



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelor-Thesis

Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

**Experimentelle und numerische Untersuchung des
Setzprozesses von Schließringbolzen im Flugzeugbau**

Suntke Remmers

14. Januar 2009

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik + Flugzeugbau
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Airbus Deutschland GmbH
Standort Bremen
Airbus-Allee 1
28199 Bremen



Verfasser: Suntke Remmers
Abgabedatum: 14.01.2009

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Martin
2. Prüfer: Dr.-Ing. Jörg Jendry

Industrielle Betreuung: Dr.-Ing. Jörg Jendry

Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbst angefertigt zu haben. Die benutzte Literatur ist vollständig angegeben.

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei allen Kollegen der Abteilung EDSWAG (Werk Bremen) der Airbus Deutschland GmbH bedanken, die zum Gelingen dieser Bachelor-Thesis beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt hierbei Herrn Dr.-Ing. Jörg Jendry für seine große Hilfsbereitschaft und die gute Betreuung während des sechsmonatigen Praktikums. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Martin möchte ich mich für die Betreuung seitens der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg bedanken.

Das Praktikum im Werk Bremen hat mir nicht nur sehr viel Spaß gemacht, sondern meine theoretischen Grundkenntnisse aus dem Studium gefestigt. Ich konnte selbständig arbeiten, aber auch jederzeit auf die Hilfe meines Betreuers und Vorgesetzten zurückgreifen.

Mir wurden viele Beispiele der praktischen Anwendung des Gelernten aufgezeigt und ich habe neue Aspekte und Anregungen für meine Zukunft gewonnen.

Ein Praktikum bei der Airbus Deutschland GmbH im Werk Bremen kann ich weiterempfehlen.

.....
Suntke Remmers

Bremen, den 08.01.2009

I	Formelzeichen	III
II	Abkürzungen	IV
III	Abbildungsverzeichnis	V
IV	Tabellenverzeichnis	VIII
V	Diagrammverzeichnis	IX
1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	2
3	Stand der Technik	4
3.1	<i>Niettechnik im Flugzeugbau - eine kleine Einführung</i>	4
3.1	<i>Das Schließringbolzen-System</i>	7
3.2	<i>Arten von Schließringbolzen bei AIRBUS</i>	8
3.3	<i>Setzprozess der Schließringbolzen</i>	10
4	Experimentelle Untersuchung	15
4.1	<i>Nomenklatur der Versuchselemente</i>	15
4.2	<i>Testmatrix</i>	18
4.3	<i>Lockbolt-Verbindung und Versuchsvorbereitung</i>	22
4.4	<i>Versuchsdurchführung</i>	26
4.4.1	<i>Lockbolt-Installationen</i>	26
4.4.2	<i>Scherzugversuche</i>	28
4.4.3	<i>Kopfzugversuche</i>	30
4.5	<i>Versuchsergebnisse</i>	32
4.5.1	<i>Lockbolt-Installationen</i>	32
4.5.2	<i>Scherzugversuche</i>	37
4.5.3	<i>Kopfzugversuche</i>	42
4.5.4	<i>Schliffbilder</i>	46
5	Simulation	49
5.1	<i>Die Finite-Element-Methode</i>	49
5.2	<i>Anwendungen der FE-Methode</i>	50
5.2.1	<i>Lineare statische Berechnungen</i>	50
5.2.2	<i>Nichtlineare statische Berechnungen</i>	52
5.2.3	<i>Strukturdynamische Berechnungen</i>	52
5.3	<i>Das FEM-Programm ABAQUS 6.7</i>	53

5.3.1	Vorgehensweise einer FEM-Untersuchung in ABAQUS	54
5.3.1.1	Der Pre-Prozessor	55
5.3.1.2	Die Analyse.....	56
5.3.1.3	Der Post-Prozessor.....	56
5.4	<i>Modellerstellung in ABAQUS 6.7.....</i>	57
5.4.1	Ausgangsmodell.....	57
5.4.2	Geometrie und Vernetzung der Blechkante des unteren Fügepartners... 60	
5.4.3	Vernetzung der Blechkante des oberen Fügepartners.....	69
5.5	<i>Absicherung einer quasi-statischen Lösung in Abaqus/ Explizit.....</i>	72
5.6	<i>Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Experimenten.....</i>	78
5.6.1	Geometrie des Collars aus der Simulation.....	80
5.6.2	Reibungseinfluss	83
5.6.3	Ermittlung einer Korrekturfunktion für die experimentellen Kraft-Weg-Verläufe	85
6	Zusammenfassung und Ausblick	87
7	Literaturverzeichnis	89
8	Anhang	91
	<i>Anlage I: Beispiele für Passbolzen mit Universal- und Senkkopf [ABS].....</i>	<i>91</i>
	<i>Anlage II: Auszug aus Airbus-Norm: Bezeichnung für einen Lockbolt</i>	<i>92</i>
	<i>Anlage III: Auszug aus Airbus-Norm: Bezeichnung für einen Collar</i>	<i>93</i>
	<i>Anlage IV: Messungen der Bohrungen [in mm].....</i>	<i>94</i>
	<i>Anlage V: Messungen der Niete [in mm].....</i>	<i>96</i>
	<i>Anlage VI: Messungen der Passung und des Nietkopfüberstandes [in mm].</i>	<i>99</i>
	<i>Anlage VII: Klasseneinteilung für Längenänderungs-Messeinrichtungen[6]</i>	<i>102</i>
	<i>Anlage VIII: Typische Kraft-Weg-Kurve eines Scherzugversuches [2a].....</i>	<i>103</i>
	<i>Anlage IX: Maße der Bleche [in mm].....</i>	<i>104</i>
	<i>Anlage X: Installationsergebnisse</i>	<i>105</i>
	<i>Anlage XI: Scherzugergebnisse.....</i>	<i>108</i>
	<i>Anlage XII: Protokoll der Schlifffildanfertigung vom 06.11.2008.....</i>	<i>112</i>
	<i>Anlage XIII: Gekürzte ABAQUS Eingabe Syntax mit Erläuterungen.....</i>	<i>135</i>

I Formelzeichen

a) Lateinisch groß

Formelzeichen	Dimension	Benennung
[A]	N/mm	Gesamtsteifigkeitsmatrix
E	MPa, N/mm ²	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
{F}	N	Lastvektor
G	MPa, N/mm ²	Gleitmodul
[K]	N/mm	Elementsteifigkeitsmatrix
L	mm	Elementlänge
T	s	Periodendauer

b) Lateinisch klein

Formelzeichen	Dimension	Benennung
c_d	m/s	Schallgeschwindigkeit
{d}	mm	Gesamtknotenverschiebungsvektor
f	1/s	Eigenfrequenz
t	s	Zeit

c) Griechisch

Formelzeichen	Dimension	Benennung
ε_{pl}	-	plastische Dehnung
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	(N·s)/mm ⁴	Dichte
σ	N/mm ²	Spannung
δ	mm/N	Nachgiebigkeit

II Abkürzungen

Abkürzung	Benennung
ABS	Airbus-Norm für Schließringbolzen
Al	Aluminium
ASNA	Airbus-Norm für Schließringe
bzw.	beziehungsweise
CAE	Complete Abaqus Environment
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
d. h.	das heißt
FE	Finite-Element
FEM	Finite-Element-Methode
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GP	Groove Proportioned
kN	Kilonewton
LB	Lockbolt
LGP	Light Groove Proportioned
m	Meter
ms	Millisekunde
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
N	Newton
NASM 1312-4	National Aerospace Standard, Lap Joint Shear
NASM 1312-8	National Aerospace Standard, Tensile Strength
o. g.	oben genannt
RP	Reference Point
s	Sekunde
sog.	sogenannt
Ti	Titan
Vgl.	Vergleiche
XPL	Lightweight Extended Performance
z. B.	zum Beispiel

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Schließringbolzen-System [3]	6
Abbildung 2	Varianten von Lockbolts	6
Abbildung 3	Schließringbolzen-Aufbau	7
Abbildung 4	Lockboltsetzprozess in der Praxis [2b]	8
Abbildung 5	Anwendung umformtechnischer Fügeverfahren im Flugzeugbau [13]	9
Abbildung 6	Pull- und Stump-Typ der Lockbolts [3]	10
Abbildung 7	Setzprozess des Lockbolts als Pull-Typ [3]	11
Abbildung 8	Lehre zur Qualitätssicherung einer Lockbolt-Verbindung [2a]	12
Abbildung 9	Lockbolt des Typs ABS 0548 VHK 3-04 mit Collar	21
Abbildung 10	Scherzugversuch – Probe nach NASM 1312-4	23
Abbildung 11	Scherzugversuch – Probe nach NASM 1312-4	23
Abbildung 12	Scherzugversuch – Probe nach NASM 1312-4	24
Abbildung 13	Beispiel für eine Probenbezeichnung nach Nomenklatur	24
Abbildung 14	Setzwerkzeuge	26
Abbildung 15	Adapter-Geometrie	26
Abbildung 16	Einsetzen des Passbolzens durch Einschlagen [2a]	27
Abbildung 17	Kopfzugversuch – Probe nach NASM 1312-8	29
Abbildung 18	Kopfzugversuchs-Apparatur nach NASM 1312-8	30
Abbildung 19	OLYMPUS SZ61	33
Abbildung 20	Definition der Messgrößen am Collar	34
Abbildung 21	Mikroskop-Aufnahme der Probe mit variiertem Nenndurchmesser (=5,6mm) des Bolzen (Al-LB-Ga-S1-2)	36

Abbildung 22	Blechabscherung nach Scherzug an Probe Al-LB-Fa-2-1/Fa-2-2	38
Abbildung 23	Collar-Versagen nach Scherzug an Probe Al-LB-Ca-4-1/Ca-4-2	38
Abbildung 24	Übersicht über die Versagensmodi am Lockbolt nach Kopfzug	41
Abbildung 25	Probe Al-LB-Fa-K3-1/Fa-K3-2 nach Kopfzug	42
Abbildung 26	Übersichtsaufnahme von Niet 26 einer Referenz-Verbindung (Al-LB-A-7-1/Al-LB-7-2)	45
Abbildung 27	Collar-Vermessung aus der Schliffbildanalyse	46
Abbildung 28	Typische FE-Programmstruktur [10]	52
Abbildung 29	Zusammenbau des ABAQUS-Modells	57
Abbildung 30	Definition der einzelnen Simulationssteps [12]	58
Abbildung 31	Geometrie und Vernetzung der Fügepartner	60
Abbildung 32	Verhalten der Fügepartner beim Einziehvorgang	60
Abbildung 33	Abknickende Ecke beim Einziehen des Schließringbolzen	61
Abbildung 34	Vergleich zwischen alter und neuer Vernetzung im kritischen Bereich des unteren Fügepartners	62
Abbildung 35	Einziehvorgang bei neuer Vernetzung der kritischen Ecke	62
Abbildung 36	Konstruktion und neue Vernetzung der Übergangsfase	63
Abbildung 37	Einziehvorgang für vier ausgewählte Zeitpunkte	63
Abbildung 38	Vergleichsspannung nach von Mises entlang der linken Blechkante des unteren Fügepartners mit „harter“ und „weicher“ Ecke	65
Abbildung 39	Radialspannung entlang der linken Blechkante des unteren Fügepartners „mit“ und „ohne“ Fase	66
Abbildung 40	Vernetzung am oberen Fügepartner im Bereich der Senkung mit 20 Elementen	69
Abbildung 41	Vernetzungsvarianten am oberen Fügepartner	69

Abbildung 42	Auswerteweg entlang der Blechkante des oberen Fügepartners und Vergleichsspannung während des STEP 2	70
Abbildung 43	Vergleichsspannung nach von Mises während des STEP 3 im Bereich der Senkung des oberen Fügepartners	71
Abbildung 44	Energie-Diagramm mit kinetischer und innerer Energie für den Umformvorgang	73
Abbildung 45	Energie-Diagramm mit kinetischer und innerer Energie für den Klemmvorgang	75
Abbildung 46	Energie-Diagramm mit kinetischer und innerer Energie für den Einziehvorgang	76
Abbildung 47	Definition der Messgrößen am verformten Collar	79
Abbildung 48	Definition der Messgrößen am unverformten Collar	80
Abbildung 49	Maße am Collar aus dem ABAQUS-Sketcher	81
Abbildung 50	Geometrievergleich nach dem Umformvorgang ohne Reibung (links) und mit Reibung (rechts)	84

IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Vor- und Nachteile des Nietens gegenüber dem Schweißen u. Kleben	5
Tabelle 2	Vor- und Nachteile der Schließringbolzen-Verbindung gegenüber herkömmlichen Nietverbindungen [vgl. 9]	13
Tabelle 3	Konvention zur Nomenklatur der Elemente einer Nietverbindung	16
Tabelle 4	Testmatrix I für AI-LB-Verbindungen	18
Tabelle 5	Testmatrix II für AI-LB-Verbindungen	19
Tabelle 6	Auszug aus der ABS 0548-3-4	19
Tabelle 7	Gesamtaufstellung über die Versuche der AI-LB-Systeme	20
Tabelle 8	Probenmaterial und –geometrie [2c] [8]	22
Tabelle 9	Technische Daten der Taurus 4	25
Tabelle 10	Technische Daten der Zugprüfeinrichtung Zwick 100 [6]	28
Tabelle 11	Bleche der Scherzugproben	29
Tabelle 12	Bleche der Kopfzugproben	30
Tabelle 13	Collar-Maße nach der Installation	35
Tabelle 14	Übersicht über die Bruchlasten und Versagensarten der verschiedenen Probenreihen nach Scherzugversuch	37
Tabelle 15	Übersicht über die Bruchlasten und Versagensarten der verschiedenen Probenreihen nach Kopfzugversuch	42
Tabelle 16	Vergleich der ermittelten Messwerte am Collar mit SZ61 und AX70	46
Tabelle 17	Vergleich der Prozessorzeit bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten	74
Tabelle 18	Collar-Maße nach der Installation im Vergleich	79
Tabelle 19	Experimentelle Vermessung der Collar im Vergleich zu den Eingabedaten in der Simulation	81

V Diagrammverzeichnis

Diagramm 1	Kraft-Weg-Vergleich während der Installation für verschiedene Lockbolt-Fügevarianten	31
Diagramm 2	Kraft-Zeit-Vergleich während der Installation für verschiedene Lockbolt-Fügevarianten	32
Diagramm 3	Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A nach Scherzug	39
Diagramm 4	Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Ba [Klemmlänge = 6, 6 mm] nach Scherzug	40
Diagramm 5	Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Fa [Übergangspassung] nach Scherzug	40
Diagramm 6	Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A nach Kopfzug	43
Diagramm 7	Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Fa [Übergangspassung]	43
Diagramm 8	Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Ca [maximaler Klemmlängenbereich]	44
Diagramm 9	Kraft-Weg-Verlauf für Variation „mit“ und „ohne“ Fase beim Einziehvorgang (STEP 2)	67
Diagramm 10	Kraft-Weg-Verlauf für Variation „mit“ und „ohne“ Fase beim Umformvorgang (STEP 3)	68
Diagramm 11	Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A im Vergleich zum FE-Modell bei der Installation	77
Diagramm 12	Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A im Vergleich zum FE-Modell mit verschiedenen Zeitschrittweiten bei der Installation	78
Diagramm 13	Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A im Vergleich zum FE-Modell „mit“ u. „ohne“ Reibung bei der Installation	83
Diagramm 14	Ermittlung der Nachgiebigkeit des Systems über die Korrekturfunktion	86
Diagramm 15	Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A im Vergleich zum FE-Modell bei der Installation nach Korrektur	86

1 Einleitung

Im Flugzeugbau werden heutzutage zur Montage hochbeanspruchter Bauteile überwiegend Nietverfahren angewendet. Bei der Herstellung eines mittleren Passagierflugzeuges werden bereits über eine Million Niete verwendet. Bei der Airbus Deutschland GmbH wird unter anderem das sog. Lockbolt-System eingesetzt. Eine derartige Verbindung besteht aus einem Schließringbolzen (Lockbolt) und einem Schließring (Collar). Durch Umformen des Schließrings in entsprechende Verriegelungsrillen des Bolzens wird eine kraft- und formschlüssige Verbindung erzeugt.

Vor der Einführung neuer Verbindungselemente in der Flugzeugmontage wird grundsätzlich eine Überprüfung dieser Systeme durchgeführt, welche heutzutage fast ausschließlich experimentell ermittelt wird, da genaue Simulationstools zurzeit nicht vorhanden sind. Diese Methode ist allerdings sehr zeit- und kostenaufwendig. Eine FEM-Simulation soll deshalb eingesetzt werden, um die Verbindungselemente zu optimieren und den Testaufwand zu minimieren.

In der Abteilung *Assembly Technologies* (EDSWAG) der Airbus Deutschland GmbH wurde bereits ein FE-Modell für Lockbolt-Verbindungen erstellt.

Zur späteren Verifikation dieses Simulationstools werden Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen zum Vergleich benötigt.

Die Ergebnisse werden dann anhand von Geometrie- und Prozessdaten dem simulierten Fügeprozess gegenübergestellt.

Das Simulationsmodell soll zur Optimierung des Fügeprozesses, hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Festigkeitseigenschaften, sowie später zur Verkürzung der Entwicklungszeiten und der Verringerung des experimentellen Versuchsaufwands im Rahmen der Zertifizierung, dienen.

2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, den Setzprozess von Lockbolt-Systemen experimentell zu analysieren und das bestehende FE-Modell in der Software ABAQUS zu optimieren.

Zunächst soll daher der Setzprozess der Lockbolt-Verbindungen anhand der Variation verschiedener Fügeparameter näher untersucht und dokumentiert werden. Danach ist das Festigkeitsverhalten dieser Verbindungen anhand von Scherzug- und Kopfzugversuchen zu untersuchen.

Im Speziellen soll die Verifikation des FE- Modells anhand der experimentell aufgenommenen Kraft-Weg-Verläufe für den Setzprozess und für den Bolzenabriss sowie anhand von Schliffbildern und einem Abgleich der Geometrie vor und nach der Installation durchgeführt werden.

Hierzu wird, ausgehend von einer Referenz-Lockbolt-Verbindung, eine Testmatrix definiert.

Von dieser Referenz-Lockbolt-Verbindung werden verschiedene den Fügeprozess beeinflussende Parameter wie Klemmlänge, Bolzendurchmesser, Passung und Nietkopf variiert und deren Einfluss auf den Prozessverlauf evaluiert.

Im Einzelnen sollen folgende Arbeitspunkte bearbeitet werden:

Experimentell:

- Erstellung einer Testmatrix für die erforderlichen Versuchskombinationen
- Ermittlung der benötigten Lockbolts bezüglich Länge und Durchmesser gemäß Testmatrix
- Ermittlung der Probengeometrie für Scherzugversuche nach NASM1312-4 bzw. für Kopfzugversuche nach NASM1312-8
- Materialplanung durch Berücksichtigung der Anzahl der Proben, Abmessungen u.ä.
- Herstellung der Proben (Zuschnitt, Oberflächenbehandlung, Setzen der Elemente etc.)

2 Aufgabenstellung

- Versuchsdurchführung
 - Installation nach Airbus-Fertigungs-Handbuch 80-T-34-5812
 - § Vermessung der Verbindungselemente vor und nach Installation (Lockbolt-Collar-Geometrie und Kopfüberstand)
 - § Messung und Dokumentation der Kraft-Weg-Verläufe
 - § Messung und Dokumentation der Kraft-Zeit-Verläufe
 - § Erstellung und Auswertung von Schliffbildern
 - Scherzugversuche nach NASM 1312-4
 - § Messung und Dokumentation der Kraft-Weg-Verläufe
 - § Messung und Dokumentation der Kraft-Zeit-Verläufe
 - § Versagensdokumentation
 - Kopfzugversuche nach NASM 1312-8
 - § Messung und Dokumentation der Kraft-Weg-Verläufe
 - § Messung und Dokumentation der Kraft-Zeit-Verläufe
 - § Versagensdokumentation

Simulation:

- Optimierung des FE- Modells gemäß der ermittelten Geometriedaten
- Absicherung des FE- Modells hinsichtlich der gewählten Zeitschrittweite
- Verifikation des FE- Modells durch Abgleich mit den experimentellen Kraft-Weg-Verläufen für den Setzprozess und durch Abgleich der Geometrie der gesetzten Verbindung

3 Stand der Technik

3.1 Niettechnik im Flugzeugbau - eine kleine Einführung

Das Nieten beschreibt ein Fügen von Bauteilen durch Umformen und ist schon etwa 2500 Jahre alt. Das Wort Fügen steht im engen Zusammenhang mit *verbinden* oder *ineinander passen*. Es wurde erstmals in Griechenland angewendet, um Bronzegussstücke wie z. B. Waffen und Schmuck unlösbar miteinander zu verbinden.

Beim Nieten werden die Verbindungselemente in die zu fügenden Bauteile eingesteckt und durch Umformen des Nietes oder der Füge Teile eine unlösbare Verbindung dieser Bauteile, z. B. Bleche, Rohre und Profile, hergestellt.

Ab dem Industriezeitalter wurde speziell das Vollnieten vor allem im Eisenbahnbau, Maschinenbau und Brückenbau angewendet. Das wohl bekannteste Beispiel dieser Zeit ist der Eiffelturm in Paris, dessen Strukturelemente nur durch Nietverbindungen (Voll- und Hohniete) gefügt wurden. Mehr als 1 Million Niete sind hier verbaut worden.

Im Brückenbau wurde ab 1930 aus Kostengründen vermehrt das Schweißen eingesetzt. Hier ist aber besonders die thermische Beeinflussung auf die Bauteile zu erwähnen, die das Schweißen problematisch macht. Negative Effekte des Schweißens sind z. B. Stoffeigenschaftsänderungen und hohe Eigenspannungen im Werkstoff, die zur unerwünschten Entfestigung des Bauteils führen. Ebenfalls problematisch ist die Qualitätssicherung nach dem Schweißprozess, die sich als besonders komplex gestaltet. Zerstörungsfreie Prüfverfahren liefern nur ungenügende Informationen zur Beurteilung der Qualität. Das Schweißen ist ebenfalls nicht besonders umweltfreundlich (Freisetzung gesundheitsgefährdender Gase) und erfordert ein hohes Maß an Vor- und Nachbehandlung, sowie einen hohen Grad menschlicher Zuverlässigkeit [13] [14].

Um dennoch die Übertragung großer Lasten in dickeren Bauteilen zu gewährleisten, wo Vollniete die Anforderungen an die Festigkeit nicht mehr erfüllen, werden *Passniete* eingebaut. Passniete sind zweiteilige Verbindungselemente mit aufgeschraubten oder aufgequetschten Schließringen (Schließringniete).

Ein zerstörungsfreies Lösen der aufgequetschten Verbindung ist dann nach dem Fügeprozess nicht mehr möglich. Schließringniete eignen sich sehr gut bei schwingender Beanspruchung, da die parallelen Schließringe im Bolzen eine Selbstlösung verhindern [13] [14].

Die ersten Typen von Passniete wurden bereits um 1950 extra für den Flugzeugbau entwickelt, finden aber auch heute noch in weiterentwickelter Form Anwendung in der Flugzeugindustrie.

Neben dem Nieten werden heute auch verstärkt Klebverbindungen eingesetzt, wie z. B. im Militär- und Verkehrsflugzeugbau. Es werden hauptsächlich Flächen- und Längsnahtdoppler im Hautbereich des Rumpfes, Längsversteifungen der Rumpfhaut, Stringer, und teilweise Spanten geklebt. Für Sandwichbauteile, wie z. B. Seiten- und Querruder oder Landeklappen ist das Kleben gar nicht mehr wegzudenken. Gegenüber der Niettechnik lassen sich in Metallflugzeugen 15 % Strukturgewicht einsparen, gleichzeitig aber steigt die Sicherheit gegen unkontrollierten Rissfortschritt. Mit der Klebtechnik lässt sich ebenfalls eine extreme Ermüdungsfestigkeit der Struktur bei hoher Steifigkeit und guten aerodynamischen Eigenschaften erreichen [14].

Bedingungen, die heutzutage an eine Verbindung in Verkehrsflugzeugen gestellt werden, umfassen mindestens 20 Jahre, das entspricht etwa 60000 Flugstunden. Während dieser Zeit ist das Flugzeug Feuchtigkeit, wechselnden Temperaturen von -50 bis $+80^{\circ}\text{C}$ und korrosiven Medien laufend ausgesetzt. Um den geforderten Lastfällen und Umgebungseinflüssen trotzdem zu genügen, sind deshalb spezielle Einkomponenten-Epoxidharzklebstoffe nötig, sowie bestimmte Oberflächenbehandlungen, wie zum Beispiel das Entfetten der Oberflächen und Aufspritzen korrosionshemmender Beschichtung. Nach dem Kleben ist eine Härtung im Autoklaven von mehreren Stunden notwendig und eine zerstörungsfreie Prüfung durchzuführen. Der Klebprozess ist daher sehr zeitaufwendig und treibt die Herstellkosten in die Höhe [14].

Alles in allem sind Klebe- und Schweißverfahren, speziell im Flugzeugbau, mit ihren vielen Einzelschritten und Zwischenprüfungen, verglichen mit der hochautomatisierten und optimierten Niettechnik, unwirtschaftlich. Das Kleben beschränkt sich derzeit nur auf bestimmte Strukturteile. Wesentliche Entwicklungen zur Optimierung sind hier noch notwendig.

Jedoch ist eine Kombination beider Fertigungsverfahren grundsätzlich möglich und für bestimmte Verbindungen anzustreben, wie zum Beispiel das Ankleben

3 Stand der Technik

von Stringern und Spanten an die Rumpfschalen zur Steigerung der Korrosionsbeständigkeit [4].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Fügen durch Umformen keinesfalls der Vergangenheit angehört, auch wenn sich neue Fügetechniken, wie z. B. das Kleben, auf dem Vormarsch befinden.

