkopf zu weit hinausragt.
Im Scherzugversuch wurde im Mittel eine Verbindungsfestigkeit von 6,3 kN erreicht. Die Scherzugfestigkeit ist geringer als beim Halbhohlstanznieten, aber mit einem größeren Flansch könnte die Festigkeit steigen (Materialbruch). Im Kopfzug wurde durchschnittlich eine Festigkeit von 2,9 kN erreicht. Damit liegt die Festigkeit der Blindnietverbindungen im Kopfzug ca. 25% über der Festigkeit des Halbhohlstanznietens.

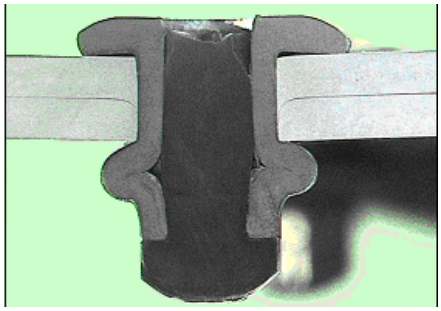


Abbildung 5-12: Schliffbild einer Blindnietverbindung

FDS-Verschraubung

Für die Herstellung der Proben wurde die Kapazität und das Know-How des Verfahrenslieferanten Fa. Ejot genutzt. Die Proben wurden mit einer FDS-Schraube des Durchmessers 5,0 mm / Länge 18 mm gefügt. Das oben liegende Blech wurde vorgebohrt. Das Anzugsmoment lag bei 5 Nm.

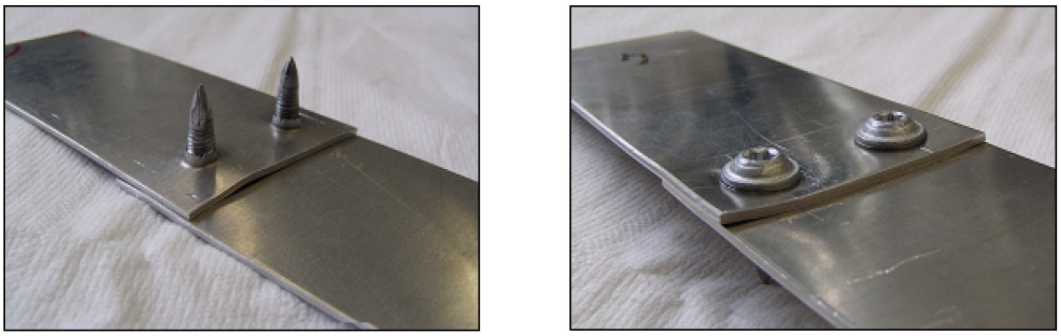


Abbildung 5-13: FDS-Verschraubung, klemmblechseitig (links), schraubblechseitig (rechts)

Ersichtlich aus Abbildung 5-13 ist die geringe Deformation der gefügten Aluminiumbleche. Auffällig sind hier besonders die um ca. 15 mm aus der Blechpaarung ragenden Schraubenenden. Diese stellen eine Verletzungsgefahr dar.

Abbildung 5-14: Schliffbild einer FDS-Schraubverbindung

Die form- und kraftschlüssige Verbindung erreichte im Scherzug eine mittlere Festigkeit von 8,0 kN. Im Kopfzug erreicht die FDS-Verschaubung 3 kN.

PentaFlow-Verschraubung

Als Äquivalent zur FDS-Schraube der Fa. EJOT wurde die PentaFlow-Schraube mit in den Festigkeitsvergleich einbezogen (Abb. 5-15). Die bereits erläuterten Unterschiede im Verschraubungsprozess wirken sich nur in geringem Maße auf die geprüften Festigkeitswerte aus.

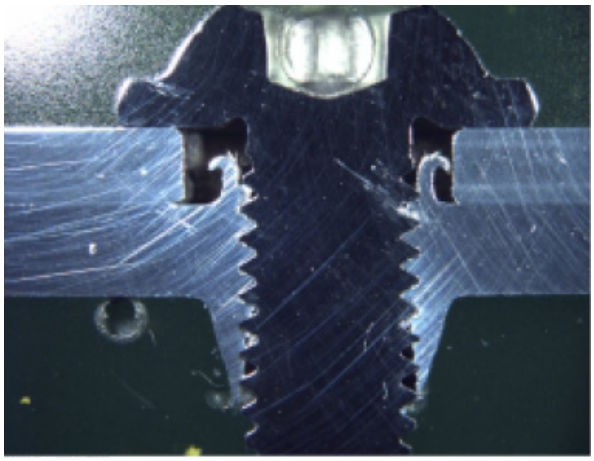


Abbildung 5-15: Schliffbild einer PentaFlow-Schraubverbindung

Widerstandspunktschweißen

Die Probenherstellung zum Fügeverfahren Widerstandspunktschweißen er-folgte intern im Hause BMW. Hierbei wurde eine stationäre Schweißanlage der Bauart Dalex PMS-16 verwendet.

Zur Herstellung aller Verbindungen wurden Kupfer-Chrom-Zirkon – Schweißkappen Ø 16mm nach DIN ISO 5821 Form G mit einem Radius von 75 mm eingesetzt. Die Einstellung der Elektrodenkühlung lag bei 6 l/min. Bei den Untersuchungen ergab sich ein durchschnittlicher Punktdurchmesser von 6,2 mm.

Schweißparameter WPS	
Strom	18,52 kA
Schweißkraft	6,7 kN
Vorhaltezeit	600 ms
Schweißzeit	80 ms
Nachhaltezeit	400 ms

Abbildung 5-16: Oberfläche einer WPS-Verbindung / Schweißparameter

Nach den Zugversuchen zur Feststellung der quasistatischen Festigkeit der Verbindungen ergab sich für den Kopfzug eine mittlere Festigkeit von 2,5 kN und für den Scherzug 8,3 kN. Somit erzielt das Fügeverfahren Widerstands-punktschweißen im Scherzug den größten Festigkeitswert in dieser Versuchs-reihe.

Die den Aluminiumwerkstoff kontaktierenden Elektrodenkappen der Schweiß-anlage verschleißen (Verkleben) schon nach wenigen Schweißpunkten und bedürfen daraufhin einer Nacharbeit (Fräsen und Polieren) der Kappen-oberflächen.

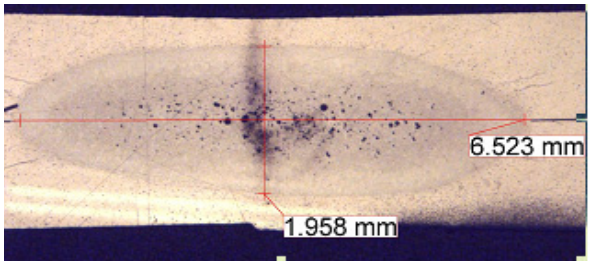


Abbildung 5-17: Schliffbild einer Punktschweißverbindung

Punkt-Rührreibschweißen

Für Punkt-Rührreibschweißen (Abb. 5-18, EN AW 5042) existieren kaum Erfahrungs-werte, was das durchschnittliche Abschneiden im Vergleich mit den anderen warmen Fügeverfahren von 6,4 kN im Scherzug und 1,9 kN im Kopfzug erklärt.

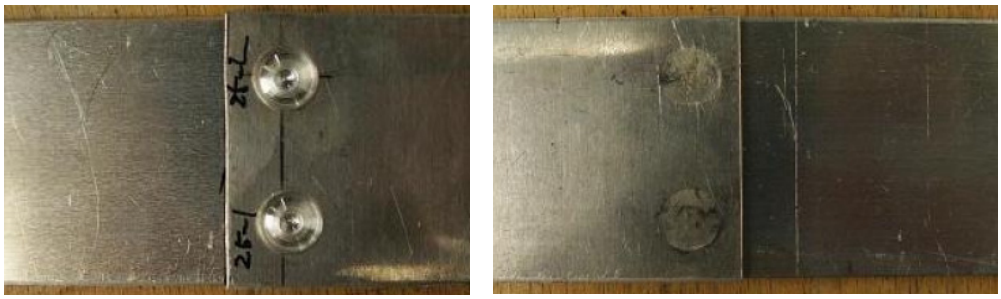


Abbildung 5-18: Punkt-Rührreibgeschweißen; Oberseite (links), Unterseite (rechts)

In den Schliffbildern der Punkt-Rührreibschweißverbindung ist eine deutliche Trennfuge zwischen den verschweißten Blechen zu erkennen (Abb. 5-19).
Eine Anpassung der Parameter (Schweißzeit, Anpresskraft und Rotationsgeschwindigkeit des Stempels) und eine Änderung der Werkzeuggeometrie könnte Abhilfe schaffen und die Festigkeit steigern.

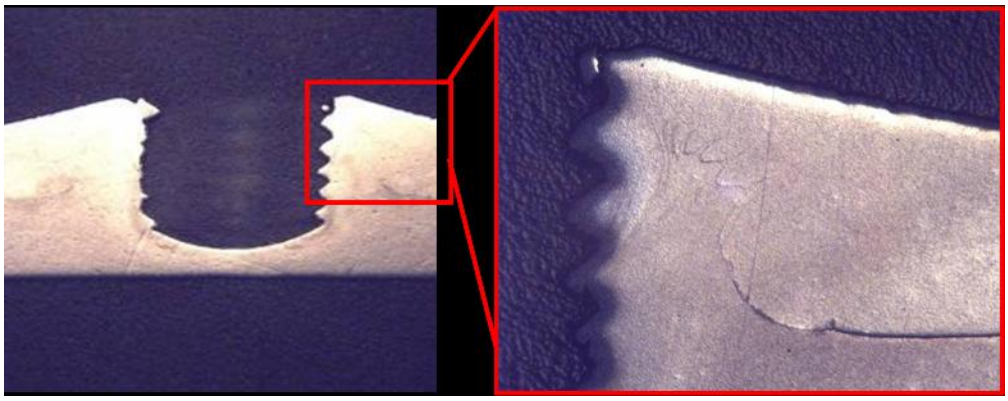


Abbildung 5-19: Schliffbild einer Punkt-Rührreibverbindung

Plasmaschweißen

Als weiteres warmes Fügeverfahren wurde das Plasmaschweißen in die Untersuchungen aufgenommen. Hierbei wurden die zu untersuchenden Materialproben im Hause BMW mittels einer Plasmaschweißpistole, Fa. SBI gefügt.

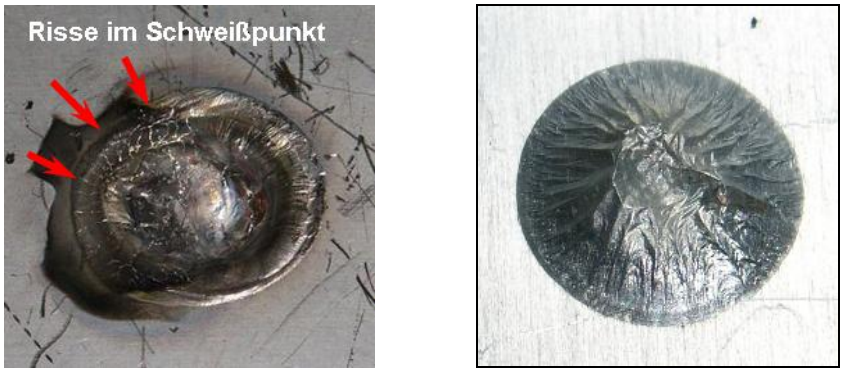


Abbildung 5-20: Plasmaschweißverbindung; Oberseite (links), Unterseite (rechts)

Im Schliffbild (Abbildung 5-21) sind die Unterschiede zum Widerstandspunktschweißen deutlich zu erkennen. Neben einer großen Wärmeeinflusszone sind vor allem die Deformationen an beiden Blechoberseiten als Nachteile zu nennen. Weiterhin ist besonders die Rissbildung im Schweißpunkt selbst als kritisch zu bewerten (Abbildung 5-20).

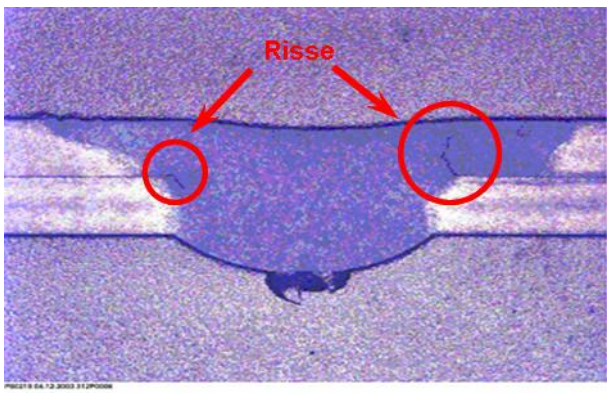


Abbildung 5-21: Schliffbild einer Plasmaschweißverbindung mit Rissen

Die plasmageschweißten Proben erreichten im Scherzug durchschnittlich eine Festigkeit von 7,2 kN. Im Kopfzug werden lediglich 1,7 kN erreicht. Damit liegen die erzielten Festigkeiten deutlich unter denen des Widerstandpunkt-schweißens.

5.1.2 Zyklische Untersuchungen ohne Klebstoff (Anhang 4)

Die Proben für die zyklischen Untersuchungen wurden analog den quasistatischen Scherzugproben nach BMW-internen Normen angefertigt (GS96012 [H]). Hierbei galt besonderes Augenmerk der Proben-herstellung unter Verwendung der gleichen Parameter wie sie bereits bei den quasistatischen Untersuchungen Anwendung fanden. Die so gefügten Proben wurden den bereits erläuterten zyklischen Prüfungen unterzogen. Die für den Vergleich herangezogenen Werte entsprechen einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 50% (siehe Kapitel 4.2.2 Zyklische Zuguntersuchungen).

Für die Auswertung und eine vergleichende Betrachtung ist vor allem der Wert der Oberlast bei $N=10^5$ Lastwechseln von Interesse. Als sekundäres Vergleichskriterium wird der k-Faktor hinzugezogen. Des Weiteren ist die Bruchlage zu vergleichen.

Halbhohlstanznieten

Bei der verwendeten Halbhohlstanznietgeometrie (C 5,3 x 5,0 - H4) erfolgt der Bruch meist im Material. Nur bei höheren Lasthorizonten (zwischen 6,5 kN und 7,0 kN) kommt es zu einem teilweisen Ausknöpfen des Nietes. Dies geschieht jedoch stets in Verbindung mit einem Anriss im Material. Daraus ist ein hoher Optimierungsgrad der Verbindung ersichtlich.

Mit einer Oberlast von 5 kN bei einer Schwingspielzahl von 10^5 Lastwechseln stellt der Referenzwert ein hohes Kurvenniveau dar. Der k-Faktor beträgt 5,9 und liegt somit ebenfalls auf einem hohen Niveau (z.B. für WPS k=4,6).

Diese angefertigte Stanznietverbindung (i.O. nach GS 96001-2) dient bei der Untersuchung als Vergleichsbasis.

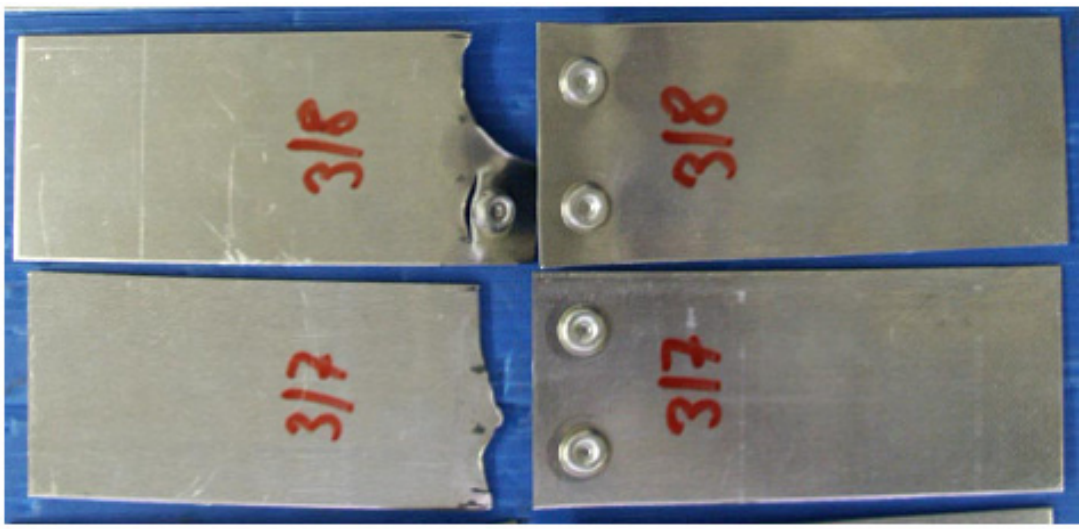


Abbildung 5-22: Versagensbilder zyklisch geprüfter Halbhohlstanznietverbindungen

IWU-Nietclinchen

Die Untersuchung der Proben zeigte von Beginn an deutliche Unterschiede im Vergleich zu den anderen Verfahren. So war die erste Materialprobe bei einem Lasthorizont von 2 kN ein Durchläufer, d.h. sie befand sich im dauerfesten Bereich. Die Proben drei und vier hingegen knüpften bei einer Kraft von 6 kN sofort aus, ohne eine dokumentierbare Zahl von Lastwechseln zu liefern.
Diese Werte durften zur Ermittlung der Wöhlerlinie nicht in Betracht gezogen werden, da sie die Bestimmung des k-Faktors falsch beeinflussen würden.
Des Weiteren knöpften die Proben zwischen 4 kN und 5,5 kN auch aus. Alle Proben mit weniger Last als 4 kN war ein Mischbruch der Versagensgrund.

Abbildung 5-23: Versagensbilder zyklisch geprüfter Nietclinchverbindungen

Die so ermittelte Oberlast von 4,9 kN bei 10^5 Schwingspielen setzt das Nietclinchen des Fraunhofer Institutes auf Rang drei der verglichenen Ver-fahren.
Der k-Faktor ist relativ klein, woraus eine stärker abfallende Wöhlerlinie resultiert.
Bei den verwendeten Nieten handelte es sich um eine Lieferung der dritten modifizierten Charge, die von Henrob kaltgeschlagen wurde.
Jedoch bestehen Geometrieabweichungen zwischen der Vorgabe und den von Fa. Henrob gefertigten Nieten (Ø Innendurchmesser), was sich negativ auf die Verbindungsheraus-bildung auswirkt. Sowohl der erreichte Hinterschnitt als auch die Halsdicke (Abbildung 5-4) fallen deutlich geringer aus.

TOX-Clinchnieten

Wie schon bei den quasistatischen Untersuchungen fand auch bei der Anfertigung der zyklischen Zugproben die vierteilige SKB-Matrize Anwendung. Gefügt wurde mit Clinchnieten des Durchmessers 5,0mm.
Nur bei zwei der zehn geprüften Scherzugproben knöpften die Clinchnietpunkte aus. Bei abnehmenden Lasten (ab ca. 5,5 kN) erfolgte der Versagensfall durch Materialermüdung (Abbildung 5-24).

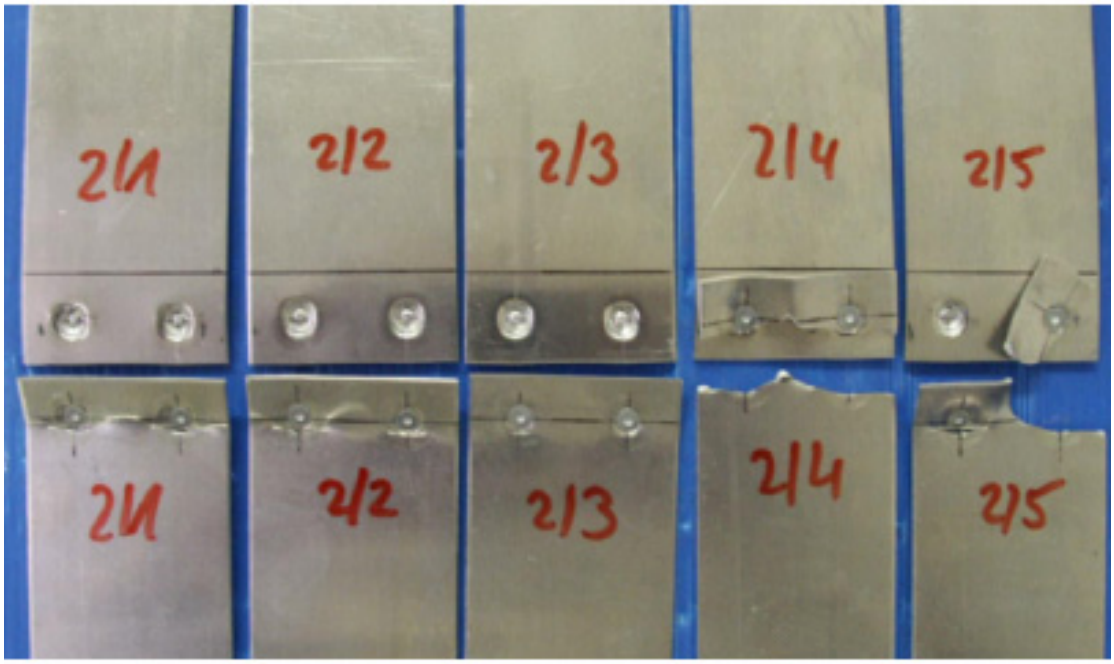


Abbildung 5-24: Versagensbilder zyklisch geprüfter TOX-Clinchnietverbindungen

Der Wert für die Oberlast liegt für 10^5 Schwingspielen bei 5 kN. Damit liegt diese Fügetechnik über dem Clinchen, was auf den Niet als Hilfsfügeteil zurückzuführen ist. Dieser erzeugt, verglichen mit dem Clinchpunkt, einen größeren Hinterschnitt.

Clinchen

Die meisten Versagensfälle sind hier durch eine Kombination aus Ausknöpfen des Clinchpunktes und Halsriss gekennzeichnet (Abbildung 5-25), während bei der ganz niedrigen Last zuerst das Oberblech riss.
Die übertragbare Kraft von ca. 4,7 kN bei 10^5 Lastwechseln entspricht dem viertbesten Wert des Verfahrensvergleiches. In Relation zu dem ebenfalls von der Fa. TOX entwickelten Verfahren Clinchnieten, ist das Clinchen schlechter zu bewerten. Dies ist vor allem auf das fehlende Hilfsfügeteil zurückzuführen.

Abbildung 5-25: Versagensbilder zyklisch geprüfter Clinchverbindungen

Vollstanznieten

Analog zu den quasistatischen Untersuchungen wurden Niete mit dem Durchmesser von 4 mm von der Fa. Kerb Konus verwendet.
Die ersten beiden Proben knöpften bereits nach wenigen Lastwechseln bei einer Kraft von 4 kN am Fügepunkt aus. (Abbildung 5-26; VSN3 u. VSN4) und konnten für die Auswertung nicht genutzt werden.

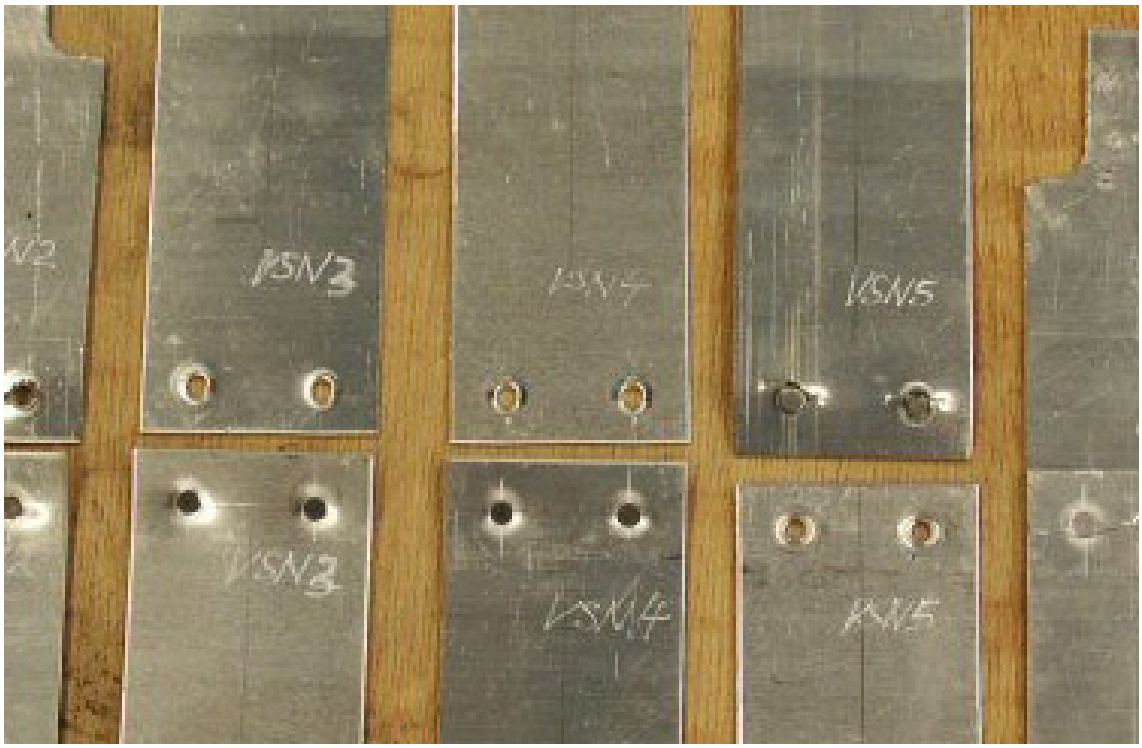


Abbildung 5-26: Versagensbilder zyklisch geprüfter Vollstanznietverbindungen

Das schlechte Abschneiden der Vollstanznieten im quasistatischen Zugversuch spiegelt sich im zyklischen Zugversuch wieder. Gegenüber Halbhohlstanznieten werden nur 55% der Festigkeit erreicht.
Nach den quasistatischen und zyklischen Untersuchungen zeigte sich, dass eine Vollstanznietverbindung nur eine Heftfunktion übernehmen kann.

Blindnieten (selbstschneidend) (Datenblatt: Anhang V)

Das Versagensbild der zyklisch geprüften Blindnietverbindungen ähnelt denen der quasistatischen Untersuchungen. Der Bruch des Probebleches erfolgt im Material, wobei sich der Riss beidseitig von den Fügepunkten in Richtung des Blechrandes bzw. der Blechmitte ausbreitet.
Die Art der Schädigung ist unabhängig von der Höhe des Lasthorizontes. Auch hier hat, ähnlich der Schraubenverbindung, die Bauart des Hilfsfügeteiles einen großen Einfluss auf die Festigkeit. Bedingt durch die Schwächung des Bleches im Fügepunkt entsteht eine Art Sollbruchstelle.

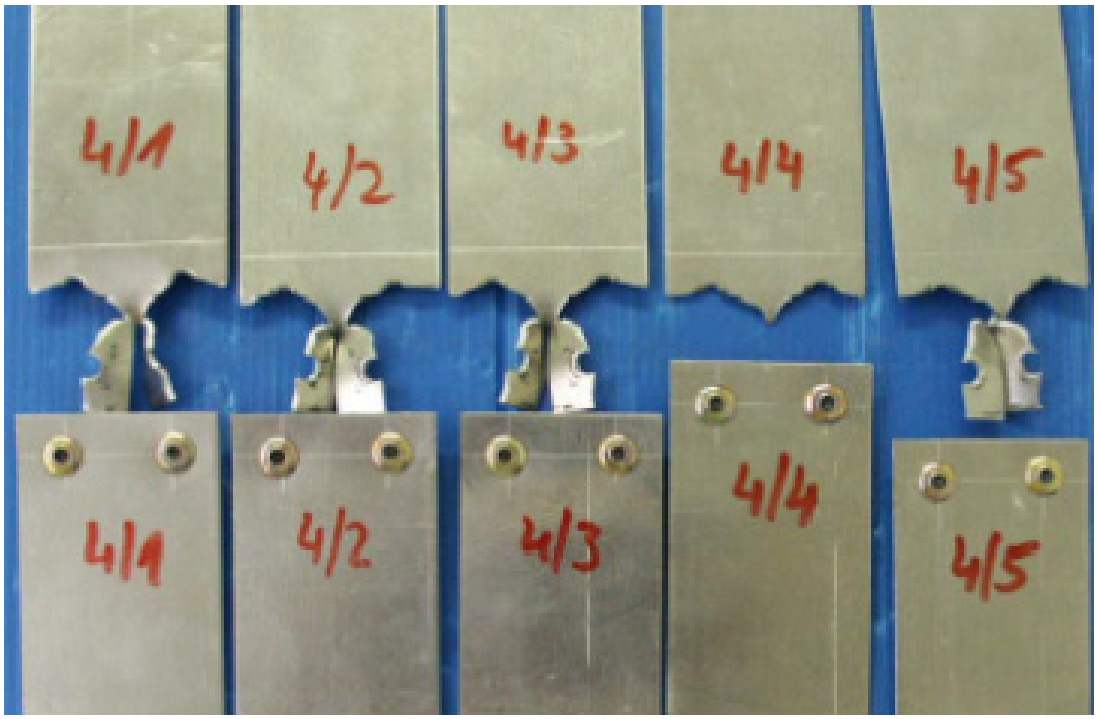


Abbildung 5-27: Versagensbilder zyklisch geprüfter Blindnietverbindungen

Der Wert der Oberlast liegt mit 4 kN ca. 20% niedriger als beim Halbhohlstanznieten. Deutlich wird dies vor allem beim Vergleich der beiden Wöhlerlinien (siehe Anhang 4).

FDS-Verschraubung

Es zeigt sich, dass der Verbindungsbruch stets im Material stattfindet. Trotzdem ist auch hier, wie bei den vorangegangenen Fügetechniken, ein Unterschied zwischen den Schadensfällen bei verschiedenen gefahrenen Lasten erkennbar. Je geringer die Kraft, mit der die Probe belastet wird, desto eher erfolgt ein „glatter“ Riss im unteren Blech.
Die Kraft von 4,5 kN bei 10^5 Schwingspielen liegt hinter der Clinchverbindung der Fa. TOX, die gänzlich auf ein Hilfsfügeteil verzichtet.

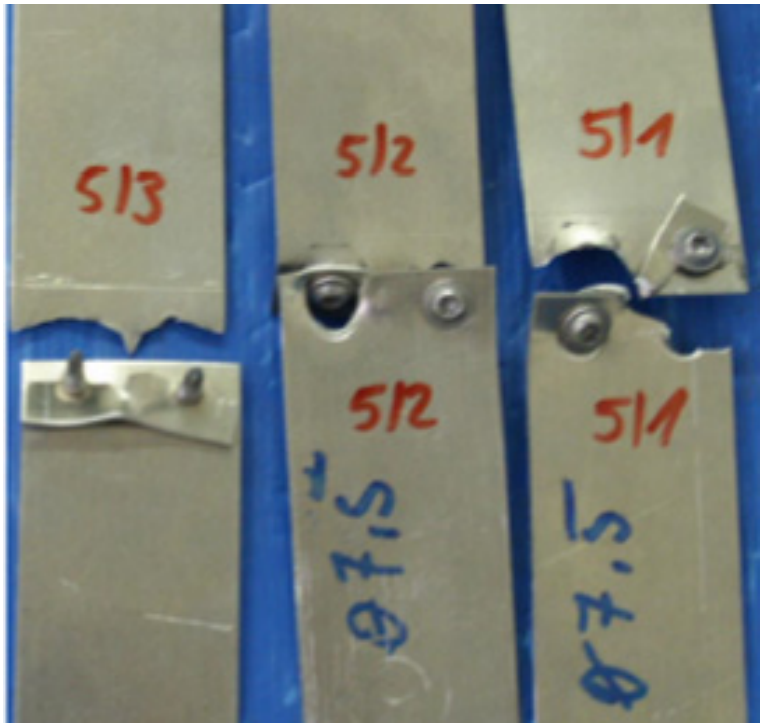


Abbildung 5-28: Versagensbilder zyklisch geprüfter FDS-Verschraubungen

Trotz der geringfügig höheren ertragbaren Oberlast sind die FDS-Schrauben nicht eindeutig besser als die PentaFlow Schrauben. Dies wird vor allem im Vergleich der einzelnen Wöhlerlinien deutlich (siehe Anhang 4). Durch den niedrigeren k-Faktor und die daraus resultierende, schneller abfallende Gerade sinkt die Dauerfestigkeit gegenüber der PentaFlow-Schraube.