Die Niettechnik zeichnet sich besonders durch eine einfache und zuverlässige Qualitätsprüfung aus. Während der Fertigung, die im Übrigen gut automatisierbar ist, lassen sich Andruckkräfte und Wege der Werkzeuge rechnergestützt einfach überwachen und steuern. Hier lassen sich die Daten gut mit Hilfe von Referenzwerten vergleichen und damit überprüfen. Nach dem Fügeprozess ist eine Sichtprüfung mit entsprechenden Lehren möglich und ausreichend zuverlässig [9].

Die Tabelle 1 stellt die Vor- und Nachteile der Niettechnik verglichen mit dem Schweißen und Kleben nochmals gegenüber.

Vorteile	Nachteile
- Große Vielfalt fügbarer Werkstoffe	- Geringere Festigkeiten als beim Schweißen
- Wirtschaftlichkeit (geringer Investitionsbedarf)	- Verfahrensbedingt nur Überlappverbindungen Hohe Kosten, hohes Gewicht im Vergleich zum Kleben
- In der Regel keine thermischen Umwandlungen des Gefüges	- Unebenheiten der Bauteile durch die Niete
- Hohe Sicherheit	- Erschwerte Nacharbeit
- Einfache Qualitätskontrolle	- Keine oder schwere Reparatur
- Umweltverträglichkeit Keine Entsorgungsprobleme Schnelle und geräuscharme Verarbeitung Keine besonderen Arbeitsplatzbelastungen	- Begrenzt anwendbar Kleine Bauteile schwierig Der Setzprozess benötigt gute Zugänglichkeit, meistens von zwei Seiten
- Vollmechanische Verbindungsherstellung	- Evtl. Beschädigung der Bauteilumgebung
- Hohe konstante Vorspannungen	- Vorarbeit (meist Vorlochen) notwendig

Tabelle 1: Vor- und Nachteile des Nieten gegenüber dem Schweißen u. Kleben

3.1 Das Schließringbolzen-System

Passniete mit aufgequetschten Schließringen nennt man auch Schließringbolzenverbindungen. Bei dieser Nietform wird in die Bohrung übereinander liegender Werkstücke ein Verbindungselement (Schließringniet) eingesteckt und ein Schließring in die Ausformungen des Nietes eingeformt. Somit entsteht eine form- und kraftschlüssige Verbindung.

Eine derartige Verbindung besteht also aus den zu verbindenden Elementen, z. B. zwei Bleche, dem Schließringbolzen (Schließringniet) und dem Schließring (Abbildung 1) [13].

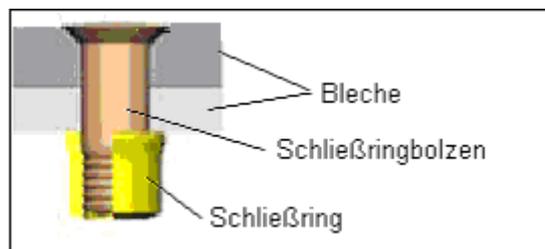


Abbildung 1: Schließringbolzen-System [3]

Üblicherweise nennt man einen Schließringbolzen auch *Lockbolt* und einen Schließring *Collar*, frei nach der englischen Übersetzung.

Das Material dieser Verbindung richtet sich ganz nach dem Einsatzgebiet und den Festigkeitsanforderungen des Bauteils. Vorwiegend werden Aluminium, Titan und rostfreie Stähle für diese Passniete verwendet, wobei erstere aus Gewichtsgründen im Flugzeugbau vorgezogen werden.

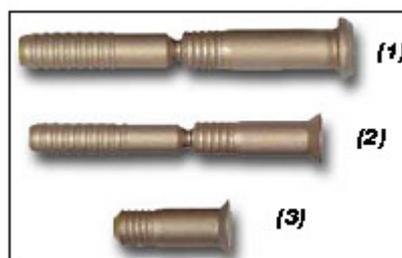


Abbildung 2: Varianten von Lockbolts: (1): Universalkopf-Lockbolt (Pull-Typ)
[3] (2): Senkkopf-Lockbolt (Pull-Typ)
(3): Senkkopf-Lockbolt (Stump-Typ)

Der Schließringbolzen ist in zwei Abschnitte unterteilt, die durch eine Sollbruchstelle miteinander verbunden sind. Der erste Abschnitt besteht aus dem Schließringbolzenkopf und einem Bolzen mit parallelen Verriegelungsrillen, die für die Verbindung mit dem Schließring nötig sind, Abbildung 3.

Der zweite Abschnitt besitzt ebenfalls einen Bolzen mit parallelen Rillen, die der Krafteinleitung dienen. Der Schließringbolzenkopf sowie der Bolzen selbst sind in unterschiedlichen Formen, je nach Anwendungszweck, verfügbar, Abbildung 2. Beispiele für Passbolzen mit Universal- und Senkkopf sind der Anlage I im Anhang zu entnehmen.

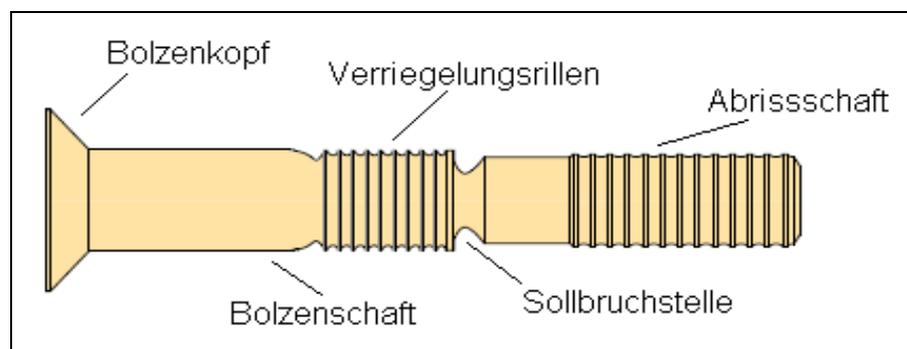


Abbildung 3: Schließringbolzen-Aufbau

3.2 Arten von Schließringbolzen bei AIRBUS

Der Markt an Schließringbolzensystemen ist sehr groß und vielfältig und sie besitzen oft herstellenspezifische Merkmale. Die Firma ALCOA Fastening Systems beliefert unter anderem AIRBUS Deutschland GmbH mit Schließringbolzen.

Der Hersteller dieser Lockbolts unterscheidet seine Schließringbolzen nach der Anzahl der Verriegelungsrillen, in die der Schließring eingeformt wird.

Im Jahr 1989 wurden bei AIRBUS Deutschland GmbH zwei Schließringbolzen der Firma ALCOA Fastening Systems in die Produktion aufgenommen und standardisiert. Der erste Schließringbolzen ist der „GP-Lockbolt“, wobei das GP für „Groove Proportioned“ steht. Dieser Bolzen hat 10 Rillen im ersten Abschnitt, in die der Schließring eingeformt werden kann [16].



Der zweite Schließringbolzen ist der „LGP-Lockbolt“, wobei das LGP für „Light Groove Proportioned“ steht. Er hat 5 Verriegelungsrillen für Bleche aus Metall und 6 Rillen für Composite-Werkstoffe. Die Reduzierung der Rillen dient ausschließlich der Gewichtsreduzierung.

Bei der erheblichen Anzahl von verbauten Nieten im Flugzeug eine nicht ganz unwichtige Option. Die erforderliche Festigkeit wird dennoch erreicht.

Im Jahr 2003 wurde ein weiterer, dritter, Schließringbolzen bei der AIRBUS Deutschland GmbH eingeführt, der sogenannte „XPL-Lockbolt“, wobei XPL für „Lightweight Extended Performance“ steht. Ihn charakterisieren ein doppelter Klemmlängenbereich sowie einen vergrößerten Durchmesser im Vergleich zu seinen Vorgängern. Für Bleche aus Metall hat der XPL-Lockbolt 7 Verriegelungsrillen und 9 Rillen für Composite-Werkstoffe [16].

Bei der AIRBUS Deutschland GmbH werden Schließringbolzen als hochfeste Verbindungselemente in allen strukturellen Verbindungsteilen, vorzugsweise bei Längs- und Quernähten im Rumpfbereich, siehe Abbildung 4, sowie im Flügel für Klappen und Ruder verwendet.



Abbildung 4: Lockboltsetzprozess in der Praxis [2b]

Der XPL-Lockbolt wird für die beiden neusten Flugzeuge der AIRBUS Familie verwendet: Im A380 sorgt er im mittleren Flügelkasten für die Rumpf-Flügel-Anbindung und im A400M Militärtransporter für Verbindungen an und in den Tragflächen [2c].

Eine Übersicht über die Anwendung verschiedener Fügeverfahren im Flugzeugbau am Beispiel eines A320 ist in Abbildung 5 dargestellt.

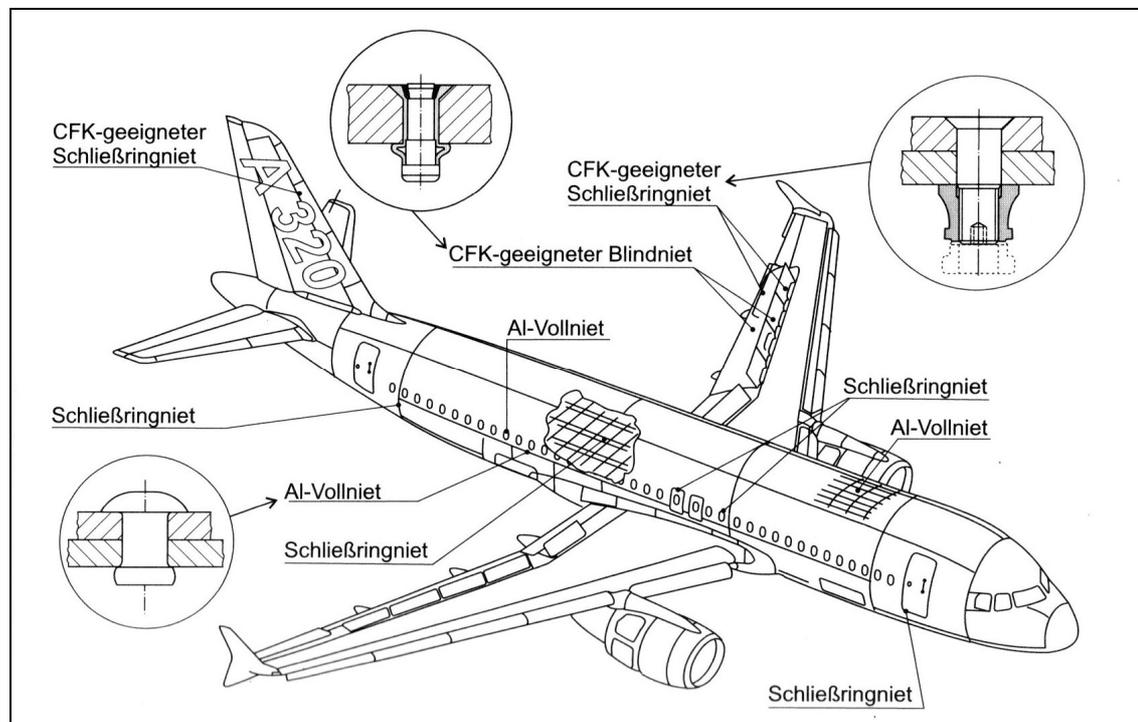


Abbildung 5: Anwendung umformtechnischer Fügeverfahren im Flugzeugbau [13]

3.3 Setzprozess der Schließringbolzen

Für den Einbau von Passnieten sind Spezialwerkzeuge notwendig, die sogenannten Setzwerkzeuge. Ein Setzwerkzeug besteht aus Klemmbacken und einer Zugkopfhülse. Die Zugkopfhülse ist das sogenannte Quetschwerkzeug (od. Setzwerkzeug) und wird auch als *Döpper* bezeichnet.

Die Setzwerkzeuge können elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch betrieben werden [NASM 1312-4].

Ziel des Setzvorganges ist es, den Schließring in die Rillen des Schließringbolzens einzuformen.

Dieses kann auf 2 Arten geschehen. Die erste Art ist der Setzprozess mit den *Lockbolts* des sogenannten *Pull-Typs*, Abbildung 6.

Dazu wird das Werkzeug auf den Schließring aufgesetzt, welches selbst mit Hilfe von Klemmbacken in die am Nietschaft (Bolzen) befindlichen Rillen greift. Das Setzwerkzeug fährt nun axial gegen den Setzkopf, während die Klemmbacken an dem Schließringbolzen ziehen.

Dadurch wird der Schließring auf den Bolzen gepresst und gegen die Bauteile gedrückt, die somit fest zusammengedrückt werden [13].

Wenn der Schließringbolzen an der Sollbruchstelle abgerissen ist (Abreißbolzen), ist der Setzvorgang beendet. Nach dem Setzvorgang ist der zweite Abschnitt des Schließringbolzens also vom ersten Abschnitt getrennt worden und fällt als Abfallprodukt weg.

Die zweite Art des Setzprozesses ergibt sich aus den *Lockbolts* des sogenannten *Stump-Typs*, Abbildung 6. Der *Stump-Typ* unterscheidet sich vom *Pull-Typ* dahingegen, dass er keinen Abreißbolzen besitzt, also keinen zweiten Abschnitt. Dieses bedeutet zwar weniger Material, jedoch ist eine Gegenkraft aufzubringen, die den Schließringbolzen in den Blechen festhält, während der Schließring auf den Schließringbolzen gepresst wird. Dieses erfordert eine Zugänglichkeit von zwei Seiten.

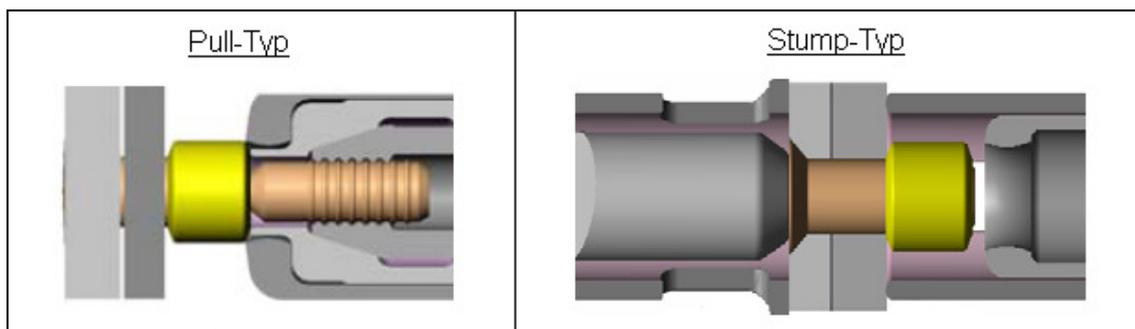


Abbildung 6: Pull- und Stump-Typ der Lockbolts [3]

In dieser Arbeit wird der Setzprozess des Lockbolts als Pull-Typ beschrieben, Abbildung 7, und auf eine nähere Beschreibung des Stump-Typs verzichtet.

Der gesamte Setzvorgang lässt sich in 6 Teilschritte unterteilen, die auf der folgenden Seite dargestellt sind.

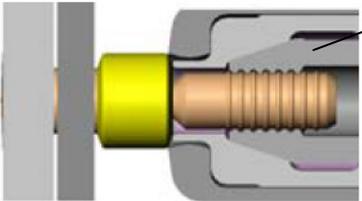
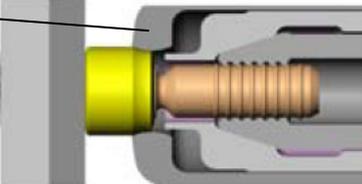
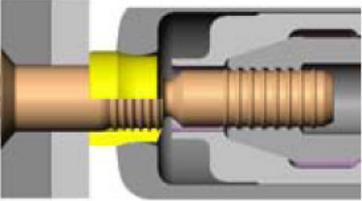
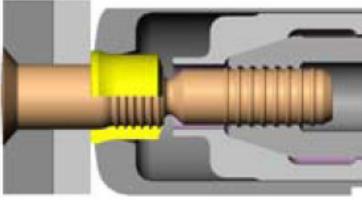
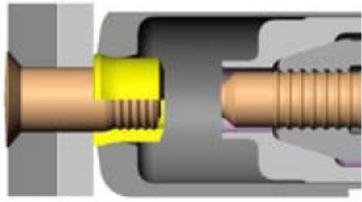
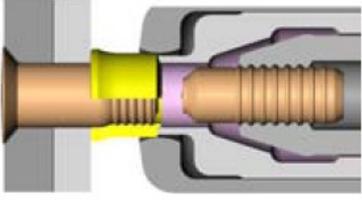
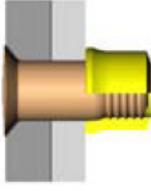
1	Der Passniet wurde in die Bleche eingeführt und das Setzwerkzeug angesetzt. Die Klemmbacke (1) greift den Lockbolt im Klemmbereich	
2	Die Klemmbacke zieht an dem Bolzen während die Zugkopfhülse (2) den Collar gegen die Bleche drückt und der Umformvorgang beginnt	
3a	Die Zugkopfhülse zieht sich über den Schließring und formt ihn so in die Rillen des Schließringbolzens ein. Währenddessen wird der Lockbolt gedehnt (durch Zug an Klemmbacken)	
3b	Die maximale Umformung ist erreicht, das Material des Collars ist vollständig eingeformt	
4	Bei Erreichen der Maximalkraft, reißt der Bolzen ab und der Umformvorgang ist beendet	
5	Die Zugkopfhülse wird von den umgeformten Collar abgezogen	
6	Der Setzvorgang ist abgeschlossen	

Abbildung 7: Setzprozess des Lockbolts als Pull-Typ [3]

Zum Überprüfen der gesetzten Verbindung werden spezielle Lehren verwendet, die für den gesamten Klemmbereich gelten. Mit diesen Lehren kann man prüfen, ob der richtige Lockbolt für die jeweilige Klemmlänge gewählt wurde und ob der Setzprozess korrekt verlaufen ist [2a].

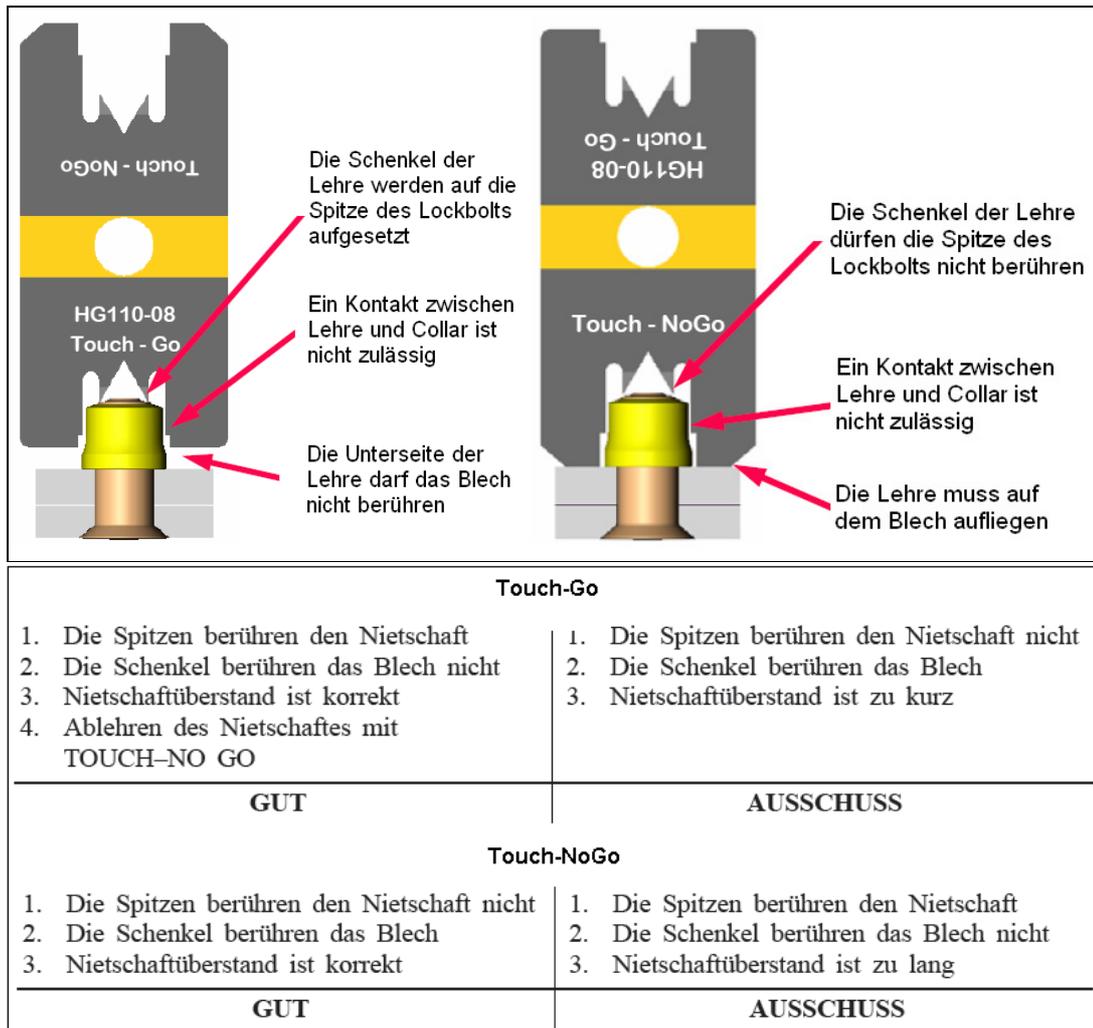


Abbildung 8: Lehre zur Qualitätssicherung einer Lockbolt-Verbindung [2a]

Wird die Touch-Go Seite auf den Lockbolt aufgesetzt, Abbildung 8, ist die Verformung des Collars und die Klemmlänge korrekt, wenn die Lehre weder Collar noch Blech berührt.

Wird die Touch-NoGo Seite auf dem Blech aufgesetzt, ist die Klemmlänge korrekt, wenn die Schenkel der Lehre den Lockbolt nicht berühren. Auch hier ist

die Verformung des Collars korrekt, wenn die Lehre den Schließring nicht berührt.

In der folgenden Tabelle sind die Vor- und Nachteile einer Lockbolt-Verbindung gegenüber herkömmlichen Nietverbindungen zusammenfassend dargestellt.

Vorteile	Nachteile
- Sehr hohe Festigkeit u. Klemmkraft gegenüber anderen Verbindungsarten	- Relativ teuer im Gegensatz zu anderen Nietverbindungen
- Keine speziellen Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit und Geometrietoleranzen	- Bei der Montage muss eine Zugänglichkeit von beiden Seiten gewährleistet sein (Stump-Typ)
- Vibrationssichere Verbindung	- Einsatz in schwer zugänglichen Bereichen nur bedingt möglich (abhängig von der Größe des Setzgerätes)
- Automatisierbar	
- Einfache Qualitätssicherung	
- Wärmefreies und damit verzerrungsarmes Verbinden	- Keine Normen und Richtlinien für die Darstellung in Konstruktionszeichnungen
- Keine Beschädigung der Bauteiloberflächen bei der Herstellung	- Nicht bei größeren Durchmessern einsetzbar
- Schnellere Verarbeitung gegenüber Gewinde-Verbindungen	- Zerstörungsfreies Lösen der Verbindung ist nicht möglich

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Schließringbolzen-Verbindung gegenüber herkömmlichen Nietverbindungen [9]

Für die Schließringbolzenverbindung gibt es heute keine bis wenige Simulationstools für detaillierte Betrachtungen des Fügeprozesses. Ein wichtiges Aufgabengebiet ist daher die Schaffung von Simulationsprogrammen, die eine Vorhersage über die Eigenschaften gefügter Verbindungen unter quasistatischer, dynamischer und schwingender Belastung liefern.

4 Experimentelle Untersuchung

4.1 Nomenklatur der Versuchselemente

Im Rahmen der Airbus-Abteilung EDSWAG im Werk Bremen ist eine Konvention zur Nomenklatur der Elemente einer Nietverbindung festgelegt worden, da außerhalb dieser Bachelor-Thesis noch weitere Experimente mit Material- und Nietvarianten durchgeführt werden sollen. Durch eine gemeinsame Nomenklatur sollen die verschiedenen Versuchsvarianten schnell identifiziert werden können. Das erleichtert später die Auswertung der Experimente und ermöglicht einen schnellen Vergleich aller Versuchsproben untereinander.

Um ein geeignetes Simulationstool einer Lockbolt-Verbindung zu schaffen, ist es zunächst notwendig, eine aussagekräftige Testreihe aufzustellen. Dafür wird ein Standard-Lockbolt-System definiert und später verschiedene Parameter, wie Klemmlänge, Bolzendurchmesser, Passung und Nietkopf, variiert. So soll untersucht werden, welchen Einfluss diese Modifizierungen auf die Gesamt-Verbindung haben.

In dieser Bachelor-Thesis werden ausschließlich Aluminiumverbindungen untersucht und als Verbindungselemente werden Schließringniete (Lockbolts) verwendet.

In der nachfolgenden Tabelle 3 ist die Konvention zur Nomenklatur der Elemente aller im Rahmen von EDSWAG zu untersuchenden Nietverbindungen dargestellt und erläutert.

So bedeutet z. B. die Probenbezeichnung **Al-LB-Fa-S1-2**, dass es sich eine Aluminiumverbindung handelt (**Al**), die mit einem Lockbolt (**LB**) in eine Übergangspassung (**Fa**) gefügt wurde. Es handelt sich dabei um den Scherzugversuch (**S**) Nr. 1 (**1**) der entsprechenden Versuchsreihe und um den unteren Fügepartner (**2**).

Material	
CFK	CFK-Verbindung
Al	Aluminiumverbindung
Nietvariante	
LB	Lockbolt Standard (Pull-Typ)
SR	Solid Rivet
Variation von	
A	<i>Standardvariante</i>
B	<i>Klemmlänge</i>
Ba	Klemmlänge 6,4 mm
Bb	Klemmlänge 5,0 mm
Bc	Klemmlänge 6,2 mm
Bd	Klemmlänge X,X mm
C	<i>Klemmlängenbereich</i>
Ca	Max. Klemmlänge 6,0 mm
Cb	Min. Klemmlänge X,X mm
Cc	Max. Klemmlänge X,X mm
Cd	Max. Klemmlänge X,X mm
D	<i>Klemmlänge 10 mm</i>
E	<i>Nietkopf Universal</i>
F	<i>Lochdurchmesser</i>
Fa	Lochdurchmesser 4,79 (Übergangspassung)
Fb	Lochdurchmesser X,X (Spielpassung)
Fc	Lochdurchmesser X,X (Spielpassung)
Fd	Lochdurchmesser X,X (Spielpassung)
G	<i>Bolzenenddurchmesser u. Klemmlänge</i>
Ga	Bolzenenddurchmesser 5,5 mm Klemmlänge 6,4 mm
Gb	Bolzenenddurchmesser 6,3 mm Klemmlänge 6,4 mm
H	<i>Bolzenenddurchmesser</i>
Ha	Bolzenenddurchmesser 4,0 mm
Hb	Bolzenenddurchmesser 6,4 mm
J	<i>Senkungsdurchmesser</i>
Ja	Min. Senkungsdurchmesser 9,2 mm
Jb	Max. Senkungsdurchmesser 9,5 mm
K	<i>Senkungswinkel</i>
Ka	Min. Senkungswinkel 95°
Kb	Max. Senkungswinkel 105°
L	<i>Stauchkraft</i>
La	Min. Stauchkraft 32 kN
Lb	Max. Stauchkraft 40 kN
M	<i>Beschichtung</i>
Ma	- noch nicht vergeben -
Mb	- noch nicht vergeben -
N	<i>Vorspannkraftabnahme</i>
Na	- noch nicht vergeben -

Nb	- noch nicht vergeben -
O	Fügepartnerbreite und -länge
Oa	Fügepartnerbreite X,X mm und -länge X,X mm
Ob	Fügepartnerbreite X,X mm und -länge X,X mm
Versuchsnummer	
I1, I2, I3, ...	1., 2., 3. usw. Installationsversuch
K1, K2, K3, ...	1., 2., 3. usw. Kopfzugversuch
S1, S2, S3, ...	1., 2., 3. usw. Scherzugversuch
Fügepartnernummer	
1	Fügepartner 1
2	Fügepartner 2
Niete und Collar	
N1 bzw. C1*	Niet Nr. 1 bzw. Collar Nr. 1
N2 bzw. C2*	Niet Nr. 2 bzw. Collar Nr. 2
...	...
<p>*Als Fügepartner 1 wird derjenige bezeichnet, auf deren Seite sich der Nietkopf befindet. Werden zwei Partner beidseitig gefügt, ist der Partner als Fügepartner 1 zu bezeichnen, der beim ersten Nietvorgang den Nietkopf zugewandt liegt. Liegen Fügepartner unterschiedlicher Stärken vor, die beidseitig gefügt werden sollen, so ist beim ersten Nietvorgang der dickere Fügepartner nietkopfseitig zu fügen.</p> <p>Die Niete und Collar sind mit N1, N2 usw. bzw. C1, C2 usw. durchnummerieren. Ihre Position und Zuordnung zu den Fügepartnern und Versuchen muss anhand von entsprechenden eindeutigen Tabellen und Skizzen erkennbar sein!</p>	

Tabelle 3: Konvention zur Nomenklatur der Elemente einer Nietverbindung

4.2 Testmatrix

Der in dieser Bachelor-Thesis als Referenz verwendete Lockbolt ist ein Titan-Lockbolt mit Hi-Kote 1 Beschichtung und ist in der Airbus-Norm ABS 0548, Pull-Type für Zugbeanspruchung mit 100° Senkkopf, beschrieben. Als Referenz-Schließring wird der Aluminium-Collar nach ASNA 2025 verwendet. Eine Beschreibung der Airbus-Norm zum Lockbolt und zum Collar sind der Anlage II und III im Anhang zu entnehmen.

Das Referenz-Lockbolt-System besteht aus einem Bolzen mit dem Nenndurchmesser 4,8 mm und dem entsprechenden Collar. Die Verbindung soll bei einer Klemmlänge von 4,8 mm im minimalen Klemmbereich liegen. Dementsprechend lässt sich mit dieser Vorgabe aus der Norm der geeignete Passbolzen herausuchen. Als Material für die zu verbindenden Bleche ist eine Aluminium-Knetlegierung aus 2024 T351 vorgesehen und es soll ein pneumatisches Setzgerät verwendet werden.

Die experimentellen Untersuchungen unterteilen sich in Installations-, Scherzug- und Kopfzugversuche.

Für die Installation soll der Parameter „Nenndurchmesser“ des Referenz-Bolzens modifiziert werden und zwar mit den Werten 5,5 bzw. 6,3 mm. Außerdem soll der Basis-Lockbolt mit maximalem Klemmlängenbereich und mit veränderter Passung (Übergangspassung) getestet werden.

Für den Scherzugversuch soll ebenfalls der maximale Klemmbereich und eine Übergangspassung getestet werden. Zusätzlich kommt noch ein Test mit einem Lockbolt mit Universalkopf hinzu (ABS 0549). Außerdem werden unterschiedliche Klemmlängen bei gleichbleibendem Klemmlängenbereich getestet. Das bedeutet, dass Passbolzen mit unterschiedlichen Längen in die Testreihe aufgenommen werden.

Beim Kopfzugversuch werden gegenüber dem als Referenz definierten Lockbolt die Klemmlänge, der Nietkopf und die Passung variiert.

Für jede Testreihe ist ein Umfang von sechs Proben vorgesehen. Einige Varianten werden nach der Installation für die Scherzugversuche weiterverwendet, deshalb wird der Probenumfang um eine Probe ergänzt (sieben statt sechs), da eine Probe für ein Schliffbild aufgeschnitten werden soll.

4 Experimentelle Untersuchungen

Eine zusammenfassende Aufstellung der verschiedenen Parameter liefert folgende Testmatrix, Testmatrix I:

Installation				Scherzugversuch					
Lockbolt Installation in Al 2024	Referenz: <i>Lockbolt: ABS 0548-3-4 Lockbolt 100° (gesenkt) Ti, Hi-Kote1 Beschichtung; Collar: ASNA 2025 Al; Nenndurchmesser Bolzen: 4.8 mm; Klemmlängenbereich: minimal; Klemmlänge: 4.8 mm; Material Bleche: 2024 T351; Lochdurchmesser: Presspassung (ABS 1707); Werkzeug: pneumatisch gesteuertes Setzgerät (GESIPA, Taurus 4)</i>			Lockbolt Scherzugversuch in Al 2024	Referenz: <i>Lockbolt: ABS 0548-3-4 Lockbolt 100° (gesenkt) Ti, Hi-Kote1 Beschichtung; Collar: ASNA 2025 Al; Nenndurchmesser Bolzen: 4.8 mm; Klemmlängenbereich: minimal; Klemmlänge: 4.8 mm; Material Bleche: 2024 T351; Lochdurchmesser: Presspassung (ABS 1707); Werkzeug: Materialprüfmaschine Z100/TL3A (Zwick GmbH & Co. KG)</i>				
	Bz	Variation	Parameter		Anzahl Tests	Bz	Variation	Parameter	Anzahl Tests
	A	-	Referenz		7	A	-	Referenz	6
	Ga	Nenndurchmesser Bolzen	5,5 mm*		6	Ga	Nenndurchmesser Bolze.	5,5 mm*	6
	Gb		6,3 mm*		6	Gb		6,3 mm*	6
	Ca	Klemmlängenbereich	maximum		7	Ca	Klemmlängenbereich	maximum	6
	D	Klemmlänge	10,0 mm		6	D	Klemmlänge	10,0 mm	6
	Ba	Klemmlänge	6,4 mm		6	Ba	Klemmlänge	6,4 mm	6
	Fa	Lochdurchmesser	Übergangspassung		7	Fa	Lochdurchmesser	Übergangspassung	6
	<i>Bz = Bezeichnung der Probe nach Airbus-Nomenklatur * Klemmlänge = 6,4 mm</i>					E	Nietkopf	Universal (ABS 0549)	6
Gesamtanzahl der Versuche:			<u>45</u>	Gesamtanzahl der Versuche:			<u>36</u>		

Tabelle 4: Testmatrix I für Al-LB-Verbindungen

Für die verschiedenen Varianten der Kopfzugversuche ergibt sich folgende Testmatrix, Testmatrix II:

Kopfzugversuch				
Lockbolt Kopfzugversuch in AI 2024	Referenz: Lockbolt: ABS 0548-3-4 Lockbolt 100° (gesenkt) Ti, Hi-Kote1 Beschichtung; Collar: ASNA 2025 AI, Nenndurchmesser Bolzen: 4.8 mm; Klemmlängenbereich: minimal; Klemmlänge: 4.8 mm; Material Bleche: 2024 T351; Lochdurchmesser: Presspassung (ABS 1707); Werkzeug: Materialprüfmaschine Z100/TL3A (Zwick GmbH & Co. KG)			
	Bz	Variation	Parameter	Anzahl Tests
	A	-	Referenz	6
	Ca	Klemmlängenbereich	maximum	6
	Fa	Lochdurchmesser	Übergangspassung	6
E	Nietkopf	universal	6	
<i>Bz = Bezeichnung der Probe nach Airbus-Nomenklatur</i>				
Gesamtanzahl der Versuche:			<u>24</u>	

Tabelle 5: Testmatrix II für AI-LB-Verbindungen

Nach der Airbus-Norm ABS 0548-3-4 gilt der Klemmlängenbereich 4,80 mm bis 6,35 mm, Tabelle 6.

Grip Dash No	Grip range		X ±0.005 0,127
	Max	Min	
02	0.125 (3,18)	0.063 (1,60)	0.125 (3,18)
03	0.188 (4,78)	0.126 (3,20)	0.188 (4,78)
04	0.250 (6,35)	0.189 (4,80)	0.250 (6,35)

Tabelle 6: Auszug aus der ABS 0548-3-4 [Angaben in inch (mm)]

Der in der Testmatrix I und II geforderte Klemmlängenbereich von 4,8 mm für die Referenz-Probe wird aus Gründen der Verfügbarkeit an Material und der Vereinfachung auf 5 mm festgelegt (zwei Bleche mit jeweils 2,5 mm Dicke).

4 Experimentelle Untersuchungen

Der Klemmlängenbereich ist hier, wie gefordert, als Minimum anzusehen (vgl. Tabelle 6).

Der maximale Klemmlängenbereich für die Al-LB-Ca-Probe liegt laut Airbus-Norm für einen Lockbolt nach ABS 0548-3-4 also bei 6,35 mm. Aufgrund der Verfügbarkeit der Bleche und der einfacheren Handhabung, weil ein Abfräßen nicht nötig ist, werden bei allen Untersuchungen als maximaler Klemmlängenbereich 6,2 mm gewählt. Dieser wird erreicht durch zwei Bleche mit jeweils 3,1 mm Dicke.

Die Klemmlängen 6,4 mm und 10 mm der Al-LB-Ba- und Al-LB-D-Proben ergeben sich ebenfalls aus der Verfügbarkeit der Bleche. Sie genügen der Norm ABS 0548-3-5 und ABS 0548-3-7. Die Klemmlänge wird hier erreicht durch zwei Bleche mit jeweils einer Dicke von 3,3 mm für die Al-LB-Ba-Proben bzw. 5,2 mm für die Al-LB-D-Proben.

Auf die genaue Geometrie der Blechproben sowie auf die Beschreibung der Airbus-Norm wird im folgenden Kapitel ausführlich eingegangen.

Aus den Testmatrizen I und II und der Verfügbarkeit des Materials ergibt sich folgende Gesamtaufstellung nach ABS 0548 und ABS 0549:

Bz	Nenn-durch-messer Bolzen [mm]	Klemmlänge [mm]	Nietkopf	Passung	Test	Lockbolt
A	4,8	5,0	gesenkt	Übermaß	Installation + Scherzugversuch	ABS 0548-3-4
Fa		5,0		Übergangs-	Installation + Scherzugversuch	
Ca		6,2 (max)		Übermaß	Installation + Scherzugversuch	
E		5,0	universal	Übermaß	Installation + Scherzugversuch	ABS 0549-3-4
Ba		6,6	gesenkt	Übermaß	Installation + Scherzugversuch	ABS 0548-3-5
D		10,4		Übermaß	Installation + Scherzugversuch	ABS 0548-3-7
Ga	5,5	6,4	gesenkt	Übermaß-	Installation	ABS 0548-3A-5
Gb	6,3	6,4	gesenkt	Übergangs-	Installation	ABS 0548-4-5
A	4,8	5,0	gesenkt	Übermaß	Kopfzugversuch	ABS 0548-3-4
Fa		5,0	gesenkt	Übergangs-		ABS 0548-3-4
E		5,0	universal	Übermaß		ABS 0549-3-4
Ca		6,2 (max)	gesenkt	Übergangs-		ABS 0548-3-4

Tabelle 7: Gesamtaufstellung über die Versuche der Al-LB-Systeme



4.3 Lockbolt-Verbindung und Versuchsvorbereitung

Der hier verwendete Referenz – Lockbolt trägt die Bezeichnung ABS 0548 VHK 3-04. Daraus lässt sich erkennen, dass es sich um einen Titan-Lockbolt mit einer Hi-Kote Beschichtung handelt (VHK). Die erste Ziffer bezeichnet den Nenndurchmesser (in diesem Fall 4,8 mm) und die zweite Zahl steht für die Länge, bzw. den Klemmbereich. Bei der Zahl 04 handelt es sich um einen Lockbolt mit dem Klemmbereich von 4,8 mm bis 6,35 mm. Desweiteren werden Passniete mit dem Klemmbereich von 6,38 mm bis 7,92 mm (Bezeichnung 05) und mit dem Bereich 9,55 mm bis 11,13 mm (07) für die experimentelle Untersuchung eingesetzt.

Wie in der Testmatrix schon beschrieben, handelt es sich um einen Lockbolt mit 100° Senkkopf als Pull-Typ. In Abbildung 9 ist dieser Lockbolt mit dem zugehörigen Collar zu sehen.



Abbildung 9: Lockbolt des Typs ABS 0548 VHK 3-04 mit Collar [3]

Bei dem Werkstoff handelt es sich um eine Titan-Knetlegierung mit der Bezeichnung TiAl6V4 nach der Norm DIN 17851. Dieser Werkstoff ist eine hochfeste Legierung mit einer hohen Korrosionsbeständigkeit gegenüber oxidierenden Säuren, Chloridlösungen und Spannungsriss- und Lochkorrosionen bei einer Dichte von 4,43g/cm³. Er ist zudem warmhärterbar [17].

Die Hi-Kote 1-Beschichtung des Lockbolts ist eine auf Phenolharz-basierender Aluminiumbeschichtung, die ebenfalls sehr korrosions- und temperaturbeständig ist. Sie ist außerdem resistent gegen Treibstoffe, Hydraulik-Flüssigkeiten und Lösungsmittel [15].

Der Collar mit der Bezeichnung ASNA 2025-3 hat ebenfalls einen Nenndurchmesser von 4,8 mm, was durch die Ziffer 3 beschrieben ist.

Er besteht aus einer Aluminium-Knetlegierung mit der Bezeichnung EN AW-2024 T42 nach der Norm DIN EN 573.

Für die Lockbolts mit größerem Nenndurchmesser werden Collar nach ASNA 2025-3A und ASNA 2025-4 verwendet.

Der Collar-Werkstoff ist eine AlCuMg-Legierung, die lösungsgeglüht aus dem weichgeglühten Zustand und kaltausgelagert wurde. Ihre mechanischen Eigenschaften nach der Norm DIN EN 485-2 sind in Tabelle 8 dargestellt.

Legierung EN AW-2024 [Al Cu4Mg1]		T42	T351	
Nenndicke		0,4-6,0 mm	1,5-3,0 mm	3,0-6,0 mm
Zugfestigkeit Rm	MPa	425	435	440
Dehngrenze Rp0,2	MPa	260	290	290
Bruchdehnung A50mm	%	15	14	14
Härte	HBW	119	123	124
Dichte	Kg/dm ³	2,7		
E-Modul	N/mm ²	70000		
Querkontraktionszahl		0,34		

Tabelle 8: Probenmaterial und -geometrie [2c] [8]

Die zu verbindenden Bleche werden ebenfalls aus der Aluminium-Knetlegierung Al 2024 hergestellt. Die Legierung unterscheidet sich von dem Material des Collars nur hinsichtlich der Wärmebehandlung. Hier gilt der Zusatz T351. Er steht für einen lösungsgeglühten, kaltumgeformten und kalt ausgelagerten Werkstoff. Außerdem lässt sich daraus lesen, dass der Werkstoff durch Recken entspannt und nicht nachgerichtet wurde. Dieser Werkstoff besitzt eine höhere Festigkeit als die Legierung des Collars.

Für die Durchführung der Versuche sollen die Bedingungen möglichst der realen Verarbeitung entsprechen. Daher werden die Bleche aus Gründen des Oberflächenschutzes mit Weinsäure anodisiert und anschließend mit einem Grundlack versehen.

Die Durchführung der Scherzug- und Kopfzugversuche soll nach der „National Aerospace Standard Method“, der NASM 1312-4 bzw. 1312-8 erfolgen.

In dieser Anweisung ist die Probengeometrie von dem Bolzendurchmesser abhängig, daher muss zunächst die korrekte Abmessung der Proben für die

verschiedenen Passniete, wie in den folgenden Abbildungen dargestellt, ermittelt werden.

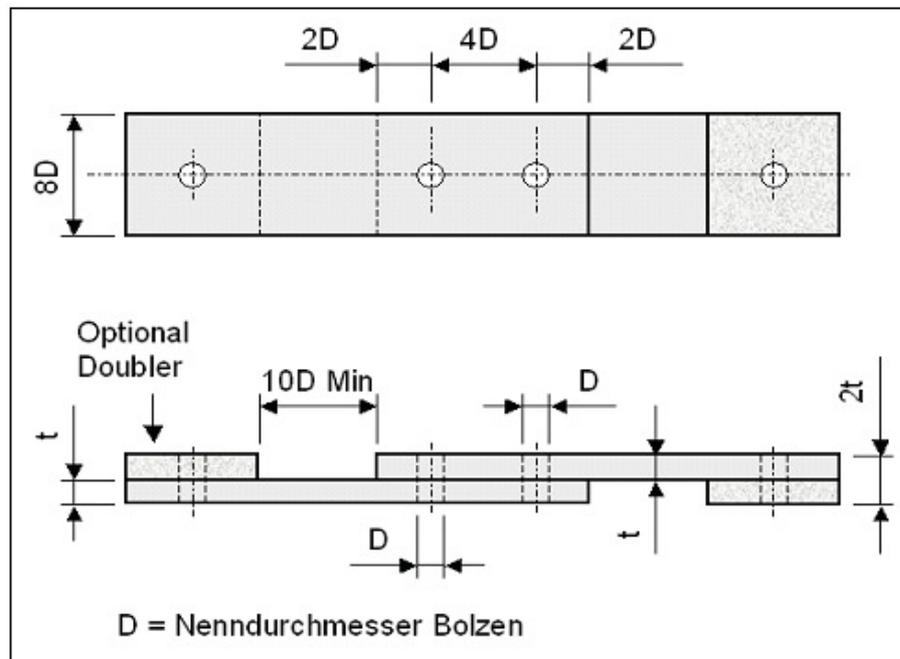


Abbildung 10: Scherzugversuch – Probe nach NASM 1312-4

Daraus ergaben sich folgende Probengeometrien:

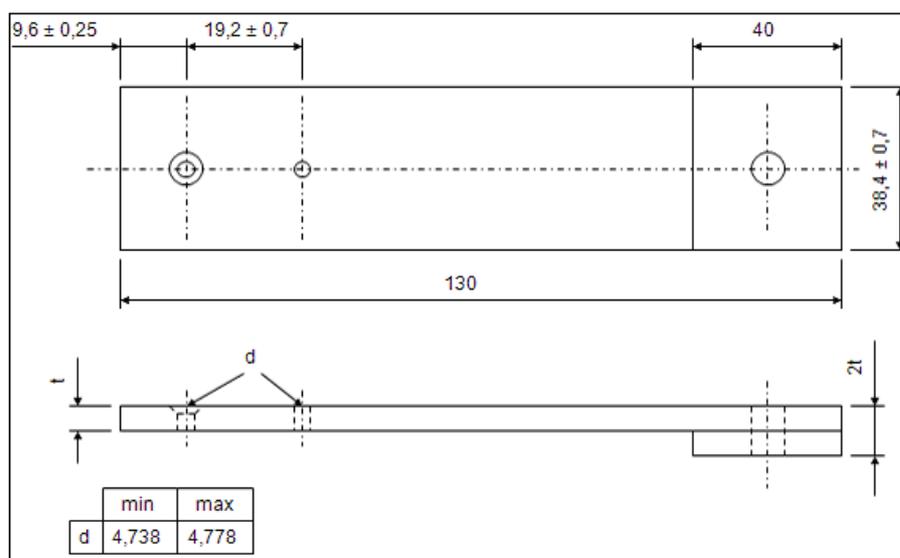


Abbildung 11: Scherzugversuch – Probe nach NASM 1312-4

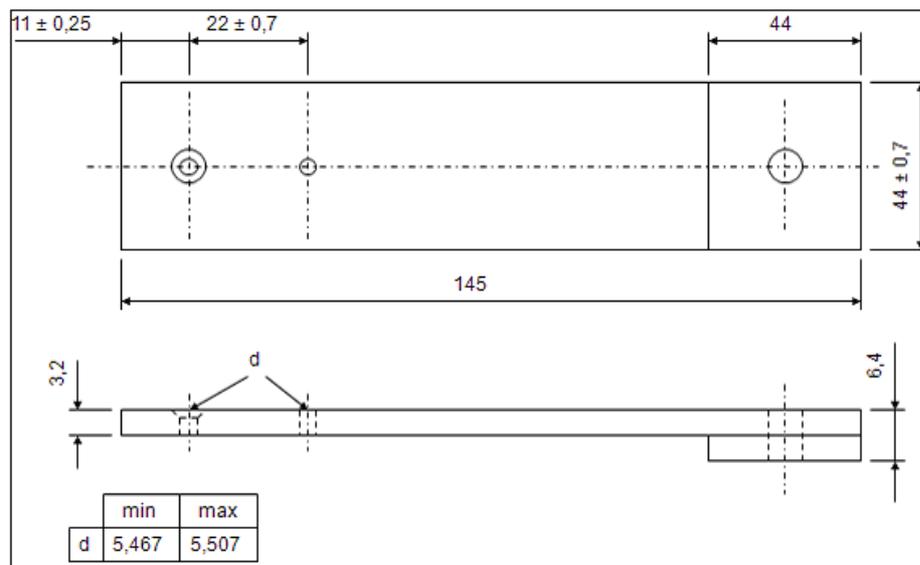


Abbildung 12: Scherzugversuch – Probe nach NASM 1312-4

Die „Doubler“ an den Enden, vgl. Abbildung 10, werden auf die Streifen aufgeklebt, um eine gerade Einspannung zu ermöglichen. Sie dienen nur zur Erleichterung der Durchführung des Versuchs und sind für die Ermittlung der Werte nicht relevant.

Abbildung 13 zeigt ein Beispiel für die Bezeichnung nach der in Kapitel 4.1 beschriebenen Nomenklatur.

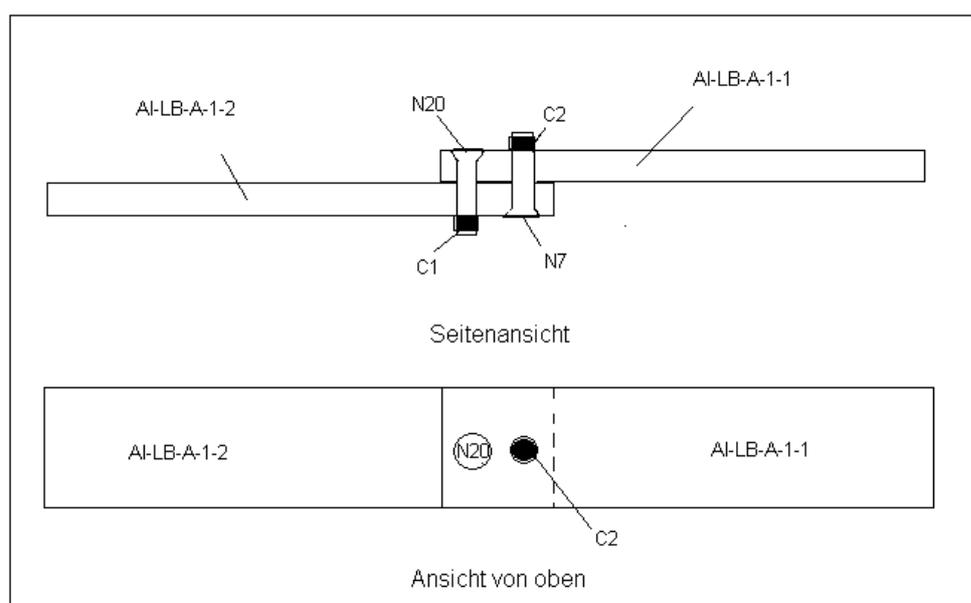


Abbildung 13: Beispiel für eine Probenbezeichnung nach Nomenklatur

4.4 Versuchsdurchführung

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen werden Installations-, Scherzug- und Kopfzugversuche durchgeführt.