PentaFlow-Verschraubung

Für die Untersuchungen kamen PentaFlow-Schrauben der Form C, mit „Gleitmo“-Beschichtung, zum Einsatz. Diese wurde speziell für nicht gelochte Dünnbleche entwickelt.

Ziel der Gleitmo-Beschichtung ist eine Reduzierung der Reibung im Gewinde, was zu einer höheren Klemmkraft führt.

Im Vergleich zu früheren Untersuchungen ohne Beschichtung ergibt sich eine ca. 450N höhere Festigkeit. Dies entspricht einem Anteil von rund 10%.

Zur Verdeutlichung werden beide Wöhlerlinien in einem Diagramm (Abbildung 5-29) dargestellt.

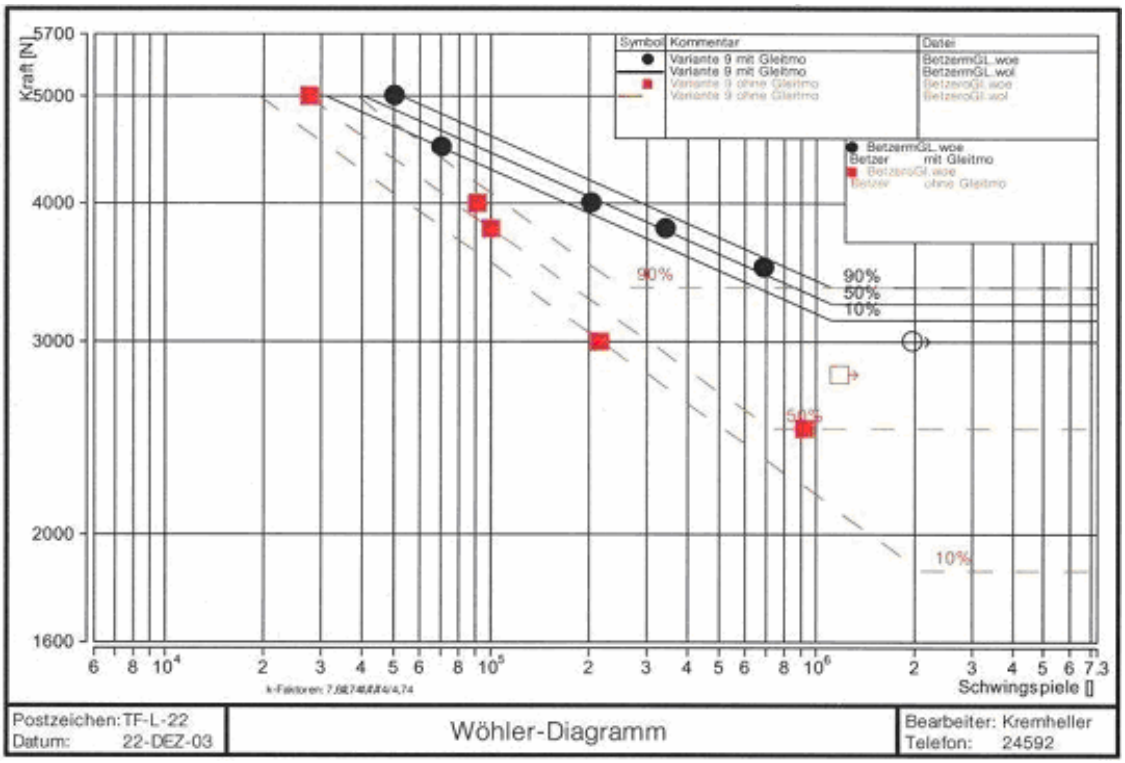


Abbildung 5-29: Wöhlerlinien PentaFlow-Verschraubung

Trotzdem liegen die Festigkeitswerte der PentaFlow- und FDS-Verschraubung auf gleichem Niveau. Jedoch liegt der k-Faktor der gleitmobeschichteten PentaFlow-Proben (k = 7,6) über den DeltaTone-beschichteten FDS-Schrauben (k = 6,6).

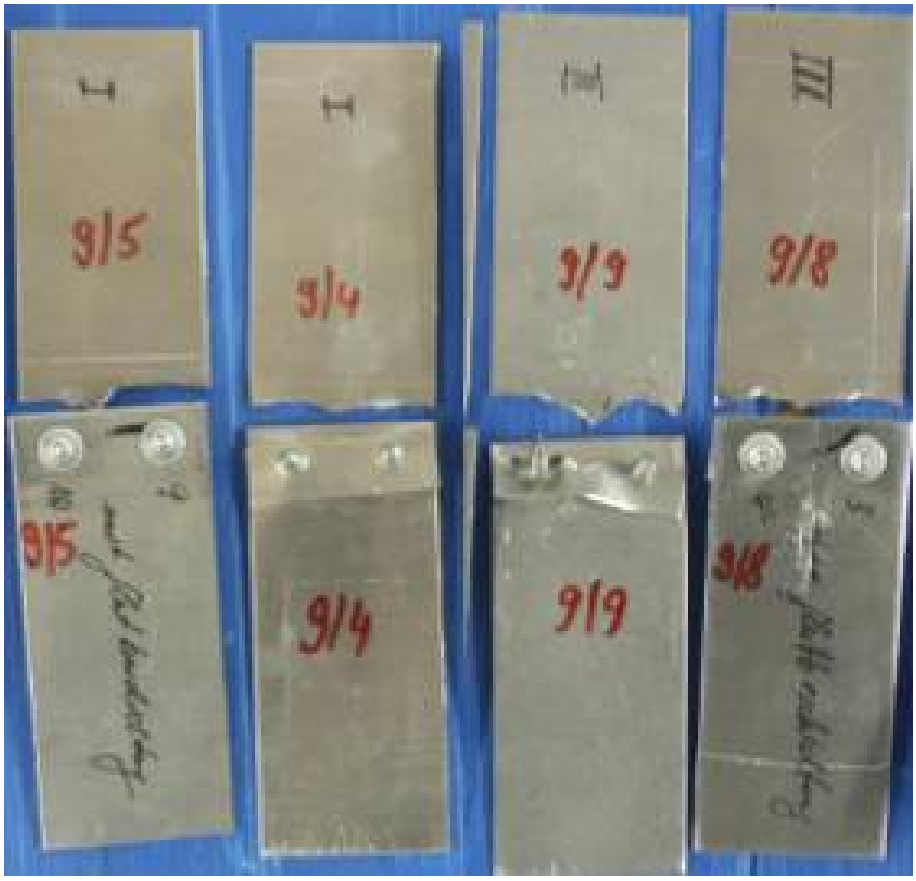


Abbildung 5-30: Versagensbilder zyklisch geprüfter PentaFlow-Verschraubungen

Widerstandspunktschweißen

Die Oberlast von 2,2 kN markiert den zweit niedrigsten Wert in der Auflistung aller Verfahren. Nur das Plasmaschweißen liegt noch darunter. Nicht nur deshalb, sondern auch wegen der Charakteristik als warmes Fügeverfahren ist ein Vergleich eher mit dem zweiten Schweißverfahren sinnvoll. Der k-Faktor beim Widerstandspunktschweißen ist mit einem Wert von 4,6 niedrig.
Das Bruchbild war bei allen Punkten sehr ähnlich, es war stets ein Materialbruch des Unterblechs durch den Fügepunkt.

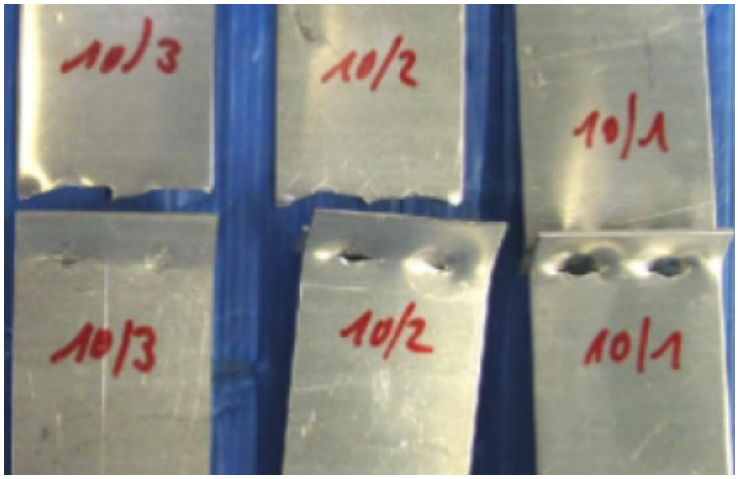


Abbildung 5-31: Versagensbilder zyklisch geprüfter WPS-Verbindungen

Das Widerstandspunktschweißen stößt in diesem Versuch sichtbar an seine Verfahrensgrenzen. Die den Aluminiumwerkstoff kontaktierenden Elektrodenkappen der Schweißanlage verschleißen (verkleben) schon nach acht bis zehn Schweißpunkten und bedürfen daraufhin des Nachfräsens der Kappenoberflächen.
Darüber hinaus stellen die gewählten Parameter das momentane Maximum des Möglichen dar.

Punkt-Rührreibschweißen

Das Punkt-Rührreibschweißen ist ein noch junger, in der Entwicklung befindlicher Prozess. Dies spiegelt sich auch in den bereits erwähnten unverschweißten Stellen wieder. Diese Stellen sind ausschlaggebend für die geringen Oberlastwerte von 2,3 kN in der zyklischen Zuguntersuchung. Im direkten Vergleich mit anderen warmen Fügeverfahren erreicht dieses Verfahren dennoch den besten Wert. Im Vergleich zum Halbhohlnieten erreicht das Punkt-Rührreibschweißen nur 45% der Oberlast.

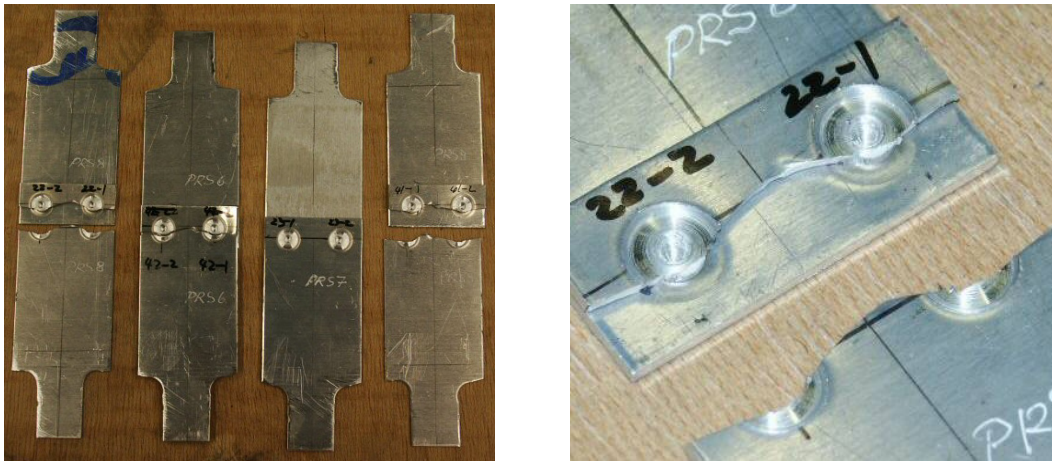


Abbildung 5-32: Versagensbilder (zyklisch) Punkt-Rührreibschweißen

Eine weitere Ursache für die geringe Oberlast kann auch die Geometrie des Schweißpunktes sein. Das Eindringen des rotierenden Stiftes hinterlässt beim Fügen einen tiefen Abdruck, von dem eine Kerbwirkung ausgeht.

Plasmaschweißen

Die bereits in den quasistatischen Untersuchungen erwähnten Risse im Fügepunkt zeichnen sich bei den zyklischen Versuchen als Schwachstellen der Fügeverbindung ab. In 60% aller Fälle verläuft der Materialbruch direkt durch den Fügepunkt.

Abbildung 5-33: Versagensbilder zyklisch geprüfter Plasmaschweißverbindungen

Erwartungsgemäß liegt die Oberlast des Plasmapunktschweißens mit 2,2 kN unter der des Widerstandspunktschweißens. Dies ist vor allem auf die mangelnden Erfahrungen mit diesem Verfahren beim Fügen von Aluminium zurückzuführen. Gleichzeitig wird hierdurch ein hohes Optimierungspotenzial deutlich. Untermauert wird dies durch einen relativ niedrigen k-Faktor (k=4,6).

5.1.3 Crash-Tests (Anhang 5)

Die Probenabmessungen und Analyse der Crashtests sowie des Kraft-Weg Diagramm wurden schon im Abschnitt 4.2.3 erläutert. Beim Crashtest wird vor allem, als erstes auf eine kleine homogene Faltenbildung geachtet. Diese weist darauf hin dass die Probe eine gute Energieaufnahme besitzt. Diese Energieaufnahme hängt auch von der Anzahl der offenen Punkte ab. Das Ranking resultiert aber aus der Auswertung der Kurvenverläufe.

Halbhohlstanznieten

Halbhohlstanznieten liegt den Untersuchungen als Referenz zugrunde und bildet somit die Basis für den angestrebten Vergleich. Das gute Resultat ist auf ein definiertes Faltverhalten zuzuführen, was nur wenige aufgeknöpfte Fügepunkte zur Folge hat.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,97 kNm	1./11.
Standartabw.	0,081 kNm	
Anzahl Proben	10	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	1 x keine 8 x 2 1 x 3	4./11.
Faltenbildung		3./11.

Abbildung 5-34: Crash-Verhalten von Halbhohlstanznietverbindungen; Bewertung

Hierbei wirkt sich die geringe Größe des Hilfsfügeteils positiv aus, welches die Bildung möglichst kleiner Falten begünstigt.
In acht von zehn Fällen öffnen sich zwei Punkte, meist im oberen Bereich des Flansches. Nur bei einem Profil versagt ein dritter Punkt, was ein unsauberes Faltverhalten zur Folge hat.
Allgemein zeigen sich die einzelnen Profile dieser Versuchsreihe sowohl in der Qualität der Verbindungen als auch in Bezug auf das Faltverhalten sehr homogen.

IWU-Nietclinchen*

Das Nietclinchen findet sich im Vergleich am unteren Ende wieder. Mit 1,76 kNm ist die Energieaufnahme verglichen mit TOX-Clinchnieten und Halbhohlstanznieten (1,85 kNm bzw. 1,97 kNm) bedeutend geringer. Der Kraft-Weg-Verlauf ist undefiniert und bei drei von fünf Proben kaum ansteigend.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,76 kNm	9./11.
Standartabw.	0,085 kNm	
Anzahl Proben	5	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	**1 x 4** **1 x 6** **3 x 8**	10./11.
Faltenbildung		10./11.

Abbildung 5-35: Hohe Schwankungen beim Crash-Verhalten von Nietclinchverbindungen; Bewertung

Aus der Analyse der Bilder und Filmaufnahmen sowie der Untersuchung der zerstörten Profile wird ein Versagen der Nietclinchpunkte nach dem Reißverschlussprinzip deutlich. Das bedeutet, dass nach dem ersten offenen Fügepunkt die Folgenden ebenso ausreißen, ohne dass eine Faltung zustande kommt. Die Erklärung dafür kann das Moment im Clinchpunkt sein, das durch den kleineren Hebelarm, größere Scherkräfte entstehen lässt.
Die Versagensursache der einzelnen Punkte ist zumeist der Halsriss. Um zu festeren Verbindungen auch im Crashfall zu kommen, muss nun vorrangig die Halsdicke gesteigert und zweitrangig der Hinterschnitt vergrößert werden. Dies muss primäres Ziel bei den künftigen Optimierungen sein. Eine zweite Möglichkeit ist, die Spannung in der Verbindung zu reduzieren. Dies kann durch die Verwendung eines Ambosses mit Außenring, (s.Abschn. 7.2.1) anstatt eines herkömmlichen Ambosses realisiert werden.

* Die Crash-Untersuchung mit und ohne Klebstoff wurde mit der zuletzt optimierten Nietgeometrie realisiert. Mit der optimierten Geometrie wurde ein größerer Hinterschnitt und eine größere Halsdicke erreicht. (Anhang 9)

TOX-Clinchnieten

Etwas besser als das reine Clinchen ist das von der Fa. TOX entwickelte Clinchnieten. Ähnlich dem vorher analysierten Clinchverfahren ist nicht in erster Linie die aufnehmbare Energie von 1,85 kNm, sondern vor allem das Faltverhalten als verhältnismäßig schlecht zu bewerten.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,85 kNm	5./11.
Standartabw.	0,156 kNm	
Anzahl Proben	10	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	1 x 2 1 x 3 1 x 4 3 x 6 4 x 7	6./11.
Faltenbildung		8./11.

Abbildung 5-36: Crash-Verhalten von Clinchnietverbindungen; Bewertung

So ist primär die schlechtere Faltenbildung, dargestellt durch den ungleichmäßigen Kurvenverlauf (Abbildung 5-37), entscheidend.
Die Bewertung liegt im unteren Drittel und erheblich unter dem Stanznieten. Auch hier sind nur bei einem der zehn zerstörten Profile nicht mehr als zwei Punkte ausgerissen.

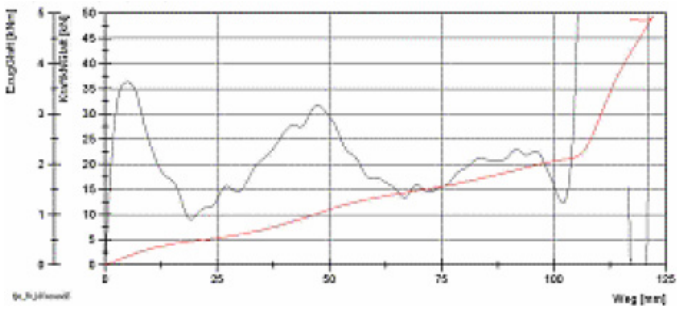


Abbildung 5-37: Kraft-Weg-Diagramm aus den Crash-Untersuchungen clinchgenieteter Profile

Clinchen

Die Clinchverbindungen liefern unzureichende Ergebnisse. Die Energieaufnahmefähigkeit liegt mit 1,83 kNm etwa 7% unter den Werten des Halbhohlstanznietverfahrens. Ferner zeigt die Bewertung der Faltenbildung ein deutliches Defizit.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,83 kNm	7./11.
Standartabw.	0,083 kNm	
Anzahl Proben	10	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	2 x 5 4 x 6 4 x 7 1 x 8	6./11.
Faltenbildung		8./11.

Abbildung 5-38: Crash-Verhalten von Clinchverbindungen; Bewertung

Als Folge der sich öffnenden Punkte ist das Faltverhalten sehr undefiniert, die Mehrzahl der Profile schält auf. Die Schädigung der Clinchpunkte erfolgt stets durch einen Abriss im Halsbereich. Der Hinterschnitt ist folglich ausreichend. Die zu geringe Festigkeit im Hals muss daher Hauptziel weiterer Optimierungsbemühungen sein.

Vollstanznieten

Vollstanznieten schneidet in allen Bewertungsdisziplinen am schlechtesten ab.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,61 kNm	11./11.
Standartabw.	0,09 kNm	
Anzahl Proben	5	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	1 x 7 1 x 8 2 x 9 1 x 10	11./11.
Faltenbildung		11./11.

Abbildung 5-39: Crash-Verhalten von Vollstanznietverbindungen; Bewertung

Das schlechte Ergebnis wird noch durch einen kaum ansteigenden und undefinierten Kraft-Weg-Verlauf bekräftigt.

Im Vergleich zum Referenzverfahren werden nur ca. 80% des Energieaufnahmevermögens erreicht.

Beim Betrachten der Crash-Profile und der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen fallen die vielen ausgerissenen Niete auf, was eine definierte und gleichmäßige Faltenbildung unmöglich macht. Das Ausreißen der Punkte erfolgt wie bei einem Reißverschluss. Faltungen sind nicht oder nur in Ansätzen erkennbar.

Blindnieten

Mit 1,90 kNm Energieaufnahmevermögen erreicht das Blindnieten der Fa. TUCKER ein hohes Niveau. Der Unterschied zum Halbhohlstanznieten von 4% ist relativ gering. Im zweiten Vergleichskriterium, dem gleichmäßigen Kurvenverlauf, weist es gegenüber dem Stanznieten jedoch Nachteile auf.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,90 kNm	2./11.
Standartabw.	0,059 kNm	
Anzahl Proben	10	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	10 x keine	1./11.
Faltenbildung		4./11.

Abbildung 5-40: Crash-Verhalten von Blindnietverbindungen; Bewertung

Der Faltenwurf ist bei den Blindnieten unregelmäßiger als bei den Crash-Proben mit Stanznieten.

Die Qualität des Blindnietens ist mit keinem offenen Punkt besser als das Referenzverfahren. Bedingt durch die Bauart des Blindnietes sind alle Fügepunkte nach den Versuchen intakt, was nach den hohen Kopfzugwerten der quasistatischen Untersuchung zu erwarten war.

FDS-Verschraubung

Bezogen auf das Energieaufnahmevermögen liegt die FDS-Verschraubung mit 1,88 kNm ca. 5% unter dem Referenzwert des Halbhohlstanznietens.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,88 kNm	3./11.
Standartabw.	0,185 kNm	
Anzahl Proben	10	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	10x keine	1./11.
Faltenbildung		1./11.

Abbildung 5-41: Crash-Verhalten von FDS-Verschraubungen; Bewertung

Alle Fügepunkte sind auch nach dem Versuch noch intakt. Der Kurvenverlauf ist als sehr homogen zu bezeichnen, was einer gleichmäßigen Faltenbildung entspricht. In diesem Kriterium liegt die FDS-Verschraubung sogar vor dem Halbhohlstanznieten der Fa. TUCKER. Jedoch sind die entstandenen Falten noch ein wenig zu groß. Zurückzuführen ist diese Tatsache auf die Schraube als Fügeteil, die beim Faltvorgang hinderlich wirkt. Optimierungspotential besteht also vor allem bei eben dieser Faltenbildung. Bei kürzeren Schrauben ist aller Voraussicht nach ein kleinerer Faltenwurf die Folge, was gleichzeitig zu einem höheren Wert für die Energieaufnahme führen könnte.

PentaFlow-Verschraubung

Beim Betrachten des Crashkörpers fallen leichte Verspannungen der Crash-Körper auf, die sich in Form von Verwerfungen ausprägen. Besonders sichtbar wird dies am oberen und unteren Ende des Profils. Die Blechenden wölben sich nach außen.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,87 kNm	4./11.
Standartabw.	0,109 kNm	
Anzahl Proben	10	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	10 x keine	1./11.
Faltenbildung		2./11.

Abbildung 5-42: Crash-Verhalten von PentaFlow-Verschraubungen; Bewertung

Die PentaFlow-Crashproben erreichen eines der besten Ergebnisse im Gesamtvergleich. Keiner der Fügepunkte ist ausgerissen. Der Kraft-Weg-Verlauf ist gleichmäßig.
Erreicht werden 1,87 kNm bei der Energieaufnahme, was ca. 95% der Referenz Halbhohlstanznieten entspricht. Die entstandenen Falten sind aufgrund der Behinderung durch die Schraubenspitze noch zu groß.

Abbildung 5-43: Crash-Profil ohne Deckel

Widerstandspunktschweißen

Mit einem Mittelwert von 1,85 kNm Energieaufnahmevermögen erreicht das WPS einen durchschnittlichen Wert im Vergleich.
Meist erfolgt eine Schädigung der Punktverbindungen durch Ausknöpfen der Punkte aus dem Profil.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,85 kNm	5./11.
Standartabw.	0,138 kNm	
Anzahl Proben	10	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	1 x 1 3 x 2 4 x 3 2 x 4	5./11.
Faltenbildung		7./11.

Abbildung 5-44: Crash-Verhalten von WPS-Verbindung; Bewertung

Sichtbar wird dies durch einen ringförmigen Riss im Material um die Schweißlinse. Seltener ist die Schädigung in Form einer Abscherung in der Schweißlinse selbst.

Punkt-Rührreibschweißen

Im Crash-Versuch bestätigt sich das relativ schlechte Abschneiden im quasistatischen Zugversuch. Bis auf den letzten Crash-Körper erreichen alle Punkt-Rührreibschweißproben eine undefinierte Faltenbildung und kaum ansteigende Kraft-Weg-Verläufe mit vielen geöffneten Punkten.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,70 kNm	10./11.
Standartabw.	0,068 kNm	
Anzahl Proben	5	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	1 x 4 2 x 7 1 x 8 1 x 9	8./11.
Faltenbildung		6./11.

Abbildung 5-45: Crash-Verhalten von Punkt-Rührreibverbindungen; Bewertung

Die letzte Probe faltet sich mit einer definierten Kraft-Weg-Kurve mit nur vier geöffneten Punkten. Diese eine Probe bewahrte das noch weitere Abrutschen im Vergleich.

Versagensart ist immer das Ausreißen der Fügepunkte, was durch eine unvollständige Verschweißung verursacht wird.

Plasmaschweißen

Das Plasmaschweißen belegt in der Gesamtwertung einen mittleren Platz. Eine definierte Faltenbildung ist in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen erkennbar. Auffällig ist bei zwei Proben eine erkennbare Faltunwilligkeit, wenn der volle Deformationsweg von 100mm fast erreicht wird.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	1,83 kNm	7./11.
Standartabw.	0,141 kNm	
Anzahl Proben	5	
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	3 x 4 1 x 5 1 x 7	7./11.
Faltenbildung		5./11.

Abbildung 5-46: Crash-Verhalten von Plasmaschweißverbindungen; Bewertung

Diese Faltunwilligkeit äußert sich in Form des Ausknickens. Wäre die Bodenplatte nicht fest eingespannt, würde die Probe knicken.
Gegenüber der Referenz werden 92% des Energieaufnahmevermögens des Halbhohlstanznietens erreicht.

5.2 Festigkeitsuntersuchung mit Klebstoff

Für die Untersuchung der Verbindungsfestigkeit mit zusätzlicher Verwendung des Klebstoffs Betamate 1480 (Anhang 7) wurden fünf Verfahren ausgewählt, welche am besten den Einfluss des Klebstoffes widerspiegeln können.
Das Plasma- sowie das Rührreibschweißen wurden nicht untersucht, da unter Verwendung von Klebstoff keine Verbindung möglich ist (Störung durch Klebstoff in der warmen Fügezone). Die FDS- und Pentaflow- Verschraubung wurden nicht geprüft da durch den Kleber im Gewindeteil, bei einschrauben, die Eigenschaften der Fügepunkte leiden ahnlich auch bei Blindnieten vorhanden. Die ausgewählten Fügeverfahren sind im nachfolgenden aufgelistet:

Halbhohlstanznieten
Clinchen
Clinchnieten
Nietclinchen
Widerstandspunktschweißen

Der Einfluss des Strukturklebstoffes auf die Festigkeit der Verbindung soll in quasistatischen und zyklischen Tests sowie bei Untersuchung auf dem Fallprüfstand gezeigt werden. Bei der quasistatischen Festigkeit wurden nur je fünf Scherzugproben untersucht, da eine klar definierte geklebte Fläche notwendig ist. Bei Kopfzugproben ist es nicht möglich, die geklebte Fläche auf allen Proben gleich groß zu halten.

5.2.1 Quasistatische Verbindungsfestigkeit

Halbhohlstanznieten

Für die Festigkeitsuntersuchung wurden fünf Scherzugproben mit Klebstoff geprüft. Die gefügten Probebleche erreichten einen Mittelwert der maximalen Zugkraft von 14,8 kN.

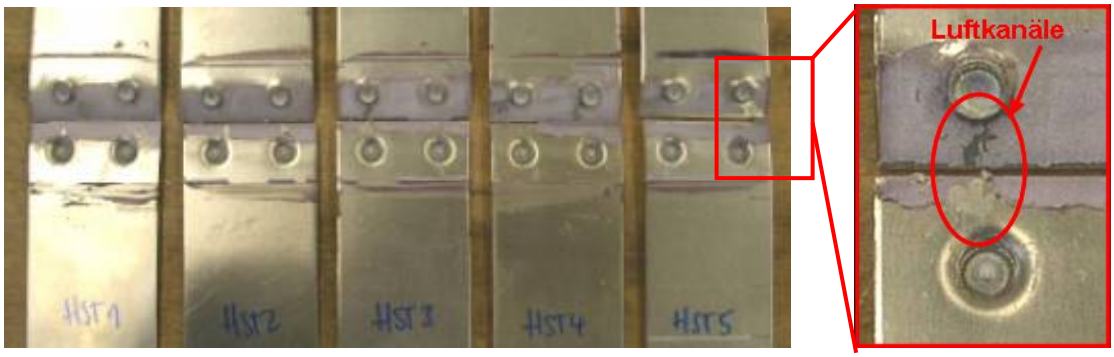


Abbildung 5-47: Scherzugproben nach dem Zugversuch; Versagensbild

Die Versagensursache der Verbindung ist in allen Fällen das Ausknöpfen der Niete. Durch die plastische Verformung der Bleche öffnet sich die Verklammerung im matrizenseitigen Blech, so dass der Niet aus seiner festen Position im matrizenseitigen Blech herausgerissen wird (Abbildung 5-47). Auch hier ist der geringere Hinterschnitt ein Indiz auf das Zerstörungsbild.

IWU-Nietclinchen

Für die Untersuchung der Scherzugfestigkeit mit Klebstoff wurden fünf gefügte Proben überprüft. Es wurde ein Mittelwert der Zugkraft von 15,3 kN ermittelt. Die Festigkeit ist somit 0,6 kN höher als beim Referenzverfahren Halbhohlstanznieten. Eine mögliche Erklärung dafür könnten die Luftkanäle beim Halbhohlstanznieten sein (Abbildung 5-47).

Abbildung 5-48: Versagensbild der Scherzugproben – IWU-Nietclinchen

Die Versagensursache der Verbindung ist in allen fünf Fällen ein Misch-versagen. Bei drei Proben kommt es zum Halsriss und Ausknöpfen der Niete, bei den zwei anderen noch zusätzlich zum Ausknüpfen (Abbildung 5-47).

TOX-Clinchnieten

Es wurden fünf Scherzugproben mit Klebstoff zur Ermittlung der Festigkeit untersucht. Es wurde ein Mittelwert der Zugkraft von 14,5 kN ermittelt.

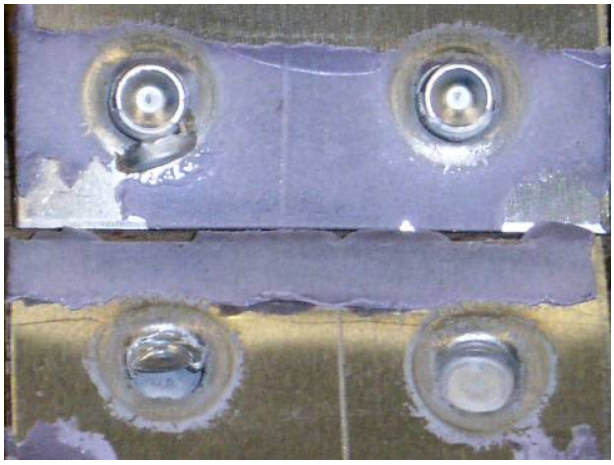


Abbildung 5-49: Versagensbild der Scherzugproben – TOX-Clinchnieten

Die Versagensursache der Verbindung ist in allen fünf Fällen ein Misch-versagen von Halsriss und Ausknöpfen der Niete. Das stempelseitige Blech ist durch Materialverdrängung im Fügepunkt deutlich dünner und somit der schwächste Punkt der Verbindung. Es kommt zu einem Zerreißen im Halsbereich, wodurch der ganze Punkt letztendlich aus der Verklemmung des matrizenseitigen Bleches gerissen wird.