Bei der Installation werden für den Setzprozess der Nietverbindungen Kraft-Weg-Verläufe dieser Verbindungen aufgenommen und jeweils für eine Versuchsreihe ein Schliffbild erstellt. Bei den restlichen Verbindungen wird die Collar-Geometrie sowie der Nietkopfüberstand vermessen.

Die Scherzug- und Kopfzugversuche werden nach der Norm NASM 1312-4 bzw. NASM 1312-8 durchgeführt und dokumentiert.

Jedes Blech einer Probe erhält als Bezeichnung eine Kombination von Buchstaben und Zahlen, die für die Merkmale der jeweiligen Verbindung steht und deren Bedeutung der Testmatrix I und II, der Nomenklatur aus Kapitel 4.1 und der Abbildung 13 zu entnehmen ist.

4.4.1 Lockbolt-Installationen

Zur Installation dient normalerweise das Lockbolt-Setzgerät Huck 230. Da sich an diesem Setzgerät aber keine Möglichkeit zur Aufnahme von Kraft-Weg-Verläufen befindet, wird für die Installation das Blindniet-Setzgerät Taurus 4 der Firma GESIPA verwendet. An diesem Gerät befindet sich ein Aufnehmer für die Setzkraft und einer für den Installationsweg, die mit Hilfe eines USB-Anschlusses an einem PC visualisiert werden können. Beide Setzgeräte werden mit Druckluft angesteuert.

Technische Daten GESIPA Taurus 4		
Standardblindniete	mm	bis 6,4
Gewicht	kg	2,5
Betriebsdruck	bar	5-7
Gerätehub	mm	19
Setzkraft bei 5bar	N	20000
Schlauchanschluss	mm	6
Luftverbrauch	NI/Niet	4,8
Geräuschemission Lpa	dB	79

Tabelle 9: Technische Daten der Taurus 4



Abbildung 14: Setzwerkzeuge

Da bei den beiden Setzgeräten die Aufnahmen für die Mundstücke nicht identisch sind, muss ein Adapter eingefügt werden, der es ermöglicht, das Mundstück von dem Lockbolt-Setzgerät mit dem Blindniet-Setzgerät zu kombinieren. Dieser Adapter muss speziell für diesen Fall nach der folgenden Abbildung angefertigt werden.

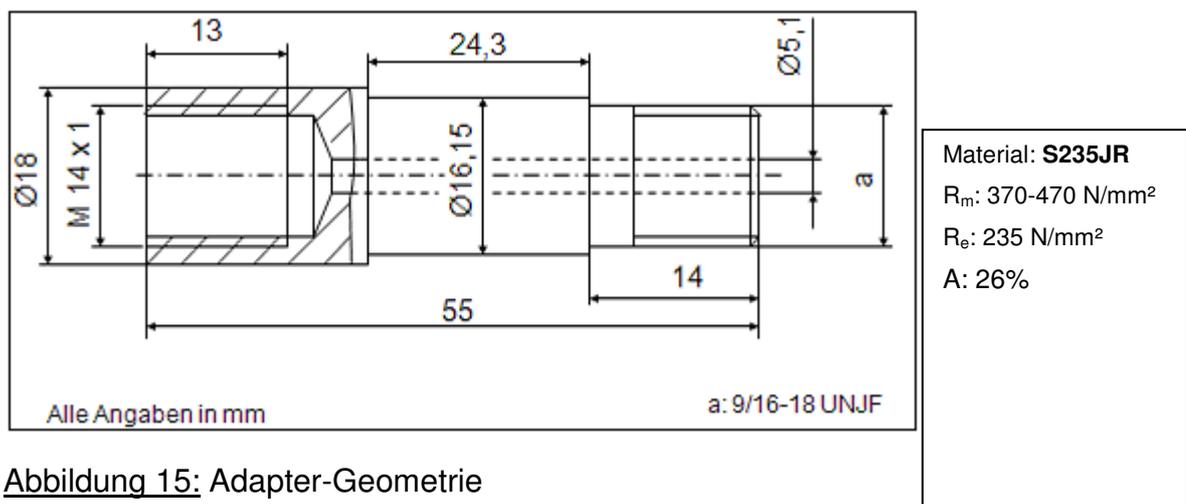


Abbildung 15: Adapter-Geometrie

Der gesamte Setzprozess, von der Vorbereitung der Nietmaterialien bis hin zu dem Prüfen der gesetzten Verbindung, ist in der AIRBUS-Fertigungsvorschrift 80-T-34-5812 festgelegt. Die folgenden Arbeitsschritte wurden gemäß dieser Vorschrift ausgeführt.

Die Nietbohrungen werden mit einem Bohrsenker $\varnothing 4,74$ mm hergestellt. Dies ermöglicht das Herstellen der Bohrung und der Senkung in einem Arbeitsschritt.

Anschließend werden die Durchmesser der Bohrungen bei 0° und bei 90° gemessen und dokumentiert. Die Durchmesser der Passniete werden ebenfalls im Klemmbereich bei 0° und bei 90° gemessen. Die Daten sind der Anlage IV und V im Anhang zu entnehmen.

Zum Setzen wird der Passbolzen mit Hilfe eines Alu-Dorns in die Passung eingeschlagen, Abbildung 16. Anschließend wird der Collar auf den Lockbolt geschoben und die Probe mit dem Klemmbereich auf das Mundstück des Setzgerätes aufgesteckt und die Verbindung gesetzt. Für jede gesetzte Verbindung wird der Nietkopfüberstand gemessen, sowie ein Kraft-Weg/Kraft-Zeit-Verlauf aufgezeichnet. Die Daten der Nietkopfüberstände sind der Anlage VI im Anhang zu entnehmen.

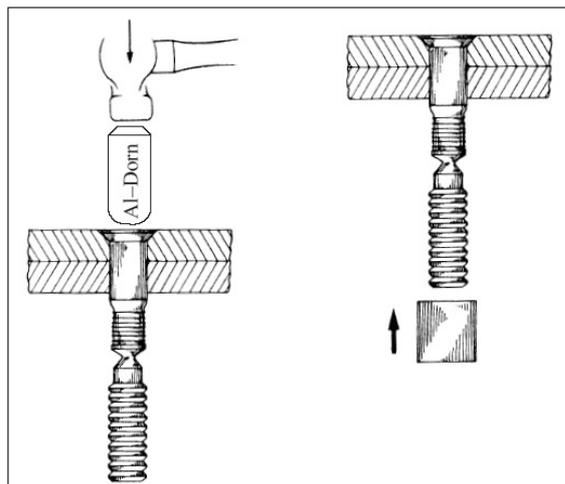


Abbildung 16: Einsetzen des Passbolzens durch Einschlagen [2a]

4.4.2 Scherzugversuche

Die wichtigste mechanische Werkstoffprüfung ist der Zugversuch, da die auftretenden Erscheinungen zumindest qualitativ auf andere Beanspruchungsarten übertragen werden können.

Für die Scherzugversuche aus der Testmatrix wird die Materialprüfmaschine Z100/TL3A, Baujahr 1997, der Firma Zwick GmbH & Co. KG verwendet.

4 Experimentelle Untersuchungen

Diese Maschine kann für Zug- und Druckprüfungen im Bereich von 200 N bis 100 kN eingesetzt werden.

Sie kann ebenfalls für Dehnungsmessungen im Bereich von 0,02 mm bis 50 mm der Klasse 0,5 eingesetzt werden. Anlage VII im Anhang erläutert die Klasseneinteilung von Längenänderungs-Messeinrichtungen.

Die Maschine besteht im Wesentlichen aus dem Sockel mit Spindeltrieb, Führungssäulen, Kugelgewindespindeln, einer feststellbaren und einer fahrbaren Traverse. Es stehen außerdem zwei Kraftaufnehmer zur Verfügung (bis 2 kN bzw. bis 100 kN), welche die physikalisch Kraft in eine elektrisch messbare Spannung umwandeln.

Maximale Prüfkraft (Zug bzw. Druck)	100 kN
Traversengeschwindigkeit	0,001 mm/min bis 200mm/min
Genauigkeit der eingestellten Antriebsgeschwindigkeit	1%
Wegauflösung des Antriebs	0,0083 μm
Positionier-Wiederholgenauigkeit	$\pm 2 \mu\text{m}$
Nennkraft F_{nom}	100 kN
Bruchkraft F_B	>300% von F_{nom}

Tabelle 10: Technische Daten der Zugprüfeinrichtung Zwick 100 [6]

Die Scherzugprobe wird mit beiden Enden in die Maschine eingespannt. Die Belastung erfolgt mittels der verfahrenen Traverse, die mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit von 1,5 mm/min die Probe belastet. Bei Erreichen der erwarteten Steckgrenze wird die Probe auf ungefähr 20% der erwarteten Kraft entspannt und anschließend wieder bis zum Versagen der Probe belastet. Eine typische Kraft-Weg-Kurve eines Scherzugversuches ist in Anlage VIII im Anhang dargestellt [NASM 1312-4].

Der gesamte Prozess wird in einem Kraft-Weg-Diagramm festgehalten. Das Entlasten der Probe zeichnet sich in dem Diagramm durch eine Schleife aus. Hat man die Probe oberhalb der tatsächlichen Dehngrenze der Nietverbindung entlastet, bildet sich beim erneuten Belasten ein anderes Modul als beim Entlasten. Um die tatsächliche Dehngrenze nun zu bestimmen, wird die zweite entwickelte Steigung nun solange in Richtung Ursprung verschoben, bis der Abstand auf der X-Achse zur Ordinate dem entspricht, der für diese Verbindung vorgeschrieben ist (0,04 x Nenndurchmesser des Bolzen).

Der Versuch wurde mit vier verschiedenen Blechdicken durchgeführt, um die geforderten Klemmlängenbereiche laut der Testmatrix zu erfüllen. Wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert, wurden die Blechdicken an die Verfügbarkeit des Materials angepasst. Die angepassten Werte sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. Die genauen Maße aller Bleche sind der Anlage IX im Anhang zu entnehmen.

Probenbezeichnung	Nenn-Blechdicke [mm]	Nietdurchmesser [mm]
A	2,50 (x 2 = 5,00)	4,80
Ba	3,30 (x 2 = 6,60)	4,80
Ca	3,10 (x 2 = 6,20)	4,80
D	5,20 (x 2 = 10,40)	4,80
E	2,50 (x 2 = 5,00)	4,80
Fa	2,50 (x 2 = 5,00)	4,80
Ga	3,30 (x2 = 6,60)	5,50
Gb	3,30 (x2 = 6,60)	6,30

Tabelle 11: Bleche der Scherzugproben

4.4.3 Kopfzugversuche

Für die Kopfzugversuche wird ebenfalls die Materialprüfmaschine Z100/TL3A, Baujahr 1997, der Firma Zwick GmbH & Co. KG verwendet. Die entsprechenden Bleche werden nach der Fertigungsnorm NASM 1312-8 zugeschnitten. Die Abmaße sind der folgenden Skizze zu entnehmen.

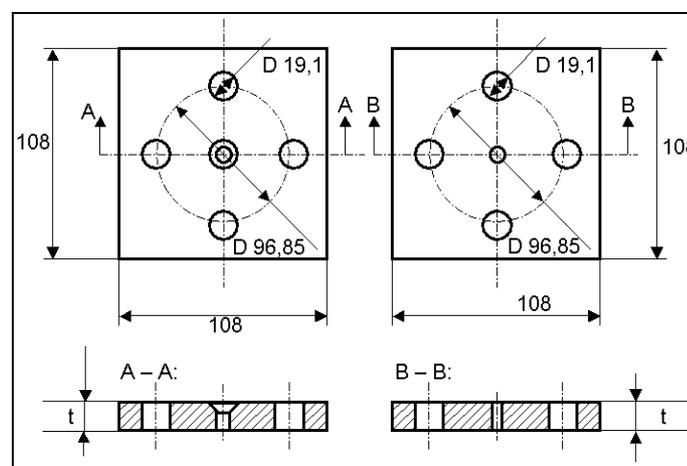


Abbildung 17: Kopfzugversuch – Probe nach NASM 1312-8 (in mm)

Nach dem Zuschneiden der Bleche werden jeweils zwei Bleche über eine Lockbolt-Verbindung gesetzt. Der Setzprozess ist der gleiche wie in Kapitel 4.4.1 bereits beschrieben. Es ist darauf zu achten, dass die beiden Bleche zueinander um 45° versetzt angeordnet sind, um in folgende Apparatur eingespannt werden zu können:

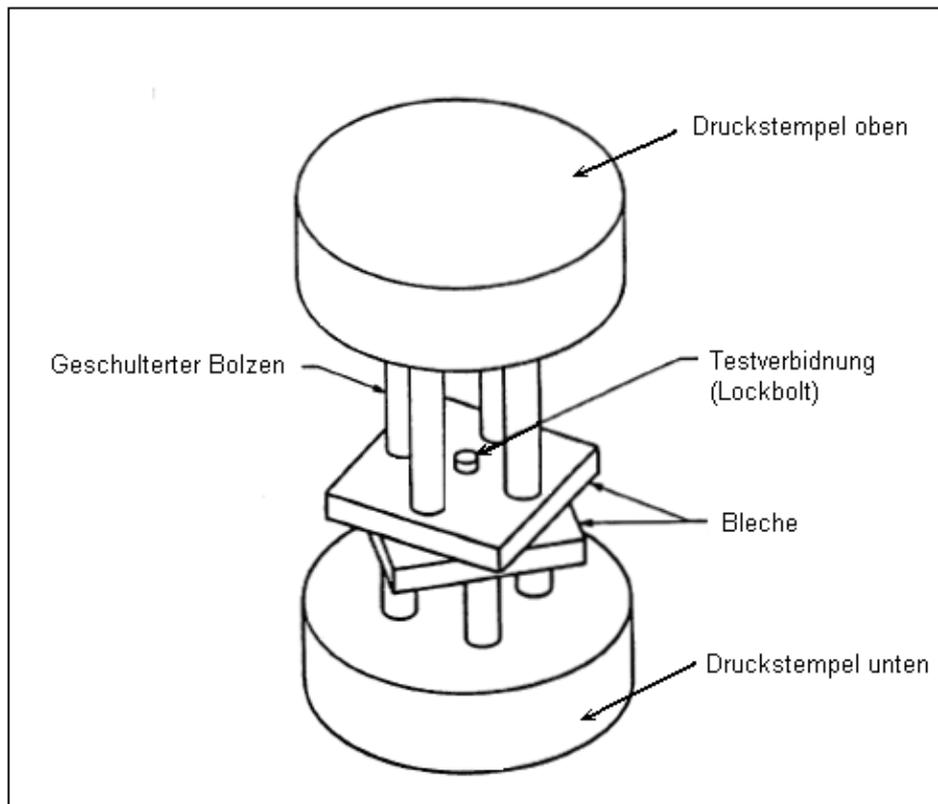


Abbildung 18: Kopfzugversuchs-Apparatur nach NASM 1312-8

Der Versuch wurde mit drei verschiedenen Blechdicken durchgeführt, um die geforderten Klemmlängenbereiche laut der Testmatrix zu erfüllen. Wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert, wurden die Blechdicken auch hier an die Verfügbarkeit des Materials angepasst. Die angepassten Werte sind in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Probenbez.	Nenn-Blechdicke [mm]	Bohrsenker	Nietdurchmesser [mm]
A	2,50 (x 2 = 5,00)	4,79 mm	4,80
Ca	3,10 (x 2 = 6,20)	4,79 mm	4,80
Fa	2,50 (x 2 = 5,00)	4,74 mm	4,80

Tabelle 12: Bleche der Kopfzugproben

4.5 Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zusammengetragen. Neben charakteristischen Kraft-Weg-Verläufen jeder Probenreihe in Form von Diagrammen werden ebenfalls detaillierte Kraft-Weg-Verläufe einzelner Proben analysiert und mit entsprechenden Bildbeispielen erläutert. So soll zum einen deutlich werden, wie der Installationsprozess durch eine Parameteränderung der Lockbolt-Verbindung beeinflusst wird, zum anderen die damit verbundenen Auswirkungen auf die Bruchlasten nach Scherzug- bzw. Kopfzugbelastung.

4.5.1 Lockbolt-Installationen

Diagramm 1 zeigt exemplarisch den Kraft-Weg-Verlauf während der Installation für ausgewählte Proben. Es ist jeweils eine charakteristische Kurve jeder Probenreihe dargestellt. Alle anderen Proben jeder Reihe sind aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht dargestellt, aber der Anlage X im Anhang zu entnehmen.

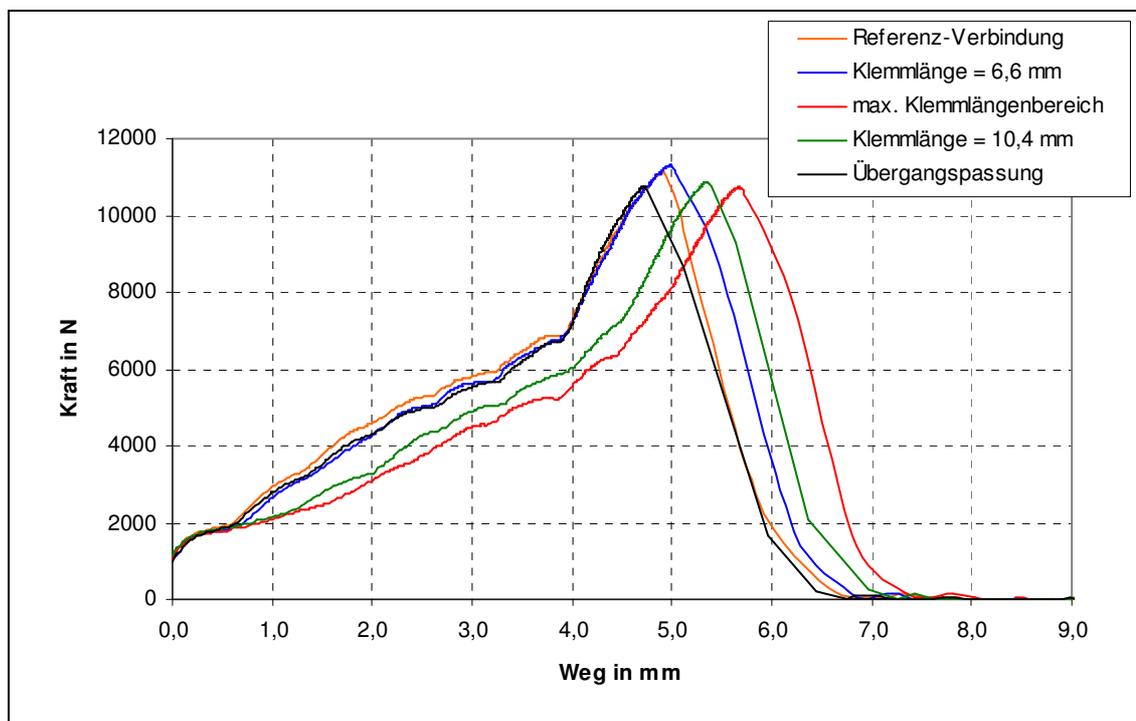


Diagramm 1: Kraft-Weg-Vergleich während der Installation für verschiedene Lockbolt-Fügevarianten

Das Diagramm 1 soll deutlich machen, dass die Lockbolt-Verbindungen bei einer Maximalkraft von ca. 11.000 N gesetzt werden. Bei dieser Maximalkraft reißt der Abreißbolzen des Lockbolts ab und der Fügeprozess ist damit beendet.

Deutlich wird aber auch, dass die Maximalkräfte bei einer Parameteränderung der Lockbolt-Verbindung in einem Umfang von etwa 600 N variieren. So liegt die Abreißkraft eine Lockbolt-Verbindung mit Übergangspassung bei 10.733 N, während diese 11.302 N beträgt, wenn eine Verbindung mit einer Klemmlänge von 6,6 mm betrachtet wird.

Auch die Abreißwege werden durch entsprechende Parameteränderungen beeinflusst. So reißt der Bolzen einer Verbindung, die im maximalen Klemmlängenbereich gesetzt wird, bei 5,67 mm Wegänderung, wo hingegen nur eine Wegänderung von 4,73 mm erreicht wird, wenn die Verbindung als Übergangspassung gesetzt wird.

Die Kraft-Weg-Verläufe aus Diagramm 1 sind allerdings auch kritisch zu betrachten. Die Kraft-Aufzeichnung beginnt erst bei ca. 1000 Newton, was mit der Voreinstellung der Kraftmessdose zu tun hat. Ebenfalls kritisch zu sehen ist der Kurvenverlauf nach dem Abreißen des Bolzen. Die Kraft müsste hier sofort auf Null zurückgehen, so wie in Diagramm 2 der Kraft-Zeit-Verlauf beweist.

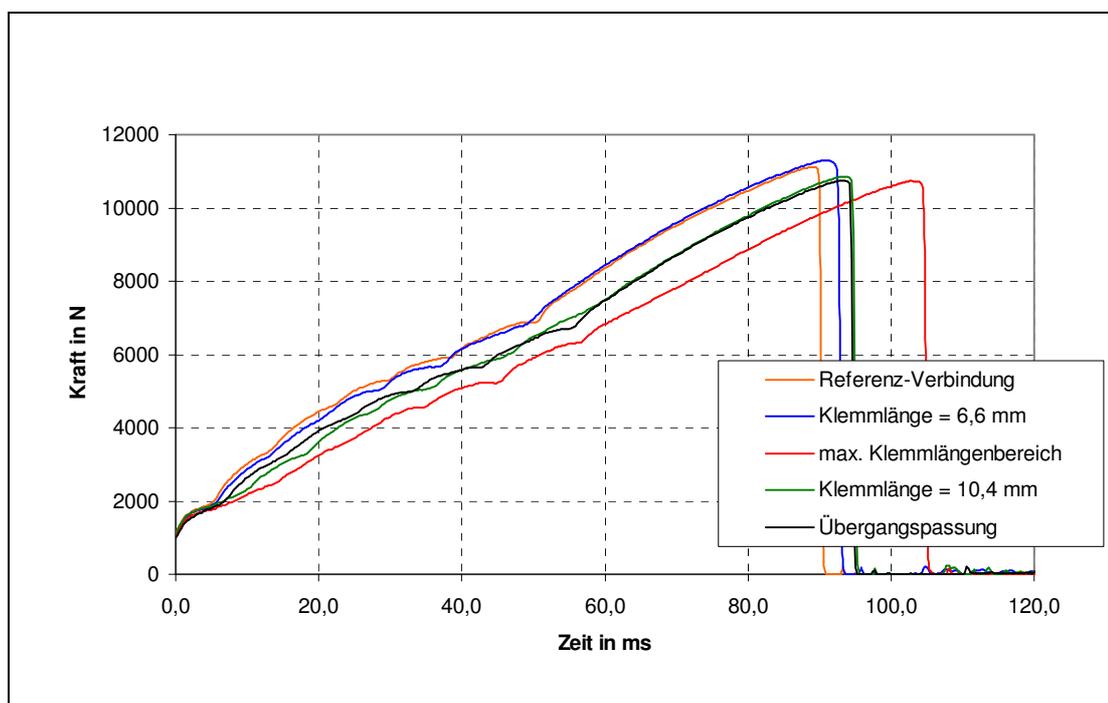


Diagramm 2: Kraft-Zeit-Vergleich während der Installation für verschiedene Lockbolt-Fügevarianten

Dies hängt mit der Aufnahme von nur drei bis fünf Messpunkten nach dem Abreißen zusammen. Die Elastizität der Werkzeugbauteile, z. B. der Adapterstücke, führt dazu, dass nach dem Abreißen des Bolzen die Kraft nur langsam auf Null zurückgeht, was mit dem Messaufnehmer nicht korrekt aufgezeichnet werden kann. Diese Erkenntnisse müssen nachher für den Vergleich mit der Simulation berücksichtigt werden. Alle Installationskurven können nach dem Abreißvorgang „abgeschnitten“ werden, da der weitere Verlauf also keinen realen Zustand darstellt. In der Anlage X im Anhang sind alle Installationsverläufe bereits korrigiert dargestellt.

Nach dem Setzprozess werden ebenfalls die Collar aller verfügbaren Proben vermessen. Für die Vermessung wird ein Mikroskop verwendet, welches an ein Computerprogramm angeschlossen ist. Die geringe Größe und die Unhandlichkeit der installierten Proben führen dazu, dass eine Messung mit einem normalen Messschieber zu ungenau bzw. in Axialrichtung gar nicht möglich wäre.

Als Mikroskop wird ein OLYMPUS SZ61 verwendet, welches als Stereomikroskop auch mit einem Adapter für Digitalkameras ausgestattet ist, Abbildung 19. Als Software dient „ANALYSIS“, ebenfalls von OLYMPUS. Mit dieser Vermessungs-Software lässt sich die im Mikroskop eingespannte Probe digitalisieren. Dazu wird ein Foto aufgenommen, welches auf dem Bildschirm vergrößert dargestellt und mit Hilfe einer Messeinrichtung an beliebigen Punkten vermessen werden kann.



Abbildung 19: OLYMPUS SZ61

Die gewählten vier Vermessungspunkte sind in Abbildung 20 dargestellt.