Clinchen

Für die Festigkeitsermittlung der Scherzugproben mit Klebstoff sind fünf gefügte Bleche geprüft worden. Es wurde ein Mittelwert der Zugkraft von 15,9 kN erreicht.

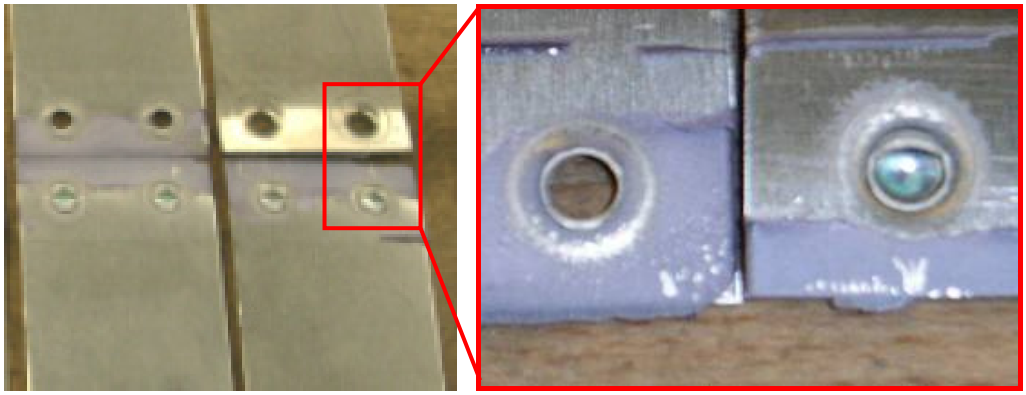


Abbildung 5-50: Scherzugproben nach dem Zugversuch; Versagensbild – Clinchen

Die Versagensursache der Verbindung ist in allen fünf Fällen Halsriss. Deshalb ist die Halsdicke das wesentliche Kriterium (Abbildung 4-8). Je dünner dieser Bereich beim Fügen wird, desto anfälliger wird die Probe dadurch.

Widerstandspunktschweißen

Für die Untersuchung der Scherzugfestigkeit beim Widerstandpunktschweißen mit Klebstoff sind fünf Zugproben geprüft worden. Der Mittelwert der Zugkraft liegt bei diesem Verfahren bei 13,8 kN.

Abbildung 5-51: Versagensbild der Scherzugproben – Widerstandspunktschweißen

Die Versagensursache der Verbindung ist in allen fünf Fällen das Ausreißen des verschweißten Bereiches bei nur einem oder bei beiden Blechen. Der heraus gerissene Bereich entspricht näherungsweise der Schweißlinse, die im Schliffbild sichtbar ist.

5.2.2 Zyklische Verbindungsfestigkeit

Halbhohlstanznieten

Für dieses Fügeverfahren mit Klebstoff sind Zugprobenbleche in einem Last-horizontintervall von 3,5-6,5 kN geprüft worden.
Bei einer Oberlast zwischen 4 – 5,5 kN kam es zum Mischversagen durch Ermüdungsbruch im Blechmaterial und zum Ausknöpfen der Niete. Bei höheren Lasthorizonten war die Ursache für das Versagen ausschließlich das Aus-knöpfen der Niete.

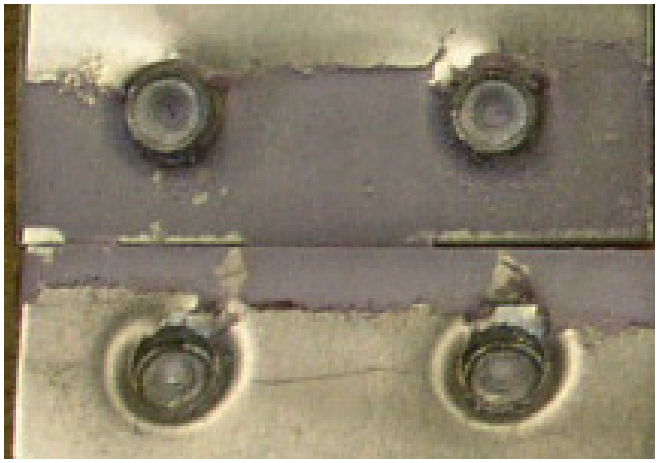


Abbildung 5-52: Versagensbild zyklisch geprüfter Halbhohlstanzniet-Scherzugproben

Mit einer Oberlast von 5,8 kN bei einer Schwingspielzahl von 10^5 Lastwechseln stellt der Referenzwert gleichzeitig das schlechteste Kurvenniveau innerhalb des im Vergleiches der Fügeverfahren mit Klebstoff dar. Es kann mehrere Gründe geben: geringe Aufspreizung, Lufkanäle usw.. Die Lage der Wöhlerlinie im doppel-logarithmischen Diagramm ergibt einen k-Faktor von 7,60 für dieses Füge-verfahren.

IWU-Nietclinchen

Für das Verfahren mit Klebstoff sind Zugprobenbleche in einem Lasthorizont-intervall von 3,8 – 7,5 kN geprüft worden.
Die Versagensursache war das Ausknöpfen des Nietes. Eine der zwölf Proben ist ein „Durchläufer“ und auch nach $12 \cdot 10^6$ Schwingspielen immer noch intakt.

Abbildung 5-53: Versagensbild zyklisch geprüfter IWU-Nietclinch-Scherzugproben

Mit einer Oberlast von 7,5 kN bei einer Schwingspielzahl von 10^5 Lastwechseln stellt dieses Verfahren mit Klebstoff im Vergleich das zweitbeste Ergebnis dar. Die Lage der Wöhlerlinie im doppellogarithmischen Diagramm ergibt einen k-Faktor von 5,37 für dieses Fügeverfahren.

TOX-Clinchnieten

Für dieses Fügevefahren der Fa. TOX mit Klebstoff sind Zugprobenbleche in einem Lasthorizontintervall von 4–7,5 kN geprüft worden.
Eine Probe riss bei der Oberlast von 4 kN ausschließlich im Blechmaterial. In fünf Fällen war die Ursache des Versagens das Ausknöpfen der Niete. Bei drei Zugproben trat ein Mischversagen bestehend aus Ausknöpfen der Niete und einem Ermüdungsbruch im Blechmaterial auf.

Abbildung 5-54: Versagensbild (zyklisch) TOX-Clinchniet-Scherzugproben (Mischbruch)

Eine der zehn Proben ist ein „Durchläufer“, da dieses Probeblech bei einer max. Schwellkraft von 5 kN nach über $3{,}6 \cdot 10^6$ Schwingspielen immer noch intakt war.
Mit einer Oberlast von 6,4 kN bei einer Schwingspielzahl von 10^5 Lastwechseln stellt dieses Verfahren mit Klebstoff im Vergleich den vorletzten Platz dar. Die Lage der Wöhlerlinie im doppellogarithmischen Diagramm ergibt einen k-Faktor von 6,07 für dieses Fügeverfahren.

Clinchen

Für dieses nietelementlose Fügeverfahren mit Klebstoff sind Zugprobenbleche in einem Lasthorizontintervall von 3,5kN – 10 kN geprüft worden.
Eine der zehn Proben versagte durch Ermüdungsbruch im Blechmaterial bei einer Oberlast von 8 kN. In zwei Fällen trat Mischversagen, Bruch im Blech und Halsriss im Fügepunkt, bei den Oberlasten von 6,5 und 7,0 kN auf. In den anderen Fällen war die Ursache für das Versagen ausschließlich ein Halsriss des Clinchpunktes. In zwei Fällen der zehn Proben kam es zu „Durchläufern", da die Probebleche bei einer max. Schwellkraft von 3,5 und 6,0 kN nach über $3{,}2 \cdot 10^6$ Schwingspielen immer noch intakt waren.

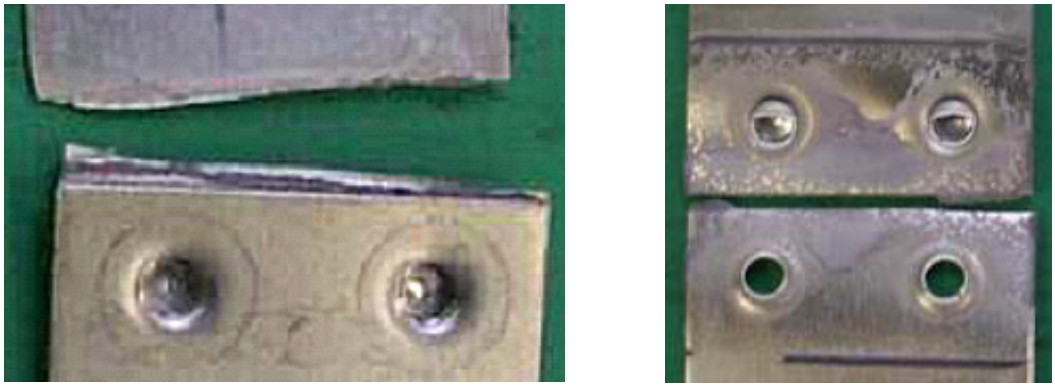


Abbildung 5-55: Versagensbild zyklisch geprüfter Scherzugproben; Ermüdungsbruch (links), Halsriss (rechts)-Clinchen

Mit einer Oberlast von 9 kN bei einer Schwingspielzahl von 10^5 Lastwechseln stellt dieses Verfahren mit Klebstoff im Vergleich das beste Ergebnis. Die Lage der Wöhlerlinie im doppellogarithmischen Diagramm ergibt einen k-Faktor von 6,79 für dieses Fügeverfahren.

Widerstandspunktschweißen

Für das einzige warme Fügeverfahren sind Zugprobenbleche in einem Lasthorizontintervall von 3,5 – 8,0 kN geprüft worden.

Bei sechs Proben kam es ausschließlich nur zum Ermüdungsbruch im Blechmaterial. In sechs weiteren Fällen war für das Versagen ausschließlich das Ausknöpfen der Schweißlinse die Ursache. Zwei der zwölf Proben sind „Durchläufer“. Mit einer Oberlast von 6530 N bei einer Schwingspielzahl von 10^5 Lastwechseln stellt dieses Verfahren mit Klebstoff im Vergleich das drittbeste Ergebnis dar. Die Lage der Wöhlerlinie im doppellogarithmischen Diagramm ergibt einen k-Faktor von 4,15 für dieses Fügeverfahren.

Das Versagensbild der zyklisch geprüften Zugproben zeigt Abbildung 5-56.

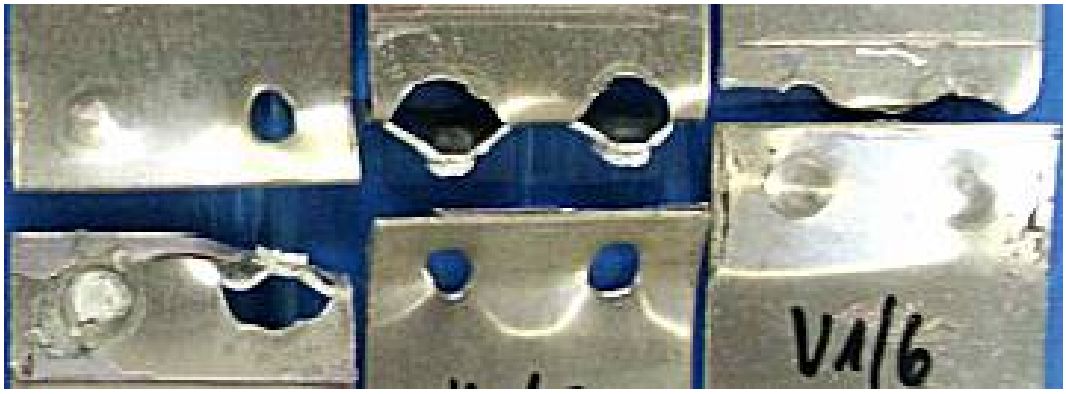


Abbildung 5-56: Versagensbild zyklisch geprüfter Scherzugproben

5.2.3 Crash-Tests

Halbhohlstanznieten

Das Halbhohlstanznieten liegt den Untersuchungen als Referenz zugrunde und bildet somit die Basis für den angestrebten Vergleich.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	2,29 kNm	5.
Standardabw.	0,135 kNm	4.
Anzahl Proben	5	-
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	4 x 1 1 x 2	2.
Faltenbildung		3.

Abbildung 5-57: Crash-Verhalten von Halbhohlstanznietverbindungen; Bewertung

Hierbei wirkt sich die geringe Größe des Hilfsfügeteils positiv aus, welches die Bildung möglichst kleiner Falten begünstigt. Deutlich wird dies in Abbildung 5-57, aber vor allem in einem gleichmäßigen Verlauf der Kraft-Weg-Kurve.
Allgemein zeigen sich die einzelnen Profile dieser Versuchsreihe sowohl in der Qualität der Verbindungen als auch in Bezug auf das Faltverhalten sehr homogen. Die maximal aufgenommene Kraft erreicht einen wert von 47,17 kN.
Durch die flächige Klebstoffauftragung versagen weniger Fügepunkte und es bilden sich größere Falten als bei einer Verbindung ohne Klebstoff aus. Dadurch kann eine größere Energieaufnahme von 0,3 kNm erreicht werden.

IWU-Nietclinchen*

Mit 2,34 kNm ist die Energieaufnahme verglichen mit TOX-Clinchnieten und Halbhohlstanznieten (2,33kNm bzw. 2,29kNm) nahezu gleich. Trotz der guten Energieaufnahme öffneten sich mehr Fügepunkte als beim Halbhohlstanz-nieten.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	2,34 kNm	3.
Standardabw.	0,323 kNm	5.
Anzahl Proben	5	-
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	1 x 1 2 x 2 2 x 3	5.
Faltenbildung		5.

Abbildung 5-58: Crash-Verhalten von Nietclinchverbindungen; Bewertung

Das Versagen ist meist ein Mischbruch. Um zu festeren Verbindungen auch im Crashfall zu kommen, muss die Halsdicke erhöht werden. Das IWU-Nietclinchen weist ein ungleichmäßiges Faltverhalten auf. Die maximal aufgenommene Kraft erreicht einen Mittelwert von 51,77kN.

* Die Crash-Untersuchung mit und ohne Klebstoff wurde mit der zuletzt optimierten Nietgeometrie realisiert. Mit der optimierten Geometrie wurde ein größerer Hinterschnitt und eine größere Halsdicke erreicht (Anhang 9).

TOX-Clinchnieten

Das von der Firma TOX entwickelte Clinchnieten schneidet im Vergleich zum Clinchen etwas schlechter ab. Ähnlich dem Clinchverfahren ist die aufgenommene Energie von 2,33 kNm als verhältnismäßig gut zu bewerten.
Das Faltverhalten ist mit dem des Stanznietens zu vergleichen.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	2,33 kNm	4.
Standardabw.	0,125 kNm	3.
Anzahl Proben	5	-
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	1 x keine 2 x 2 2 x 2	4.
Faltenbildung		2.

Abbildung 5-59: Crash-Verhalten von Nietclinchverbindungen; Bewertung

Die Qualität der Verbindungen ist als zufriedenstellend einzustufen. Bei einer der fünf Proben wurde kein Fügepunkt aufgerissen.
Betrachtet man die im Scherzug erreichten Werte der quasistatischen Prüfungen, so sind Parallelen zu sehen. Die maximal aufgenommene Kraft erreicht einen Mittelwert von 47,27 kN.

Clinchen

Das einzige im Crash geprüfte Fügeverfahren ohne Hilfsfügeteil, das Durchsetzfügen oder Clinchen der Fa. TOX liefert ein sehr gutes Ergebnis.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	2,43 kNm	1.
Standardabw.	0,079 kNm	1.
Anzahl Proben	5	-
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	1 x keine 1 x 1 2 x 2 1 x 3	3.
Faltenbildung		4.

Abbildung 5-60: Crash-Verhalten von Clinchverbindungen; Bewertung

Ausschlaggebend für das gute Abschneiden sind die hohen aufgenommen Energiewerte und die zufriedenstellende Qualität der Verbindungen.
Die Energieaufnahmefähigkeit von 2,43 kNm liegt über den Werten des Halbhohlstanznietverfahrens und der anderen kalten Fügetechniken, obwohl die Bewertung der Faltenbildung ein deutliches Defizit aufzeigt.
Das Versagen der Clinchpunkte erfolgt stets durch einen Abriss im Halsbereich. Die maximal aufgenommene Kraft erreicht einen Mittelwert von 45,84 kN.

Widerstandspunktschweißen

Mit einem Mittelwert von 2,40 kNm Energieaufnahmevermögen erreicht das WPS das zweitbeste Ergebnis im Vergleich aller geprüften Verfahren.
Meist erfolgt eine Schädigung der Punktverbindungen durch Ausknüpfen der Punkte. Sichtbar wird dies durch einen ringförmigen Riss im Material um die Schweißlinse.

Bewertung	Ergebnis	Ranking
Energieaufnahme (Mittelwert)	2,40 kNm	2.
Standardabw.	0,092 kNm	2.
Anzahl Proben	5	-
Proben (n) mit offenen Punkten (m) n x m	4 x 1 1 x 2	1.
Faltenbildung		1.

Abbildung 5-61: Crash-Verhalten von WPS-Verbindungen; Bewertung

Aus den Schädigungen im Material gemeinsam mit den maximal eingestellten Werkzeugparametern wird deutlich, dass ein Optimierungspotential unter den aktuellen Bedingungen nur in geringem Maße vorhanden ist. Die maximal aufgenommene Kraft erreicht einen Mittelwert von 47,48 kN.

6 Versuchsauswertung

6.1 Versuchsauswertung ohne Klebstoff

6.1.1 Quasistatische Verbindungsfestigkeit

Fast alle untersuchten Fügeverfahren zeigten in erster Begutachtung der hergestellten Proben keine beziehungsweise nur geringe Deformation des Aluminiumwerkstoffs. Lediglich die am Fraunhofer Institut gefügten Nietclinch-proben weisen an den Kanten des Blechmaterials deutliche Verformungen auf.

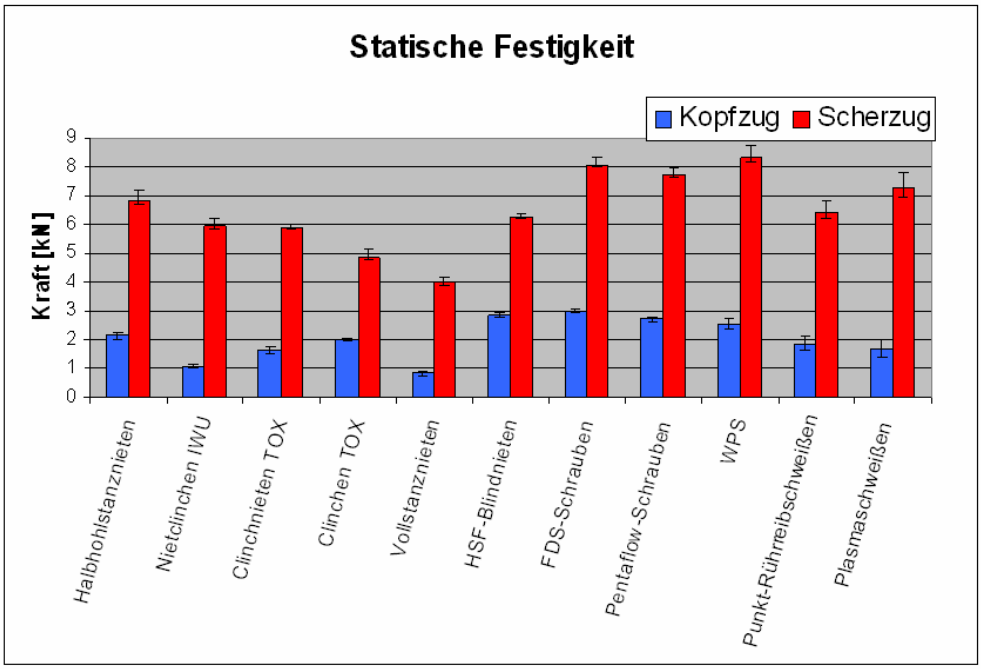


Abbildung 6-1: Übersicht der im Versuch ermittelten quasistatischen Festigkeiten (ohne Klebstoff) mit Streubreite

Bei den kalten Fügeverfahren erreichten die beiden getesteten Schraubenarten sowohl im Scher- als auch im Kopfzug die größten Festigkeitswerte. Dabei wurden bei den FDS-Schrauben geringfügig größere Festigkeiten ermittelt als bei den PentaFlow-Schrauben.

In der Gruppe der warmen Fügetechniken erreicht das Widerstandspunkt-schweißen für Kopf- und Scherzug die höchsten Festigkeitswerte. Diese Werte übertreffen die Festigkeitswerte des Referenzverfahrens Stanznieten.

Bei den Nietverfahren wurden die besten Ergebnisse im Kopfzug mit dem Blindnieten erreicht. Für den Scherzug erzielte das Stanznieten in dieser Verfahrensgruppe die besten Festigkeitswerte.
Die Vollstanznietverbindung lieferte im Kopf- und Scherzugversuch die niedrigsten Festigkeitswerte. Eine höhere Festigkeit kann mit einem Vollstanzniet nicht erreicht werden, da das in die Ringnut fließende Aluminium keinen ausreichenden Querschnitt aufweist. (Abbildung 5-9)
Die Clinchpunkte erreichten aufgrund des großen Hinterschnittes in der Kopfzugprüfung annähernd das Festigkeitsniveau des Stanznietens.
Für das Clinchnieten lagen die Werte für die Scherzugfestigkeit höher als bei dem Clinchen. Der Niet hat hierbei einen positiven Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung. Aufgrund des geringeren Hinterschnitts wiesen die Proben des Clinchnietens eine geringere Kopfzugfestigkeit auf als die geclinchten Proben.
Für das Nietclinchen wurden bei der Scherzugprüfung vergleichbare Werte wie für das Clinchnieten ermittelt. Durch den geringeren Hinterschnitt, wird jedoch nur 1 kN Kopfzugfestigkeit erreicht.

6.1.2 Zyklische Verbindungsfestigkeit

Das Halbhohlstanznieten, welches die Referenz dieses Vergleiches bildet, repräsentiert mit einer Oberlast von 5 kN den besten Wert dieses Vergleiches. An zweiter Stelle folgt das Clinchnieten des Lieferanten TOX mit 4,9kN. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass hier das Hilfsfügeteil das Oberblech nicht durchschneidet und das Material nicht geschwächt wird.
Das Nietclinch-Verfahren des Fraunhofer-Institutes liegt rund 100 N niedriger als Clinchnieten. Im Vergleich der k-Faktoren bleibt das Nietclinchen ebenfalls unter dem Wert des Clinchnietens zurück.
Das Clinchen weist ein ebenso hohes Niveau der Zeitfestigkeitsgerade auf, wie das Stanznieten. Bedingt durch den niedrigeren k-Faktor ist es gegenüber dem Stanznieten allerdings als schlechter zu bewerten.
Die Verschraubungstechniken der Fa. EJOT und Fa. Betzer liegen annähernd auf gleichem Niveau. Ein wenig darunter liegt das Blindnietverfahren der Fa. TUCKER, welches mit 4,0 kN rund 400 N weniger Oberlast bei 10^5 Lastwechseln aufzeigt. Der hohe k-Faktor der PentaFlow-Verschraubung mit Gleitmo-Beschichtung stellt sich als entscheidender Vorteil heraus, da durch den

geringeren Abfall der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich ein größerer Dauerfestigkeitswert abgebildet wird.

Der Unterschied zwischen der warmen Fügetechnik und dem Halbhohlniet ist Faktor 2 bezüglich der Festigkeit . Dabei liegen alle drei untersuchten Ver-fahren etwa auf dem gleichen Niveau.

Einen Überblick über die ermittelten Oberlasten inklusive der zugehörigen Streubreiten gibt die Abbildung 6-2 wieder.

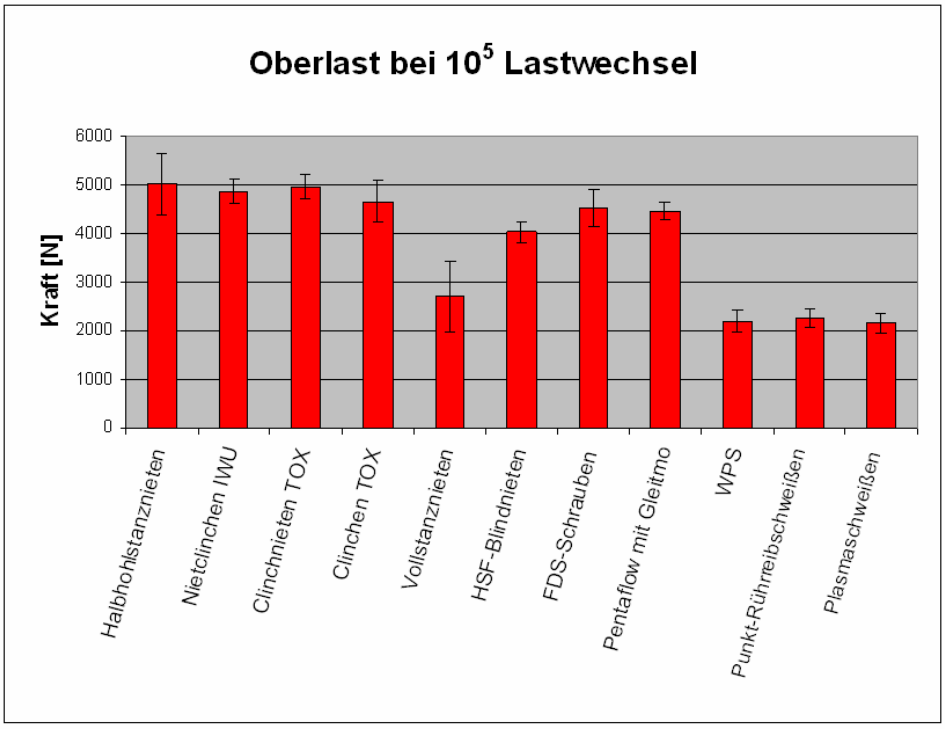


Abbildung 6-2: Versuchsdiagramm aller Fügeverfahren im Vergleich der Scherzugfestigkeit

Die Auswertung im Bezug auf den k-Faktor zeigt, dass die Schraubver-bindungen mit 7,6 (FDS) bzw. 6,7 (PentaFlow) deutlich über den anderen Verfahren liegen. Für das Halbhohlstanznieten als Referenzverfahren wurde ein k-Faktor von 5,9 ermittelt. Alle anderen kalten Fügeprozesse liegen darunter, mit Werten zwischen 5,0 bis 5,7. Die Schweißverfahren besitzen Werte von 4,7 bis 5,6 und stellen damit die niedrigsten Werte im Vergleich dar.

Bei der Betrachtung der Bruchbilder der einzelnen Verfahren bilden sich zwei Gruppen ab. Die erste zeigt eine Zerstörung des Grundmateriales beim Bruch. Es reißt ein Blech oder beide Bleche in der Nähe der Fügepunkte, wobei die Fügestelle nicht durchtrennt wird. Zu dieser Klasse lassen sich die Verschraubung, das Stanznieten und die Schweißverfahren zählen. Beim

Clinchen, Nietclinchen, Vollstanznieten und Clinchnieten hingegen knöpfen die Proben im Fügepunkt aus. Das Grundmaterial ist nur in Einzelfällen beschädigt.

6.1.3 Crash – Tests

Während das Stanznieten erneut das Beste aller elf untersuchten Verfahren darstellt, kristallisiert sich die FDS- und PentaFlow-Verschraubung als eine Fügetechnik mit großem Optimierungspotential heraus. Das Blindnieten weist, verglichen mit der FDS-Verschraubung, Ähnlichkeiten in nahezu allen Kriterien auf, was aus Gemeinsamkeiten in der Charakteristik des Fügeteils resultiert. Das Widerstandspunktschweißen stellt ebenso ein gutes Ergebnis dar, was primär aus der Tatsache folgt, dass sich hier nur relativ wenige Fügepunkte öffnen. Die beiden TOX-Verfahren Clinchen und Clinchnieten liegen nahezu gleichauf, wobei das Clinchnieten, bedingt durch den zusätzlichen Niet, bessere Werte aufweist. Wie bereits dargestellt, bedarf das Nietclinchen noch der Optimierung (s. Abschn. Amboss mit Außenring).

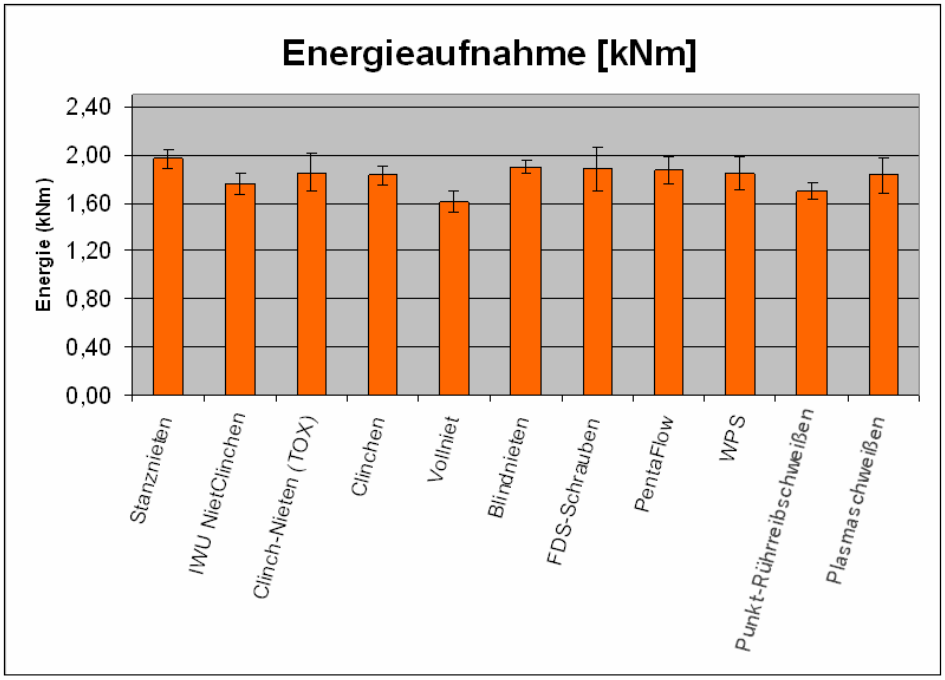


Abbildung 6-3: Versuchsdiagramm aller Verfahren im Vergleich

Bei den untersuchten warmen Fügetechniken war das Punkt-Rührreib-schweißen kritisch. Das WPS nimmt soviel Energie wie das Blindnieten auf, jedoch versagen mehr Fügepunkte.

Durch eine Analyse des Kraft-Weg-Diagrammes kann eine Aussage über das Energieaufnahmevermögen gemacht werden.

6.2 Versuchsauswertung mit Klebstoff

6.2.1 Quasistatische Verbindungsfestigkeit

Zur besseren Übersicht sind in Abbildung 6-4 die quasistatischen Festigkeiten dargestellt.

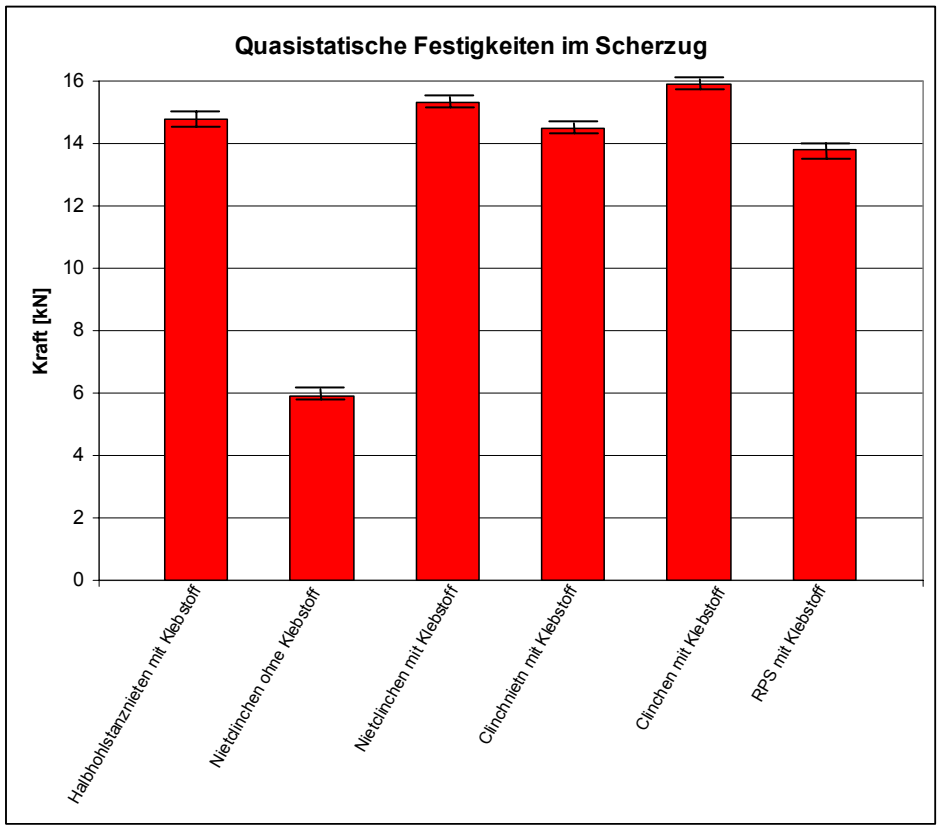


Abbildung 6-4: Versuchsdiagramm aller Verfahren (mit Klebstoff) im Vergleich

Die geklebten Proben weisen eine wesentlich höhere Scherzugfestigkeit auf. Zum Beispiel erreicht das Nietclinchen mit Klebstoff eine Festigkeit von 15,3 kN und ohne Klebstoff eine Festigkeit von 5,9 kN.

Beim Nietclinchen und Clinchen mit Klebstoff wurde eine etwas höhere Festigkeit als beim Halbhohlstanznieten erreicht. Die Erklärung dafür könnten die beim Halbhohlstanznieten entstehenden Luftkanäle sein.

Das Widerstandspunktschweißen erreicht eine geringere Festigkeit als das Referenzverfahren Halbhohlstanznieten. Der Grund dafür könnte sein, dass beim

Widerstandspunktschweißen der Klebstoff in der Fügezone verbrennt. Auf den Proben beim WPS konnte man beobachten, dass der Adhäsivbruch größer war als bei den anderen geprüften Proben.

6.2.2 Zyklische Verbindungsfestigkeit

In der Tabelle (Abbildung 6-5) sind alle Ergebnisse der Oberlast bei 10^5 und 10^6 Lastwechseln, das Streumaß und der k-Faktor der fünf Fügeverfahren dargestellt. Im Diagramm (Abbildung 6-6) werden alle geprüften Verfahren in Hinsicht ihrer erreichten Oberlast nach 10^5 Lastwechseln verglichen.
Neben der Oberlast ist auch das Streumaß (Bereichbreite zwischen 10%- und 90%-Wöhlerlinie) der Proben ablesbar. $\text{Delta} = \frac{S_{90} - S_{10}}{2}$

Fügeverfahren	10^5	10^6	k-Faktor	S_{90}	S_{10}	Ts	Delta-S / 2
HHSN mit Klebstoff	5840	4170	7,60	6140	5020	1,223	560
Nietclinchen	5220	3260	5,17	5890	5010	1,176	440
NCI mit Klebstoff	7510	5020	5,37	9220	6190	1,489	1515
CI mit Klebstoff	9000	6180	6,79	10030	8000	1,254	1015
CIN mit Klebstoff	6430	4330	6,07	7090	6050	1,172	520
WPS mit Klebstoff	6530	3850	4,15	8830	5040	1,752	1895

Abbildung 6-5: Ergebnisse aus den zyklischen Festigkeitsuntersuchungen

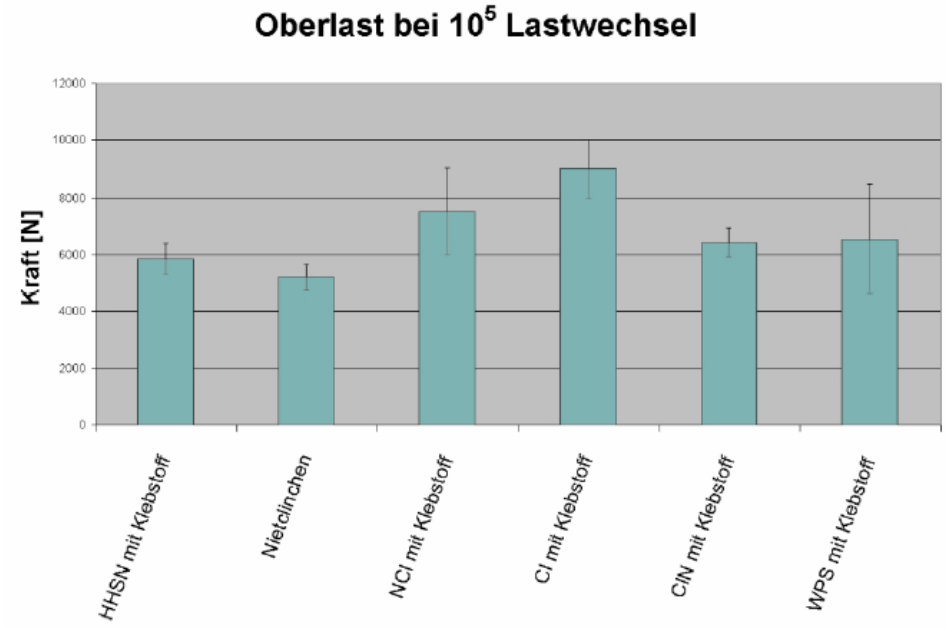


Abbildung 6-6: Oberlast der Fügeverfahren bei 10^5 Lastwechseln

Die größte Streuung der Werte im Kraft-Schwingspiel-Diagramm weist das Widerstandspunktschweißen mit 1,9 kN auf.

Mit 1,5 und 1,0 kN haben Nietclinchen und Clinchen auch ein relativ hohes Streumaß.

Der grafische Vergleich der k-Faktoren in Abbildung 6-7 zeigt, dass das Halbhohlstanznieten und Clinchen die beiden Verfahren mit dem höchsten k-Faktor sind. Deshalb haben diese Fügeverfahren eine flach ansteigende Wöhlerlinie und besitzen somit eine hohe Dauerfestigkeit.

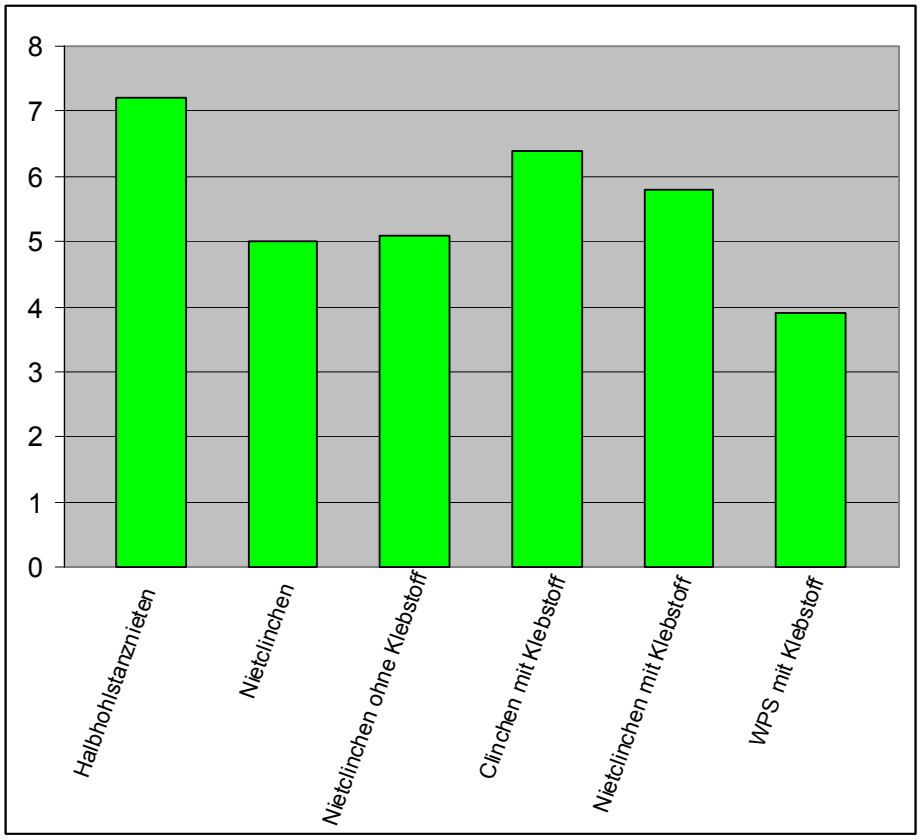


Abbildung 6-7: k-Faktoren der fünf geprüften Fügeverfahren

Da das Clinchen einen höheren Wert bei 10^5 Lastwechseln besitzt, ist somit auch die ertragbare Kraft im Dauerfestigkeitsbereich höher. Ablesbar ist das am Wert der Verfahren bei 10^6 Lastwechseln, welcher die Grenze zur Dauerfestigkeit ist.

6.2.3 Crash – Tests

Zur Übersicht der Ergebnisse sind im Diagramm (Abbildung 6-8) die aufgenommenen Energien der Fügeverfahren dargestellt.

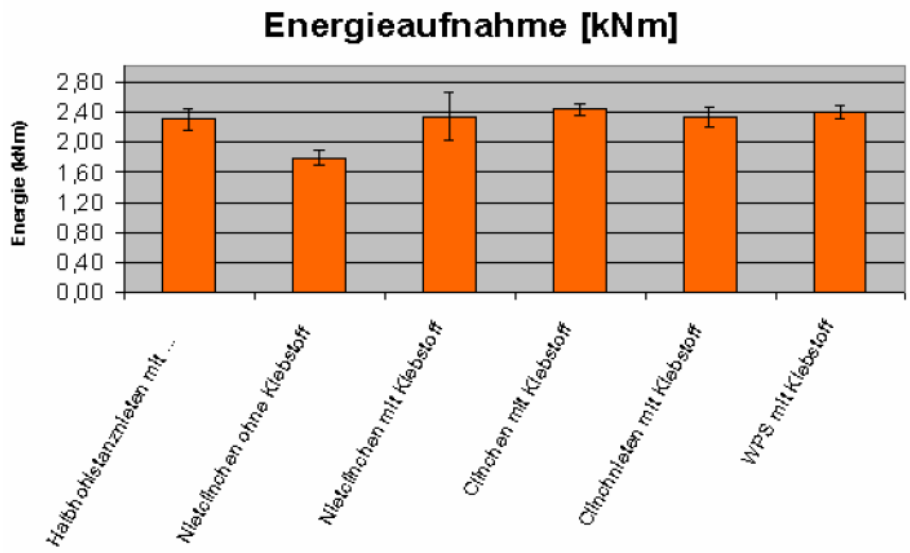


Abbildung 6-8: Versuchsdiagramm aller Fügeverfahren im Vergleich

Durch die Verwendung von Klebstoff wurde eine höhere Energieaufnahme erreicht. Alle untersuchten Fügetechniken mit Klebstoff weisen eine vergleichbare Energieaufnahme auf. Dieser positive Einfluss ist aus den Kraft-Weg-Diagrammen ersichtlich (zum Beispiel die maximal aufgenommene Kraft).

Durch die Klebstoffverbindung versagen weniger Fügepunkte und es bilden sich größere Falten als bei einer Verbindung ohne Klebstoff aus.

Bei den verwendeten Crash-Proben ist eine Überprüfung der Klebnaht nicht mehr möglich. Somit kann keine Aussage über die Versagensart des Klebstoffes getroffen werden.

6.3 Zusammenfassung Versuchsauswertung

Zusammenfassung Festigkeiten

Anbei eine Tabelle um einen einfachen Vergleich zu realisieren.

Prüf-methode	Ohne Klebstoff				Mit Klebstoff		
	Quasistatisch		Zyklisch	Crash Test	Quasistisch	Zyklisch	Crash Test
Füge-verfahren	Kopfzug [kN]	Scherzug [kn]	Kraft bei 10^5 Last-wechsel [kN]	Energieaufn. [kNm]	Scherzug [kn]	Kraft bei 10^5 Last-wechsel	Energieaufn. [kNm]
HHSN	2,20	6,80	5,00	1,98	14,80	5,80	2,30
NC IWU	1,10	6,00	4,80	1,75	15,40	7,50	2,32
CN TOX	1,70	5,90	4,90	1,85	14,30	6,40	2,32
CI	2,00	4,80	4,60	1,85	15,90	9,00	2,45
VSN	0,80	4,00	2,70	1,65	nicht Geprüft		
HSF-BN	3,90	6,30	4,10	1,90			
FDS-SCH	3,00	8,00	4,50	1,88			
Pentaflow	2,80	7,70	4,40	1,87			
WPS	2,60	8,30	2,20	1,85	13,80	6,50	2,40
PRRS	1,80	6,40	2,30	1,70	nicht Gepüft		
PS	1,70	7,20	2,10	1,80			

Abbildung 6-9: Vergleich Festigkeitsuntersuchung

Es gibt keinerlei Abhängigkeit zwischen den quasistatischen-, zyklischen- und Crasheigenschaften. Als bestes Beispiel dient das WPS. Es liefert sehr gute quasistatische Werte diese sind aber deutlich schlechter positioniert.

In den Kategorien Steifigkeit, Torsion und Crash werden nur Realteile geprüft (Karroserie komplett, keine einzelnen Teile). Nach diesen Gesichtspunkten ist jeweils das optimale Fügeverfahren anzupassen. Z.B. wird man verlangen, dass ein Motorträger crashrelevant ist, während man bei einer Tür Steifigkeit verlangt.

Was die Bewertung der Korrosion anbelangt, wird man im Mischbau versuchen, Luftkanäle im Klebstoff zu vermeiden. Hier zeigt das Nietclinchen sehr gute Ergebnisse.

Kostenvergleich

Die Wahl eines Fügeverfahrens wird neben seiner technischen Einsatzfähigkeit in Form von quasistatischer und zyklischer Festigkeit sowie Crashstabilität auch von seiner wirtschaftlichen Eignung bestimmt. Im ersten Teil der Arbeit wurde auf diese technischen Eigenschaften eingegangen. In diesem Kapitel soll ein Kostenvergleich durchgeführt werden. Im ganzen Vergleich ist zu berücksichtigen das wie in der Arbeit gezeigt, für eine gewünschte zu übertragene Kraft unterschiedliche Anzahl von Fügepunkten gebraucht werden. Der Wunsch der Planer ist es, die genauen Kosten für eine Punktverbindung zu kennen. Um eine Aussage bezüglich der anfallenden Kosten pro Fügepunkt treffen zu können, ist es notwendig ,die kostenbeeinflussenden Parameter, welche sich für jede Anwendung ändern, zu kennen. Im nachfolgenden wird auf diese Parameter eingegangen. Als Vergleich wurde eine Aluminium – Aluminium Verbindung aus AlMg 3,5 Mn verwendet.

Die **Investkosten** für die Anlagen sind der erste wesentliche kostenbeeinflussende Parameter. Die günstigsten Anschaffungskosten hat eine Clinch-zange mit ca. 20.000 Euro. Die teuersten Investkosten fallen für eine selbstschneidende Blindnietanlage an. Sie betragen etwa 70.000 Euro. Die Kosten für eine Nietclinchanlage sind mit 50.000 Euro etwa die gleichen wie die für das Stanznieten.

Der zweite Parameter ist die **Laufzeit** der Anlagen. Diese Zeit kann zwischen sechs und acht Jahren variieren. Die Laufzeit der Anlagen kann länger werden, wenn die Zangen durch Retooling wieder verwendet werden.

Der nächste kostenbeeinflussende Faktor ist das **Fügeelement**. Das Clinchen sowie das Widerstandspunktschweißen benötigen kein Fügeteil. Somit entfallen für diese Fügeverfahren die Kosten des Fügeteiles. Die teuersten Elemente im Vergleich bilden Schrauben und Blindnieten mit vier Cent pro Stück. Beim Nietclinchen und beim Halbhohlstanznieten fallen dieselben Kosten von 1,7 Cent pro Fügeteil an.

Um die Kosten bestimmen zu können, ist auch notwendig, die entsprechenden **Anwendungen** für die Fügeverfahren zu kennen. Wenn zum Beispiel die Aufgabe einer Clinchzange das Anfertigen von zwei Heftpunkten, oder aber das Setzen von 15 Fügepunkten (gleiche Taktzeit) an einem Frontklappen-

Innenblech ist, so werden die zwei Heftpunkte immer teurer sein, da die Investkosten mit jedem weiteren Fügepunkt verringert werden.

Ein weiterer Kostenfaktor sind die **Instandhaltungs- und Wartungskosten** der Anlagen. Die Lebensdauer der Verschleißteile ist abhängig von den gefügten Paarungen. So wird bei einer Mischbauverbindung aus hochfestem Stahl und Aluminiumguss die Spindel einer Stanznietzange mehr belastet, als bei einer Aluminium-Aluminium-Verbindung. Ein anderes Beispiel für die Abhängigkeit von der gefügten Paarung ist das Fügen mit Hotmelt. Der Stempel einer Clinchzange verschleißt hierbei weniger, da die Reibung durch das Hotmelt reduziert wird. Eine Schädigung der Zange (z.B. Stanznietzange) durch eine Kollision ist schwierig zu planen und hat hohe Reparaturkosten (elektrische Spindel bis zu 25.000 EUR) zur Folge.

Ein weiterer wesentlicher und nicht zu unterschätzender Kostenfaktor ist der **Energie- und Fluidbedarf**. Die nachfolgende Tabelle (Abbildung 6-10) zeigt einen Kostenvergleich von Stanznieten mit Halbhohlniet, Clinchen und Widerstandspunktschweißen. Die Werte für den Energiebedarf wurden den Herstellerangaben entnommen. Die Werte für die Kosten pro Kilowattstunde (kWh) wurden von Abteilung TM-7 bereitgestellt (Stand Januar 2006).

Kostenvergleich Punktschweißen - Clinchen – Stanznieten

	Punktschweißen	**Clinchen**	**Stanznieten**
Elektr. Energie pro Pkt	0,010 kWh	0,000014 kWh	0,0032 kWh
Kosten elektr. Energie pro Pkt.	0,000472 €	0,000001 €	0,000151 €
Druckluft pro Pkt	1,35l	5l	2l
Kosten Druckluft pro Pkt	0,000069 €	0,000255 €	0,000102 €
Gesamtkosten Strom + Luft	**0,000541 €**	**0,000256 €**	**0,000253 €**

Abbildung 6-10: Kostenvergleich WPS, Clinchen, Stanznieten

Der Wasserverbrauch der Punktschweißzange ist im Vergleich nicht enthalten. Es sind vier Liter Wasser pro Minute notwendig und die Kosten dafür entsprechen etwa denen der Luft.

Einen Überblick über die kostenbeeinflussenden Faktoren zeigt die nachfolgende Abbildung 6-11.

Fügeverfahren	Investkosten Anlage / €	Fügeelementkosten / Cent	Taktzeit / s
Halbhohlstanznieten	50.000	1,7	3,5
Vollstanznieten	50.000	3	3,5
Clinchen	20.000	-	3,0
Clinchnieten	45.000	1,5	3,5
Nietclinchen	50.000	1,7	3,5
Selfpiercing Blindnieten	70.000	4	4,5
FDS-Verschraubung	45.000	4	6
PentaFlow-Verschraubung	45.000	4	6
Punkt-Rührreibschweißen	55.000	-	4,5
Plasmapunktschweißen	40.000	-	6
WPS mit Poliereinheit	43.000	-	2,5

Abbildung 6-11: Kostenübersicht der Fügeverfahren

Um diesen Kostenvergleich anschaulich darzustellen, wurde ein Modell aufgebaut. Der Vergleich wurde zwischen drei Fügetechniken durchgeführt (Stanznieten mit Halbhohlniet, Clinchen und Widerstandspunktschweißen).
Jede Zange wird an einem Roboter (40.000 Euro) angebracht. In diesem Modell wurden sämtliche Kosten für Wartung, Vorrichtungen und Raumkosten außer Acht gelassen. Es wird in zwei Schichten, zu jeweils acht Stunden, gearbeitet. Am Tag werden 400 Fahrzeuge produziert und pro Fahrzeug zehn Fügepunkte gesetzt. Die Laufzeit der Produktionslinie beträgt sieben Jahre. In diesen sieben Jahren werden 7,56 Millionen Fügepunkte gesetzt.

Fügeverfahren / Kostenart	Clinchen	WPS	Stanznieten
Invest (Roboter+Zange)	60 000 €	76 000€	90 000€
Invest pro Punkt	0,00793651 €	0,01005291 €	0,01190476 €
Fügeelementkosten	0 €	0 €	0,017 €
H_2O-Kosten pro Punkt	0 €	0,0000491 €	0 €
Energie- und Luftbedarf pro Punkt	0,000256 €	0,000441 €	0,000253 €
Kosten pro Punkt	**0,0082 €**	**0,011 €**	**0,029 €**

Abbildung 6-12: Kostenmodell

Das Ergebnis des Modells zeigt, dass das Clinchen 20 Prozent günstiger als das Widerstandspunktschweißen (WPS) ist. Aus dem Modell geht auch hervor, dass das Stanznieten knapp dreimal teurer ist als das WPS. Der Hauptgrund dafür liegt in den Kosten des Fügelementes.

Bei der Auswahl verschiedener Fügeverfahren ist immer auf die Festigkeit zu achten. Deswegen ist der erste Schritt die Anzahl der Fügepunkte für die einzelnen Verfahren auszurechnen, um ein Vergleichbares Ergebnis zu erhalten. Danach Vergleichen wir die Festigkeit von den Fügeverfahren mit den entstehenden Kosten.
Hierzu nehmen wir das erste Beispiel von einer Tür (Fensterbrüstung) Aluminium 1,5 mm/ Aluminium 1,5 mm. Als Basis nehmen wir das Verfahren Stanzniet mit

10 Verbindungen. Diese Fügepunkte an der Tür werden nur auf statischen Scherzug beansprucht (Steifigkeit). Die Preise für Stanznieten und Nietclinchen sind Vergleichbar, der höhere Preis des Vollnietes liegt an den etwa 0,02 € die das Hilfsfügeteil teurer ist. Wir zeigen auch für diese Verbindungen die Gesamt Taktzeit auf, da in der Produktion die Zeit sehr ausschlaggebend ist. (Abb. 6-13)

	Stanznieten (Basis)	Vollnieten	Nietclinchen	Clinchen	WPS
Festigkeit im Scherzug	3,4 kN	2 kN	2,95 kN	2,45 kN	4,15 kN
Anzahl der Punkte	10	17	12	14	8
Kosten pro Punkt	0,029 €	0,031 €	0,029 €	0,0082 €	0,011 €
Gesamt Kosten	0,29 €	0,527 €	0,348 €	0,115 €	0,088 €
Gesamt Taktzeit	35 s	59,5 s	42 s	42 s	20 s
Ranking	**3**	**5**	**4**	**2**	**1**

Abbildung 6-13: Gesamtranking der Verfahren über die Kosten

WPS ist in unserem Vergleich das beste Verfahren da es eine hohe Festigkeit aufweist und dadurch wenig Fügepunkte braucht. Weiter ist es das günstigste wegen dem Fehlen des Hilfsfügeteils, und das schnellste durch die geringe Anzahl der Punkte sowie Taktzeit pro Punkt. Das Clinchen liegt auf Platzt 2 vor allem wegen des günstigeren Preises obwohl es mehr Fügepunkte und eine höhere Taktzeit aufweist als unser Referenzverfahren des Stanznietens. Das in diesem vergleich den dritten Rang belegt, was durch den Mehrpreis des Hilfsfügeteil resultiert. Obwohl Nietclinchen einen vergleichbaren Preis hat wie das Stanznieten, ist es nur auf Platzt vier gekommen durch die geringere Festigkeit und die dadurch höhere Taktzeit. Das Vollnieten belegt den letzten Rang durch den Mehrpreis des Vollnietes und der geringen Festigkeit was in mehr Fügepunkten und höherer Taktzeit sich zeigt.

Als zweites nehmen wir ein Beispiel für eine Stahl/ Aluminium Verbindung mit Festigkeitsklebstoff Betamat 1460. Errechnet werden die Verbindungen für eine 70 cm Klebenaht. Dadurch das dass Stanznieten mit Klebstoff Luftkanäle bildet muss aus Schutz vor Korrosion eine nachträgliche Versiegelung geschehen.

Durch diese Versiegelung ergibt sich ein Mehrpreis bei dem Stanznieten.(Abb. 6-14)

	Stanznieten	Vollnieten	Nietclinchen	Clinchen
Anzahl der Punkte	10	17	12	14
Kosten pro Punkt	0,029 €	0,031 €	0,029 €	0,0082 €
Kosten Kleber	0,30 €	0,30 €	0,30 €	0,30 €
Kosten Versiegelung	0,062 €	0 €	0 €	0 €
Gesamt Kosten	0,652 €	0,827 €	0,648 €	0,415 €
Ranking	**3**	**4**	**2**	**1**

Abbildung 6-14: Verfahrensvergleich mit Kleber

Das Clinchen belegt den ersten Rang durch den geringen Preis wegen des Fehlens des Hilfsfügeteils. Nietclinchen ist dahinter, obwohl es weniger Fügepunkte braucht ist der Mehrpreis pro Fügepunkt hier ausschlaggebender. Platz 3 belegt das Stanznieten, weil wegen der Bildung der Luftkanäle hier als einziges noch Versiegelt werden muss. Vollnieten bildet den letzten Platzt wegen der geringeren Festigkeit und den dadurch resultierenden vielen Fügepunkten die auch noch die teuersten darstellen.

7 Weiterentwicklung beim Niet-Clinchen

In Rahmen der Entwicklung neuer mechanischer Fügeverfahren arbeitet die BMW Group eng mit externen Partnern zusammen. Das bestehende Patent für das Nietclinchverfahren wurde am Dresdener Fraunhofer Institutteil IWU entwickelt.

Bis Ende 2004 wurden dort 3 Nietgeometrien mit einem Schaftdurchmesser von 5,3 mm entwickelt (Halbhohlniete der Länge 4,0 mm und 4,5 mm sowie Vollniete der Länge 4,0 mm). Alle drei Geometrien können durch BMW-interne Stanznietsysteme gefügt werden.

7.1 Entwicklungsschritte des Fraunhofer Institut

In ersten Versuchen mit den neuen Nietgeometrien (Anhang 11.1) wurden die Verbindungen mit einem flachen Amboss realisiert. Diese Versuche konnten tendenziell zuvor gemachte Simulationsergebnisse bestätigen. Jedoch zeigte sich, dass bereits geringe Härteschwankungen der Fügepartner erheblichen Einfluss auf den Prozess haben. So konnten mit der Werkstoffkombination von H340LAD (Anhang 6.2) in AlMg3,5Mn (Anhang 6.4) teils akzeptable, teils unakzeptable Verbindungen gefügt werden. Darüber hinaus waren zum Teil erhebliche Spalte unter dem Nietkopf sowie eine radiale Werkstoffverdrängung im ambossseitigen Blech zu beobachten (Risse im Unterblech)
(siehe Abb. 7-1).

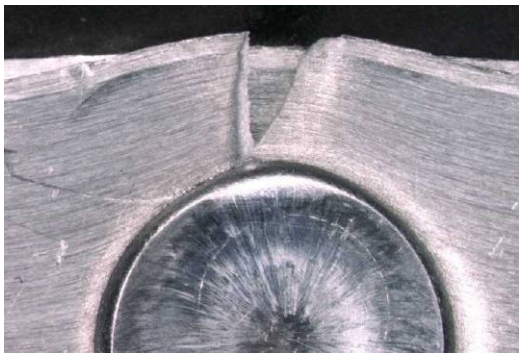


Abbildung 7-1: Risse im Unterblech bei einem Randabstand von weniger als 10mm

Durch den Übergang zu einem Amboss mit aufgesetztem Außenring (Matrize mit geringer Tiefe; 0,5mm / Ø 10mm) konnte die Rissbildung unterdrückt werden. Der Außenring übernimmt dabei nicht die Rolle, den Schließkopf zu formen, wie es bei einer Matrize üblich ist, sondern bewirkt ein Vorbiegen der Bleche bei Prozessbeginn. Dies führt dazu, dass bei der Einformung des Nietkopfes weniger Material verdrängt werden muss, und die rissauslösenden tangentialen Zugspannungen des Unterblechs verringert werden.

Allerdings verringerte sich mit dem Einsatz des Ambosses mit Außenring die Halsdicke der Verbindungen. Ursache hierfür ist das ungünstigere Verspreizen des Nietes. Insbesondere bei Verwendung der beiden Halbhohlgeometrien konnten dadurch keine akzeptablen Verbindungen erzielt werden. Die Vollnietgeometrie lieferte dagegen gute Ergebnisse. Die zum Setzen der Niete notwendigen Fügekräfte blieben auch bei Verwendung des Amboss mit Außenring sehr hoch (80kN).

7.2 Variantenentwicklung des Zielverfahrens Nietclinchen

Um weitere Erkenntnisse zu sammeln und Möglichkeiten zu suchen, die Fügekraft zu senken, starteten Untersuchungen auf Niet-Systemen, die bereits in der Produktion eingesetzt werden. Neben dem Sammeln allgemeiner Prozesskenntnisse stand dabei auch das Finden einer Grundeinstellung im Vordergrund. Als Standard-Verbindung wurde die Werkstoffpaarung aus mikrolegiertem Stahl H340LAD 1,4 mm (GS-93005-9) und AlMg3,5Mn 1,5 mm realisiert.

Um die Versuche für die Optimierung der FE-Simulation (Fraunhofer Institut) nutzen zu können und den Versuchsaufwand zu begrenzen, wurden die meisten Versuchsreihen ohne Strukturklebstoff gefügt. (Hierbei sei angemerkt, dass es derzeit nicht möglich ist, den Klebstoff in FE-Simulationen zu integrieren).

7.2.1 Versuche mit Amboss und Amboss mit Außenring

Die Untersuchungen aller drei Nietvarianten, die mittels eines Ambosses mit Außenring auf den Serien-Stanzniet-Systemen gefügt wurden (max. bereitgestellte Fügekraft 50kN), konnten wenig überzeugen. Auch modifizierte Varianten mit einer Ambosstiefe von 0,3 mm und 0,7 mm brachten keine deutliche Verbesserung (Anhang 11.2). Sowohl Hinterschnitt als auch Restbodenstärke wichen deutlich von den gestellten Anforderungen von etwa 0,2 mm bzw. 0,15 mm ab. Einzig die geforderte Mindesthalsdicke von 0,25 mm konnte realisiert werden.