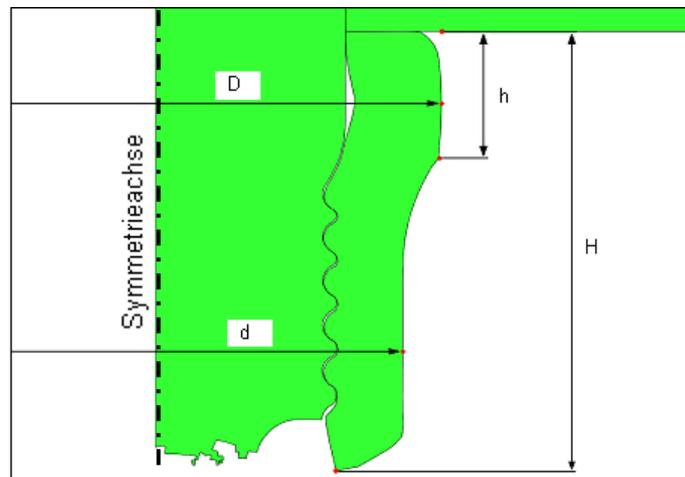


Abbildung 20: Definition der Messgrößen am Collar

Ermittelt wurden jeweils die Außendurchmesser d und D , sowie die Gesamthöhe H und die gestauchte Höhe h des Collars. Die Mittelwerte für alle vermessenen Punkte sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Trotz exakter Kalibrierung der Kamera sind die Messergebnisse der Collar-Vermessung streuungsbehaftet. Die Konturkanten des Collars werden per Mausclick angewählt. Dabei verursacht ein Pixelsprung bereits eine Differenz von $10\ \mu\text{m}$. Das liegt zwar im Toleranzbereich der Kamera, kann aber in Kombination mit der ungenauen Konturauswahl zu einem Fehler von bis zu 3% führen.

Das SZ61 hat einen Vergrößerungsbereich von $6,7\times$ bis $45\times$, bei Verwendung eines $10\times$ Okulars. Hauptsächlich in niedriger Vergrößerung, bei $6,7\times$ bis $27\times$, treten Messungenauigkeiten auf. Tests haben gezeigt, dass eine mittlere bis hohe Vergrößerung die wenigsten Fehler verursacht.

Minimaler Klemmbereich/ Presspassung* (Probenreihe A)			Maximaler Klemmbereich/ Presspassung* (Probenreihe Ca)		
D	6,971 mm	Min: 6,915 mm Max: 7,027 mm	D	6,986 mm	Min: 6,949 mm Max: 7,022 mm
d	6,100 mm	Min: 6,063 mm Max: 6,125 mm	d	6,119 mm	Min: 6,119 mm Max: 6,119 mm
H	5,954 mm	Min: 5,867 mm Max: 6,052 mm	H	6,080 mm	Min: 6,063 mm Max: 6,102 mm
h	1,397 mm	Min: 1,318 mm Max: 1,542 mm	h	0,627 mm	Min: 0,572 mm Max: 0,701 mm
* Anzahl gemessener Collar: 8			* Anzahl gemessener Collar: 2		

Klemmlänge = 10 mm/ Presspassung* (Probenreihe D)			Minimaler Klemmbereich/ Übergangspassung* (Probenreihe Fa)		
D	6,971 mm	Min: 6,943 mm Max: 6,999 mm	D	7,011 mm	Min: 7,011 mm Max: 7,011 mm
d	6,074 mm	Min: 6,063 mm Max: 6,085 mm	d	6,094 mm	Min: 6,085 mm Max: 6,102 mm
H	5,859 mm	Min: 5,850 mm Max: 5,867 mm	H	6,038 mm	Min: 5,956 mm Max: 6,119 mm
h	0,790 mm	Min: 0,679 mm Max: 0,897 mm	h	1,501 mm	Min: 1,436 mm Max: 1,554 mm
* Anzahl gemessener Collar: 2			* Anzahl gemessener Collar: 2		

Nenndurchmesser des Bolzen = 5,6 mm* (Probenreihe Ga)			Nenndurchmesser des Bolzen = 6,4 mm* (Probenreihe Gb)		
D	8,042 mm	Min: 7,990 mm Max: 8,090 mm	D	9,163 mm	Min: 9,090 mm Max: 9,210 mm
d	7,074 mm	Min: 7,040 mm Max: 7,090 mm	d	8,203 mm	Min: 8,040 mm Max: 8,190 mm
H	7,131 mm	Min: 7,040 mm Max: 7,250 mm	H	7,198 mm	Min: 7,045 mm Max: 7,395 mm
h	1,888 mm	Min: 1,795 mm Max: 1,970 mm	h	2,131 mm	Min: 1,910 mm Max: 1,365 mm
* Anzahl gemessener Collar: 10			* Anzahl gemessener Collar: 12		

Tabelle 13: Collar-Maße nach der Installation

Die Messergebnisse sollten auf jeden Fall mit den Messergebnissen aus den Schliffbildern verglichen werden.

Abbildung 21 zeigt die Mikroskop-Aufnahme einer exemplarischen Collar-Vermessung mit der Vermessungssoftware.

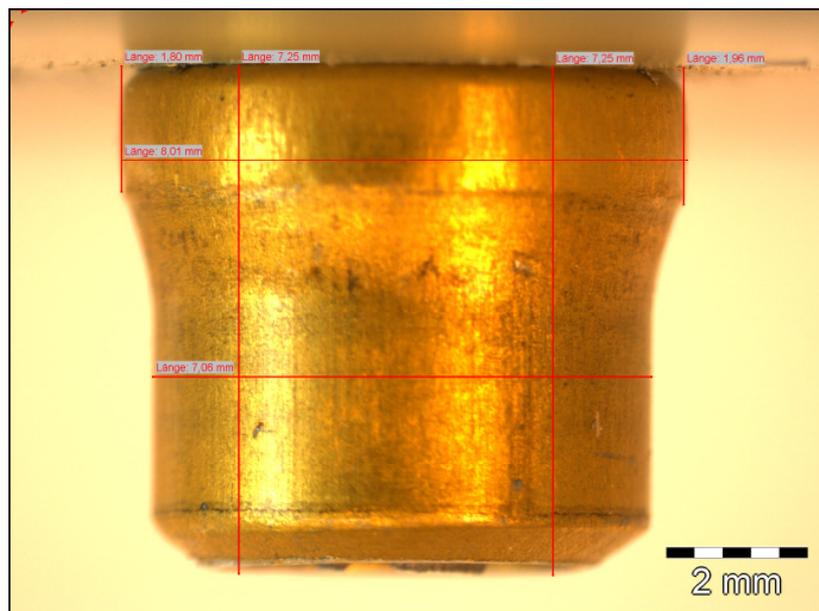


Abbildung 21: Mikroskop-Aufnahme des Collars der Probe mit variiertem Nenndurchmesser (= 5,6 mm) des Bolzen (Probe Al-LB-Ga-S1-2)

4.5.2 Scherzugversuche

Für jede Probenvariante wurden 5 bis 7 Versuche durchgeführt. Die unterschiedlichen Bruchlasten und die Versagensart der jeweiligen Proben sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Probenbezeichnung	Bruchlast [N]	Versagensart
A-IS1-1/A-IS1-2	19.398,83	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
A-IS2-1/A-IS2-2	20.305,82	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
A-IS3-1/A-IS3-2	20.585,57	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
A-IS4-1/A-IS4-2	19.048,54	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
A-IS5-1/A-IS5-2	20.493,25	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
A-IS6-1/A-IS6-2	20.295,89	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Ø 20,0 kN		

Ba-IS1-1/Ba-IS1-2	22.992,30	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ba-IS2-1/Ba-IS2-2	23.077,82	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ba-IS3-1/Ba-IS3-2	22.69742	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ba-IS4-1/Ba-IS4-2	22.444,86	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ba-IS5-1/Ba-IS5-2	22.862,19	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ba-IS6-1/Ba-IS6-2	22.847,73	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ø 22,8 kN		

Ca-IS1-1/Ca-IS1-2	20.520,77	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ca-IS2-1/Ca-IS2-2	20.632,00	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ca-IS3-1/Ca-IS3-2	20.270,76	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ca-IS4-1/Ca-IS4-2	20.307,51	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ca-IS5-1/Ca-IS5-2	20.400,17	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ca-IS6-1/Ca-IS6-2	20.399,04	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Ca-IS8-1/Ca-IS8-2	20.312,62	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
	Ø 20,4 kN	

D-IS1-1/D-IS1-2	29.202,56	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
D-IS2-1/D-IS2-2	28.276,99	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
D-IS3-1/D-IS3-2	28.430,47	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
D-IS4-1/D-IS4-2	28.932,87	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
D-IS5-1/D-IS5-2	29.501,99	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
D-IS6-1/D-IS6-2	28.733,41	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
	Ø 28,8 kN	

Fa-IS1-1/Fa-IS1-2	18.647,96	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Fa-IS2-1/Fa-IS2-2	20.051,20	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Fa-IS3-1/Fa-IS3-2	19.138,81	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Fa-IS4-1/Fa-IS4-2	19.921,95	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Fa-IS5-1/Fa-IS5-2	19.355,33	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Fa-IS6-1/Fa-IS6-2	19.172,26	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
	Ø 19,4 kN	

Ga-IS1-1/Ga-IS1-2	31.059,51	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Ga-IS2-1/Ga-IS2-2	31.492,36	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Ga-IS3-1/Ga-IS3-2	31.517,09	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Ga-IS4-1/Ga-IS4-2	31.244,32	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Ga-IS5-1/Ga-IS5-2	31.308,07	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
	Ø 31,3 kN	

Gb-IS1-1/Gb-IS1-2	33.547,22	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Gb-IS2-1/Gb-IS2-2	34.745,62	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Gb-IS3-1/Gb-IS3-2	35.674,03	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Gb-IS4-1/Gb-IS4-2	35.979,89	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
Gb-IS5-1/Gb-IS5-2	33.392,02	Collar-Versagen (Collar-Fracture-Failure)
Gb-IS6-1/Gb-IS6-2	36.116,46	Blechabscherung (Shear-out-Failure)
	Ø 34,9 kN	

Tabelle 14: Übersicht über die Bruchlasten und Versagensarten der verschiedenen Probenreihen nach Scherzugversuch

Anhand der Tabelle 14 lassen sich bei den Scherzugversuchen zwei unterschiedliche Versagensmodi feststellen:

Zum einen die Blechabscherung, zum anderen das Collar-Versagen. Welches Versagen auftritt, richtet sich nach dem Nietdurchmesser, der Klemmlänge und der Passung.

Auffällig ist, dass die Referenzverbindung ausschließlich durch Blechabscherung versagt, sowie die Variante Al-LB-Ga, bei der die Klemmlänge auf 6,4 mm und der Bolzendurchmesser auf 5,5 mm vergrößert wurden.

Die Varianten Al-LB-Ca (maximaler Klemmlängenbereich), Al-LB-Ba (Klemmlänge 6,6 mm) und Al-LB-D (Klemmlänge 10,4 mm) zeigen ausschließlich Collar-Versagen. Die Varianten Al-LB-Fa und Al-LB-Gb, die mit eine Übergangspassung gefügt wurden, zeigen beide Versagensmodi.

Abbildung 22 zeigt ein Beispiel für den Versagensmodus Blechabriss, Abbildung 23 ein Beispiel für Collar-Versagen.

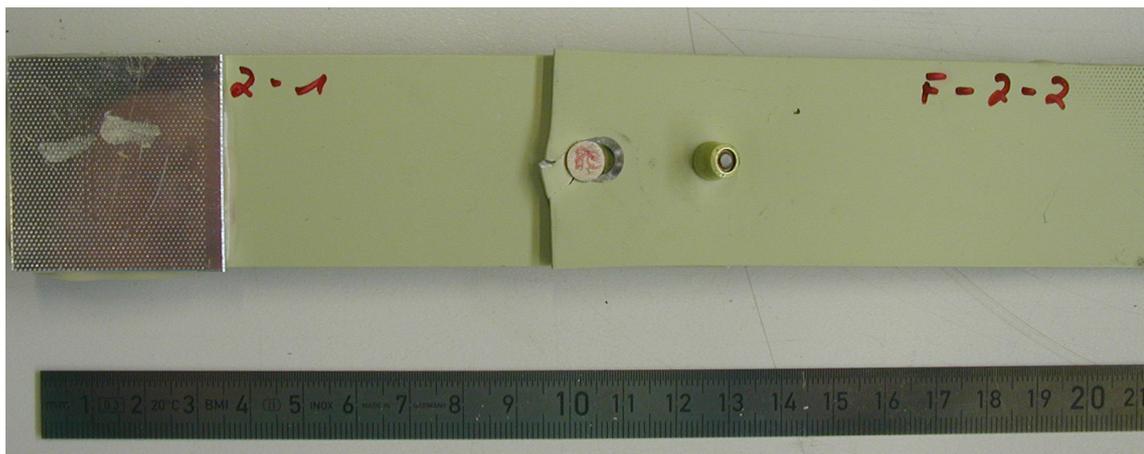


Abbildung 22: Blechabscherung nach Scherzug an Probe Al-LB Fa-2-1/Fa-2-2

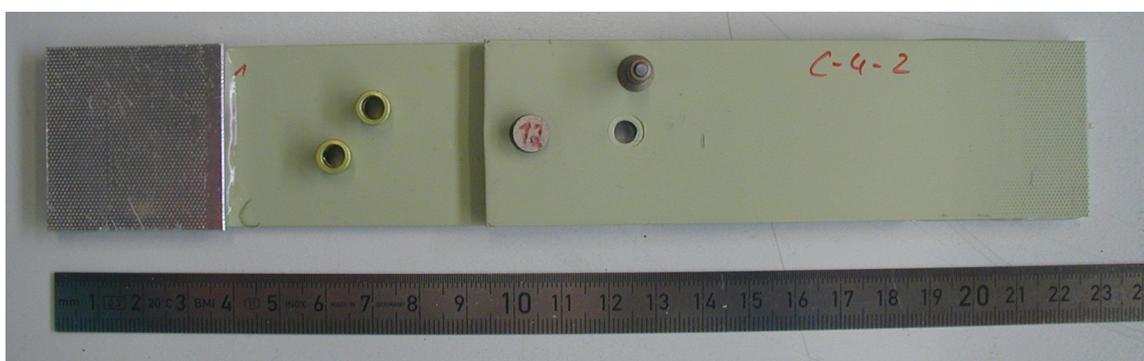


Abbildung 23: Collar-Versagen nach Scherzug an Probe Al-LB Ca-4-1/Ca-4-2

Die Bruchlasten der Proben einer jeweiligen Probenreihe sind untereinander nur wenig streuungsbehaftet. Bei den Probenreihen mit variiertem Klemmlänge zeichnen sich mit größerer Klemmlänge auch höhere Bruchlasten ab. So wird z. B. bei der Variante Al-LB-D, die mit einer Klemmlänge von 10,4 mm gefügt wurde, eine mittlere Bruchlast von 28,8 kN erreicht, gegenüber 20,0 kN der Referenzverbindung, die eine Klemmlänge von 5,0 mm aufweist.

Diagramm 3 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf aller sechs Referenz-Proben.

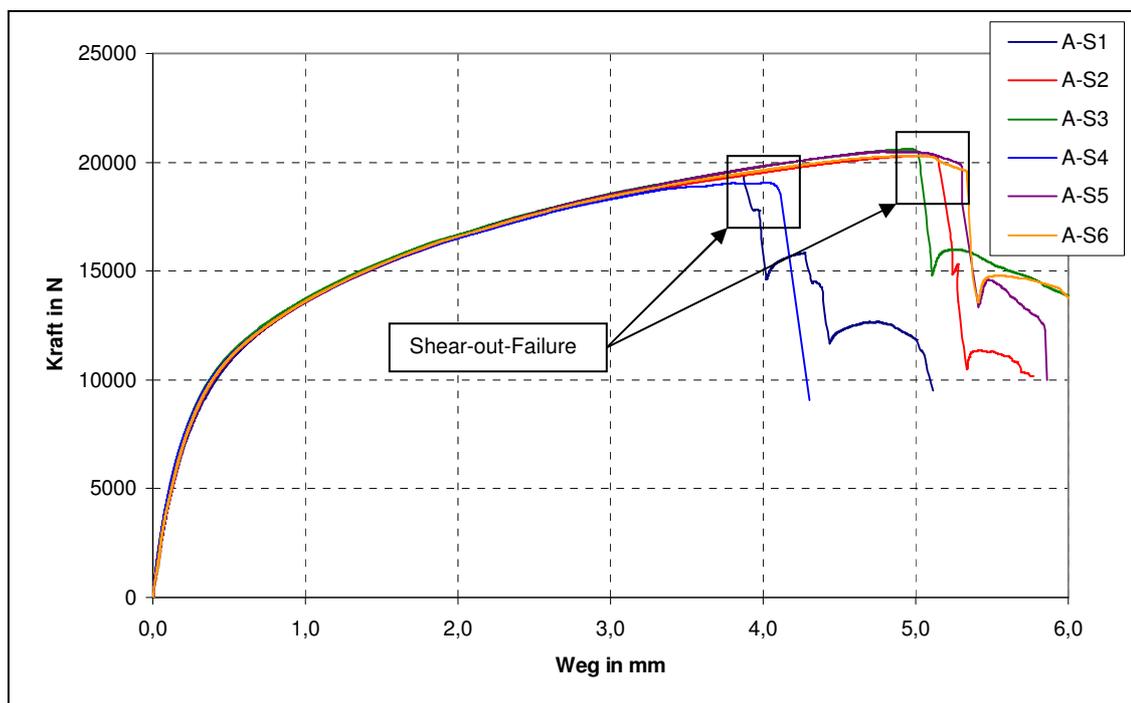


Diagramm 3: Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A nach Scherzug

Die höchsten Bruchlasten werden bei Variante Al-LB-Gb erreicht. Die Klemmlänge ist hier 6,4 mm und der Bolzendurchmesser 6,3 mm. Die mittlere Bruchlast dieser Variante beträgt 34,9 kN.

Auch mit der Variante Al-LB-Ba, bei der die Klemmlänge 6,6 mm beträgt, lassen sich höhere Bruchlasten feststellen als bei der Referenz-Verbindung. Diagramm 4 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf dieser Probenreihe.

In Diagramm 5 ist der Kraft-Weg-Verlauf für die Variante mit Übergangspassung dargestellt. Die Bruchlasten dieser Variante liegen im Schnitt 1 kN niedriger als die der Referenz-Verbindung (Presspassung).

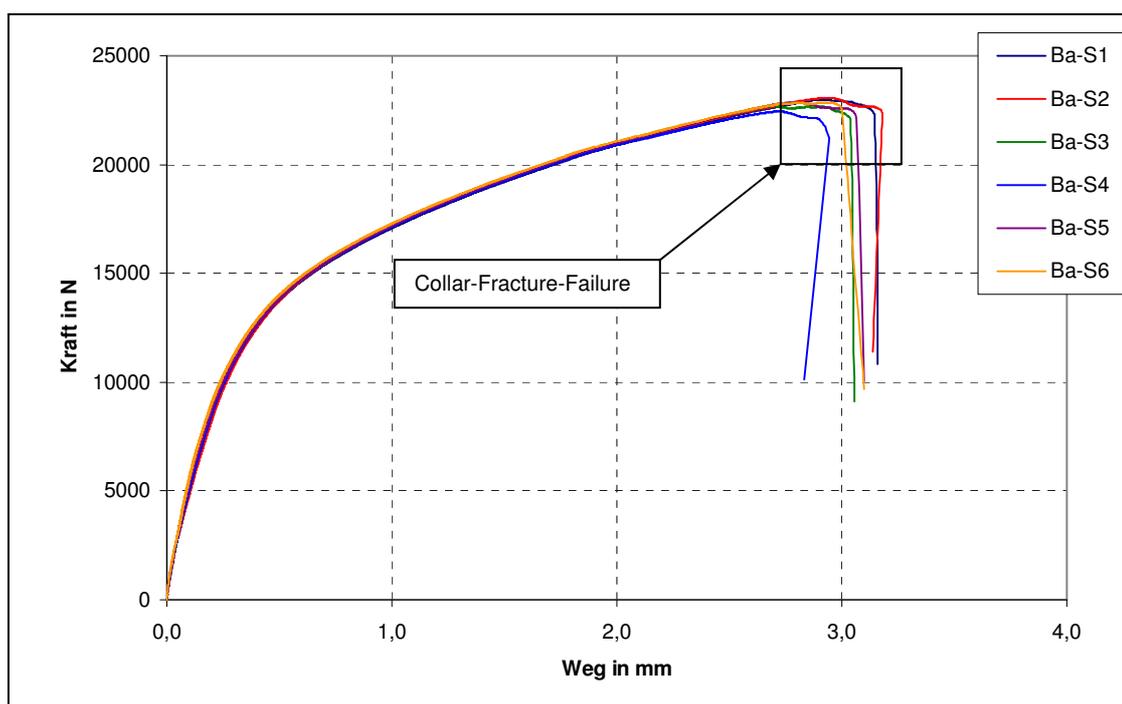


Diagramm 4: Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Ba [Klemmlänge = 6,6 mm] nach Scherzug

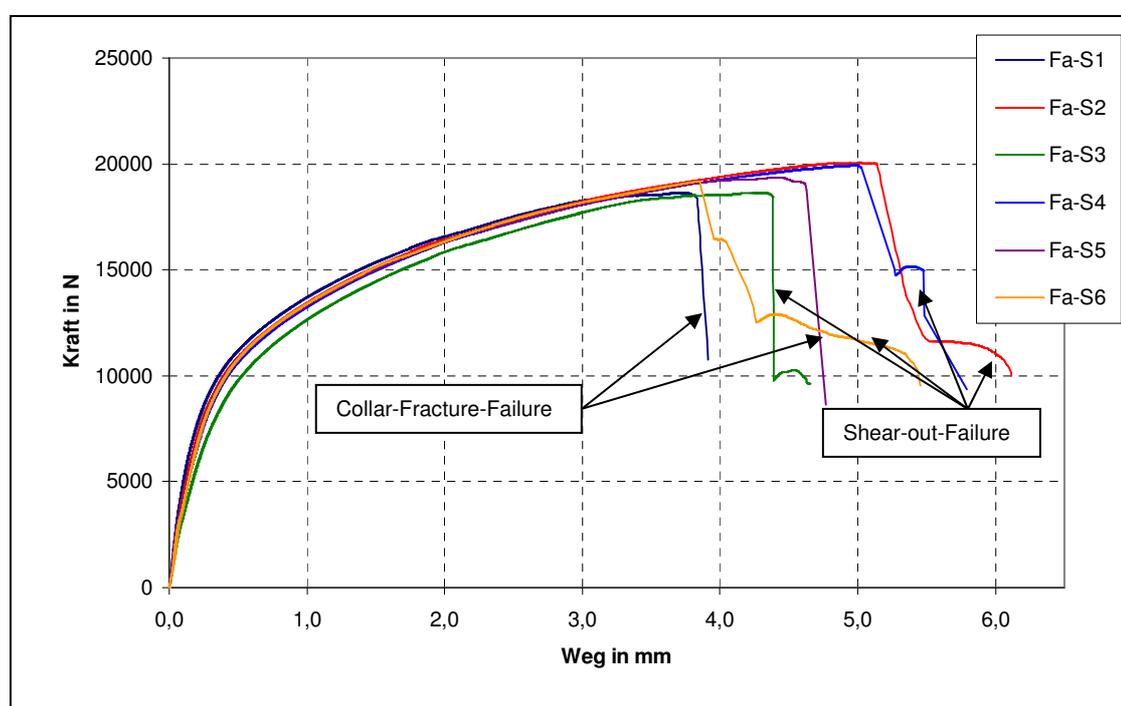


Diagramm 5: Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Fa [Übergangspassung] nach Scherzug

Alle hier nicht dargestellten Kraft-Weg-Verläufe der übrigen Varianten, sowie Bildbeispiele zum jeweiligen Versagensmodus, sind im Anhang XI dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich also aussagen, dass bestimmte Parameteränderungen an der Referenzverbindung die Versagensart und die Bruchlast der jeweiligen Verbindung erheblich beeinflussen.

Entscheidend sind die Wahl des Lockbolts, die Klemmlänge und damit die Dicke der Verbindung, sowie die Passung.

Durch die Wahl einer Presspassung lässt sich in jedem Fall die Bruchlast steigern und der Versagensmodus besser vorhersagen.

Allgemein gilt: Bei gleichzeitiger Vergrößerung der Bolzendurchmesser und der Klemmlänge lassen sich die höchsten Bruchlasten erzielen. Welche Variante letztlich am Günstigsten ist muss im Einzelfall geprüft werden und ist abhängig von den Anforderungen an die Lockbolt-Verbindung.

Für die Lockbolts mit Universalkopf der Probenreihe AI-LB-E sind an dieser Stelle im Rahmen der Testmatrix noch Versuche durchzuführen. Durch Lieferverzögerungen des Materials muss auf die Untersuchung dieser Lockbolt-Variante im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden.

4.5.3 Kopfzugversuche

Für die Bruchlast und den Versagensmodus nach Kopfzugbelastung ist vor allem die Tragfähigkeit der Lockbolt-Collar-Verbindung entscheidend. Vermutungen, dass nach Kopfzugbelastung die Lockbolts und Collar stärker in Mitleidenschaft gezogen werden, lassen sich durch die Experimente bestätigen. Es treten drei neue Versagensmodi auf: Flansch-Scherung, Bolzenschaft-Versagen und Kopf-Scher-Versagen. Eine Übersicht über die drei Versagensmodi liefert Abbildung 24.



Abbildung 24: Übersicht über die Versagensmodi am Lockbolt nach Kopfzug

Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Überblick über die unterschiedlichen Bruchlasten und die Versagensarten der jeweiligen Proben nach Kopfzugbelastung.

Probenbezeichnung	Bruchlast [N]	Versagensart
A-K1-1/A-K1-2	6619,74	Flansch-Scherung (Flange-Shear-Failure)
A-K2-1/A-K2-2	7021,74	Flansch-Scherung (Flange-Shear-Failure)
A-K3-1/A-K3-2	6820,83	Flansch-Scherung (Flange-Shear-Failure)
A-IS4-1/A-K4-2	6580,88	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
A-K5-1/A-K5-2	6539,75	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
A-K6-1/A-K6-2	6892,27	Flansch-Scherung (Flange-Shear-Failure)
Ø 6745,9		

Ca-K1-1/Ca-K1-2	8770,90	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
Ca-K2-1/Ca-K2-2	7746,64	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
Ca-K3-1/Ca-K3-2	7482,64	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
Ca-K4-1/Ca-K4-2	7345,50	Kopf-Scher-Versagen (Head-Shear-Failure)
Ca-K5-1/Ca-K5-2	7695,06	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
Ca-K6-1/Ca-K6-2	7531,78	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
Ø 7762,1		

Fa-K1-1/Fa-K1-2	6812,12	Flansch-Scherung (Flange-Shear-Failure)
Fa-K2-1/Fa-K2-2	6949,52	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
Fa-K3-1/Fa-K3-2	6891,18	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
Fa-K4-1/Fa-K4-2	6745,60	Kopf-Scher-Versagen (Head-Shear-Failure)
Fa-K5-1/Fa-K5-2	7026,32	Flansch-Scherung (Flange-Shear-Failure)
Fa-K6-1/Fa-K6-2	6890,49	Bolzenschaft-Versagen (Shank-Tension-Failure)
Ø 6885,9		

Tabelle 15: Übersicht über die Bruchlasten und Versagensarten der verschiedenen Probenreihen nach Kopfzugversuch

Abbildung 25 zeigt eine Kopfzugprobe der Probenreihe Al-LB-Fa (Übergangspassung) nach dem Zugversuch.

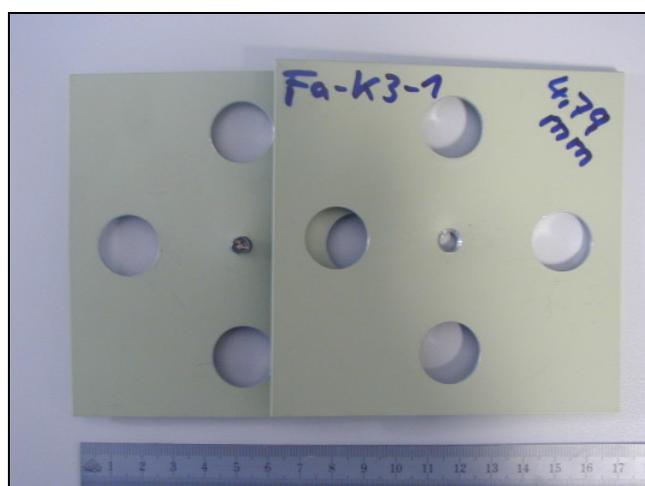


Abbildung 25: Probe Fa-K3-1/Fa-K3-2 nach Kopfzug

Während die Bleche selbst nur wenig verformt sind, werden die Verbindungen hauptsächlich durch Nietversagen zerstört.

Die Kraft-Weg-Verläufe der Proben einer jeweiligen Probenreihe liegen sehr eng zusammen, wie folgendes Beispiel anhand der Probenreihe Al-LB-A zeigt.

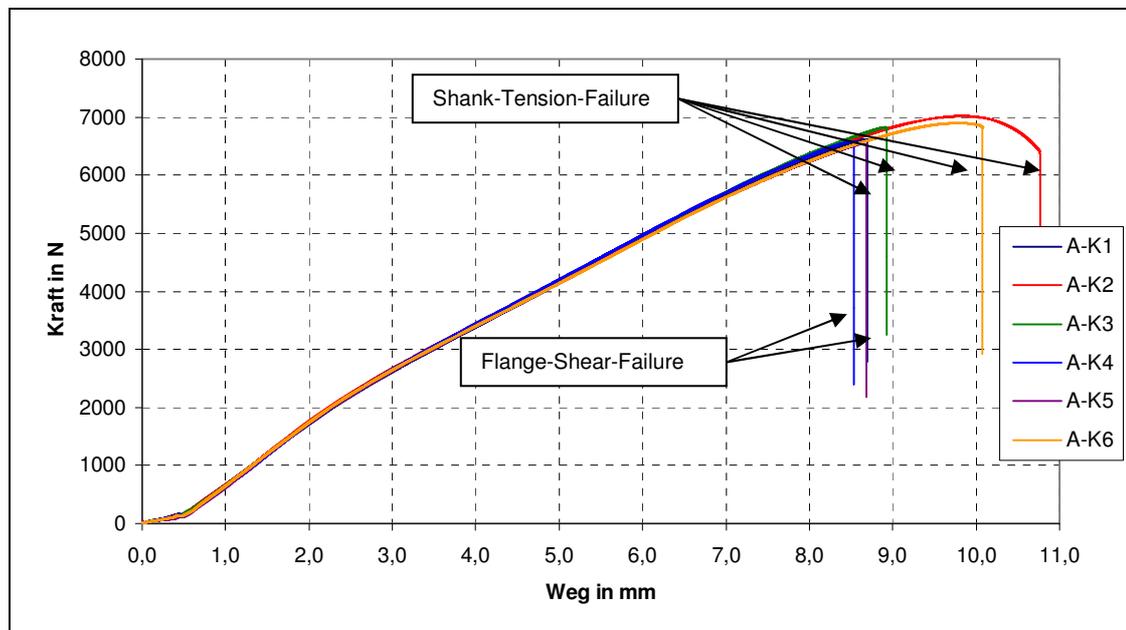


Diagramm 6: Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A nach Kopfzug

Die mittlere Bruchlast der Referenz-Verbindung beträgt nach Kopfzugbelastung 6745,9 N.

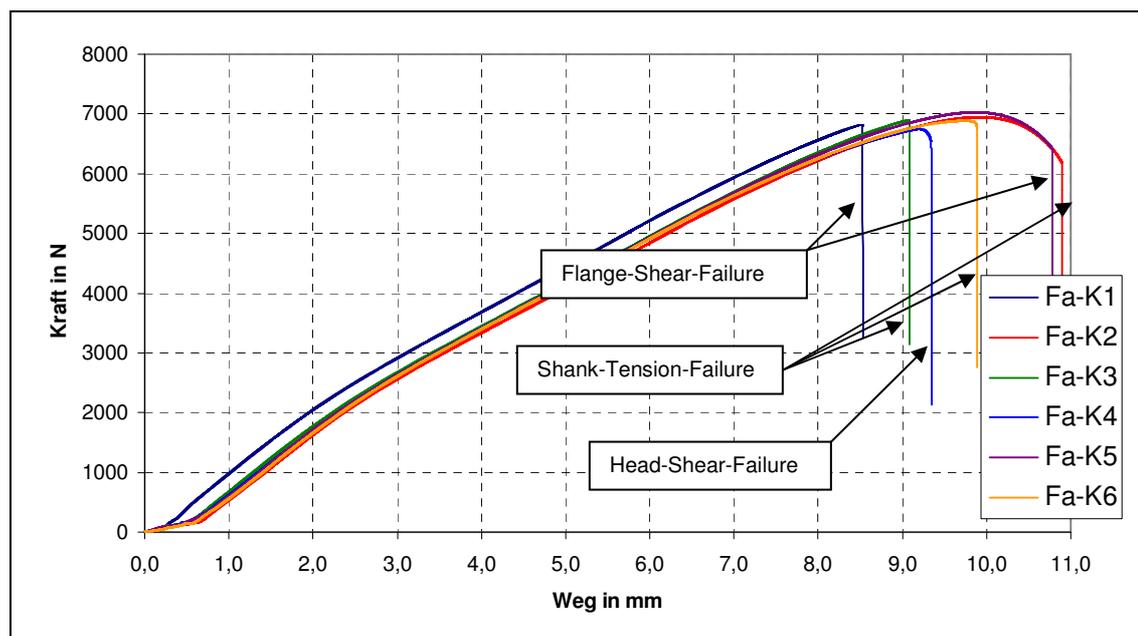


Diagramm 7: Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Fa [Übergangspassung]

Im Kraft-Weg-Verlauf für die Probenreihe Al-LB-Fa besteht, verglichen mit der Referenz-Verbindung, kaum ein Unterschied. Die Wahl, ob Presspassung oder Übergangspassung verwendet wird, scheint auf die maximale Bruchlast bei Kopfzugbeanspruchung also keinen Einfluss zu haben.

Die höchsten Bruchlasten von ca. 7500 N werden mit der Variante Al-LB-Ca erreicht, die mit maximal gültigem Klemmlängenbereich gefügt wurde. Der Kraft-Weg-Verlauf dieser Probenreihe ist in Diagramm 8 dargestellt.

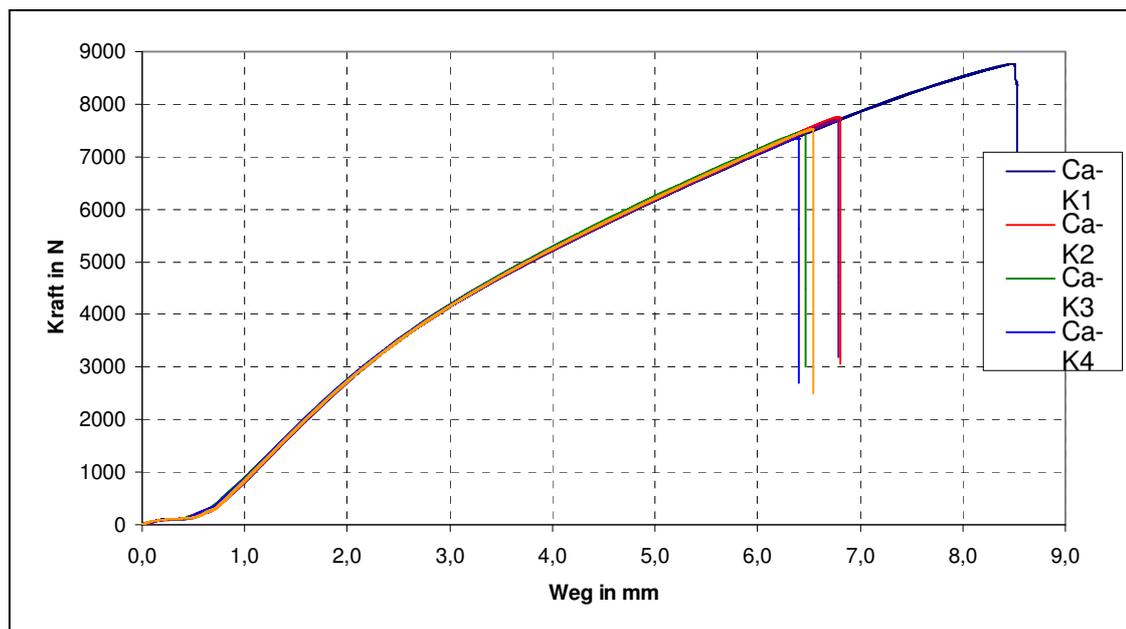


Diagramm 8: Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Ca [maximaler Klemmlängenbereich]

Zusammenfassend lässt sich auch bei den Kopfzugversuchen sagen, dass Bruchlast und Versagensart von der Wahl der Parameter abhängig sind.

Die Collar werden bei den Kopfzugversuchen nicht vom Lockbolt getrennt. Dies spricht für eine gute Rilleneinformung und damit Verbindung zwischen Lockbolt und Collar. Auch die Bleche werden bis auf leichte Verformungen nicht zerstört. Maßgeblich für ein Versagen ist also die Festigkeit des Lockbolts. Die Bruchlast kann über die Wahl des Klemmlängenbereiches beeinflusst werden.

Auch hier fehlt aufgrund von Lieferverzögerungen des Materials die Untersuchung der Lockbolt-Variante mit Universalkopf, Probenreihe Al-LB-E.

4.5.4 Schliffbilder

Im Rahmen der Untersuchungen wurde jeweils eine Lockbolt-Verbindung einer Probenreihe anhand des Schliffbildes analysiert.

Hierzu wurden Übersichtsaufnahmen der erstellten Schliffe erstellt. Abbildung 26 zeigt eine solche Übersichtsaufnahme für die Referenz-Lockbolt-Verbindung. Diese ist später mit den Ergebnissen aus der Simulation zu vergleichen.

Ebenfalls wurde der Collar vermessen, um einen Vergleich mit den Messdaten aus der Collar-Vermessung mit dem Mikroskop OLYMPUS SZ61 aus Kapitel 4.5.1 anzustellen. Das gesamte Untersuchungsprotokoll ist der Anlage XII im Anhang zu entnehmen.

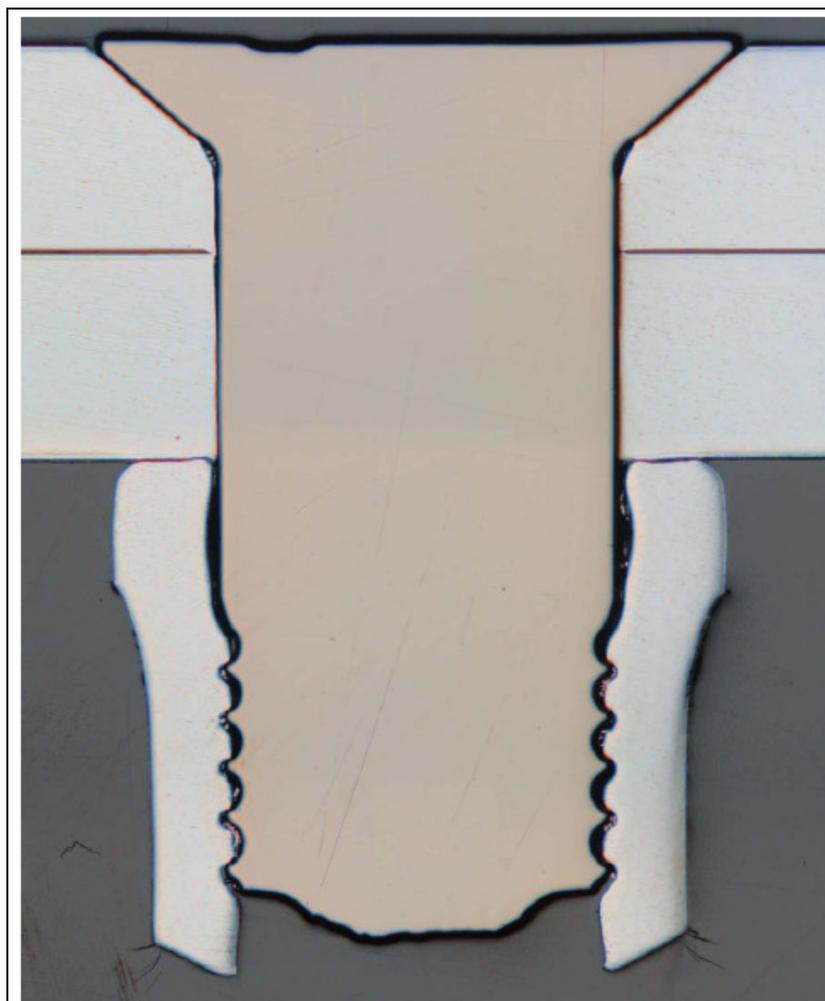


Abbildung 26: Übersichtsaufnahme von Niet 26 einer Referenz-Verbindung (AI-LB-A-7-1/AI-LB-7-2)

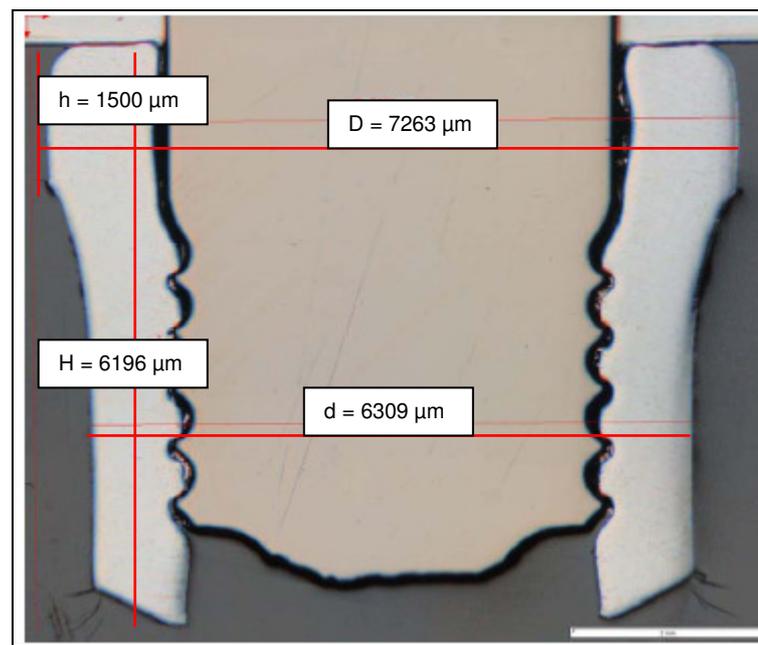


Abbildung 27: Collar-Vermessung aus der Schlibfbildanalyse von Niet 26

Für die Vermessung der Collar-Schliffe wurde das Mikroskop AX70 von OLYMPUS verwendet. Es ist ein automatisiertes Durchlicht-Fluoreszenzmikroskop. Der Vergleich der Collar-Vermessung mit dem Mikroskop SZ61 aus Kapitel 4.5.1 und der Vermessung der Schlibfbilder mit dem Mikroskop AX70 ist in Tabelle 15 am Beispiel der Referenz-Lockbolt-Verbindung dargestellt.

Die Messdaten zeigen, dass die Maße für die Durchmesser **D** und **d**, sowie der Gesamthöhe **H**, um 3-4% voneinander abweichen. Bei der gestauchten Höhe **h** gibt es eine Abweichung von fast 7%.

		Minimaler Klemmbereich/ Presspassung (Probenreihe A)				Minimaler Klemmbereich/ Presspassung (Probenreihe A)	
		Vermessung mit OLYMPUS SZ61				Vermessung der Schliffe mit OLYMPUS AX70	
D		6,971 mm	+4,0%	D		7,263 mm	
d		6,100 mm	+3,3%	d		6,309 mm	
H		5,954 mm	+3,9%	H		6,196 mm	
h		1,397 mm	+6,9%	h		1,500 mm	

Tabelle 16: Vergleich der ermittelten Messwerte am Collar mit SZ61 und AX70

4 Experimentelle Untersuchungen

Dies liegt neben der Messungsgenauigkeit daran, dass sich bei der Erstellung der Schliffe die Collar ein wenig aufweiten, weil die Eigenspannungen infolge des Auftrennens des Collars freigesetzt werden. Außerdem ist es schwierig, die genaue Schlifflage zu definieren. Idealerweise sollte eine symmetrische Schlifflage gewählt werden, was jedoch praktisch nicht genau möglich ist.

Mit der Schliffbildanalyse sind die experimentellen Untersuchungen der Lockbolt-Varianten abgeschlossen.

5 Simulation

5.1 Die Finite-Element-Methode

Die Finite-Element-Methode, kurz FEM, ist heute die am häufigsten verwendete Methode zur Berechnung komplexer Strukturen im Maschinen- und Apparatebau, im Bauwesen, sowie in der Fahrzeug-, Luft- und Raumfahrttechnik. Sie kann überall da eingesetzt werden, wo physikalische Erscheinungen durch partielle, orts- bzw. zeitabhängige Differentialgleichungen beschrieben werden können.

Bei der FE-Methode wird eine vorhandene Konstruktion in viele kleine, analytisch lösbare Teile, sogenannte Finite Elemente, zerlegt bzw. diskretisiert. Diese Teile bzw. Elemente sind durch End- und Eckpunkte, den sogenannten Knoten, definiert. Dadurch können komplizierte Geometrien, verschiedene Lagerbedingungen und bereichsweise unterschiedliche Werkstoffe berücksichtigt werden. Das mechanische Verhalten kleiner Elemente lässt sich hinreichend genau beschreiben, so dass die Lösungen auf Elementebene bekannt sind. Man erhält für jeden Knoten die Verschiebungen und Verdrehungen und kann daraus die Knotenkräfte, Elementverformungen, inneren Kräfte und Spannungen bestimmen. Anschließend wird aus den Einzellösungen unter Berücksichtigung von Gleichgewichts- und Verträglichkeitsbedingungen die Lösung für das Gesamtsystem ermittelt [10].

Das Prinzip der virtuellen Arbeit spielt bei dieser Vorgehensweise eine große Rolle. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich das zu betrachtende mechanische System unter Einwirkung äußerer Kräfte und geometrischer Bedingungen im Gleichgewicht befindet. Die Summe der gesamten virtuellen Arbeit δW , welche durch innere δW_{innere} und äußere $\delta W_{\text{äußere}}$ Kräfte und beliebige virtuelle Verschiebungen hervorgerufen wird, ist Null. Dieses Prinzip gilt für jedes Element:

$$\delta W = \sum \delta W = \delta W_{\text{innere}} + \delta W_{\text{äußere}} = 0 \quad (1)$$

Nun werden sogenannte Ansatzfunktionen aufgestellt, die so gewählt werden, dass Dehnungen und Querkräfte am entsprechenden Knoten konstant sind, Starrkörperverschiebungen beschrieben werden und Übergangsbedingungen

von einem zum nächsten Element erfüllt sind. Die Summe daraus ergibt die Näherungslösung. Dazu werden diese Verschiebungsansätze in das Integral, dass sich aus dem Prinzip der virtuellen Arbeit ergibt, dem Arbeitsintegral, eingesetzt und ausgewertet. Man erhält die Elementsteifigkeitsmatrix $[K]$ und den Lastvektor $\{F\}$. Alle Elementsteifigkeitsmatrizen $[K]$ führen dann zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix $[A]$ und damit zur Lösung der Gesamtknotenverschiebungen $\{d\}$ mit folgendem Ansatz [7]:

$$\{F\} = [A] \cdot \{d\} \quad (2)$$

Sind die Knotenverschiebungen bekannt, können alle Lagerkräfte, Schnittgrößen und Spannungen berechnet werden [10].

5.2 Anwendungen der FE-Methode

Die wichtigsten Anwendungsgebiete der FEM in der Strukturmechanik sind statische und strukturdynamische Berechnungen. Bei statischen Berechnungen wird zwischen linearer und nichtlineare Statik unterschieden, bei strukturdynamischen Berechnungen zwischen Eigenschwingungsanalysen, sowie zwischen Berechnungen im Frequenz- und Zeitbereich. Mit Hilfe der FE-Methode können Bauteile und Prozesse so optimiert werden, dass Prototypen und Nachbesserungen in der Fertigung und Produktion so gering wie möglich gehalten werden können.

5.2.1 Lineare statische Berechnungen

Bei statischen Berechnungen werden keine Einflüsse von Massenkräften erfasst, außer es handelt sich um Gewichts- oder konstanten Zentrifugalkräften.

Der Belastungsvorgang soll hinreichend langsam, „quasi-statisch“, erfolgen.

Als „quasi-statisch“ können Belastungen dann eingestuft werden, wenn die Zeitdauer der Lastaufbringung t_B länger als das Dreifache der Periodendauer der kleinsten Struktureigenfrequenz ist [11].

$$t_B \geq 3 \cdot T_1 \quad \text{mit} \quad T_1 = \frac{1}{f_1} \quad (3)$$

worin $f_1 = 1$. Eigenfrequenz und $T_1 =$ Periodendauer

Hierfür wird ein lineares Werkstoffgesetz vorausgesetzt, also rein elastisches Werkstoffverhalten.

Bei homogenem isotropen Werkstoffgesetz werden zwei Werkstoffkonstanten benötigt,

der **Elastizitätsmodul E** (engl.: Young's Modulus) und die **Querkontraktionszahl ν** (Poisson's Ratio).

Der **Gleitmodul** ist eine abgeleitete Größe und wird bestimmt aus

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (4)$$

Unter „homogen“ wird eine durchweg gleichartige Materialzusammensetzung verstanden, die mechanisch nicht in unterschiedliche Werkstoffe zerlegt werden kann.

Bei orthotropem Werkstoffverhalten sind

- drei Elastizitätsmoduln E_x, E_y, E_z ;
- drei Gleitmoduln G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} ;
- und drei Querkontraktionen $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$ anzugeben.

Bei vollständig anisotropem Materialverhalten sind zur Aufstellung der symmetrischen Elastizitätsmatrix 21 Materialkennwerte einzugeben.

5.2.2 Nichtlineare statische Berechnungen

Heutige Berechnungsanforderungen verlangen aber nach einer Methode, die auch nicht-linear statisches Verhalten komplexer Strukturen möglichst real wiedergibt.

Als Beispiele sind das Nachbeulverhalten dünnwandiger Schalen, Strukturen mit großen Verschiebungen, Verzerrungen und wechselnden Randbedingungen sowie thermische Belastungen zu nennen.

Allgemein unterscheidet man drei wesentliche nichtlineare Eigenschaften:

1. Geometrische Nichtlinearität
 - z. B. Große Verschiebungen (Dehnungen), große Verzerrungen;
2. Physikalische Nichtlinearität (Material-Nichtlinearität)
 - z. B. Nichtlinear elastisches oder plastisches Werkstoffverhalten;
3. Strukturelle Nichtlinearität (nichtlineare Strukturdynamik)
 - z. B. Wechselnder Kontakt mit und ohne Reibung, Rissbildung.

Die Lastaufbringung erfolgt in Teilschritten, in jedem Lastschritt oder Inkrement werden die Lösungen iterativ erzeugt. Das bekannteste Lösungsverfahren ist das Newton-Raphson-Verfahren, benannt nach Sir Isaac Newton und Joseph Raphson [10].

5.2.3 Strukturdynamische Berechnungen

Die rechenintensivsten Formen der Strukturberechnung sind nichtlineare dynamische Berechnungen im Zeitbereich. Dazu werden die Differenzialgleichungssysteme der Bewegungsabläufe direkt integriert. Dies kann explizit oder implizit geschehen. Das Ziel sind die Ermittlung der Verformungen und der aufgenommenen Verzerrungsenergie von Bauteilen und Gesamtstrukturen als Funktion der Zeit. So können in jedem Zeitschnitt die Schnittgrößen und die Spannungen in der Struktur angegeben werden [10].