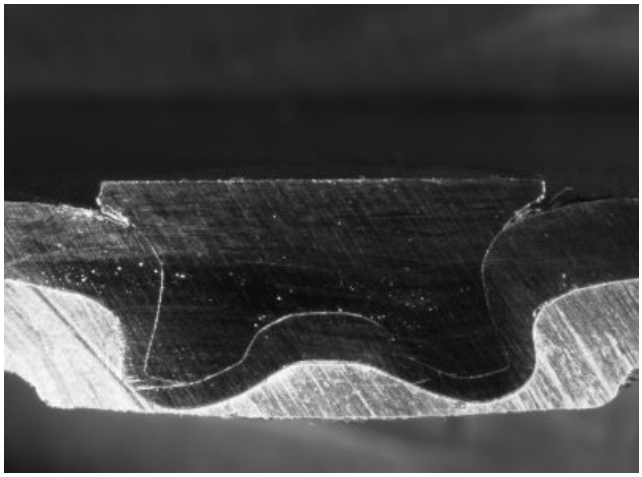


Abbildung 7-2: Verbindung mit Amboss und Außenring (Tiefe 0,5mm, Durchmesser 10mm)

Des Weiteren wurde deutlich, dass durch die geringe Höhe des Außenrings weiterhin eine sehr hohe Fügekraft für das Einebnen des Nietkopfes notwendig ist. (Die Verbindungen des Fraunhofer Institutes wurden mit einer Fügekraft von 80kN gefügt.) Diese kann von den verwendeten Tucker-Systemen nicht aufgebracht werden.
Um die notwendige Fügekraft zu senken und bessere Werte für den Hinterschnitt und den Restboden zu bekommen, wurden Folgeuntersuchungen mit diversen Matrizengeometrien gestartet.

7.2.2 Untersuchungen mit Matrizen aus dem Stanznieten

Beim Clinchen wird die Halsdicke stark durch das Verhältnis vom Stempeldurchmesser zum Matrizendurchmesser und durch die Matrizentiefe beeinflusst (Anhang 11.2). Gleiches trifft beim Nietclinchen zu. Je geringer der Unterschied zwischen dem Nietdurchmesser und dem Matrizendurchmesser wird, desto mehr Scheranteile sind im Fügeprozess vorhanden, was zu einer Verringerung der Halsdicke führt. Auch eine zunehmende Matrizentiefe hat eine Abnahme der Halsdicke zur Folge, da bei gleichem umgeformten Volumen die Hälse länger gestreckt werden. Unter Einhaltung dieser Grundsätze ist es möglich, den Umfang der zu untersuchenden Matrizen deutlich zu reduzieren.

Neben wenigen speziell angefertigten Matrizen wurden hauptsächlich Matrizen aus dem Stanznieten für die Untersuchungen verwendet. Schnell zeigte sich, dass Matrizen generelle Vorteile bei der Ausformung des Schließkopfes bieten. Akzeptable Verbindungen konnten mit verschiedenen Matrizengeometrien realisiert werden. Bestwerte wurden mit der Kombination von Matrizen mit dem Innendurchmesser 10 mm und den 5,3 x 4,0 Nietclinchnieten erzielt. Für die untersuchte Werkstoffpaarung zeigte sich zudem eine Tiefe von 1,6 mm als die geeignete. Sowohl Hinterschnitt und Restboden als auch Halsdicke übertrafen dabei die gestellten Forderungen.

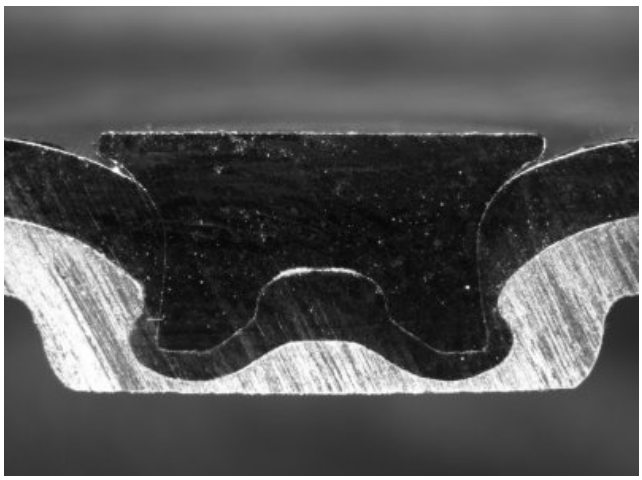


Abbildung 7-3: Mit Matrize (Tiefe 1,6mm, Durchmesser 10mm) gefügte Verbindung

Im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen wird deutlich, dass beim Fügen mit den oben genannten Matrizen der Niet während des Fügevorgangs wesentlich weniger plastisch verformt wird. Mit der geringeren plastischen Verformung des Nietes geht eine größere Umformung der beiden Fügepartner einher. Durch das geringere Aufspreizen des Nietes wird ein größeres Volumen des härteren, stempelseitigen Werkstoffes in den weicheren, matrizenseitigen Werkstoff gedrückt. Dies beeinflusst vor allem den Hinterschnitt und die Halsdicke der Verbindung positiv. Der Prozess ähnelt somit mehr dem Durchsetzfügen als dies in den bisherigen Versuchensreihen der Fall war.
Zurückzuführen ist dies vor allem auf die größere Tiefe der Matrize im Vergleich zum Amboss mit Außenring.
Als weiterer Vorteil, der sich durch den Einsatz von Matrizen ergibt, ist die Reduzierung der benötigten Fügekraft zu nennen. Je nach Tiefe und Innendurchmesser kann die benötigte Fügekraft auf bis zu 40 kN gesenkt werden. Dies ermöglicht es, den Nietkopf besser im Oberblech einzuformen und eine Nietkopfüberhöhung auszuschließen.

7.2.3 Untersuchungen mit dem Strukturklebstoff Betamate 1480

Die späteren Hauptuntersuchungen zur Erfassung und Quantifizierung einzelner Prozessparameter sollen möglichst unter Realbedingungen durchgeführt werden. Dazu muss auch der Faktor Klebstoff mit einbezogen werden. In den Vorversuchen ist es daher notwendig, bereits erste Erfahrungen diesbezüglich zu sammeln.

Es zeigte sich hierbei, dass der Klebstoff einen erheblichen Einfluss auf die Verbindung ausübt. Die Verwendung von Klebstoff führte zum Durchstanzen der Oberbleche und Klebstoffansammlungen im Halsbereich. Auch wurde eine ungünstigere Fließbewegung des matrizenseitigen Werkstoffs deutlich.

Ursachen hierfür sind zum einen die geänderten Reibbedingungen, zum anderen die unzureichende Verdrängung des Klebstoffs. Die vom Stanznieten übernommene Haltezeit (Zeitraum der Fixierung der Bauteile durch den Niederhalter) von 0,5 Sekunden (Abbildung 7-4) erwies sich als zu kurz. Um den Klebstoff besser verdrängen zu können, wurde die Haltezeit schrittweise auf bis zu 3,0 Sekunden erhöht (Anhang 11.3).

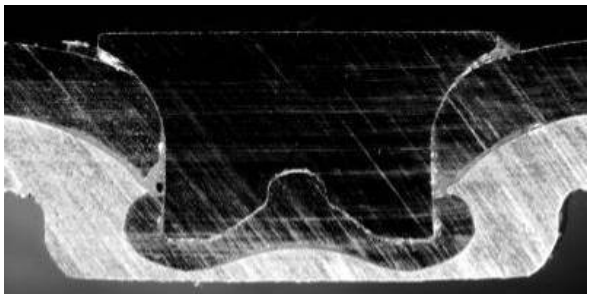


Abbildung 7-4: Verbindung mit Betamate 1480 (Haltezeit 0,5s)

Bereits bei einer Erhöhung auf 1,0 Sekunden wurde das Oberblech nicht mehr durchschnitten. Halsdicke und Restboden entsprachen den geforderten Mindestwerten. Ab einer Haltezeit von 2,0 Sekunden konnte auch der geforderte Hinterschnitt erzielt werden. Die lokalen Klebstoffanhäufungen im Halsbereich konnten durch höhere Haltezeiten verringert, jedoch nicht vollständig beseitigt werden. Aufgrund ihrer Position können sich diese negativ auf den Hinterschnitt auswirken. Ferner führten sie zu asymmetrischen Hinterschnitten. Eine solche Verbindung erreicht niedrigere Festigkeiten, da die Niete in der

Festigkeitsuntersuchung durch ihren asymmetrischen Hinterschnitt leichter ausknüpfen.

7.2.4 Untersuchungen verschiedener Werkstoffpaarungen

Neben der Materialpaarung H340LAD/AlMg3,5Mn ist auch die Fügbarkeit weiterer Werkstoffkombinationen von Interesse. In entsprechenden Untersuchungen wurden ausschließlich Mischbauverbindungen realisiert. Dabei wurde immer der festere Werkstoff (Stahl) in dem weicheren (Aluminium) gefügt. Externe Untersuchungen im Dresdner Fraunhofer Institut zeigten jedoch, dass auch Aluminium-Aluminium-Verbindungen möglich sind.

Die Ergebnisse (Anhang 11.4) der untersuchten Mischbauverbindungen verdeutlichen, dass die Streckgrenze (Verfestigungsneigung) des stempelseitigen Werkstoffs keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ausbildung der Verbindung hat. Oberwerkstoffe mit Mindeststreckgrenzen von 220N/mm^2 bis 420N/mm^2 konnten erfolgreich gefügt werden.

Im Gegensatz dazu ist die als Oberwerkstoff eingesetzte Stahlsorte für die Verbindung relevant, da die Keltverfestigung großen Einfluß bekommt. Im Unterschied zu mikrolegierten- und Bake-hardening-Stählen erwiesen sich TRIP-Stähle (H400TD) aufgrund der bisherigen Er-fahrungen als nicht fügbar. Dabei zeigte sich die Umwandlung des Rest-austenits in Martensit während des Fügevorgangs und die damit verbundene Verfestigung dieser Werkstoffe als problematisch.

Unterschiede zwischen den mikrolegierten und Bake-hardening-Stählen konnten nicht festgestellt werden.

Oberblech [mm]		Unterblech [mm] AlMg3,5Mn 1,5	AlMg3,5Mn 1,2	AlMg4,5Mn0,4 1,2	Aural2 2,5
H220 BD	1,4	5,3 x 4,0 - H4			
H260 BD	0,8				
	1,0		5,3 x 4,0 - H4	5,3 x 4,0 - H4	
	1,8	5,3 x 4,5 - H4			
H340LAD	1,2	5,3 x 4,0 - H4	5,3 x 4,0 - H4	5,3 x 4,0 - H4	
	1,4	5,3 x 4,0 - H4	5,3 x 4,0 - H4	5,3 x 4,0 - H4	
H420 LAD	1,4	5,3 x 4,0 - H4			
	1,6		5,3 x 4,0 - H4		
H400 TD	1,2				
	1,6				

Abbildung 7-5: Fügematrix (grün gekennzeichnete Verbindungen sind fügbar)

Aussagen über den Einfluss des matrizenseitigen Werkstoffs können bisher nur bedingt gemacht werden. Die getesteten Aluminiumlegierungen (AlMg3,5Mn und AlMg4,5Mn0,4) lassen keine Vor- oder Nachteile erkennen, nur bei der Materialdicke 0,8 mm des H260 BD ist eine Verbindung nicht möglich, da dieser zu dünn ist. Wie aus der Fügematrix zu entnehmen, sind die Verbindungen mit Aluminiumguss (Aural2) derzeit nicht mit dem Nietclinchen fügbar (Matrizen, Amboss), weil dieser zu spröde ist.

7.2.5 Festigkeitsvergleich Stanznieten/Nietclinchen (Anhang 12)

Um die Einsatzmöglichkeiten des Nietclinchens näher zu bestimmen, sind Untersuchungen bezüglich der Festigkeit notwendig. Im Rahmen der Untersuchungen wurden diesbezüglich Festigkeitsvergleiche verschiedener Fügeverfahren erstellt. Darin wurden die folgenden Verfahren gegenüber-gestellt:

- Nietclinchen (Niet 5,3 x 4,5 - H4)
- Stanznieten (Niet C 5,3 x 5,0 - H4)
- Stanznieten (Niet C 3,35 x 5,0 - H4)

Die verwendete Paarung - H260BD (1,8 mm) in AlMg3,5Mn (1,5 mm) - wird in zukünftigen Projekten zum Einsatz kommen. Als Fügeverfahren ist derzeit das Stanznieten (Niete 3,35 x 5,0 - H4) vorgesehen.

Die Untersuchungen wurden an gefügten Probeblechen der Abmessung 110 mm x 48 mm entsprechend Abbildung 4-2 durchgeführt. Neben quasi-quasistatischen Kopf- und Scherzugversuchen wurden zyklische Untersuchungen an Scherzugproben durchgeführt.

Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich, dass die höchste quasistatische Festigkeit mit dem Stanznieten (C 5,3 x 5,0 - H4) erzielt werden konnte. Im Kopfzugversuch verzeichnete das Nietclinchen mit einer durchschnittlichen Maximalkraft von 2,0 kN die geringste Festigkeit. Stanznietverbindungen erreichten hier bis zu 20 Prozent höhere Werte.

Im quasistatischen Scherversuch lag die Festigkeit der Nietclinchverbindungen zwischen beiden Stanznietverfahren. Mit durchschnittlich 8,1 kN wurde eine etwa 1 kN höhere Maximalkraft gegenüber den Stanznietverbindungen mit der Nietgeometrie C 3,35 x 5,0 erzielt. Stanznietverbindungen mit der größeren Nietgeometrie (C 5,3 x 5,0) erreichten im Mittel 9,4 kN.

Unabhängig vom Fügeverfahren zeigte sich in den quasistatischen Versuchen stets das Ausknüpfen der Verbindung als Versagensursache.

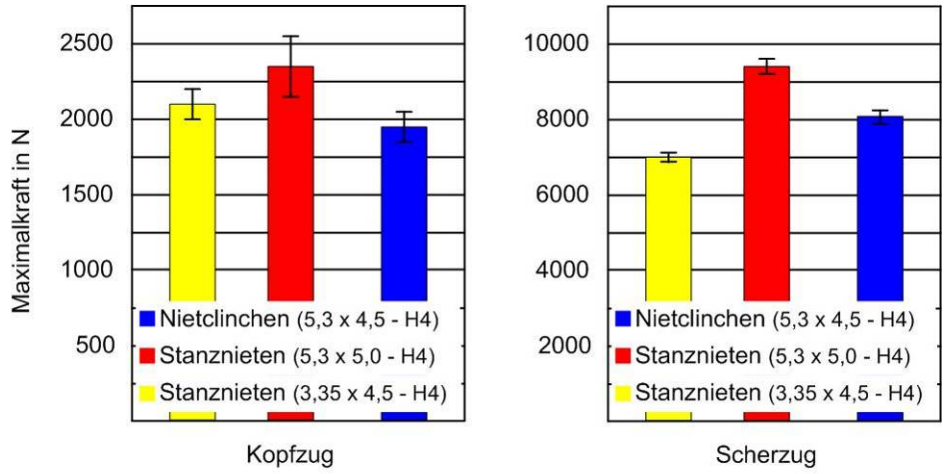


Abbildung 7-6: Ergebnisse aus den quasi -statischen Untersuchungen

Aufgabe der zyklischen Untersuchungen ist es, die Dauerfestigkeit der verschiedenen Verfahren zu ermitteln. Nach Abschluss der Untersuchungen wurden die Ergebnisse in Wöhlerkurven zusammengefasst. Für die

Untersuchungen wurde das schwellende Lastverhältnis ($_{min}$/ $_{max}$) von R = 0,1 vorgegeben.

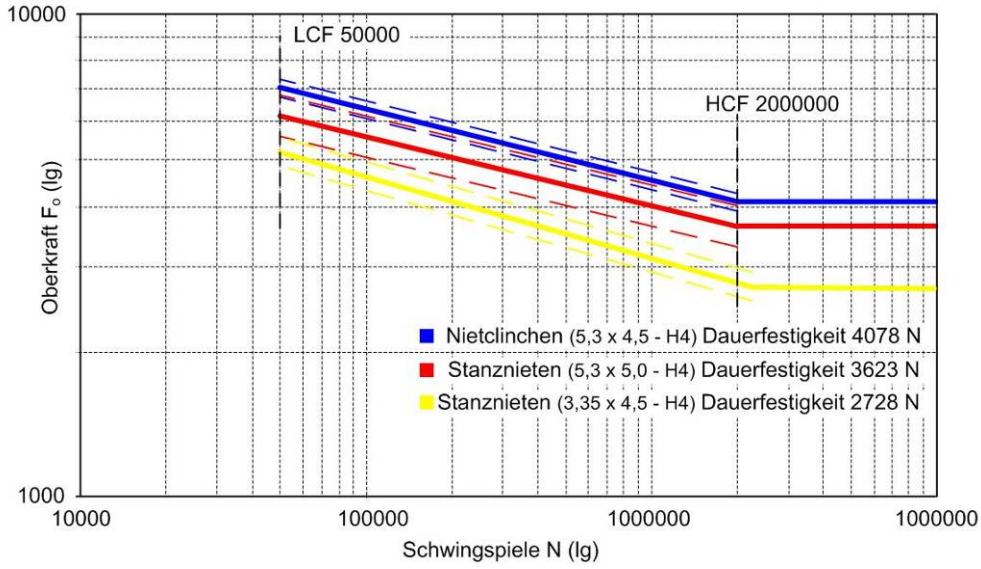


Abbildung 7-7: Wöhlerkurven mit zugehörigen Vertrauensbereichen

Abbildung 7-7 zeigt die Wöhlerlinien und zugehörige Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_Ü10/P_Ü90$, der untersuchten Verbindungen.
Ab einer Schwingspielzahl von $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen wird die Dauerhaltbarkeit erreicht. Wie die Versuche zeigten, ergab sich für die Nietclinchverbindungen mit 4 kN die höchste Dauerfestigkeit. Die Halbhohlstanznietverbindungen, die mit den 3,35er Nieten gefügt wurden, wiesen mit 2,7 kN die geringste Dauerfestigkeit auf.
Entgegen den quasistatischen Untersuchungen erfolgte das Versagen bei allen Proben unabhängig vom Lasthorizont durch Ausreißen des Aluminiumblechs.

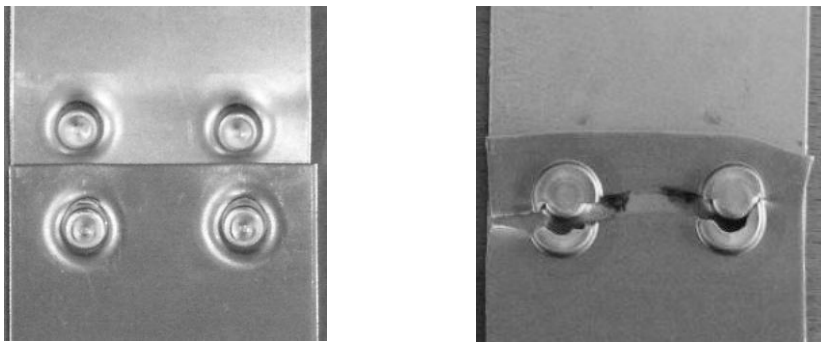


Abbildung 7-8: Bruchbilder Nietclinchen; rechts zyklisch, links quasistatisch)

Für diese geprüfte Paarung wurden im Scherzug höhere Festigkeiten mit den Stanznieten erreicht. Im Kopfzug positioniert sich das Nietclinchen zwischen einem „fünfer“ und einem „dreier“ Stanzniet. Bei den zyklischen Untersuchungen wurden die besten Ergebnisse mit dem Nietclinchen erreicht. Bei den geprüften Verbindungen, Stahl-Aluminium und Aluminium-Aluminium, erreichte das Stanznieten höhere Festigkeitswerte als das Nietclinchen in der quasistatischen Prüfung und genau umgekehrt in der zyklischen Prüfung.

8 Prozessschwankungen beim Nietclinchen

8.1 Methodik und statistische Grundlagen

Das Festlegen der Untersuchungs- und Auswertestrategie auf Basis mathematisch- statistischer Prinzipien wird als Versuchsplanung oder auch Design of Experiments (DoE) bezeichnet. Der Hintergrund dieser Überlegungen ist, Versuchs- und Auswertepläne zu erstellen, die optimal an die Anforderungen angepasst sind. Eine besondere Rolle kommt dabei dem Versuchumfang zu, der aus wirtschaftlichen Gründen möglichst klein gehalten werden soll. Um dies zu ermöglichen und gleichzeitig eine zuverlässige Aussage zu erzielen, kann man sich verschiedener Ansätze bedienen.

8.1.1 Zielgrößen und Faktoren

Die Zielgrößen oder Antwortgrößen beschreiben das Ergebnis eines Versuches und machen Aussagen über die Wirkung einzelner Einflussgrößen. Die Wertigkeit der Zielgröße wird dabei durch das Zusammenwirken der Einfluss-größen bzw. Faktoren erlangt.

Wird beispielsweise der Faktor x um den Betrag x variiert, so wird sich auch die Zielgröße y um den Betrag y ändern. Dieser vorzeichenbehaftete Betrag wird als Effekt bezeichnet und hat die gleiche Dimension wie die Zielgröße.

Entsprechend den Anforderungen können mehr als eine Zielgröße für die Versuchsauswertung herangezogen werden. Dabei ist bei deren Auswahl auf folgende Aspekte zu achten [2; S.17]:

- Vollständigkeit
  Alle essentiellen Prozessergebnisse/Eigenschaften müssen durch die Zielgrößen abgedeckt werden.

- Verschiedenheit
  Jede Zielgröße sollte einen anderen, grundlegenden Zusammenhang erfassen.
- Relevanz
  Zielgrößen müssen in Einklang mit den Untersuchungszielen stehen. Ihre Anzahl sollte möglichst klein gehalten werden.

- Linearität
  Stehen mehrere vergleichbare Zielgrößen zur Wahl, so ist diejenige auszuwählen die möglichst linear von den Einflussgrößen abhängt.

- Quantifizierung
  Die Zielgrößen sollten möglichst einfach zu erfassen und einzuordnen sein. Messwerte sind Gut/Schlecht-Aussagen immer vorzuziehen

Als Faktoren werden alle Einflussgrößen bezeichnet, die während des Versuchs variiert bzw. untersucht werden. Die Anzahl der Faktoren ist im Versuch möglichst gering zu halten. Es sollten nur Faktoren in den Versuchsumfang aufgenommen werden, von denen man einen maßgeblichen Einfluss erwartet.
Sind mehr als fünf bis sechs Faktoren zu untersuchen, so wird zur Begrenzung des Aufwands in der Regel jeder Faktor mit zwei Einstellwerten - zwei Stufen in den Versuchsumfang aufgenommen [2; S.19]. Aus der Anzahl der Faktoren und ihren jeweiligen Stufen ergeben sich die möglichen Faktorstufenkombinationen.

8.1.2 Wechselwirkungen

Wechselwirkung zwischen zwei Faktoren bedeutet hier, dass die Wirkung eines Faktors davon abhängt, welchen Wert der andere Faktor hat.
Neben den Wechselwirkungen zwischen zwei Faktoren (2FWW) gibt es auch „höhere“ Wechselwirkungen zwischen entsprechend mehr Faktoren (3FWW,

4FWW usw.). Im Allgemeinen können Wechselwirkungen zwischen drei oder mehreren Faktoren gewöhnlich vernachlässigt werden [3; S.145].
Sämtliche Wechselwirkungen werden in vollständigen faktoriellen Versuchsplänen berücksichtigt und ausgewertet.

8.1.3 Versuchsplan und Matrixexperimente

Der Versuchsplan legt Versuchsumfang, Versuchsreihenfolge sowie die zugehörigen Faktorstufenkombinationen fest. Bei der Erstellung des Versuchsplans sollte stets darauf geachtet werden, dass der Versuchsumfang auf das Nötigste begrenzt wird.

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung existieren bereits vorgefertigte Versuchspläne, so genannte Matrixexperimente. Um diese möglichst effektiv nutzen zu können, sollten sowohl die für den Prozess wichtigsten Faktoren als auch deren Wirkung tendenziell bekannt sein.

8.1.4 Vollständige faktorielle Versuchspläne

Versuchspläne auf Basis der vollständigen faktoriellen 2^k-Versuchspläne werden auch als Versuchspäne 1. Ordnung bezeichnet. Die Vollständigkeit be-zieht sich dabei darauf, dass alle denkbaren Faktorstufenkombinationen ohne Auslassungen durchvariiert werden. Wird der Versuchsplan um einen Faktor erweitert, so verdoppelt sich die Anzahl der Faktorstufenkombinationen. Aufgrund dieses Zusammenhangs wird der Versuchsumfang mit steigender Faktorenzahl sehr schnell sehr groß.

Für vollständige faktorielle 2^k-Versuchspläne gilt:

2^k: 2 = Anzahl der Stufen der Faktoren
k = Anzahl der Faktoren
m = Anzahl der Versuche/Versuchsreihen

syst. Nr.	x_1	x_2	x_1x_2	y
1	-	-	+	y_1
2	+	-	-	y_2
3	-	+	-	y_3
4	+	+	+	y_4

Abbildung 8-1: Vollständiger faktorieller 2^k-Versuchsplan mit k=2

Tabelle (Abbildung 8-1) zeigt einen vollständigen 2^k-Versuchsplan mit den vier Faktorstufenkombinationen der beiden Faktoren x_1 und x_2. Die Stufen werden als transformierte (normierte) Werte mit – und + dargestellt. Die Antwortgröße wird als y bezeichnet. Die x_1x_2-Spalte beinhaltet die Wechselwirkung beider Faktoren.
Da bei Versuchen 1. Ordnung stets nur zwei Stufen pro Faktor untersucht werden, kann die Wirkung eines Faktors auf die Zielgröße lediglich linear betrachtet werden. Eine eventuell vorhandene Nichtlinearität zwischen den Einflussgrößen und der Zielgröße wird nicht erkannt. Hier muss zu einem quadratischen Ansatz (3^k-Pläne) übergegangen werden. Man erhält Versuchspläne 2. Ordnung.

8.1.5 Fraktionelle faktorielle Versuchspläne

Wenn davon ausgegangen wird, dass die Effekte der beschriebenen Wechselwirkungen zu vernachlässigen sind, können jene Wechselwirkungsspalten mit weiteren Faktoren belegt werden. Dies führt zu vermengten Versuchsplänen, in denen sich die Wirkung der Faktoren mit der Wirkung von Wechselwirkungen überschneidet. Diese vermengten Versuchspläne werden als fraktionelle faktorielle Versuchspläne bezeichnet.

Für fraktionelle faktorielle 2^{k-p}-Versuchspläne gilt:

$m=2^{k-p}$: 2 = Anzahl der Stufen der Faktoren
k = Anzahl der Faktoren im vollständigen Versuchsplan
p = zusätzlich aufgenommene Faktoren
m = Anzahl der Versuche/Versuchsreihen

syst. Nr.	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	-	-	-	-	+	+	y_1
2	-	+	-	-	+	-	+	y_2
3	-	-	+	+	-	-	+	y_3
4	+	+	+	+	+	+	+	y_4

Abbildung 8-2: Fraktioneller faktorieller 2^{k-p}-Versuchsplan

Tabelle (Abbildung 8-2) zeigt einen 2^{3-1}-Versuchsplan mit den vier Faktorstufenkombinationen der Faktoren x_1, x_2 und x_3, die auf ihren beiden Stufen variiert werden. Die Antwortgröße wird als y bezeichnet. Die Vorzeichen der Wechselwirkungen ergeben sich als Produkte der Vorzeichen der beteiligten Faktoren. Aufgrund der Vermengung kann zwischen der Wirkung des Faktors x_1 und der Wechselwirkung x_2x_3 nicht unterschieden werden. Ähnlich verhält es sich für die restlichen Faktoren und Wechselwirkungen. Die Wechselwirkung $x_1x_2x_3$ kann nicht berechnet werden. Der Versuchsumfang reduziert sich erheblich.
Gleichzeitig bedeutet dies aber auch, dass durch die Vermengung jeweils 2^p Effekte zu einem verschmelzen. Die Versuchspläne müssen daher sorgfältig auf Basis vorhandener Informationen und technischer Überlegungen ausgewählt bzw. angepasst werden. Eine nachträgliche Korrektur durch statistisch-mathematische Maßnahmen ist nicht möglich [2; S.126].
Die Aussagekraft der 2^{k-p}-Pläne hängt maßgeblich davon ab, welche Effekte miteinander vermengt werden. Entsprechend werden die Pläne nach ihrer Auflösung klassifiziert.
Um die Verfälschung der Ergebnisse durch Vermengung möglichst gering zu halten, sollte darauf geachtet werden, dass

- die Effekte der Faktoren möglichst mit den Effekten höherer Wechselwirkungen vermengt sind

- vermutete Wechselwirkungen zwischen zwei Faktoren nur mit höheren Wechselwirkungen vermengt sind.

Sind für einen Versuch die meisten Faktoren wesentlich, so ist ein niedrig vermengter Versuchsplan sinnvoll (z.B. Pläne der Auflösung IV oder V). Je höher die Auflösung des Versuches umso besser die Ergebnisse aber der Aufwand

steigt beträchtlich. Gleiches gilt, wenn über den zu untersuchenden Prozess nur wenig bekannt ist. Einen Überblick über die maximal mögliche Auflösung in Abhängigkeit der Faktoren k und der Anzahl der Faktorstufenkombinationen m stellt Abbildung 8-3 dar.

m \ k	3	4	5	6	7	8
4	2^{3-1} III					
8	2^{3} vollst.	2^{4-1} IV	2^{5-2} III	2^{6-3} III	2^{7-4} III	
16		2^{4} vollst.	2^{5-1} V	2^{6-2} IV	2^{7-3} IV	2^{8-4} IV
32			2^{5} vollst.	2^{6-1} VI	2^{7-2} IV	2^{8-3} IV
64				2^{6} vollst.	2^{7-1} VII	2^{8-2} V

Auflösung	Vermengung	Bewertung
III	Faktor mit 2FWW	kritisch
IV	Faktor mit 3FWW 2FWW mit 2FWW	weniger kritisch
V	Faktor mit 4FWW 2FWW mit 3FWW	unkritisch
VI	Faktor mit 5FWW 2FWW mit 4FWW 3FWW mit 3FWW	unkritisch

Abbildung 8-3: Maximal mögliche Auflösung / Bewertung der Auflösung [2]

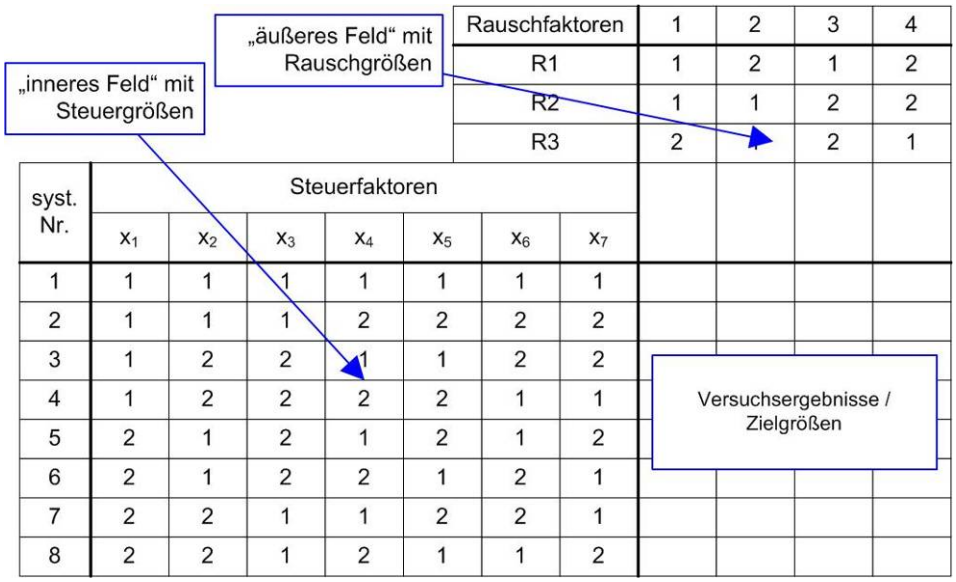
8.1.6 Versuchspläne nach G.Taguchi

Die Versuchspläne des japanischen Ingenieurs G. Taguchi werden als orthogonale Felder bezeichnet. Diese sind prinzipiell mit „fraktionellen faktoriellen Versuchsplänen“ der Auflösung III vergleichbar. Unterschiede bestehen lediglich in den realisierten Faktorstufenkombinationen und deren Reihenfolge. Als Neuerung führt G. Taguchi zwei Arten von Faktoren ein:

- Steuerfaktoren, die jederzeit problemlos auf einen Wert eingestellt werden können
- Rauschfaktoren, die lediglich im Versuch (Labor) gezielt verändert werden können.