5.3 Das FEM-Programm ABAQUS 6.7

Das Finite-Element-Programm ABAQUS wird in der vorliegenden Bachelor-Thesis verwendet und soll deshalb in seinen wesentlichen Merkmalen kurz diskutiert werden.

Das Programm ist, wie im Übrigen auch die meisten FE-Programme, nach folgender Struktur aufgebaut:

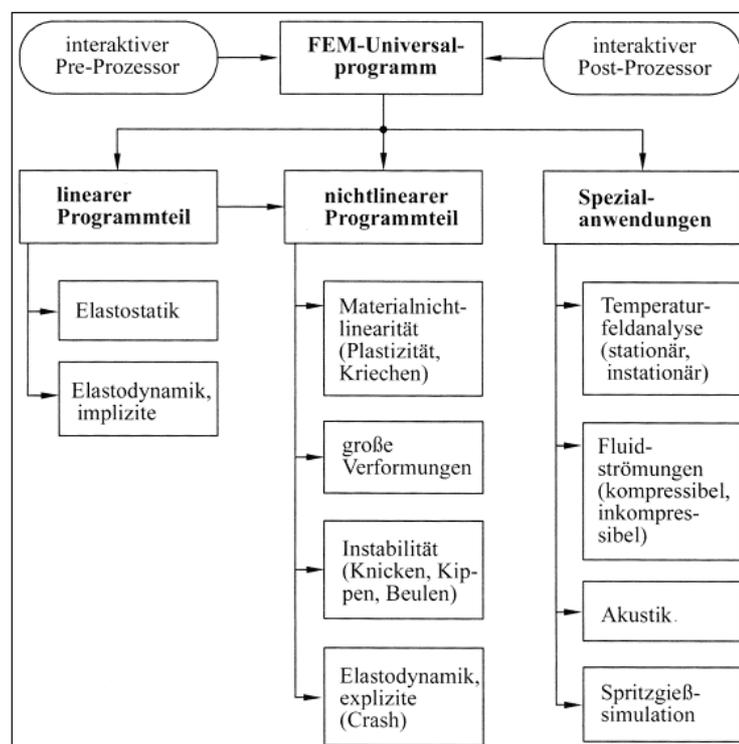


Abbildung 28: Typische FE-Programmstruktur [10]

ABAQUS zeichnet sich durch eine große interne Bibliothek aus, welche eine Analyse der wichtigsten Probleme des heutigen Ingenieurwesens möglich macht. Hierunter fallen z. B. strukturelle Probleme, Wärmeleitungsrechnungen, gekoppelte Temperatur- und Spannungsrechnungen, Kontaktprobleme, sowie spezielle Modellierungen linearer- und nichtlinearer Probleme.

ABAQUS bedient sich ebenfalls einer Vielzahl von Materialdefinitionen und lässt dem Benutzer auch jegliche Freiheit bei der Wahl der Analyse-Methode.

So kann dieser z.B. zwischen statischer und dynamischer Spannungs-Dehnungs-Analyse (linear oder nicht-linear) wählen.

Andere in ABAQUS ebenfalls mögliche Analyseprozeduren wären z. B. gekoppelte Akustik-/Strukturschwingungsanalysen und gekoppelte Temperatur-/Verschiebungsanalysen, um nur zwei weitere Beispiele zu nennen [18].

In ABAQUS gibt es zwei unterschiedliche Berechnungsmöglichkeiten: Zum einen das implizite Verfahren mit ABAQUS/Standard und zum anderen das explizite Verfahren mit ABAQUS/Explicit. Das explizite Lösungsverfahren eignet sich besonders bei großen Modellen mit einer hohen Anzahl von Elementen, bei stark dynamischen Vorgängen und bei besonders nichtlinearen Effekten.

Ein Vorteil von ABAQUS/Explicit ist, dass selbst bei großen Modellen besonders schnell gerechnet werden kann und auch weniger Speicherplatz benötigt wird, als dieses bei ABAQUS/Standard der Fall wäre. Allerdings muss bei ABAQUS/Standard ein entsprechend kleiner Zeitschritt gewählt werden, was zu einer höheren numerischen Stabilität führt, da für jeden Schritt das komplette Gleichungssystem gelöst wird. Welche Berechnung vom Benutzer gewählt wird hängt also von vielen Faktoren ab und muss von Fall zu Fall, je nach Anforderungen und Möglichkeiten, unterschieden werden [1] [11].

Für quasi-statische Probleme eignen sich beide Verfahren gleichermaßen.

5.3.1 Vorgehensweise einer FEM-Untersuchung in ABAQUS

Der Simulationsablauf in ABAQUS lässt sich grob in drei Teile gliedern:

1. Pre-processing

mit ABAQUS/CAE oder einer Input-Textdatei

2. Analyse

Gleichungslöser

3. Post-processing

z. B. ABAQUS/Viewer

5.3.1.1 Der Pre-Prozessor

Zunächst besteht die Aufgabe darin, im sog. Pre-Prozessor ein finites Modell des Bauteils bzw. der Struktur zu erzeugen. Dieses richtet sich ganz nach dem mechanischen Verhalten und kann z. B. aus Stab-, Schalen-, Scheiben- oder Volumen-Elementen bestehen. Die richtige Wahl solcher Elemente ist zwingend erforderlich, um eine möglichst reale Spannungsverteilung zu erreichen.

Um die Bearbeitungszeit – und später auch die Rechenzeit – zu verkürzen, ist es sinnvoll, das Bauteil auf mögliche Symmetrienausnutzung zu untersuchen. An den Schnitten müssen allerdings besondere Randbedingungen definiert werden.

Diese sind ebenfalls abhängig von der Belastung, der Lagerung und dem mechanischen Verhalten des Bauteils. Neben den Randbedingungen sind die Materialeigenschaften entsprechend anzugeben und können einzelnen Elementen oder dem gesamten Bauteil zugeordnet werden [1] [10].

Als letztes sind die Lasten entsprechend zu generieren, sowie eine geeignete Gittervernetzung vorzunehmen, um die ingenieurmäßige Vorbereitung abzuschließen. Um das Bauteil sinnvoll zu vernetzen (Netzgenerierung), sollten die Orte am Bauteil bekannt sein, wo möglichst genaue Ergebnisse erwünscht sind und hohe Spannungsgradienten erwartet werden, denn je feiner das Netz, desto exakter das Ergebnis [10].

Die o.g. Eingaben erfolgen entweder als Inputdatei in einem Texteditor oder direkt in ABAQUS/CAE. In diesem benutzerfreundlichen Modul lassen sich direkt computergestützt Bauteilgeometrien erzeugen.

ABAQUS/CAE eignet sich besonders bei komplexen Problemen und Geometrien. Der Benutzer hat über diverse Symbolleisten eine große Auswahl an Ansichtsoptionen, welche in einer Input-Textdatei natürlich nicht gegeben sind [18].

Die Input-Textdatei sollte jedoch vor allem für die Kontrolle und Fehleranalyse verwendet werden, da sich hier schnell Eingabefehler oder fehlende Parameter ausfindig machen lassen.

5.3.1.2 Die Analyse

Sind alle Eingabedaten formal korrekt, übergibt der Pre-Prozessor jetzt die Input-Daten an das FEM-Universalprogramm, das die Berechnung des Modells durchführt. Grundlage für die Berechnung ist ein numerischer Gleichungslöser, der nach den Verformungen auflöst und dann in einer Rückrechnung die Spannungen, Dehnungen und Reaktionskräfte berechnet.

5.3.1.3 Der Post-Prozessor

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt im dritten Schritt der Prozesskette und kann grafisch oder tabellarisch im sog. Post-Prozessor erfolgen. Eine „schriftliche“ Ausgabe in Tabellenform erfolgt in einer Ausgabedatei, die mit einem Texteditor geöffnet werden kann und alle vom Benutzer gewünschten Berechnungsgrößen enthält.

Am geeignetsten ist sicherlich die grafische Ausgabe der Berechnung mit ABAQUS/Viewer. Hier können z. B. Spannungs-Dehnungs-Verläufe oder Kraft-Weg-Verläufe als Diagramme benutzerfreundlich dargestellt werden oder Kräfte und Spannungen direkt am CAD-Modell farblich gestaffelt visualisiert werden.

Sind die wirkenden Kräfte am Bauteil bekannt, kann die Oberflächenkontur dem Belastungsverlauf angepasst werden. Auf diese Weise erhöhen sich Nutzungsdauer und bestmögliche Materialausnutzung [10].

5.4 Modellerstellung in ABAQUS 6.7

5.4.1 Ausgangsmodell

Als Grundlage für die Simulation dient ein Ausgangsmodell, das nach der in 5.3.1.1 beschriebenen Pre-Prozessor-Prozedur erstellt wurde. Es wurde im Rahmen der Diplomarbeit „Simulation des Setzprozesses von Schließringbolzen im Flugzeugbau“ [5] erstellt. Es handelt sich aufgrund der vorhandenen Symmetrie und des Materialverhaltens um ein achsensymmetrisches 2D-Modell. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde vorrangig die notwendige Systematik zur Abbildung des Installationsprozesses erarbeitet. Dies geschah hinsichtlich der Kinematik der Materialumformung und der Materialtrennung. Außerdem wurden der Umgang mit großen Verformungen und die zeitliche Skalierung der Simulation erarbeitet. Zusätzlich wurde noch eine Konvergenzuntersuchung hinsichtlich der Vernetzung am Schließring und an der Sollbruchstelle durchgeführt.

In einer weiteren Untersuchung wurde dann das Modell hinsichtlich der Werkzeug- und Lockbolt-Geometrie optimiert, sowie eine Presspassung nach Airbus-Fertigungsvorschrift 80-T-36-5812 realisiert [12].

Das vorhandene Modell soll im Rahmen dieser Bachelor-Thesis für weitere Untersuchungen genutzt, sowie an die aktuellen Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen angepasst werden. Betrachtet wird zunächst ausschließlich die Referenz-Lockbolt-Verbindung, wie sie bei den Experimenten mit der Bezeichnung **AL-LB-A** verwendet wurde.

Das vorhandene FE-Modell besteht aus dem Lockbolt, dem Collar, den Fügeteilen und dem Werkzeug. Das Werkzeug besteht aus der Klemmbacke, die den Lockbolt am Abrisschaft greift und der Zugkopfhülse, die den Collar umformt. Die Bleche, der Lockbolt und der Collar sind als verformbare Körper modelliert worden. Ihnen wurden elastische und plastische Materialeigenschaften zugewiesen. Das Werkzeug, bestehend aus Klemmbacke und Zugkopfhülse wurde als „Rigid Body“ aufgebaut. Ein „Rigid Body“ ist ein starrer Körper ohne elastische Eigenschaften. Alle Randbedingungen für einen „Rigid Body“ werden an einem Referenzpunkt festgelegt [vgl. 12].

Der Zusammenbau des Modells ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

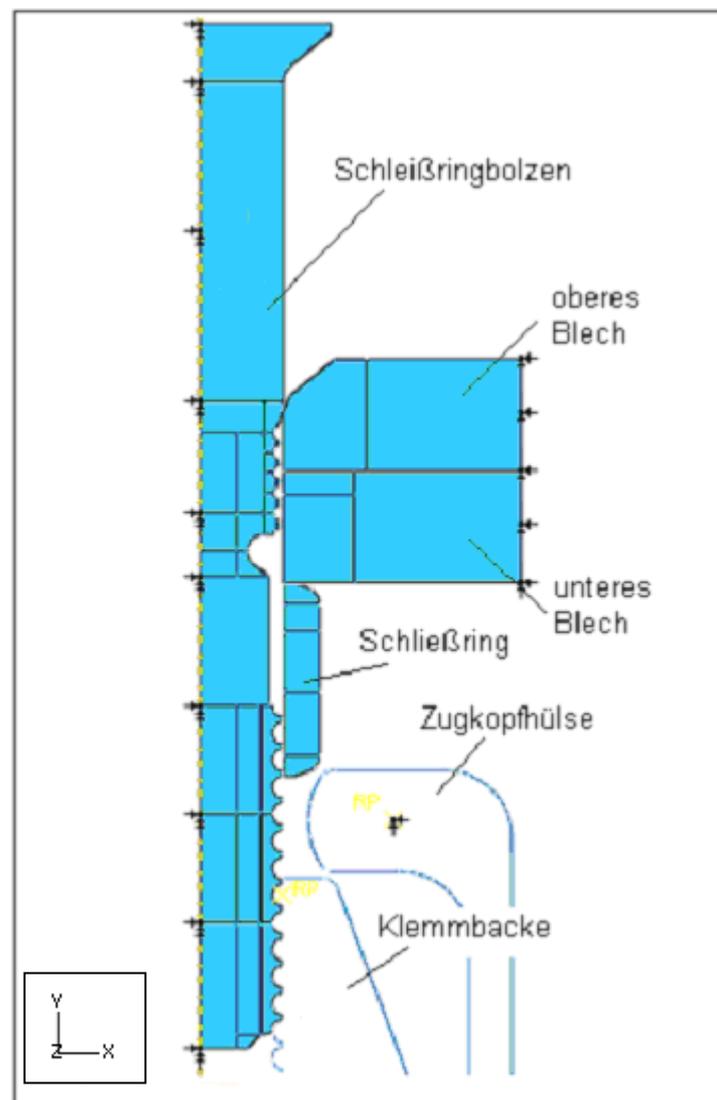


Abbildung 29: Zusammenbau des ABAQUS-Modells

Da es sich um ein achsensymmetrisches Modell handelt, wird der linke Rand am Lockbolt gegen Verschiebungen in X-Richtung und gegen Rotationen um die Y- und Z-Achsen festgesetzt. Die freien Enden der Bleche werden ebenfalls gegen Verschiebung in X-Richtung und gegen Rotation um die Z-Achse festgelegt. Diese Bedingungen gelten für die gesamte Simulation.

Die Simulation des gesamten Fügevorgangs ist in einzelne Schritte unterteilt. Hierdurch können die für die Gesamtsimulation des Fügeprozesses benötigten Zwischenschritte einfach durch eine Änderung der Randbedingungen in den jeweiligen STEPS modelliert werden. In der folgenden Abbildung sind alle Simulationsschritte kurz erläutert.

<p>1. Step: Klemmen</p>		<p>In diesem Step wird die Klemmbacke an den Schließringbolzen gefahren und somit geklemmt. Dafür wird die Klemmbacke um 0,01mm an den Bolzen herangefahren. Die Zugkopfhülse bewegt sich nicht.</p>
<p>2. Step: Einziehen</p>		<p>Die Ränder der Bleche und die Zugkopfhülse werden in X- und Y-Richtung festgehalten. Für die Achsensymmetrie wird der linke Rand des Lockbolts in X-Richtung und gegen Rotation um die Y- und Z-Achsen festgesetzt. Die Klemmbacke zieht den Bolzen in die Passungsbohrung.</p>
<p>3. Step: Umformen</p>		<p>Hier wird durch eine weggesteuerte Auslenkung der Schließringbolzen nach unten gezogen. Durch die feststehende Zugkopfhülse wird dann der Schließring, der sich mit dem Schließringbolzen nach unten bewegt, verformt. Sobald die kritische plastische Dehnung an der Sollbruchstelle erreicht ist, reißt der Schließringbolzen dort ab.</p>
<p>4. Step: Entlasten</p>		<p>Die Zugkopfhülse wird nach unten weggefahren, so dass sich der verformte Schließring und der Schließringbolzen entspannen.</p>

Abbildung 30: Definition der einzelnen Simulationsschritte [12]

Für die verschiedenen Simulationsschritte werden jeweilige Kontakt- und Randbedingungen festgelegt, auf die im Einzelnen aber nicht weiter eingegangen wird.

Bevor ein Modell für die Berechnung fertig ist, muss eine Vernetzung erzeugt werden, das heißt, über das komplette Modell wird ein Netz gelegt, so dass alle verformbaren Einzelteile durch ein Netz abgebildet werden. Da diese Simulation als achsensymmetrisches Modell erstellt worden ist, werden CAX4R Elemente verwendet. Die ABAQUS-Bezeichnung CAX4R steht für ein 4-Knoten-Achsensymmetrie Element mit linearem Verschiebungsansatz und reduzierter Integration. Durch die Vernetzung werden die Knoten- und Elementnummern automatisch erzeugt.

Es ist wichtig, dass ein Netz „ordentlich“ aufgebaut ist, da dies ausschlaggebend für eine gute Berechnung ist. Die Berechnung ist abhängig von dem Netz, also von den Knoten und Elementen. Auch die Ergebnisse, z. B. Spannungen und Kräfte, werden über Knoten oder Elementen ausgegeben. Auf die Vernetzung wird in den folgenden Kapiteln genauer eingegangen. Sie ist eine ingenieurmäßige „Stellschraube“, an der gedreht werden kann und muss, um zuverlässige Ergebnisse zu erreichen.

5.4.2 Geometrie und Vernetzung der Blechkante des unteren Fügepartners

Für aussagekräftige Berechnungsergebnisse ist besonders eine genaue Vernetzung des Modells notwendig. Ist die Vernetzung zu fein, erhöhen sich Rechenzeit und Speicherkapazität, ist sie zu grob, führt dies zu unkonvergenten Ergebnissen.

In dem vorhandenen Modell sind die Blechkanten vereinfacht als „harte“ Kanten realisiert worden, das heißt, die Kanten sind rechtwinklig. Abbildung 31 zeigt einen Ausschnitt, wo die obere linke Ecke des unteren Fügepartners mit einem roten Pfeil gekennzeichnet wurde.

Durch die Realisierung der Presspassung geschieht in STEP 2, dem Einziehvorgang, jedoch folgendes:

Der obere Fügepartner wird leicht nach rechts weggedrückt, so dass der untere Fügepartner links übersteht und zwar um $9,19 \mu\text{m}$. Dies ist in Abbildung 32 zu sehen.

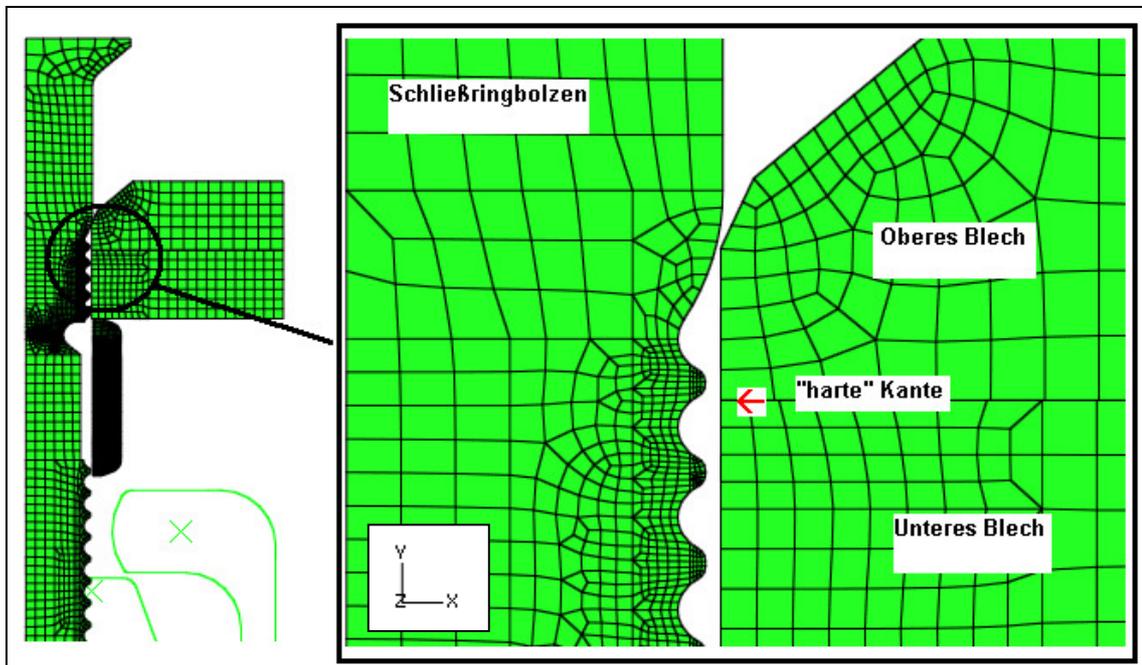


Abbildung 31: Geometrie und Vernetzung der Fügepartner

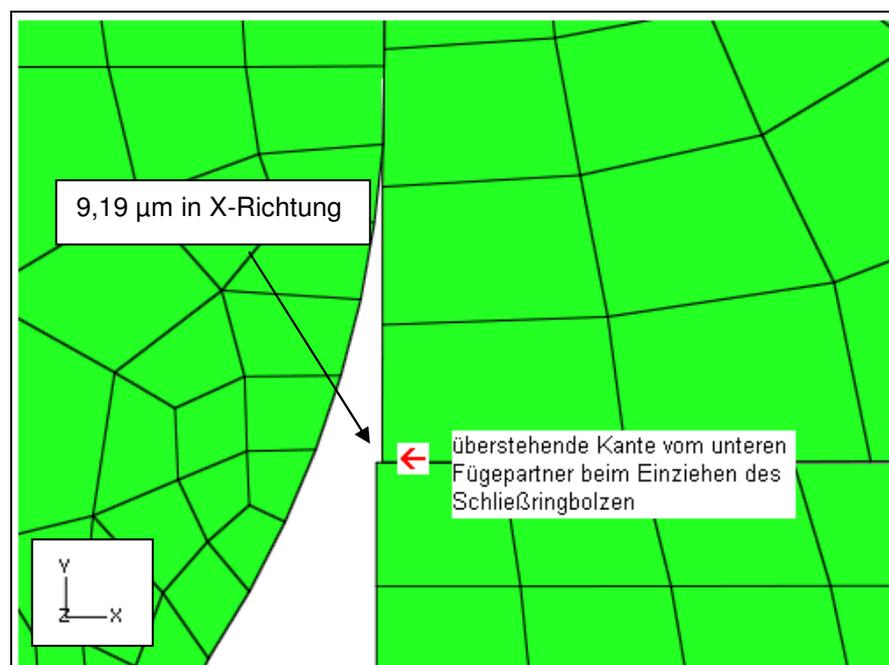


Abbildung 32: Verhalten der Fügepartner beim Einziehvorgang

Wird der Schließringbolzen nun weiter eingezogen, wird die markierte Ecke des unteren Bleches abgknickt, wie in Abbildung 33 zu erkennen ist.

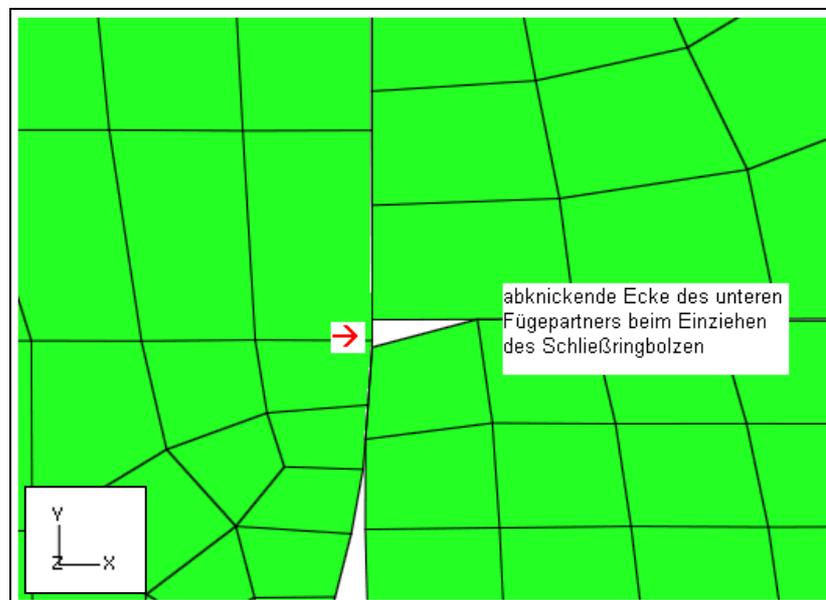


Abbildung 33: Abknickende Ecke beim Einziehen des Schließringbolzen

Dieses Abknicken entspricht nicht der Realität.

Im Folgenden muss also versucht werden, ein Abknicken des Elementes in STEP 2, dem Einziehvorgang, zu verhindern. Eine Möglichkeit dafür bietet eine Netzverfeinerung im Bereich der linken oberen Ecke des unteren Fügepartners. Dazu wird das Blech in neue Partitionen unterteilt und im kritischen Bereich feiner vernetzt. Die Netzverfeinerung wird gewöhnlich in einem iterativen Prozess erzielt. Das bedeutet, man geht zunächst von einer gröberen Vernetzung aus und muss diese gegebenenfalls verfeinern, solange, bis die gewünschten Ergebnisse erzielt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Rechenaufwand mit feinerer Vernetzung ansteigt.

Abbildung 34 zeigt einen Vergleich zwischen der alten und neuen Vernetzung im Bereich der abknickenden Ecke des unteren Fügepartners.

Bei feinerer Vernetzung sind die Auswirkungen geringer, aber in Abbildung 35 ist zu erkennen, dass auch diesmal beim Einziehvorgang das äußere Element abknickt.