Zielsetzung dieser Definition ist es, Einstellungen für Steuerfaktoren zu finden, bei denen die Rauschfaktoren möglichst wenig Einfluss haben. Um dies zu erreichen, können zwei orthogonale Felder kombiniert werden. Man erhält ein „inneres Feld“ und ein „äußeres Feld“.

Entsprechend Abbildung 8-4 werden für jede Faktorstufenkombination des „inneren Feldes“ alle Faktorstufenkombinationen des „äußeren Feldes“ je einmal realisiert.



Rauschfaktoren	1	2	3	4
R1	1	2	1	2
R2	1	1	2	2
R3	2	1	2	1

syst. Nr.	Steuerfaktoren						
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Abbildung 8-4: Kombination zweier orthogonaler Felder nach G. Taguchi

Die verschieden Stufen des „äußeren Feldes“ werden bei der Auswertung wie mehrmalige Realisierungen der Faktorstufenkombinationen des „inneren Feldes“ behandelt (was nicht zutrifft, da sich die Rauschfaktoren ändern). Insbesondere bei der späteren Beurteilung der Signifikanz einzelner Effekte führt dies zu Fehleinschätzungen [2; S.151]. Die System Nummern werden als transformierte Werte mit „1“ und „2“ dargestellt (gemäß G. Taguchi).

8.1.7 Statistische Auswertung

Um die Versuchsergebnisse abzusichern, sind stets mehrere Einzelversuche notwendig. In Bezug auf die Versuchspläne bedeutet dies, dass jede Faktorstufenkombination mehrmals durchgeführt werden muss. Es sind somit n Versuche pro Faktorstufenkombination notwendig. Dabei werden sich die Zahlenwerte der n Einzelversuche immer unterscheiden. Es kommt zu einem Wertebereich, in dem Werte in der Mitte (normalerweise) häufiger auftreten als am Rand. Aus diesem Zusammenhang und einer unendlichen Anzahl von Einzelversuchen ergibt sich die Verteilungsdichte der Grundgesamtheit. Mittels statistischer Vorgehensweisen ist es möglich, auch mit wenigen Einzel-versuchen eine umfassende Auswertung durchzuführen und Schluss-folgerungen zu treffen.

Normalverteilung

Ist das Resultat eines Prozesses das Ergebnis aus einer Vielzahl von Parametern, so werden die zugehörigen Messwerte normalverteilt sein [3; S.164]. Aus den n Messwerten der Einzelversuche $y_{1,1}, y_{1,2}, \ldots, y_{1,n}$ kann dann ein Mittelwert

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} y_j$$

über jede Faktorstufenkombination gebildet werden. Alle Einzelmesswerte einer Faktorstufenkombination weichen mehr oder weniger von diesem Mittelwert ab.Mit der Varianz

$$s_1^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n} y_{1,j} - \bar{y}_1$$

bzw. der Standardabweichung oder Streuung

$$s_1 = +\sqrt{s_1^2}$$

kann diese Abweichung zahlenmäßig erfasst werden.

Da die Anzahl der durchgeführten Einzelversuche lediglich eine Stichprobe der so genannten Grundgesamtheit (der Wahrheit) darstellt, sind die errechneten Werte für den Mittelwert und die Varianz nur Schätzwerte. Die Werte für den wahren Mittelwert μ und die wahre Varianz können mit endlichem Versuchsaufwand nicht ermittelt werden. Jedoch können mit steigender Anzahl der Realisierungen ausreichende Annäherungen erzielt werden.
Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der wahren Werte wird durch die Gauß- oder Normalverteilung

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

beschrieben. Mit der generalisierten Koordinate

$$u = \frac{y - \mu}{\sigma}$$

und unter Nutzung der Standardnormalverteilung (μ=0, =1) können bei der Auswertung, die Abweichungen von Mittelwert verglichen werden. Die Fläche, die durch die Funktion f(u) eingeschossen wird entspricht 1 oder 100%. Die Flächenanteile können herangezogen werden, um die Prozessgüte zu be-urteilen (Abbildung 8-5).

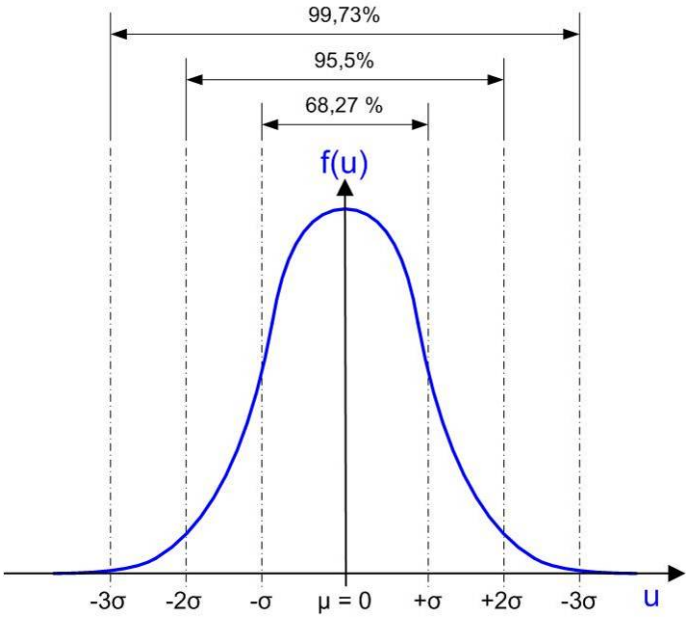


Abbildung 8-5: Standardnormalverteilung und zugehörige Eingrenzungen

Mittelwertanalyse

Die Mittelwertanalyse bietet die Möglichkeit, aus den gewonnen Zielgrößen $y_{i,j}$, die Einzelwirkungen der Faktoren, also die Effekte, sicher abzuschätzen. Das dazu notwendige Vorgehen folgt einem festen Formalismus. Die folgenden Vorgehensweisen werden anhand eines 2^2-Versuchsplans, Abbildung 8-6, verdeutlicht.

syst. Nr.	x_1	x_2	x_1x_2	y_{ji}	$\overline{y}_i$	s_i^2	s_i
1	-	-	+		$\overline{y}_1$	s_1^2	s_1
2	+	-	-	Messwerte	$\overline{y}_2$	s_2^2	s_2
3	-	+	-		$\overline{y}_3$	s_3^2	s_3
4	+	+	+		$\overline{y}_4$	s_4^2	s_4
Effekt	E_1	E_2	E_{12}				
Sig.							

Abbildung 8-6: 2^2-Versuchsplan mit vier Faktorstufenkombinationen

Wird der Faktor Effekt A gesucht, so werden jeweils die gemittelten Zielgrößen einer Stufe zusammen addiert und anschließend von der Summe der anderen Stufe subtrahiert.

$$\text{Effekt A} = \frac{\overline{y}_2 + \overline{y}_4}{2} - \frac{\overline{y}_1 + \overline{y}_3}{2}$$

$$\text{Effekt B} = \frac{\overline{y}_3 + \overline{y}_4}{2} - \frac{\overline{y}_1 + \overline{y}_2}{2}$$

Eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren A und B liegt vor, wenn der Effekt von A auf die Zielgröße davon abhängt welchen Wert B hat (oder umgekehrt).

$\bar{y}_4 - \bar{y}_3$ ist die Wirkung von A, wenn B auf Stufe + steht.

$\bar{y}_2 - \bar{y}_1$ ist die Wirkung von A, wenn B auf Stufe - steht.

Die Differenz dieser beiden Effekte ist ein Maß dafür, wie stark die Wirkung des Faktors A vom Wert des Faktors B abhängt. Die Hälfte der Differenz nennt man Effekt der Wechselwirkung AB.

$$\text{Effekt AB} = \frac{\bar{y}_4 - \bar{y}_3}{2} - \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{2}$$

Neben den drei berechneten Werten ist zusätzlich der Mittelwert über alle Ergebnisse zu berechnen. Dieser macht eine Aussage über die Lage der Versuchsergebnisse insgesamt.

Signifikanzen

Ist ein Effekt/Faktor signifikant, so bedeutet dies, dass er für das Prozessergebnis von Bedeutung ist. Dabei wird keine Aussage bzgl. der Wirkung des Effektes gemacht. Es sollen lediglich zufallsbedingte Effekte ausgeschlossen werden.
Um die Signifikanz zu überprüfen, wird zunächst der Mittelwert über die Varianzen der einzelnen Faktorstufenkombinationen gebildet.

$$s^2 = \frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + s_4^2}{4}$$

Dieser Wert ist ein Schätzwert für die Varianz der Einzelwerte und hat den Freiheitsgrad

$$f = m \cdot (n-1).$$

Der Versuchsumfang N ergibt sich aus dem Produkt der Faktorstufenkombinationen m und den jeweiligen Realisierungen n. Da jeder Effekt die Differenz zweier Mittelwerte von jeweils N/2 Einzelwerten ist, erhält man den Schätzwert für die Standardabweichung eines Effekts wie folgt:

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{4}{N} s^2}\ .$$

Um schließlich die Signifikanz zu beurteilen, bedient man sich der 95%-, 99%- und 99,9%-Vertrauensbereiche. Hierzu werden die Produkte aus t-Werten (tabelliert) und die geschätzte Standardabweichung eines Effekts mit der Wirkung des Effekts verglichen. Es werden folgende Abstufungen unterschieden:

-	kein Hinweis auf einen Effekt wenn	$t_{95\%} \cdot s_{\bar{d}} >$ Effekt
*	keine klare Aussage möglich wenn	$t_{95\%} \cdot s_{\bar{d}} <$ Effekt
**	signifikant wenn	$t_{99\%} \cdot s_{\bar{d}} <$ Effekt
***	hochsignifikant wenn	$t_{99,9\%} \cdot s_{\bar{d}} <$ Effekt

8.2 Untersuchungen mittels statistischer Versuchsplanung

8.2.1 Umsetzung der Versuchspläne

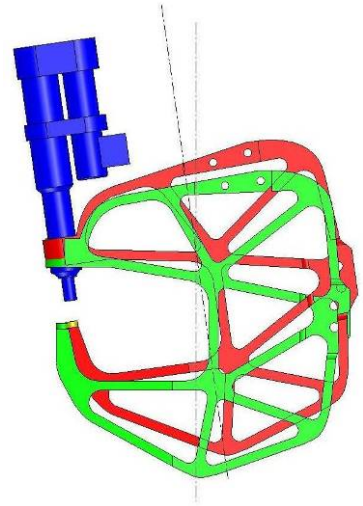
Zielsetzung der Hauptuntersuchung ist es, die Wirkung einzelner Parameter auf den Prozess zu quantifizieren und damit Rückschlüsse auf Prozessschwankungen zu ermöglichen.
Durch die statistische Versuchsplanung kann der dazu nötige Versuchsaufwand begrenzt werden. Die Abgeminderte Aussagekraft der Ergebnisse wird auf Grund gestiegener Wirtschaftlichkeit in Kauf genommen.
Auf Grundlage der Vorversuche kann die Anzahl der zu untersuchenden Parameter auf fünf begrenzt werden. Die Parameter können ohne größeren Aufwand entsprechend ihrer Stufen variiert werden. Parameter, die auf Fertigungstoleranzen basieren oder Chargencharakter haben, sind im Versuch kaum zu realisieren.
Die ausgewählten Prozessparameter sind in Tabelle (Abbildung 8-7) mit ihren jeweiligen Stufen aufgelistet und werden zum besseren Verständnis nachfolgend näher erläutert. Als Zielgrößen sollen der Hinterschnitt, der Restboden und die Halsdicke betrachtet werden. Dem Hinterschnitt kommt dabei die größte Bedeutung zu.

Konstanten	
Stanznietsystem	Tucker (SRC, SRF, SRT 80 SX, ACF)
Roboter	Kuka (KR200/2)
Matrize	FM 100 2017 (Tiefe: 1,7mm / Durchmesser: 10mm)
Werkstoffpaarung	H340LAD in AlMg3,5Mn
Klebstoff	Betamate 1480

Faktoren		Stufen		Zielgrößen		
		- od. 1	+ od. 2	y_1	y_2	y_3
x_1	Dicke Oberblech	1,4mm	1,2mm	Hinterschnitt [mm]	Halsdicke [mm]	Restboden [mm]
x_2	Dicke Unterblech	1,5mm	1,2mm			
x_3	Winkel	0°	5°			
x_4	Spalt	0,0mm	2,0mm			
x_5	Überdrückung	-0,4mm	-0,6mm			

Abbildung 8-7: Konstanten, Faktoren und Zielgrößen

In der Produktion kommt es häufig vor, dass die zu fügenden Bauteile nicht exakt senkrecht zum Setzkopf stehen. Daraus resultiert ein Winkel zwischen Soll- und Ist-Position. In den Versuchen wird dieser Parameter durch ein Schiefstellen der Zange simuliert (Abbildung 8-8).



Schiefstellen der Zange:

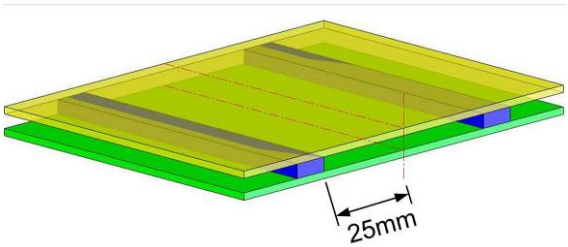
Sollposition = grün

absichtliche
Schiefstellung = rot

Winkel zwischen
beiden Positionen: 5°

Abbildung 8-8: Faktor Winkel

Des Weiteren ist es möglich, dass zwei Bauteile in der Produktion nicht ausreichend genau ausgerichtet sind. Dadurch kann sich ein Spalt zwischen den zu fügenden Bauteilen ergeben. Um einen solchen Spalt simulieren zu können, werden Blechstreifen (200mmx10mmx2mm) zwischen den zu fügenden Blechen positioniert und mit Klammern fixiert.



Spalt zwischen den Blechen:

Erzeugt durch 2mm dicke Einlagen.

Einlagen je recht und links im Abstand von 25mm zur Mitte des Fügepunktes.

Abbildung 8-9: Faktor Spalt

Die Eindringtiefe der Niete wird bei Systemen der Fa. Tucker nicht über die Setzkraft sondern über die Überdrückung gesteuert. Die Überdrückung ist entsprechend Abbildung 8-10 der Weg des Stempels mit der Bauteiloberfläche als Nulllinie. Die Überdrückung ist in der Regel immer negativ. Eine höhere Überdrückung ist daher betragsmäßig zu verstehen.

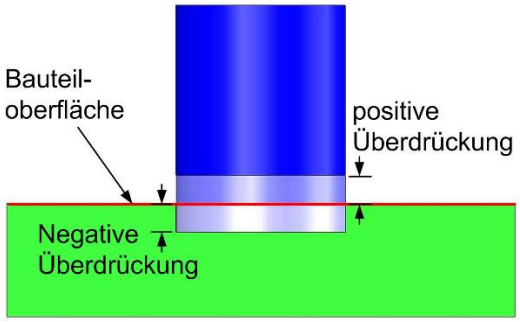


Abbildung 8-10: Faktor Überdrückung

Die Überdrückung ist ein Parameter der in die Steuerung der Zange programmiert ist, dieser Wert kann nicht mit der Niedkopfendlage aus Schliffbildern verglichen werden.

Um bei einem reduzierten Versuchsumfang korrekte Aussagen zu erhalten, werden zwei voneinander unabhängige Versuchspläne durchlaufen.

Zu Anfang wird ein orthogonales Feld der (Auflösung III), nach G. Taguchi realisiert. Im Anschluss daran folgt ein fraktioneller faktorieller Versuchsplan, um die Erkenntnisse besser zu fundieren.

In den Versuchsumfang werden je Faktorstufenkombination sechs Einzelwerte aufgenommen, die gefügten Blechen der Abmessung 320mm x 200mm entnommen werden. Um Randeinflüsse zu vermeiden, werden gemäß Abbildung 8-11 nur die mittigen Verbindungen in den Versuchsumfang einbezogen.

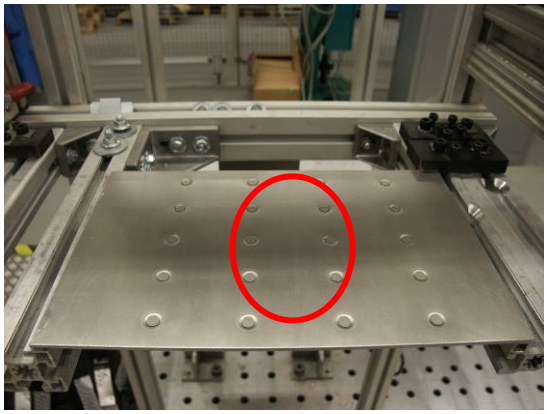


Abbildung 8-11: Verbindungen aus dem Versuchsumfang (rot eingekreist)

Versuchsplan nach G.Taguchi (Anhang 13.2)

Für ein Matrixexperiment mit fünf Faktoren kann ein orthogonale (Feld L8) herangezogen werden. Dieses entspricht in seinem Versuchsumfang einem 2^{5-2} Versuchsplan. Aufgrund der hohen Vermengung können in diesem Feld nicht alle Faktoren und 2FWW getrennt betrachtet werden. Wichtige 2FWW sollten dennoch nicht mit Faktorwirkungen vermengt werden. Welche Wechselwirkungen bestehen, kann nur vermutet werden.

Da im vorliegenden Fall nicht zwischen Steuer- und Rauschfaktoren unterschieden wird, entfällt das „äußere Feld“. Anhand der Vorüberlegungen und den Grundregeln der statistischen Versuchsplanung wurde die Versuchsmatrix erstellt. Bei der Spaltenbelegung wurde darauf geachtet, dass Faktoren und vermutete Wechselwirkungen nicht miteinander vermengt werden.

	$\mathbf{x_1}$	$\mathbf{x_2}$	x_3 $\mathbf{x_1x_2}$	$\mathbf{x_4}$	$\mathbf{x_5}$ x_1x_4	x_6 x_2x_4 x_1x_7	$\mathbf{x_7}$ x_1x_6	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\bar{y}_3$
syst. Nr.	Dicke Oberblech	Dicke Unterblech		Winkel	Spalt		Überdrückung	Hinterschnitt [mm]	Restboden [mm]	Halsdicke [mm]
1	1	1	1	1	1	1	1	0,190	0,190	0,324
2	1	1	1	2	2	2	2	0,167	0,201	0,327
3	1	2	2	1	1	2	2	0,188	0,260	0,440
4	1	2	2	2	2	1	1	0,169	0,278	0,439
5	2	1	2	1	2	1	2	0,187	0,163	0,293
6	2	1	2	2	1	2	1	0,192	0,147	0,295
7	2	2	1	1	2	2	1	0,183	0,203	0,314
8	2	2	1	2	1	1	2	0,215	0,263	0,363

Abbildung 8-12: Versuchsmatrix nach G. Taguchi

Fraktioneller faktorieller Versuchsplan (Anhang 13.3)

Durch die Realisierung des ersten Versuchsplans können bereits Aussagen bzgl. der Bedeutung einzelner Prozessparameter gemacht werden. Da die Glaubwürdigkeit jedoch aufgrund des hoch vermengten Versuchsplans noch eingeschränkt ist, wird ein weiterer Versuchsplan durchlaufen. Dieser soll mit einer höheren Auflösung die Ergebnisse fundieren und präzisieren.
Als fraktioneller faktorieller Versuchsplan kommt ein Plan der Auflösung V zum Einsatz, bei dem sich entsprechender Auflösung und fünf Faktoren ergeben sich somit 16 Versuchsreihen. Im Gegensatz zum vorangegangenen orthogonalen Feld findet bei diesem 2^{5-1}-Versuchsplan keine Vermengung zwischen Faktoren und 2FFW statt. Überschneidungen mit 3FWW und höheren Wechselwirkungen sind zu vernachlässigen. Einen fraktionellen faktoriellen Versuchsplan zeigt Abbildung 8-13.

syst. Nr.	x_1	Dicke Oberblech	x_2	Dicke Unterblech	x_1x_2		x_3	Spalt	x_1x_3		x_2x_3		$x_1x_2x_3$		x_4	Überdrückung	x_1x_4		x_2x_4		$x_1x_2x_4$		x_3x_4		$x_1x_3x_4$		$x_2x_3x_4$		x_5	Winkel	$\bar{y}_1$	Hinterschnitt [mm]	$\bar{y}_2$	Restboden [mm]	$\bar{y}_3$	Halsdicke [mm]
1	-		-		+		-		+		+		-		-		+		+		-		+		-		-		+		0,190		0,186		0,317	
2	+		-		-		-		-		+		+		-		-		+		+		+		-		+		-		0,200		0,148		0,284	
3	-		+		-		-		+		-		+		-		+		-		+		+		-		+		-		0,175		0,276		0,448	
4	+		+		+		-		-		-		-		-		-		-		-		+		+		+		+		0,187		0,177		0,325	
5	-		-		+		+		-		-		+		-		+		+		-		-		+		+		-		0,147		0,189		0,330	
6	+		-		-		+		+		-		-		-		-		+		+		-		-		+		+		0,177		0,145		0,285	
7	-		+		-		+		-		+		-		-		+		-		+		-		+		-		+		0,156		0,190		0,400	
8	+		+		+		+		+		+		+		-		-		-		-		-		-		-		-		0,168		0,132		0,348	
9	-		-		+		+		+		+		-		+		-		+		+		-		+		+		-		0,194		0,182		0,335	
10	+		-		-		-		-		+		+		+		+		-		-		-		+		+		+		0,222		0,138		0,278	
11	-		-		-		-		+		-		+		+		-		+		-		+		-		-		+		0,188		0,277		0,442	
12	+		+		+		-		-		-		-		+		+		+		+		-		-		-		-		0,197		0,253		0,331	
13	-		-		+		+		-		-		+		+		-		+		+		+		-		-		+		0,160		0,149		0,346	
14	+		-		-		+		+		-		-		+		+		-		-		+		+		-		-		0,198		0,140		0,261	
15	-		+		-		+		-		+		-		+		-		+		-		+		-		+		-		0,171		0,278		0,427	
16	+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		+		0,190		0,238		0,349	

Abbildung 8-13: fraktioneller faktorieller Versuchsplan

8.2.2 Auswertung der Versuchspläne

Für die Auswertung wurden die Schliffbilder der relevanten Verbindungen erstellt, unter dem Mikroskop digitalisiert und vermessen. Im Rahmen der Aus-wertung wurden für Hinterschnitt und Halsdicke jeweils die Mittelwerte aus rechts- und linksseitigem Wert gebildet.

Die Ermittlung der Kenngrößen erfolgte analog der bereits vorgestellten statistischen Methoden. Sämtliche Berechungen wurden mittels zuvor erstellten Excel-Tabellen durchgeführt. Unstimmigkeiten in der Darstellung der Er-gebnisse sind rundungsbedingt. Für die Berechungen wurde stets der unge-rundete Wert verwendet.

Versuchsplan nach G.Taguchi

Zur besseren Übersicht wurden die Ergebnisse aus den Berechungen in Tabellenform zusammengefasst. Einen ersten Überblick, über die ermittelten statistischen Kenngrößen des Versuchsplans nach G. Taguchi liefert Tabelle (Abbildung 8-14).

syst. Nr.	Hinterschnitt			Restboden			Halsdicke		
	$\bar{y}_i$ [mm]	s_i^2 [mm²]	s_i [mm]	$\bar{y}_i$ [mm]	s_i^2 [mm²]	s_i [mm]	$\bar{y}_i$ [mm]	s_i^2 [mm²]	s_i [mm]
1	0,190	0,000072	0,009	0,174	0,000096	0,010	0,328	0,000064	0,008
2	0,167	0,000017	0,004	0,185	0,000047	0,007	0,326	0,000296	0,017
3	0,188	0,000050	0,007	0,257	0,000979	0,031	0,434	0,000760	0,028
4	0,169	0,000010	0,003	0,275	0,000324	0,018	0,442	0,000692	0,026
5	0,187	0,000038	0,006	0,155	0,000266	0,016	0,301	0,000190	0,014
6	0,192	0,000116	0,011	0,157	0,000160	0,013	0,301	0,000196	0,014
7	0,183	0,000064	0,008	0,202	0,000608	0,025	0,321	0,000115	0,011
8	0,215	0,000035	0,006	0,265	0,000232	0,015	0,359	0,000390	0,020
	$\bar{y}$ [mm]	s^2 [mm²]	$s_{\bar{d}}$ [mm]	$\bar{y}$ [mm]	s^2 [mm²]	$s_{\bar{d}}$ [mm]	$\bar{y}$ [mm]	s^2 [mm²]	$s_{\bar{d}}$ [mm]
	0,186	0,000050	0,0020	0,209	0,000339	0,0053	0,352	0,000338	0,0053
Vertrauensbereich 95%		0,0042			0,0108			0,0108	
Vertrauensbereich 99%		0,0056			0,0146			0,0145	
Vertrauensbereich 99,9%		0,0074			0,0193			0,0192	

Abbildung 8-14: Statistische Kenngrößen aus dem Versuchsplan nach G. Taguchi

Bei der Auswertung der Daten wird deutlich, dass die errechneten Mittelwerte ($\bar{y}_i$ und $\bar{\bar{y}}$) für den Hinterschnitt nahezu durchweg unter dem geforderten Sollwert liegen. Für Restboden und Halsdicke werden die geforderten Werte erreicht und teils deutlich überschritten.

Dem gegenüber ist die geringe Standardabweichung des Hinterschnitts (wichtigste Größe) positiv zu beurteilen. So kann davon ausgegangen werden, dass die Messwerte bei der weiteren Datenanalyse eine repräsentative Aussage ermöglichen. Die im Durchschnitt höheren Standardabweichungen der beiden anderen Zielgrößen sind ebenfalls akzeptabel. (Wobei zu beachten ist, dass die Standardabweichung keine prozentuale Größe darstellt.)

Des Weiteren wird deutlich, dass der Hinterschnitt die geringste Sensibilität bzgl. der untersuchten Parameter aufweist. Dies gilt sowohl für die Absolutwerte als auch für eine prozentuale Betrachtung.

Nach Auswertung der einzelnen Faktorstufenkombinationen und zugehörigen statistischen Kenngrößen können die Effekte und Signifikanzen der Parameter und deren Wechselwirkungen ermittelt werden. Eine Übersicht liefert nachfolgende Tabelle, Abbildung 8-15.

		Parameter						
		Dicke Oberblech	Dicke Unterblech	Spalt	Überdrückung	Winkel	Wechselwirkung dicke Oberblech / dicke Unterblech	Wechselwirkung dicke Oberblech / Überdrückung
Hinterschnitt	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe 1 [mm]	0,179	0,184	0,196	0,184	0,187	0,189	0,190
	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe 2 [mm]	0,194	0,189	0,177	0,189	0,186	0,184	0,183
	Effekt [mm]	0,016	0,005	0,019	0,006	0,002	0,005	0,007
	Signifikanz	***	*	***	**	-	*	**
Restboden	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe 1 [mm]	0,222	0,167	0,213	0,202	0,197	0,206	0,217
	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe 2 [mm]	0,195	0,250	0,204	0,215	0,220	0,211	0,200
	Effekt [mm]	0,028	0,082	0,009	0,014	0,024	0,005	0,017
	Signifikanz	***	***	-	*	***	-	**
Halsdicke	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe 1 [mm]	0,383	0,314	0,356	0,348	0,346	0,334	0,358
	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe 2 [mm]	0,321	0,389	0,348	0,355	0,357	0,370	0,346
	Effekt [mm]	0,062	0,075	0,008	0,007	0,011	0,036	0,012
	Signifikanz	***	***	-	-	*	***	*

Abbildung 8-15: Effekte und Signifikanzen aus dem Versuchsplan nach G. Taguchi

Fraktioneller faktorieller Versuchsplan

Zur besseren Übersicht werden auch hier die Ergebnisse in Tabellen zusammengefasst. Erste Ergebnisse zeigt Tabelle 7.4.

syst. Nr.	Hinterschnitt			Restboden			Halsdicke		
	$\bar{y}_i$ [mm]	s_i^2 [mm²]	s_i [mm]	$\bar{y}_i$ [mm]	s_i^2 [mm²]	s_i [mm]	$\bar{y}_i$ [mm]	s_i^2 [mm²]	s_i [mm]
1	0,190	0,000085	0,009	0,186	0,000052	0,007	0,317	0,000079	0,009
2	0,200	0,000038	0,006	0,148	0,000134	0,012	0,284	0,000245	0,016
3	0,175	0,000097	0,010	0,276	0,000318	0,018	0,448	0,000302	0,017
4	0,187	0,000033	0,006	0,177	0,001810	0,043	0,325	0,000658	0,023
5	0,147	0,000072	0,009	0,189	0,000110	0,010	0,330	0,000063	0,008
6	0,177	0,000067	0,008	0,145	0,000134	0,012	0,285	0,000178	0,013
7	0,156	0,000044	0,007	0,190	0,000483	0,022	0,440	0,000195	0,014
8	0,168	0,000030	0,006	0,132	0,000097	0,010	0,348	0,000041	0,006
9	0,194	0,000016	0,004	0,182	0,000200	0,014	0,335	0,000117	0,011
10	0,222	0,000107	0,010	0,138	0,000173	0,013	0,278	0,000322	0,018
11	0,188	0,000125	0,011	0,277	0,000253	0,016	0,442	0,000569	0,024
12	0,197	0,000045	0,007	0,253	0,000538	0,023	0,331	0,000534	0,023
13	0,160	0,000088	0,009	0,149	0,000085	0,009	0,346	0,000181	0,013
14	0,198	0,000119	0,011	0,140	0,000062	0,008	0,261	0,000161	0,013
15	0,171	0,000202	0,014	0,278	0,000124	0,011	0,427	0,000495	0,022
16	0,190	0,000065	0,008	0,238	0,000331	0,018	0,349	0,000453	0,021
	$\bar{y}$ [mm]	s^2 [mm²]	$s_{\bar{d}}$ [mm]	$\bar{y}$ [mm]	s^2 [mm²]	$s_{\bar{d}}$ [mm]	$\bar{y}$ [mm]	s^2 [mm²]	$s_{\bar{d}}$ [mm]
	0,182	0,000077	0,0018	0,194	0,000307	0,0036	0,344	0,000287	0,0035

Vertrauensbereich 95%	0,0036		0,0071		0,0069
Vertrauensbereich 99%	0,0047		0,0094		0,0091
Vertrauensbereich 99,9%	0,0061		0,0122		0,0118

Abbildung 8-16: statistische Kenngrößen aus dem fraktionellen faktoriellen Versuchsplan

Auch bei der Auswertung der Daten des fraktionellen faktoriellen Versuchsplans zeigt sich, dass der geforderte Sollwert für den Hinterschnitt bei vielen Faktorstufenkombinationen nicht erreicht wird. Die Werte für den Restboden und die Halsdicke liegen zumeist über dem geforderten Wert. Die Varianzen und Standardabweichungen der einzelnen Faktorstufen sind mit denen des bereits ausgewerteten Versuchsplans vergleichbar. Dies gilt auch für die gebildeten Mittelwerte über die Faktorstufenkombinationen ($\bar{y}$).

Die im Vergleich zum Hinterschnitt, hohen Standardabweichungen des Restbodens und der Halsdicke zeigten sich bereits bei der Auswertung des ersten Versuchsplans.

Die geringeren Schätzwerte für die Standardabweichungen eines Effektes ($s_{\bar{d}}$) sind auf den gestiegenen Versuchsumfang zurückzuführen. Entsprechend ergeben sich für die Vertrauensbereiche deutlich niedrigere Werte als bei der Auswertung des Versuchsplans nach G. Taguchi.

Die geringe Sensibilität des Hinterschnitts bzgl. der untersuchten Parameter bestätigt sich und geht einher mit einer geringen Standardabweichung.

Die Wirkungsweise der Faktoren und deren Wechselwirkungen werden durch ihre Effekte und Signifikanzen verdeutlicht. Einen Überblick liefert die folgende Tabelle in Abbildung 8-17.

		Parameter						Wechselwirkungen					
		Dicke Oberblech	Dicke Unterblech	Spalt	Überdrückung	Winkel	Wechselwirkung dicke Oberblech / dicke Unterblech	Wechselwirkung dicke Oberblech / Spalt	Wechselwirkung dicke Unterblech / Spalt	Wechselwirkung dicke Oberblech / Überdrückung	Wechselwirkung dicke Unterblech / Überdrückung	Wechselwirkung Spalt / Überdrückung
Hinterschnitt	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe - [mm]	0,173	0,186	0,194	0,175	0,181	0,186	0,180	0,178	0,181	0,183	0,181
	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe + [mm]	0,193	0,179	0,171	0,190	0,184	0,179	0,185	0,186	0,184	0,182	0,184
	Effekt [mm]	0,020	0,007	0,023	0,015	0,002	0,007	0,005	0,008	0,004	0,000	0,003
	Signifikanz	***	*	***	***	-	***	**	***	*	-	-
Restboden	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe - [mm]	0,216	0,159	0,205	0,180	0,200	0,199	0,190	0,201	0,186	0,173	0,188
	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe + [mm]	0,171	0,228	0,183	0,207	0,187	0,188	0,197	0,186	0,201	0,214	0,199
	Effekt [mm]	0,044	0,068	0,022	0,027	0,012	0,011	0,007	0,014	0,015	0,041	0,011
	Signifikanz	***	***	***	***	**	**	-	***	***	***	**
Halsdicke	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe - [mm]	0,381	0,305	0,345	0,342	0,346	0,353	0,340	0,346	0,349	0,343	0,344
	Mittlere Faktorwirkung auf Stufe + [mm]	0,308	0,384	0,343	0,346	0,343	0,335	0,348	0,342	0,339	0,346	0,345
	Effekt [mm]	0,073	0,079	0,002	0,004	0,003	0,018	0,008	0,004	0,010	0,003	0,001
	Signifikanz	***	***	-	-	-	***	*	-	**	-	-

Abbildung 8-17: Effekte / Signifikanzen aus dem fraktionellen faktorieller Versuchsplan

8.2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Bei den Aussagen, die auf Basis der statistischen Berechungen gemacht werden können, muss stets beachtet werden, dass diese auf Schätzungen basieren. Eine hundertprozentige Aussage kann aufgrund des Versuchsum-fangs nicht gemacht werden.

Im Folgenden wird auf die Erkenntnisse aus den Versuchsplänen näher eingegangen. Zur besseren Gesamtübersicht werden zunächst jedoch die Ergebnisse aus den Auswertungen in den Abbildung 8-18 und Abbildung 8-19 graphisch aufbereitet.

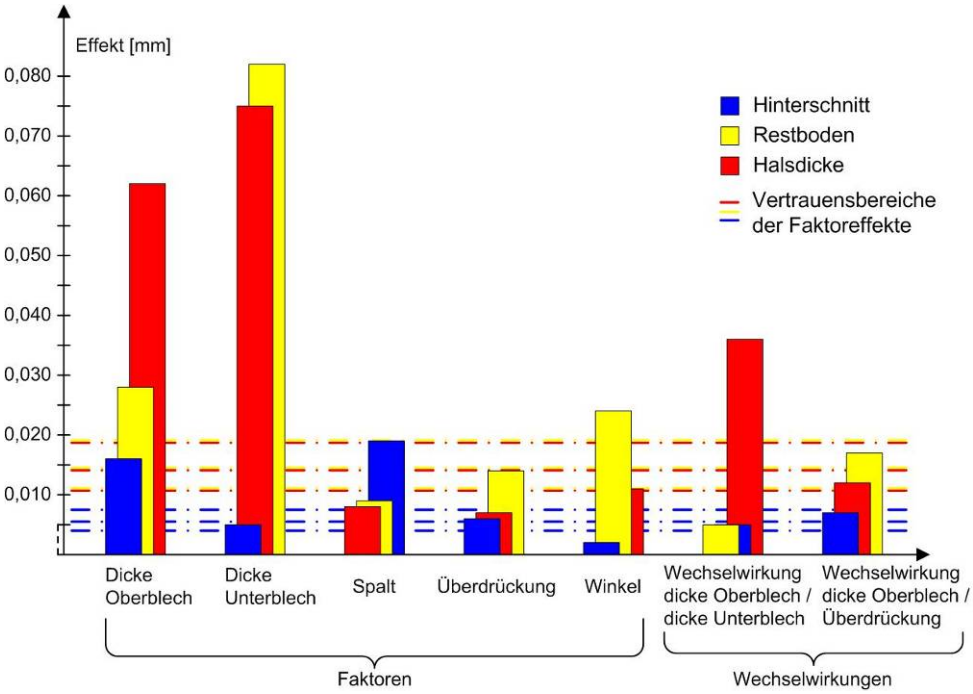


Abbildung 8-18: Effekte des Versuchsplans nach Taguchi

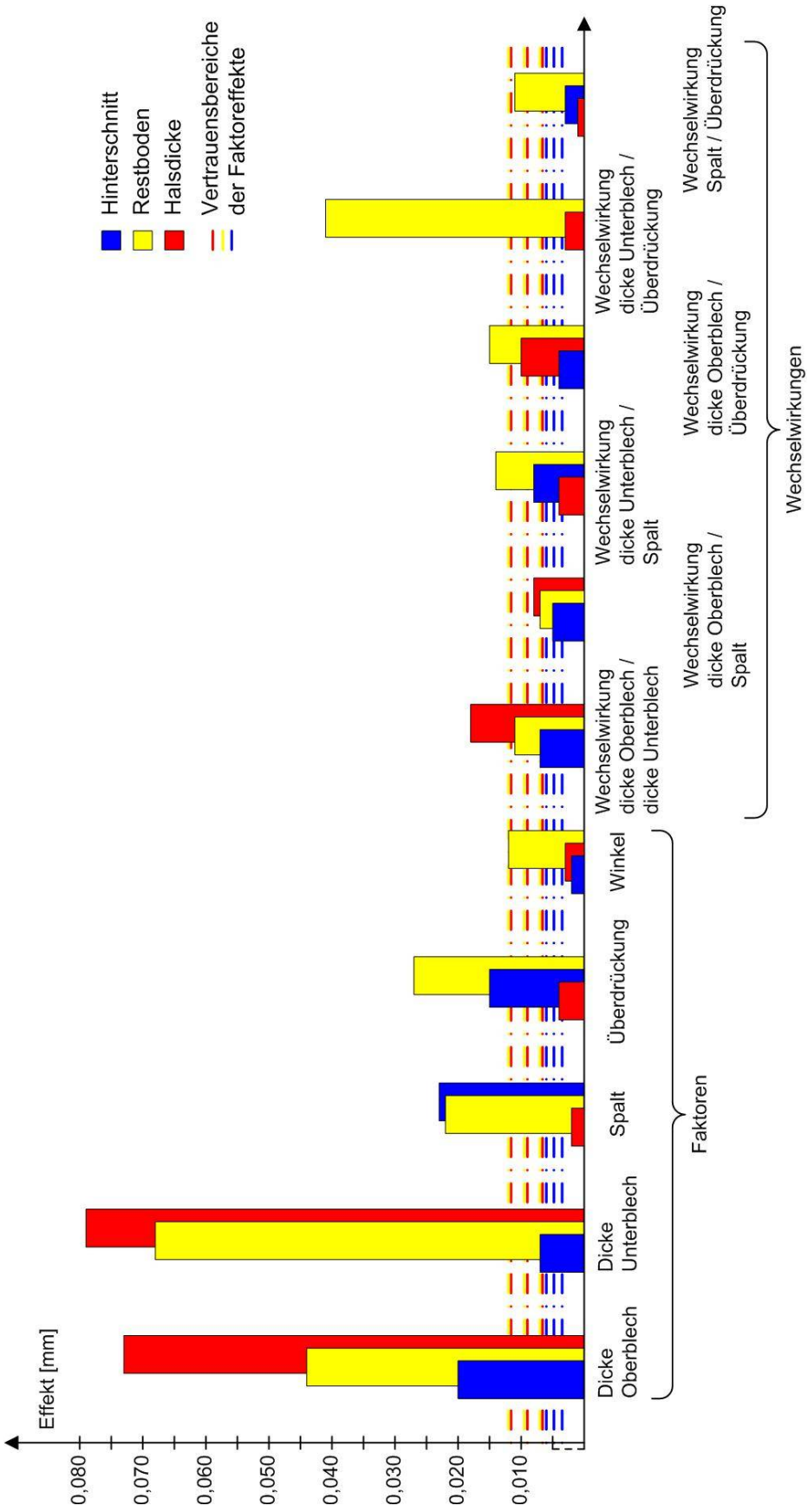


Abbildung 8-19: Effekte des faktoriellen fraktionellen Versuchsplans

Hinterschnitt

Bei Betrachtung der Ergebnisse beider Versuchspläne wird deutlich, dass die Ausprägung des Hinterschnitts maßgeblich von drei Parametern beeinflusst wird. Als wichtigster Parameter erweist sich in beiden Versuchsplänen der Faktor „Spalt“. Danach folgen die Parameter „Dicke Oberblech“ und „Überdrückung“. Alle drei werden im Signifikanztest als hoch signifikant ein-gestuft.

Die negative Wirkung eines Spaltes auf die Ausbildung des Hinterschnitts wurde bei den Vorüberlegungen unterschätzt. Die Ursache für die Dominanz dieses Faktors erklärt sich damit, dass das Oberblech eine geringere Möglichkeit, besitzt in das Unterblech zu fließen. Ein derartiges Verhalten konnte in Verbindungen ohne Klebstoff nicht nachgewiesen werden. Eine mögliche Erklärung könnte die elastisch/plastische Verformung der Aluminiumbleche durch den Niederhalter liefern. Diese entsteht bei der Fixierung der Bleche durch den Niederhalter (Niederhalterkraft 6 kN) und führt zu Spannungen und Versetzungen im Unterblech, die sich auf das weitere Umformvermögen auswirken können.
Der Effekt des Faktors „Dicke Oberblech“ ist annähernd gleich groß, wobei eine Verringerung der Blechstärke die Bildung des Hinterschnitts positiv beeinflusst. Die geringere Matrizenfüllung in Verbindung mit der Abnahme des plastisch zu verformenden Volumens begünstigen die Ausprägung des Hinterschnitts. Die Blechstärkenreduzierung beeinflusst das Aufspreizen der Niete nur unwesentlich, führt jedoch zu höheren Setzkräften.
Die Wechselwirkung zwischen den Faktoren „Dicke Oberblech“ und „Spalt“ wird bei der Auswertung des fraktionellen faktoriellen Versuchsplans als signifikant eingeschätzt. Ein positiver Einfluss der Wechselwirkung zeigt sich bei Kombination von dünnem Oberblech und minimalem Spalt (einem lediglich durch den Klebstoff bedingten Spalt).
Dem gegenüber wirkt sich 1,4 mm starkes Oberblech bei einem Spalt von 2 mm besonders negativ aus.

Zur Wirkungsweise des Faktors „Dicke Unterblech“ liefern die Versuchspläne unterschiedliche Aussagen. Während bei der Auswertung des orthogonalen Feldes nach G. Taguchi eine Reduzierung als positiv beurteilt wird, macht der fraktionelle faktorielle Versuchsplan eine gegenteilige Aussage. Die Signifikanzen stützen die Ergebnisse des fraktionellen faktoriellen Versuchs-plans. Aufgrund des vergleichsweise geringen Effektes hat der Faktor jedoch nur wenig Bedeutung hinsichtlich des Hinterschnitts.

Eine bestehende Wechselwirkung zwischen den Materialdicken von Ober- und Unterblech kann durch die Signifikanzen nachgewiesen werden. Der be-rechnete Effekt wirkt sich im untersuchten Zusammenhang positiv auf die Kombination aus 1,2 mm starken Oberblech und 1,5 mm dickem Unterblech aus. Ebenso kann eine Wechselwirkung zwischen der Materialstärke des Ober-blechs und dem Faktor „Spalt“ belegt werden. Im Vergleich mit den bereits ge-nannten Wechselwirkungen übt diese den größten Effekt aus. Es zeigt sich, dass bei einem minimalen Spalt die größere Dicke des Unterblechs einen positiven Einfluss hat.

Die Auswirkungen, die sich aus der Variation der Überdrückung ergeben, stellen den drittgrößten Effekt dar. Übereinstimmend wird in beiden Versuchsplänen mit geringer Überdrückung der größere Hinterschnitt erzielt. Die Ursache für diesen Widerspruch liefern die Schliffbilder. Diese zeigen, dass eine höhere Überdrückung die Verdrängung des Klebstoffes negativ beein-flusst. Es kommt vermehrt zu lokalen Klebstoffanhäufungen im Bereich des Hinterschnitts.

Für den Faktor „Winkel“ kann ebenso wie für die restlichen Wechselwirkungen kein Einfluss auf den Hinterschnitt nachgewiesen werden. Die ermittelten Signifikanzen liefern keinen Hinweis auf einen belegbaren Effekt.

Halsdicke

Für die Halsdicke liefern beide Versuchspläne annähernd gleiche Ergebnisse. Übereinstimmend werden in beiden Versuchsplänen nur zwei Faktoren und die zugehörige Wechselwirkung als hoch signifikant beurteilt. Entsprechend sind die zugehörigen Effekte sehr dominant.

Die größte Bedeutung hinsichtlich der Halsdicke hat die Materialstärke des matrizenseitigen Blechs. Eine reduzierte Blechstärke (1,2mm) wirkt sich positiv aus. Die Vorteile ergeben sich hier aus der größeren Nietaufspreizung. Diese führt zu einer veränderten Volumenverteilung in der Verbindung. Der veränderte Prozessverlauf begünstigt die radiale Verdrängung des stempelseitigen Werkstoffs. Somit steht ein größeres Werkstoffvolumen für die Hälse zur Verfügung. Gleichzeitig nimmt das Werkstoffvolumen unter dem Niet ab.

Die Materialstärke des stempelseitigen Werkstoffs stellt den zweiten wichtigen Faktor hinsichtlich der Halsdicke dar. Größere Materialstärken liefern hierbei die besseren Ergebnisse. Zurückzuführen ist dies vor allem auf das insgesamt größere Volumen, welches zur Bildung von Hinterschnitt und Halsdicke zur Verfügung steht.

Die Wechselwirkung zwischen den beiden Materialdicken stellt den letzten signifikanten Effekt dar. Die Auswirkungen auf die Halsdicke sind jedoch vergleichsweise gering. Die positive Wirkung wird mit der Verbindung von dickem Oberblech und dünnem Unterblech erzielt.

Restboden

Die Betrachtung der Ergebnisse beider Versuchspläne führt zu teils recht unterschiedlichen Einschätzungen. Dies wird vor allem bei der Beurteilung des Umfangs einzelner Effekte deutlich. Hier differieren die Aussagen beider Versuchspläne besonders deutlich. Verantwortlich hierfür sind die vielen signifikanten Wechselwirkungen, welche lediglich im fraktionellen faktoriellen Versuchsplan voll berücksichtigt werden. Dennoch können die für den Restboden wesentlichen Effekte ausgemacht werden.

Der Faktor „Dicke Unterblech“ übt den größten Effekt auf den Restboden aus. Dabei zeigt sich, dass sich ein verringern des Unterbleches negativ auf den Restboden auswirkt, ähnlich wie beim Stanznieten.

Der Einfluss der Dicke des Oberblechs stellt den zweitgrößten Effekt dar. In den Auswertungen beider Versuchspläne wird der Faktor als hoch signifikant eingestuft. Dabei stellt sich die Verwendung der 1,4mm-Bleche als positiv heraus. Eine Wirkungsweise, wie sie zuvor bei verringerter Materialstärke des Unterblechs beobachtet wurde, kann nicht festgestellt werden. Das Aufspreizverhalten der Niete wird durch den Faktor „Dicke Oberbleche“ nicht wesentlich beeinflusst.

In der Auswertung des fraktionellen faktoriellen Versuchsplans wird die Wechselwirkung zwischen den Materialdicken von Ober- und Unterblech als signifikant eingestuft. Im Vergleich mit den Faktoreffekten sind die Auswirkungen jedoch recht gering und daher für den Restboden nicht von entscheidender Bedeutung.

Die Beurteilung des Faktors „Überdrückung“ stellt sich schwierig dar. Der im fraktionellen faktoriellen Versuchsplan errechnete Effekt ist anhand der Schliffbilder nicht nachzuvollziehen.

Die Optimierungsrichtung erweist sich als falsch. Die Ursachen dieser Fehleinschätzung liegen im Auswerteformalismus begründet. Die in der Auswertung gefundene Optimierungsrichtung hin zu einer größeren Überdrückung besitzt nur in Verbindung mit den dünneren Unterblechen Gültigkeit. Außerhalb dieser Wechselwirkung werden mit geringerer Überdrückung größere Restböden erzielt.

Die Wechselwirkung zwischen den Faktoren „Dicke Unterblech“ und „Überdrückung“ hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Restboden. Dabei wirkt

sich die Kombination aus dünnem Unterblech und hoher Überdrückung äußerst vorteilhaft aus. Verantwortlich dafür ist das deutlich größere Auf-spreizen der Niete.

Der Spalt ist der letzte Parameter mit maßgeblichem Einfluss auf den Restboden. Zwar werden der Faktor „Winkel“ sowie weitere Wechselwirkungen ebenfalls als hoch signifikant beurteilt, in Anbetracht der vergleichsweise geringen Effekte sind diese jedoch zu vernachlässigen. Ähnlich wie bereits beim Hinterschnitt wirkt sich auch für den Restboden ein Spalt negativ aus.

8.3 FE-Simulation

8.3.1 Anpassung der Simulation

In den Voruntersuchungen (in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut) zeigte sich, dass Schwankungen der Festigkeit des H340LAD die Verbindungsqualität massiv beeinflussen. Obwohl die verwendeten Stahlbleche der Norm entsprachen, blieben die in der Praxis erreichten Kennwerte zumeist hinter der Simulation zurück. Um das Modell diesbezüglich zu optimieren, mussten die zur Simulation verwendeten Fließkurven angepasst werden. Entsprechend dem Toleranzbereich der Norm wurden vier mögliche Fließkurven berechnet (auf Grundlage der Angaben von ThyssenKrupp).

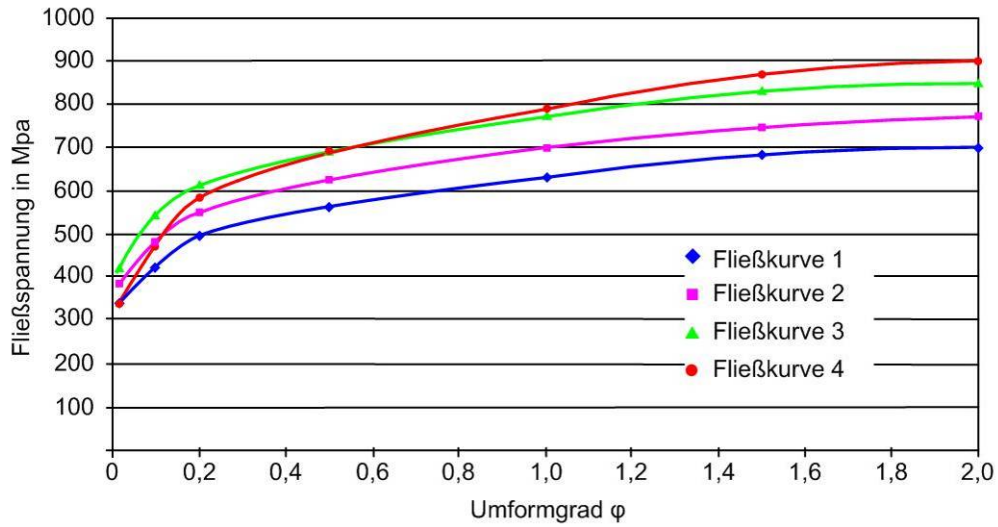


Abbildung 8-20: Berechnete Fließkurven für H340LAD

Für die bestmögliche Angleichung der Simulation wurden Berechnungen mit den vier Fließkurven durchlaufen und mit den Vorversuchen verglichen. Wie beim Großteil der Untersuchungen wurde dabei die Paarung H340LAD/AlMg3,5Mn verwendet.

Verbindung H340 (1,4mm) in AlMg3,5Mn (1,5mm)

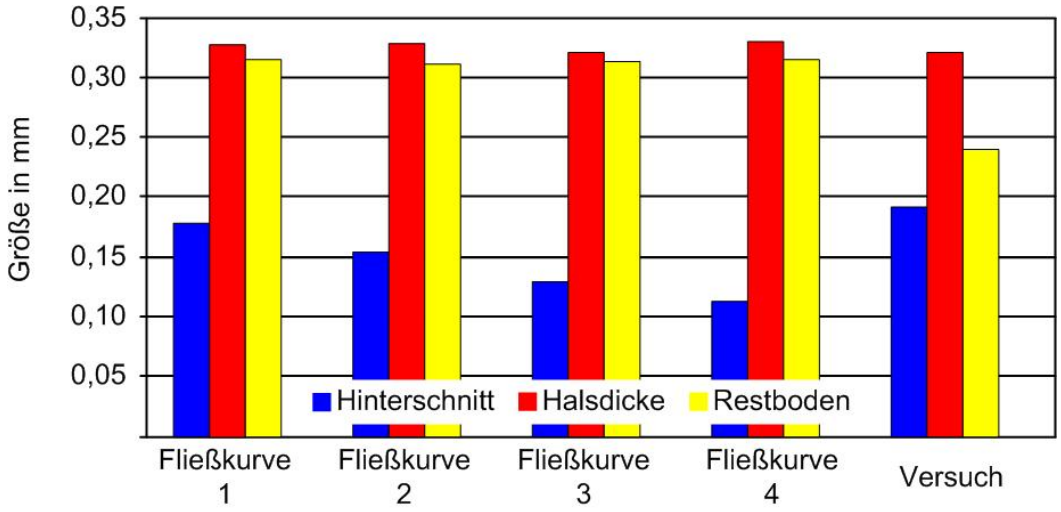


Abbildung 8-21: Abgleich Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,4)

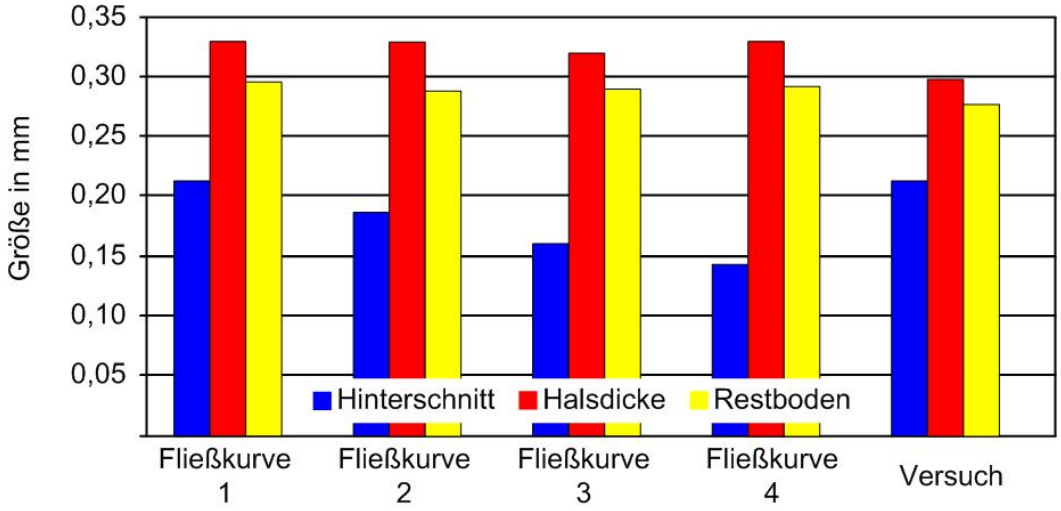


Abbildung 8-22: Abgleich Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,6)

Anhand der Simulation wird deutlich, dass Halsdicke und Restboden kaum Abhängigkeiten von der Fließkurve zeigen. Anders verhält es sich beim Hinterschnitt. Dieser fällt umso geringer aus, je höher die Festigkeit des H340LAD angenommen wird. Die beste Übereinstimmung von Experiment und Versuch wurde mit Fließkurve 1 erzielt. Dies zeigt sich insbesondere bei Überlagerung der realen Schliffbilder mit den Konturen aus der Simulation (blau).

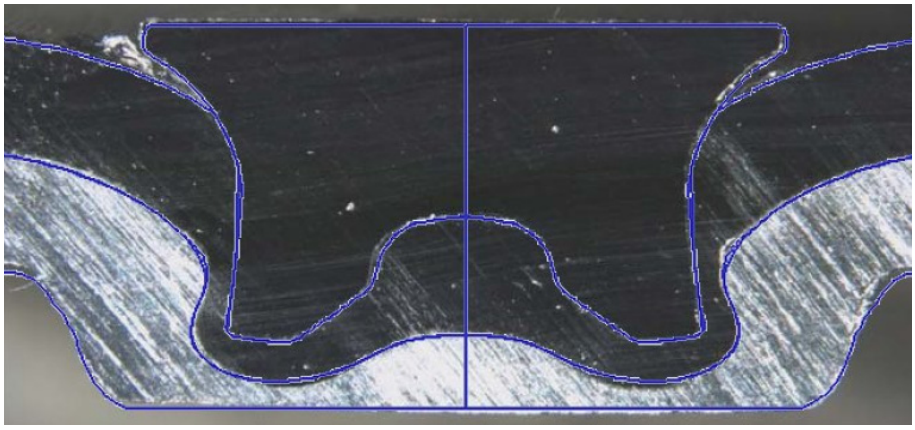


Abbildung 8-23: Überlagerung Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,4)

Verbindung H340 (1,4mm) in AlMg3,5Mn (1,2mm)

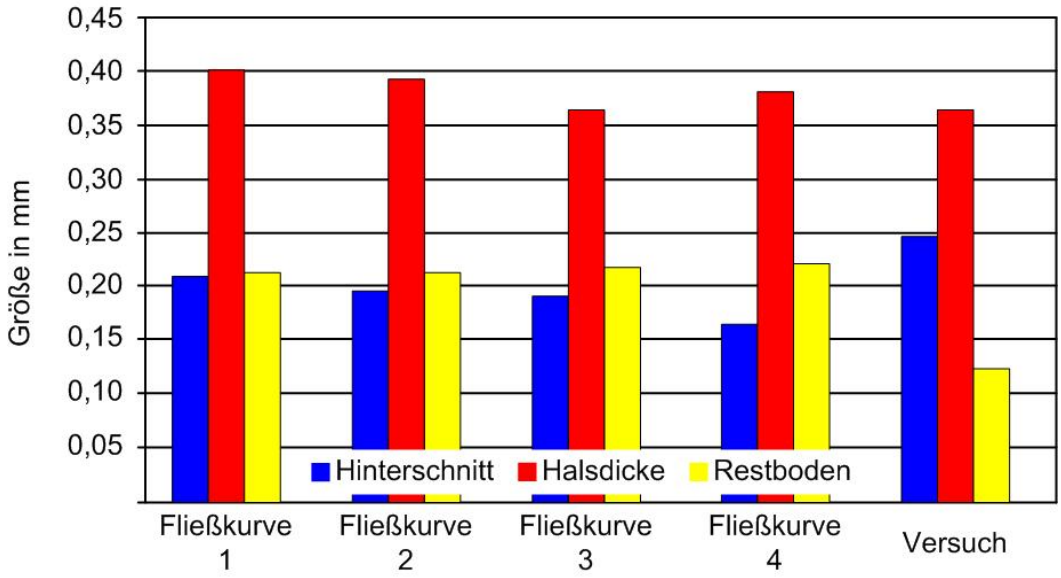


Abbildung 8-24: Abgleich Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,4)

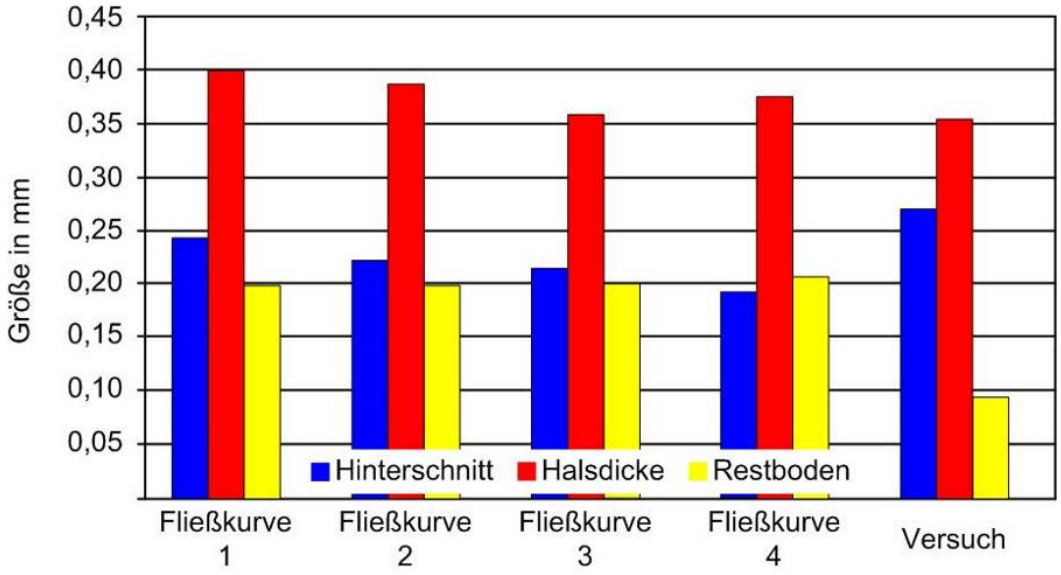


Abbildung 8-25: Abgleich Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,6)

Bei dieser Paarung fällt auf, dass nur noch der Restboden relativ unabhängig von der verwendeten Fließkurve ist. Beim Hinterschnitt ist wieder eine kontinuierliche Abnahme von Fließkurve 1 zu Fließkurve 4 festzustellen. Hinsichtlich des Hinterschnitts, der wichtigsten Bewertungsgröße, zeigt Fließkurve 1 die beste Näherung zwischen Simulation und Versuch. Ingesamt sind die Übereinstimmungen wesentlich schlechter. Dies zeigt sich vor allem beim Restboden.

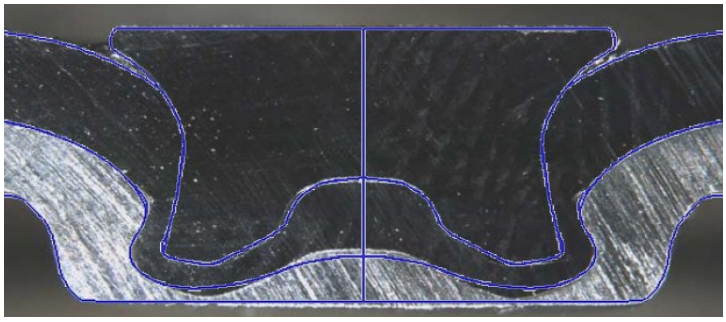


Abbildung 8-26: Überlagerung Versuch / Simulation (Niet 5,3x4,0-H4, Überdr. -0,4)

8.3.2 Einfluss der Niethärte

Bisher wurden lediglich Niete der Härteklasse H4 geschlagen. Diese wiesen der Norm entsprechend eine Härte von 480±30 HV10 auf. Um dennoch Aussagen zum Einfluss der Niethärte treffen zu können, wurden Simulationen durchlaufen. Da bei den beiden betrachteten Paarungen Fließkurve 1 stets die beste Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation aufwies, kam diese auch bei den Untersuchungen zum Einfluss der Niethärte zum Einsatz. Neben den H4-Nieten wurden die Niethärten H2 und H6 (entspricht 410±30 HV10 und 555±30 HV10) im Modell realisiert und verglichen.

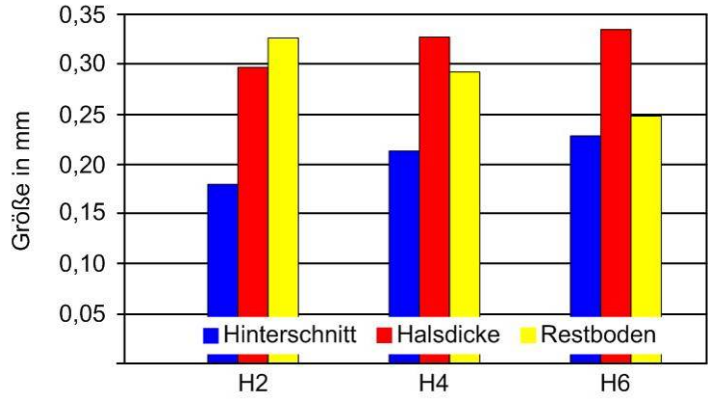


Abbildung 8-27: Einfluss der Niethärte (Niet 5,3x4,0, Überdr. -0,6)

Wie Abbildung 8-27 zu entnehmen ist, steigen mit zunehmender Niethärte sowohl Hinterschnitt als auch Halsdicke. Die Restbodendicke im unteren Blech nimmt mit steigender Niethärte ab. Zurückzuführen sind diese Tendenzen auf die stärkere Verformung der Niete bei abnehmender Niethärte. Dies bedeutet, dass ein Niet der Härte H2 stärker gestaucht wird als ein Niet einer höheren Härteklasse und somit zu mehr Restboden führt. Gleichzeitig wird bei größeren Niethärten mehr Werkstoff unter dem Niet in den Hals- und Hinterschnittbereich verdrängt, was zu steigenden Hinterschnitten und Halsdicken führt.

Abbildung 8-28 zeigt zudem, dass mit zunehmender Niethärte eine verstärkte Hohlraumbildung an der Mantelfläche des Nietes und zwischen den Blechen zu beobachten ist.

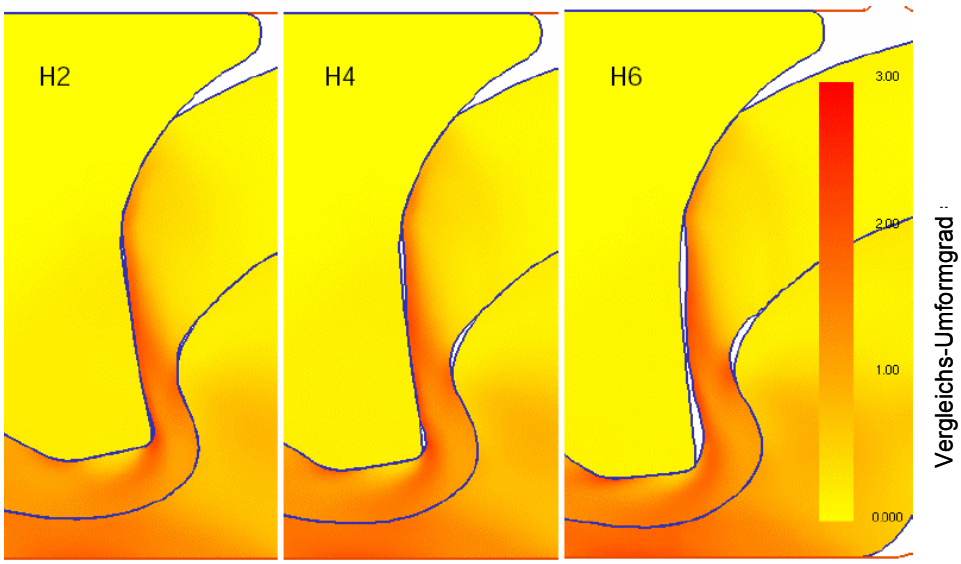


Abbildung 8-28. Hohlraumbildung bei zunehmender Niethärte (Umformgrad)

8.3.3 Sensitivitätsanalyse (Anhang 14)

In der Sensitivitätsanalyse werden die Ergebnisse aller Simulationsrechnungen gegenübergestellt. Neben der Niethärte und der Fließkurve wurden als zusätzliche Parameter die Nietlänge sowie die Blechdicke mit einbezogen. Es ergeben sich 96 Simulationsrechungen. Um die Ergebnisse übersichtlich abbilden zu können, wurden die berechneten Größen in separaten Diagrammen dargestellt.

Hinterschnitt

In Abbildung 8-29 sind die Ergebnisse für die Berechnungen des Hinterschnitts zu sehen.

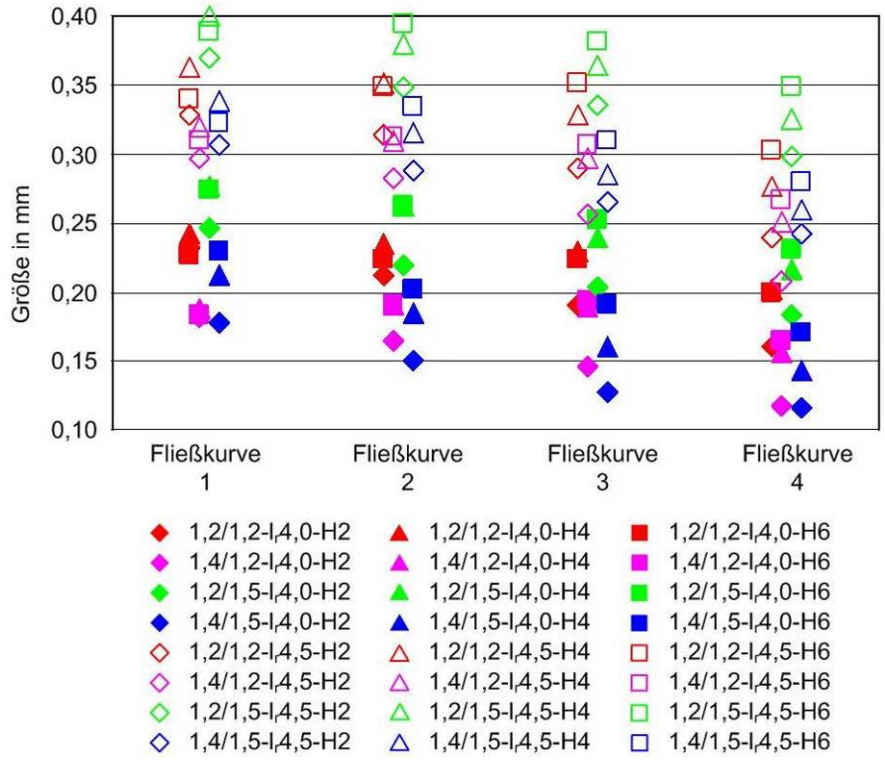


Abbildung 8-29: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bzgl. Hinterschnitt mit Stahl H340 LAD

Nachfolgend wird ein verwendetes Symbol näher erläutert:

◆ 1,2/1,2-I,4,0-H2

1,2/1,2 = Dicke Oberblech/Unterblech

L,4,0-H2 = Niet der Länge 4mm mit einer Härte 2

Aus den Daten der vorangegangenen Abbildung 8-29 können, unabhängig von den verwendeten Fließkurven, folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Verwendung der längeren Niete (4,5mm) wirkt sich positiv auf den Hinterschnitt aus. Im Vergleich mit der kürzeren Nietvariante ergibt sich im Mittel ein Unterschied von ca. 0,1 mm.

- Verbindungen mit stempelseitig geringeren Blechstärken (grün) weisen deutlich höhere Hinterschnitte auf als andere.

- Die Härteklasse H2 (Rauten) führt zu durchweg geringeren Hinterschnitten als identische Verbindungen mit größerer Härte.

Der größte Hinterschnitt wird mit einem dünnen Oberblech und einer Nietlänge von 4,5mm erreicht. Die Niethärte hat einen minimalen Einfluss auf den Hinterschnitt.

Halsdicke

In Abbildung 8-30 sind die Ergebnisse der Berechnungen für die Halsdicke der Verbindung dargestellt.

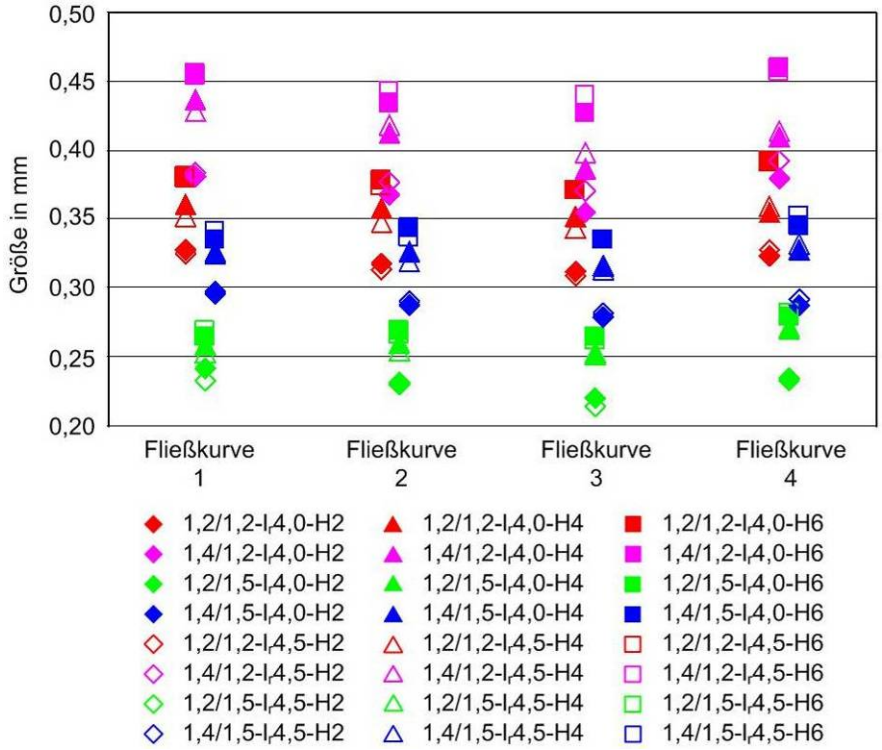


Abbildung 8-30: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bzgl. Halsdicke

Aus den Daten lassen sich unabhängig von der verwendeten Fließkurve folgende Tendenzen erkennen:

- Verbindungen mit Nieten der Länge 4,5 mm weisen im allgemeinen nahezu identische Halsdicken auf wie Verbindungen mit Nieten der Länge 4,0 mm (vgl. nicht ausgefüllte und ausgefüllte Symbole)

- Bei abnehmender stempelseitiger Blechdicke weisen die Verbindungen geringere Halsdicken auf, wobei die Halsdicke um so geringer ausfällt, je größer der Dickenunterschied zwischen den zu fügenden Blechen ist. Entsprechend haben Verbindungen von 1,2 mm in 1,5 mm die geringsten Halsdicken. Bei Paarung von 1,4 mm in 1,2 mm werden die größten Halsdicken erzielt.

- Mit steigender Härteklasse der Niete steigt auch die Halsdicke. Bei ansonsten gleichen Paarungen wurde der Unterschied, der sich aus den unterschiedlichen Klassen ergibt, mit 0,04 mm bis 0,07 mm berechnet.

Hinsichtlich der verwendeten Fließkurve zeigt sich nur eine geringe Abhängigkeit der Halsdicke. Mit höher liegenden Fließkurven nimmt in der Regel die Halsdicke leicht ab. Der Unterschied, der sich mit den verschiedenen Fließkurven bezüglich der Halsdicke ergab, lag bei ca. 0,02 mm bis 0,03 mm.

Restboden

In Abbildung 8-31 sind die Ergebnisse der Berechnungen für den Restboden der Verbindung dargestellt.

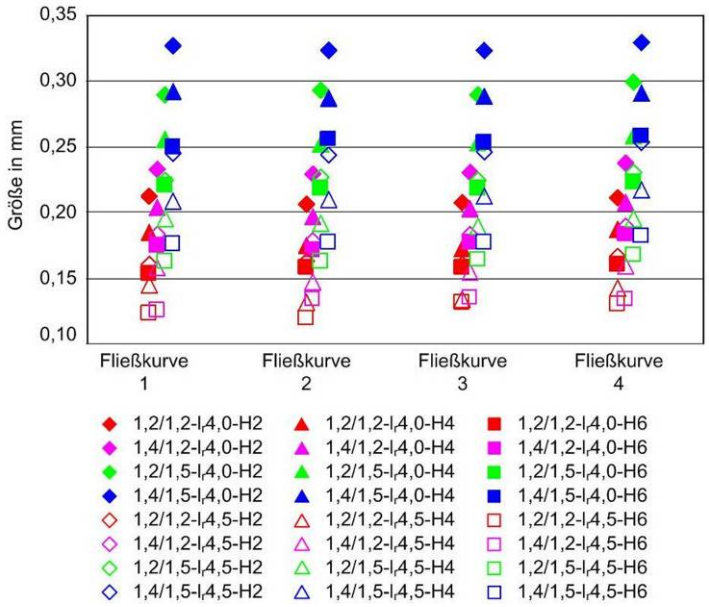


Abbildung 8-31: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bzgl. Restboden

Unabhängig von der für die Berechnungen verwendeten Fließkurve können einige Aussagen getroffen werden:

- Die Verwendung der längeren Niete (4,5mm; nicht ausgefüllte Symbole) wirkt sich negativ auf den Restboden aus. Mit den kürzeren Nieten (4,0mm; ausgefüllte Symbole) werden deutlich bessere Restbodendicken erreicht.

- Verbindungen mit matrizenseitig geringerer Blechdicke bewirken ein Abnehmen des Restbodens. Auch eine geringere Gesamtblechstärke wirkt sich negativ auf den Restboden aus.

- Mit zunehmender Niethärte nimmt der Restboden ab. Bei sonst gleichen Verbindungen werden mit Härteklasse H6 die geringsten, mit Härteklasse H2 die besten Werte für den Restboden erreicht.

Die Abhängigkeit des Restbodens von der für die Berechnung verwendeten Fließkurve ist vergleichsweise gering. Eine eindeutige Tendenz bezüglich einer Optimierungsrichtung kann nicht festgestellt werden.

9 Zusammenfassung

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wurden Festigkeitsuntersuchungen an Aluminium-Aluminium-Verbindungen durchgeführt. Das Referenzverfahren Stanznieten wurde mit zehn anderen Fügeverfahren verglichen. Bei den quasistatischen Scherzuguntersuchungen von Zwei-Punkt-Proben zeigte sich, dass das Nietclinchen etwa 1 kN weniger Festigkeit als das Stanznieten mit Halbhohlniet (6,8 kN) erreicht. Die untersuchten Schraubverfahren und die warmen Fügetechniken erzielten mit mehr als 7 kN hohe Festigkeitswerte.

Bei den Kopfzugversuchen zeigte sich, dass das Nietclinchen deutlich geringere Festigkeitswerte (ca. 50%) als das Referenzverfahren (2,1 kN) er-reicht.

Die untersuchten Nietclinchverbindungen mit Klebstoff erzielten höhere Festigkeitswerte, die mit denen des Stanznietens mit Halbhohlniet zu vergleichen sind. Der Vorteil der Nietclinchverbindungen mit Klebstoff ist, dass sich keine Luftkanäle bilden.

In den zyklischen Untersuchungen schnitt das Nietclinchen besser als das Referenzverfahren ab. Die Dauerfestigkeit der Nietclinchverbindungen übertraf die Werte der Stanznietverbindungen um etwa 12 Prozent nach 10^5 Lastwechseln.

Im Crash-Test zeigte sich, dass die auftretenden inneren Spannungen einer Nietclinchverbindung einen schlechten Einfluss auf die Energieabsorption haben. Diese inneren Spannungen können durch die Verwendung eines Ambosses mit Außenring, anstatt eines herkömmlichen Ambosses minimiert werden. Bei Crash-Profilen mit Klebstoff erreichten die Nietclinchverbindungen eine etwas höhere Energieabsorption als beim Stanznieten mit Halbhohlniet (keine Störung der Klebstoffverbindung). Allerdings knüpfen mehr Fügepunkte als bei der Referenz aus.

Das Nietclinchen bietet die Möglichkeit, Stahl/Aluminium-Mischbauverbindungen erfolgreich zu fügen. Dies zeigt sich insbesondere bei Hybridverbindungen mit Strukturklebstoff. Luftkanäle in der Klebstoffschicht, wie sie beim Halbhohlstanznieten zu finden sind, treten nicht auf. Das Fügeverfahren ist bei Paarungen mit TRIP-Stählen (H400TD) oder Aluminumguss (Material ist zu spröde) an seiner Grenze.

Im Rahmen des Kostenvergleichs hat sich gezeigt, dass zahlreiche Parameter Einfluss auf den Preis einer Punktverbindung haben. Der Preis besitzt eine starke Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzfall (Teilzeit, Schichtbetrieb). Es wurde versucht, alle kostenbeeinflussenden Faktoren auf eine Punktverbindung zu sammeln. Diese Einflüsse wurden in einem Beispiel dargestellt.

Die nächste Aufgabe der Arbeit war, die Schwankungen im Prozess (unter Laborbedingungen) zu untersuchen. Das Untersuchungsprogramm und die Auswertung der Ergebnisse wurde mit einem Versuchsplan von Taguchi durchgeführt (48 Schliffbilder). Ein Vergleich zwischen einem Unter-suchungsprogramm, aufgebaut mit einem fraktionellen faktoriellen Ver-suchsplan (96 Schliffbilder), zeigte vergleichbare Ergebnisse wie bei einem Versuchsplan nach Taguchi.

Diese Auswertung zeigte, dass die Schwankung der Materialstärke im Unter- und Oberblech den größten Einfluss auf die Verbindung haben. Dieser Einfluss spiegelt sich als erstes in der Halsdicke und als zweites im Restboden wider. Die Halsdicke hat einen Einfluss auf die Festigkeit und der Restboden auf die Korrosionsbeständigkeit der Verbindung.

Der Einfluss der Niete selbst (Nietlänge und –härte), ist im Labor nur mit sehr großem Aufwand zu überprüfen. Deshalb wurde für diese Größen eine FEM-Simulation durchgeführt. Dabei ergab sich, dass eine Reduzierung der Nietlänge (von 4,5 mm aus) zu einem geringeren Hinterschnitt führt. Die Nietlänge sowie die Niethärte haben nur einen geringen Einfluss auf die Halsdicke. Bei abnehmender Nietlänge und Niethärte wurde ein größerer Restboden erreicht.

Die Untersuchungen der Arbeit haben gezeigt, dass zum Fügen einer i.O.-Nietclinchverbindung ein Kompromiss zwischen Halsdicke, Hinterschnitt und Restboden gefunden werden muss. Um einen stabilen Prozess zu erreichen, müssen die Schwankungen der Materialstärke von abgepressten Teilen in einer definierten Toleranz liegen. Um eineen stabilen Prozess gewährleisten zu können, muss diese Toleranz durch Untersuchungen in der Produktion gesichert werden.

Literaturverzeichnis

[1] Intranet der BMW Group, Stand 2005

[2] W. Kleppmann: „Taschenbuch Versuchsplanung“, Hanser Verlag, 2003

[3] B. Klein: „Versuchsplanung DoE“, Oldenbourg Verlag, 2004

[4] IWU-Bericht Nr. 04 410 006: „Entwicklung von Nietgeometrien für das Nietclinchen, die in ihrer Außengeometrie den Halbhohlstanznieten entsprechen“, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 2004

[5] IWU-Bericht Nr. 05 430 007: „Sensitivitätsanalyse beim Nietclinchen“, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 2004

[6] O. Hahn / J. R. Kurzok: „Umformtechnisches Fügen von vorverformten Halbzeuge, Teil 1 Stahl“, Shaker Verlag 1998

[7] Ahlberg, F.: Simulation of self piercing riveting of aluminium substrates with aluminium and steel rivets Bericht Nr. IM-2002-014 des Institutet för Metallforskning Sweden, 2002

[8] Beenken, H.: Perspektiven des umformtechnischen Fügens von kaltgewalzten und oberflächenveredelten Stahlblechen. In: Stahl 2/1994, S.20-22

[9] Beyer, R.: Ein einseitiges Rennen – Durchsetzfügen und WPS im Kostenvergleich. In: Produktion 15/1995, S. 9

[10] Boomer, R. D.: Robust High Productivity Resistance Spot Welding of Aluminium, 2002

[11] Internetseite Firma Kuka

[12] Braithwaite, F.: On the fatigue and consequent fracture of metals. Proc. Inst. Civil Engrs. 13 (1853-1854) 463

[13] Budde, L.; Gao, S.: „ Verfahren zum Herstellen einer Nietverbindung“, Offenlegungsschrift DE 44 04 659 A1, Anmeldetag 14. Februar 1994

[14] Budde, L.; Pilgrim, R.: Stanznieten und Durchsetzfügen. Die Bibliothek der Technik Bd. 115, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech 1995

[15] Brune, M.: „ Innovative Leichtbaukonzepte im Automobilbau – Anwendungen und Zukunftstrends“ , Dresdner Leichtbausymposium 2002, Dresden, 13.-15. Juni 2002

[16] Dölle, N.-J.: Numerische Simulation des Fügeprozesses beim Stanznieten mit Halbhohlniet von duktilen Blechwerkstoffe. Dissertation, Universität-GH Paderborn, 2001

[17] Dorn, L.; Baker, S.: Al-Punktschweißen mit Verbundelelektroden, in: Schweißen und Schneiden, 2002

[18] Donhauser, G.; Kalich, J.; Liebrecht, F.: „ Verbessertes Arbeitsaufnahmevermögen und flexiblere Einsetzbarkeit – Neue Entwicklungen beim Stanznieten mit Vollniet“ , 7. Paderborner Symposium Fügetechnik, Paderborn, 2000

[19] Ejot Verbindungstechnik GmbH & Co.KG, FDS-Die fließlochformende Schraube für höherfeste Verbindungen, technische Broschüre, NN

[20] Göklü, S; Gösling, P.: „ Stanznieten moderner hochfester Stähle“ , 7. Paderborner Symposium Fügetechnik, Paderborn, 2000

[21] Grundler, E.: Auf der sicheren Seite mit Clinchniet-Verbindungen. In: Blech InForm 2/2004, Carl Hanser Verlag, München, S.40-41

[22] Habenicht, G.: Widerstandspunktschweißen von hochfesten Stahlblechen im Karosseriebau, TU München, 1987

[23] Hahn, O.; Voelkner, W.: Untersuchungen zur Optimierung des Stanznietens mit Halbhohlniet als universelles Fügeverfahren zum Verbinden von Blechen und Profilen. Bericht Nr. 85, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover 1996

[24] Hahn, O.; Schulte, A.; Herter, H.; Göklü, S.; Stegemann, T.: Eignung des Durchsetzfügens und des Stanznietens zum Fügen höherfester Stahlbleche. Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. Forschungsbericht P 283, Düsseldorf, 2000

[25] Hahn, O; Bangel, M.; Thoms, V.; Liebrecht, F.: Durchsetzfügen bei Hybridbauweisen aus Stahl und Aluminium. Bericht Nr. 169, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover 2001

[26] Hahn, O.; Draht, T.; Thoms, V.; Liebrecht, F.: Entwicklung der kombinierten Fügetechnik für Hybridbauweisen am Beispiel Stanznieten-Kleben. Bericht Nr. 180, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover 2002

[27] Hahn, O.; Wetter, H.: Fügen von Aluminiumfeinblechen mittels Stanznieten und Kleben unter Verwendung von Klebebändern und Klebstofffolien. Bericht Nr. 205, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover 2003

[28] Haller, J.; Dietrich, S.: „ Clinchnieten und Nietclinchen“ ; IIR Fachforum „ Fügetechnologien im Automobilbau“ , Dresden, 9./10. März 2004

[29] Haldenwanger, H.-G.: Leichtbau - eine Notwendigkeit im Fahrzeugbau – Auswirkungen auf die Auswahl von Werkstoffen, Verfahren, Recycling. Tagungsband zur Vortragsveranstaltung „Innovative Fügetechniken für Leichtbaukonstruktionen“, Uni-GH Paderborn, 7.-8. November 1996, S. 1-6

[30] Haldenwanger, H.-G.; Walther, U.: „ Entwicklung wärmearmer Fügetechniken für die Mischbauweise“ , 7. Paderborner Symposium Fügetechnik, Paderborn, 2000

[31] Hennigs, J.; Maier, J.: Vergleich mechanischer Fügeverfahren mit dem Widerstandspunktschweißen am Beispiel der Aluminiumwerkstoffe AlMg3 und AlMg0.4Si1.2, DVS-Bericht 96, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1985

[32] Hück, M.: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Grauguss. Stahl und Eisen 101 (1981) 24, S.1495-1498

[33] Israel, M.: Vergleichende Untersuchungen zur Festigkeit und zum Versagensverhalten umformgefügter Verbindungen unter statischer und zyklischer Belastung. Diplomarbeit HTW Dresden / Fraunhofer IWU, 2005

[34] Jesche, F.: Numerische Simulation beim Umformfügen. 2nd European Deform User`s Meeting, 05. Juni 2003, Steinenbronn

[35] Kap-herr, K.:Schrauben Betzer, PentaFlow, IIR Fachforum „ Fügetechnologien im Automobilbau“ , Dresden, 9./10. März 2004

[36] Khezri, R.: Finite elemente simulation of self-piercing riveting of deep drawing and rephosphorized sheet steels, diploma work, Bericht Nr. IM-2000-025 des Institutet för Metallforskning Sweden, 2000/105

[37] Klasfauseweh, U.: Beitrag zur Simulation nichtschneidender Durchsetzfügevorgänge. Dissertation Universität-GH Paderborn, 1994

[38] Klemens, U.; Hahn, O.; Kurzok, J.-R.: Garantie für festen Zusammenhalt – Mit Nieten und Clinchen zu modernen Leichtbaustrukturen. In: Bänder, Bleche, Rohre 3/2000, S.44-48

[39] Kratzer, R.: Untersuchungen zu Anlegierungsmechanismen beim Punktschweißen von Aluminium, Diplomarbeit an der FH München, 1994

[40] Leuschen, B.: Fügen von Aluminiumwerkstoffen; Aluminiumwerkstofftechnik für den Automobilbau, Technische Akademie Esslingen, 1991

[41] Maofeng Fu, P.K. Mallik: Fatigue of self-piercing riveted joints in aluminium alloys 6111, Int. Journal of Fatigue 25 (2003) 183-189

[42] Mauermann, R.; Dietrich, S.: „ Entwicklungsfortschritte beim matrizenlosen Clinchen und Nietclinchen“ , 7th German and 2nd European Automotive Conference „ Joining in Automotive Lightweight Design“ , Bad Nauheim, 8./9. April 2003

[43] In: Auto-Technology 1/2003

[44] Opper, R.: Hold Stamping Fastening bei Firma Tucker, Präsentation 2001

[45] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, Springer-Verlag Berlin, 1998

[46] Pander, M.; Schneider, F.; Liebig, H.-P.: Bewegung in der Druckfügesimulation – 3D-FEM-Simulation unterstützt Konstruktion von Fügewerkzeugen mit beweglichen Matrizenelementen. In: Blech Rohre Profile 6/1999, S. 44-47

[47] Pander, M.: Thermische Einflüsse auf Herstellung und Tragverhalten von Durchsetzfügeelementen an Leichtbaukomponenten insbesondere bei Einsatz neuer Blechwerkstoffe, Dissertation TU Hamburg-Harburg, 2001

[48] Reinstettel, M.: „ Stanznieten in der Rohbau-Produktion der BMW Group“, IIR Fachforum „ Fügetechnologien im Automobilbau“ , Dresden, 9./10. März 2004

[49] SBI-Produktion: Plasma Spot Welder PSW 500, Punktschweißen zum Verbinden von Stahl- und Aluminiumblechen verschiedener Stärken, Technische Broschüre, NN

[50] Schijve, J.: Fatigue of structures and materials. Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publishers, 2001

[51] Schijve, J.: Shear lips on fatigue fractures in aluminium alloys. Engineering Fracture Mechanics 14 (1981), S. 789-900

[52] Spingler, J.-C.; Mauermann, R.; Wössner, J.: Durchsetzfügen – taumelnd geht es leichter. In: Technische Rundschau 10/1999, S. 62-63

[53] Spingler, J.-C.; Wössner, J.; Kalich, J.; Liebrecht, F.: „ Taumelfügen – Neues Verfahrenskonzept beim Clinchen und Stanznieten“ , 7. Paderborner Symposium Fügetechnik, Paderborn, 2000

[54] Tanaka, H.: Spot FSW, Vortrag Firma Kawasaki, 04-2003

[55] Thoms, V.; Kalich, J.: Fügen von Aluminiumdruckgusswerkstoffen mit Aluminiumblechen und -profilen durch Stanznieten mit Halbhohl- und Vollniet. Bericht Nr. 173, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover, 2001

[56] Übele, K.: TOX Clinchnieten-einfach genial, Prospekt 2003

[57] Vopel, H. G.; Hillmann, J.: Berücksichtigung der Schweißpunkte bei FE-Modellierung von Karosserien, VDI-Berichte Nr. 1283, VDI-Verlag Düsseldorf, 1996

[58] Westkämper, E.; Schloske, A.: Methoden der Qualitätssicherung, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetriebe - Universität Stuttgart

[59] Quentin, H.; Versuchsmethoden im Qulitäts-Engineering; Vieweg/Braunschweig 1994

[60] Linß; Qualitätsmanagment für Ingenieure; FV Leipzig

[61] Pfeifer; Qualitätsmanagment; Hanser Verlag

[62] Krottmaier; Versuchsplanung; Verlag Industrielle Organisation Zürich / Verlag TÜV Rheinland

[63] Klein, B.; Versuchsplanung; Oldenburg

[64] Backhaus; Multivariate Analysemethoden; Springer Verlag

[65] Genichi, Taguchi; Experimental Designs; Maruzen Publishing Company

Normen

[A] BMW Group Standard GS 96001-1: „Stanzniete, Halbhohlniet (Maße und Technische Lieferbedingungen)“, 7-2004

[B] BMW Group Standard GS 96001-2: „Qualitätsmerkmale und Qualitätsprüfung von Stanznietverbindungen“, 7-2004

[C] BMW Group Standard GS 96001-4: „Stanzniete, Vollniet (Maße und Technische Lieferbedingungen)“, 7-2004

[D] BMW Group Standard GS 96001-5: „Qualitätsmerkmale und Qualitätsprüfung von Vollstanznietverbindungen“, 7-2004

[E] BMW Group Standard GS 96006: „Fügetechnik, Clinchen (Maße, Zeichnungseintrag, Konstruktionshinweise,)“, 7-2004

[F] BMW Group Standard GS 96005-1: „Stähle für Karosseriebau (Normenübersicht und Bezeichnungssysteme)“, 7-2004

[G] BMW Group Standard GS 96005-9: „Stähle für Karosseriebau (Kaltgewalzte mikrolegierte Stähle)“, 7-2005

[H] BMW Group Standard GS 91012: „Scherzugprüfung und Kopfzugprüfung“, 10-2005

[I] BMW Group Standard GS 91013-1: „Aluminiumblechwerkstoffe für Karosserie und Fahrwerk (Tafeln und Bänder)“, 7-2005

[J] BMW Group Standard GS 91013-3: „Aluminiumblechwerkstoffe für Karosserie und Fahrwerk (Tafeln und Bänder, Legierungen – Serie 5000)“, 7-2005