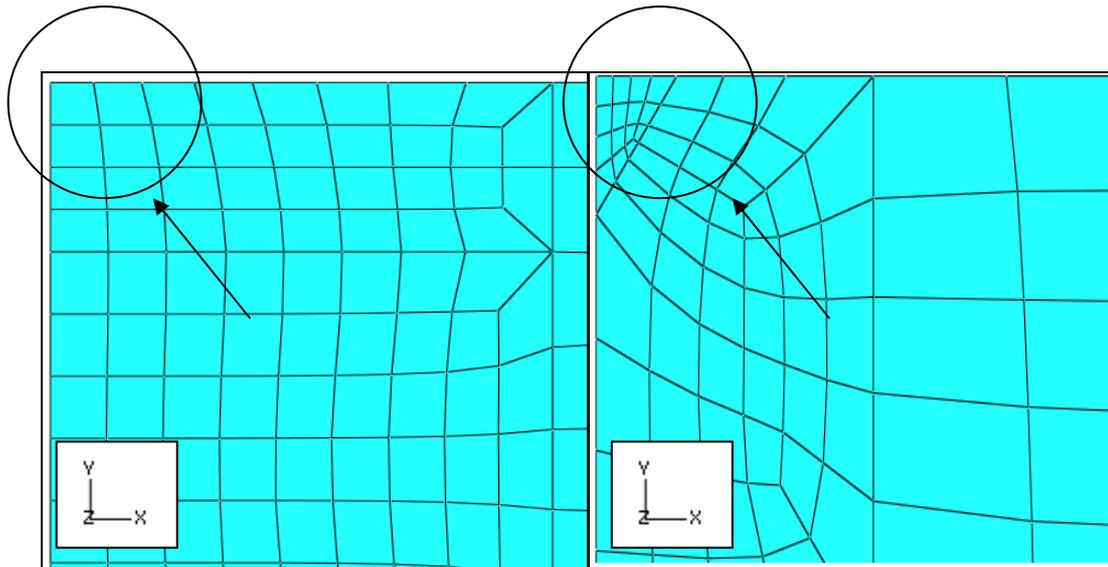


Abbildung 34: Vergleich zwischen alter (li) und neuer Vernetzung (re) im kritischen Bereich des unteren Fügepartners

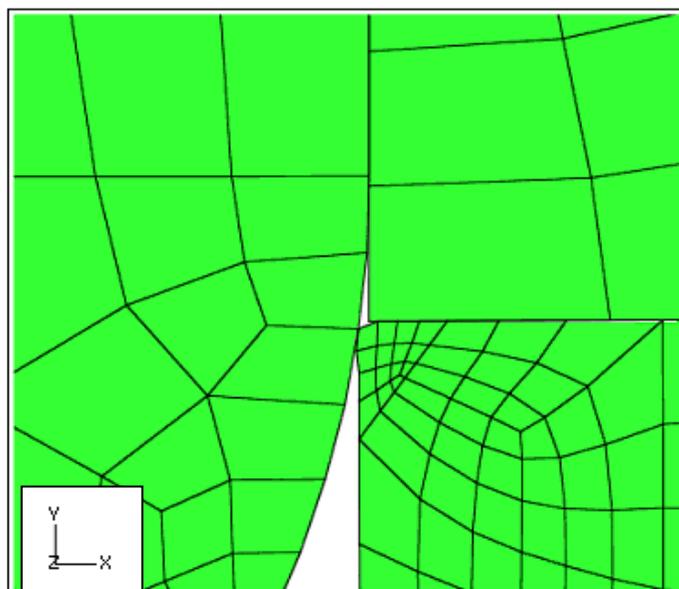


Abbildung 35: Einziehvorgang bei neuer Vernetzung der kritischen Ecke

Eine Netzverfeinerung ist zudem kritisch zu beurteilen in Bezug auf eine einfache Handhabung des Simulationstools. Durch die Erzeugung neuer Knoten und Elemente wird nämlich eine automatische Netzgenerierung durch ABAQUS erschwert. So lässt sich später im Falle einer Parameteränderung, z. B. der Blechdicke, die Neuvernetzung nicht so leicht anpassen, sondern muss aufwendig „per Hand“ von Fall zu Fall neu generiert werden.

Im Folgenden wird versucht, eine Übergangsfase am unteren Fügepartner konstruktiv in ABAQUS zu realisieren. Die Konstruktion der Übergangsfase ist in Abbildung 36 dargestellt. Gewählt wird ein Übergangsradius von 0,05 mm.

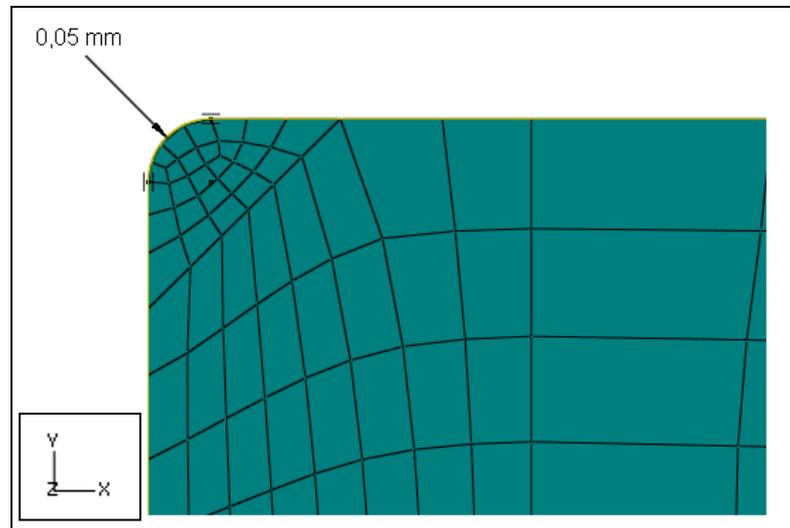


Abbildung 36: Konstruktion und neue Vernetzung der Übergangsfase

Nach der Realisierung ergibt sich folgende Situation beim Einziehvorgang, der in Abbildung 37 an vier verschiedenen Zeitpunkten festgehalten wurde.

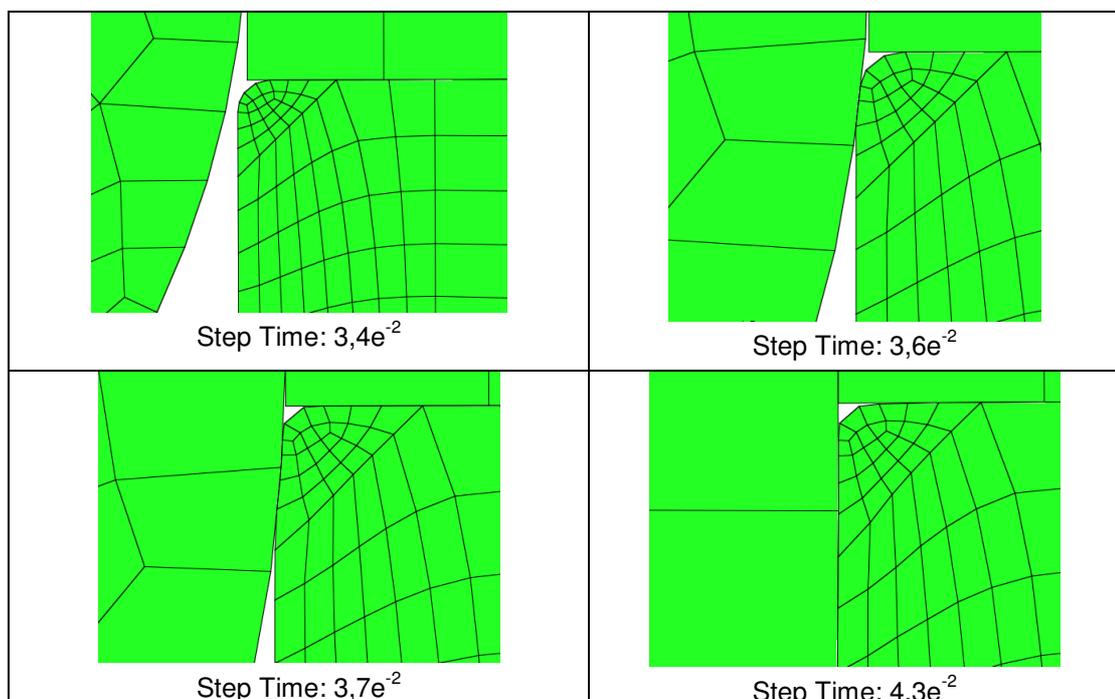


Abbildung 37: Einziehvorgang für vier ausgewählte Zeitpunkte

Es wird deutlich, dass beim Einziehvorgang zum Zeitpunkt 0,036 s, wo erstmals Kontakt zwischen Schließringbolzen und unterem Fügepartner auftritt, kein Abknicken eines oder mehrerer Elemente zu erkennen ist. Vielmehr formt sich der Schließringbolzen in die Bohrung ein, wie es der Realität entspricht.

Abbildung 38 auf der nächsten Seite zeigt die Vergleichsspannung nach von Mises entlang der Blechkante bei den Varianten mit und ohne Fase während des Einziehvorgangs.

Es wird deutlich, dass die Vergleichsspannung mit bis zu 450 MPa in den ersten Elementen bei der Variante mit Fase höher liegt als bei der Variante ohne Fase, wo knapp 350 MPa erreicht werden. Dafür ist im weiteren Verlauf zu erkennen, dass die Vergleichsspannung bei der Variante mit Fase ab einer Distanz von ca. 0,7 mm zunächst stark abfällt, dann wieder ansteigt, aber im weiteren Verlauf immer niedriger ist als bei der Variante ohne Fase. Ab einer Distanz von ca. 0,7 mm ändert sich bei der Variante mit Fase die Vernetzung, es tritt ein Netzsprung auf, was auf den plötzlichen Spannungsabfall schließen könnte.

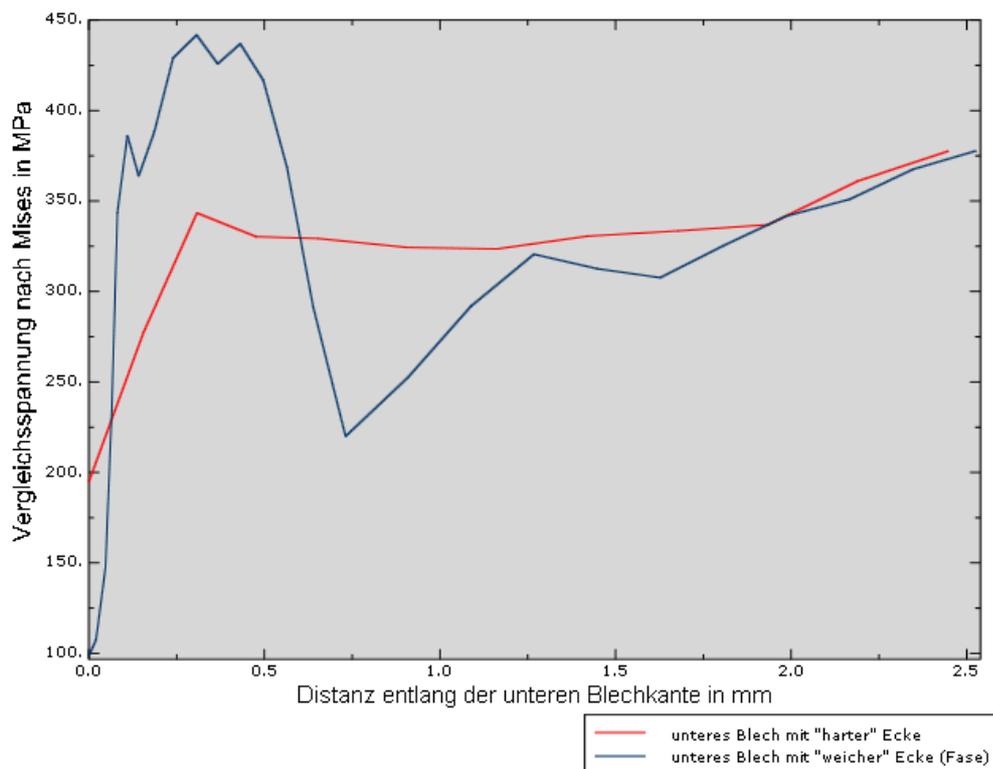
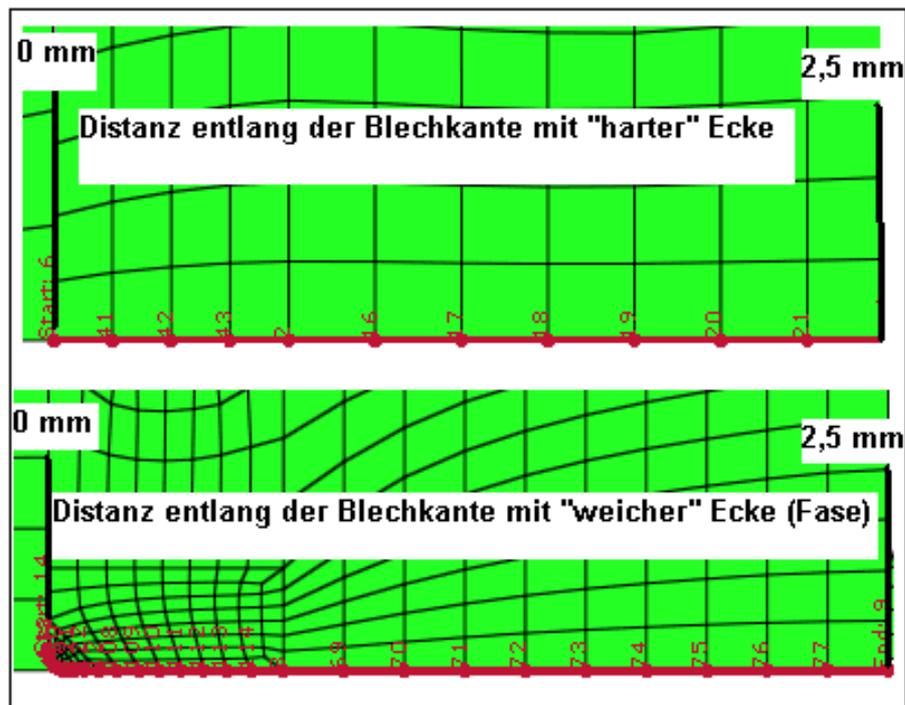


Abbildung 38: Vergleichsspannung nach von Mises entlang der linken Blechkante des unteren Fügepartners mit „harter“ und „weicher“ Ecke

Die Auswertung der Radialspannungen entlang des gleichen Auswerteweges zeigt einen qualitativ ähnlichen Verlauf, jedoch um einige Millimeter verschoben. Zudem fallen die maximal auftretenden Radialspannungen bei der Variante mit Fase etwas geringer aus als bei der Variante ohne Fase. Bei der alten Geometrie verlaufen die Radialspannungen bis zum Abknicken des Elements sogar konstant und fallen dann sprunghaft auf den maximalen Wert ab. Dies ist bei der neuen Geometrie nicht der Fall. Hier sind kleine Schwingungen der Radialspannungen zwischen 100 MPa und -100 MPa im Bereich der Fase auszumachen.

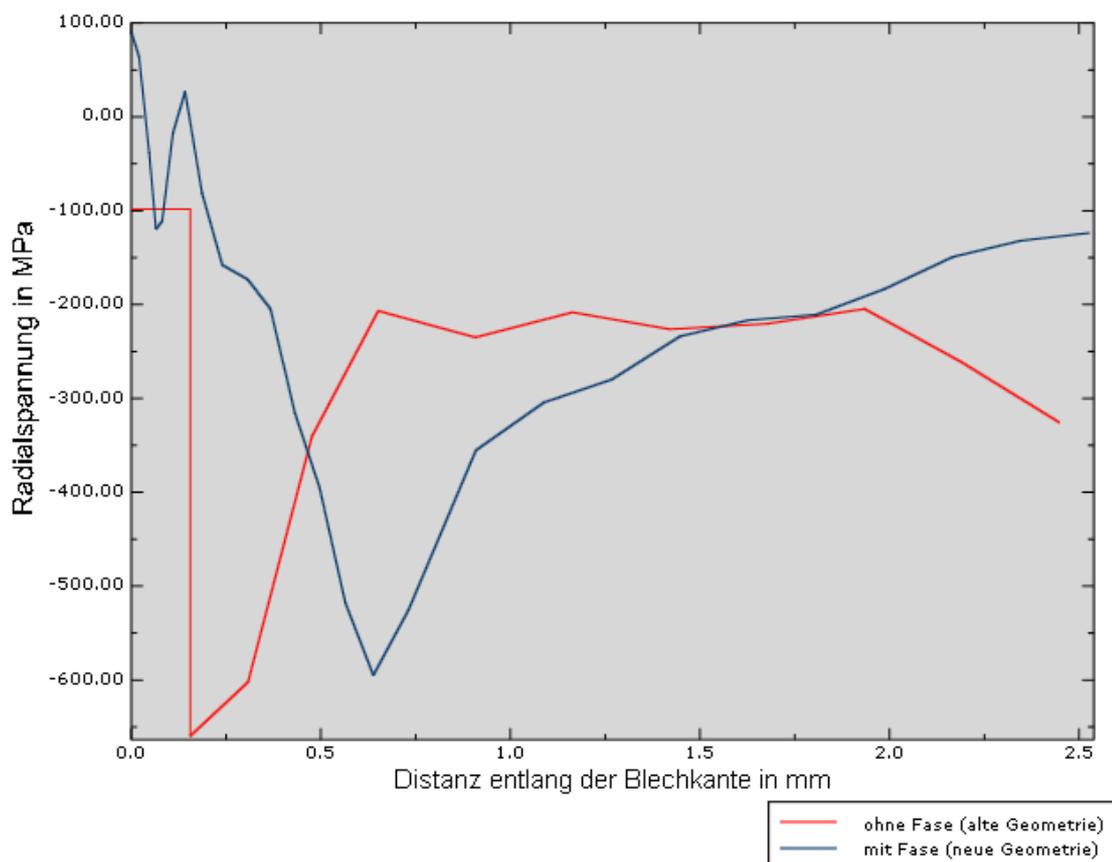


Abbildung 39: Radialspannung entlang der linken Blechkante des unteren Fügepartners „mit“ und „ohne“ Fase

Eine Untersuchung des Kraft-Weg-Verlaufs während des STEP 2, dem Einziehvorgang, verdeutlicht, dass nach 1,3 mm Einziehweg bei der Variation mit Fase eine Kraft von ca. 3300 N an der Klemmbacke erreicht wird, Diagramm 9.

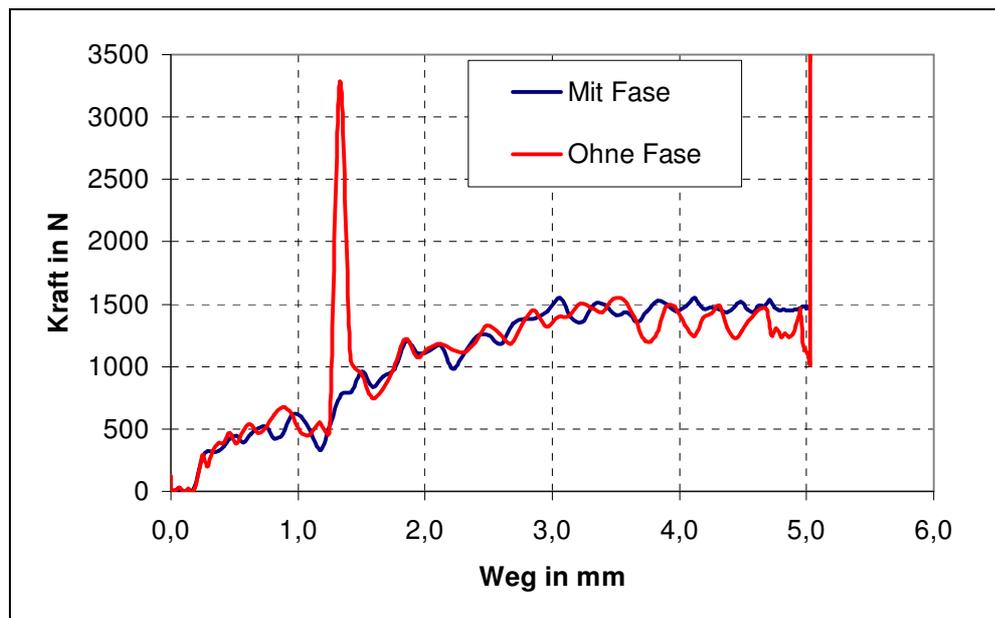


Diagramm 9: Kraft-Weg-Verlauf für Variation „mit“ und „ohne“ Fase beim Einziehvorgang (STEP 2)

Nach einem Weg von ca. 1,3 mm treten nämlich der Schließringbolzen und die abgenickte Blechkante in Kontakt miteinander. Auch am Ende des Einziehvorgangs wird eine Kraft von über 6000 N an der Klemmbacke erreicht. Durch die Realisierung der Fase konnten diese beiden Kraftspitzen ganz ausgeschaltet werden. Die Fase scheint jedoch keinen großen Einfluss auf den Umformprozess an sich zu haben, wie Diagramm 10 beweist. Lediglich zu Beginn des Umformens ist die Kraft an der Klemmbacke bei der Variante ohne Fase deutlich höher als bei der Variante mit Fase. Dies hängt damit zusammen, dass der Einziehvorgang mit dieser erhöhten Kraft endet.

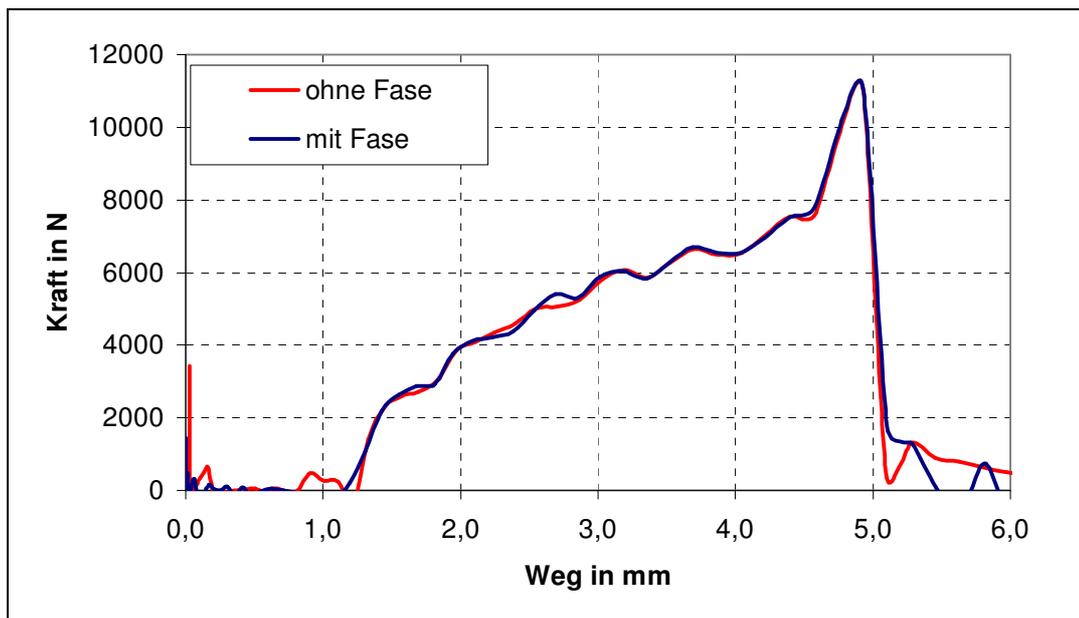


Diagramm 10: Kraft-Weg-Verlauf für Variation „mit“ und „ohne“ Fase beim Umformvorgang (STEP 3)

Wichtiges Ergebnis dieser Untersuchung ist also, dass der Einziehvorgang realistischer gestaltet wurde, ohne dass dabei kritische Veränderungen im Spannungsverlauf an dem Schließringbolzen während des Einziehvorgangs und der Umformung stattfinden.

5.4.3 Vernetzung der Blechkante des oberen Fügepartners

Auch im Bereich des oberen Fügepartners soll eine Untersuchung hinsichtlich der Vernetzung im Bereich des Senkung durchgeführt werden. Hier besteht das Ausgangsmodell aus einer Vernetzung von 10 Elementen. Es wurden Varianten mit 20, 30 und 35 Elementen getestet. Ein Überblick dazu verschaffen Abbildung 40 und 41.



Abbildung 40: Vernetzung am oberen Fügepartner im Bereich der Senkung mit 20 Elementen

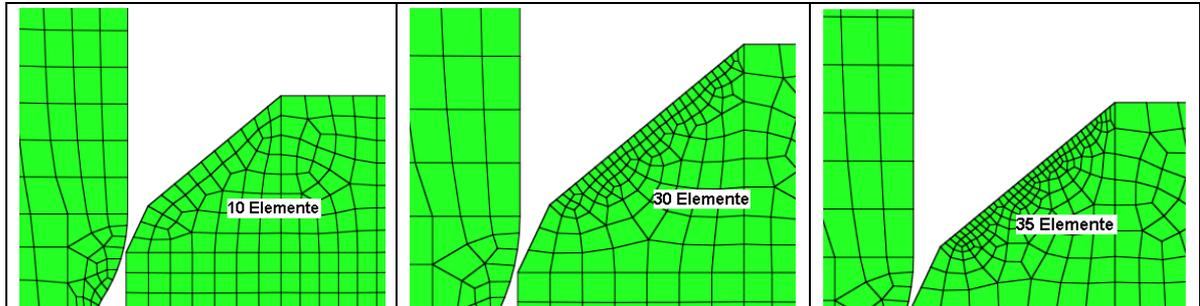


Abbildung 41: Vernetzungsvarianten am oberen Fügepartner

Aus Abbildung 42 ist der Auswerteweg zu entnehmen, an dem die Vergleichsspannung nach von Mises entlang der Senkung während des Einzieh- (STEP 2) und Umformvorgangs (STEP 3) bei den verschiedenen Varianten zu untersuchen ist.

Eine Auswertung der Vergleichsspannung während des Einziehvorgangs zeigt, dass alle Kurven einen qualitativ gleichen Verlauf zeigen, die Spannungsverläufe mit 20, 30 und 35 Elementen aber enger zusammen liegen als der Spannungsverlauf mit 10 Elementen.

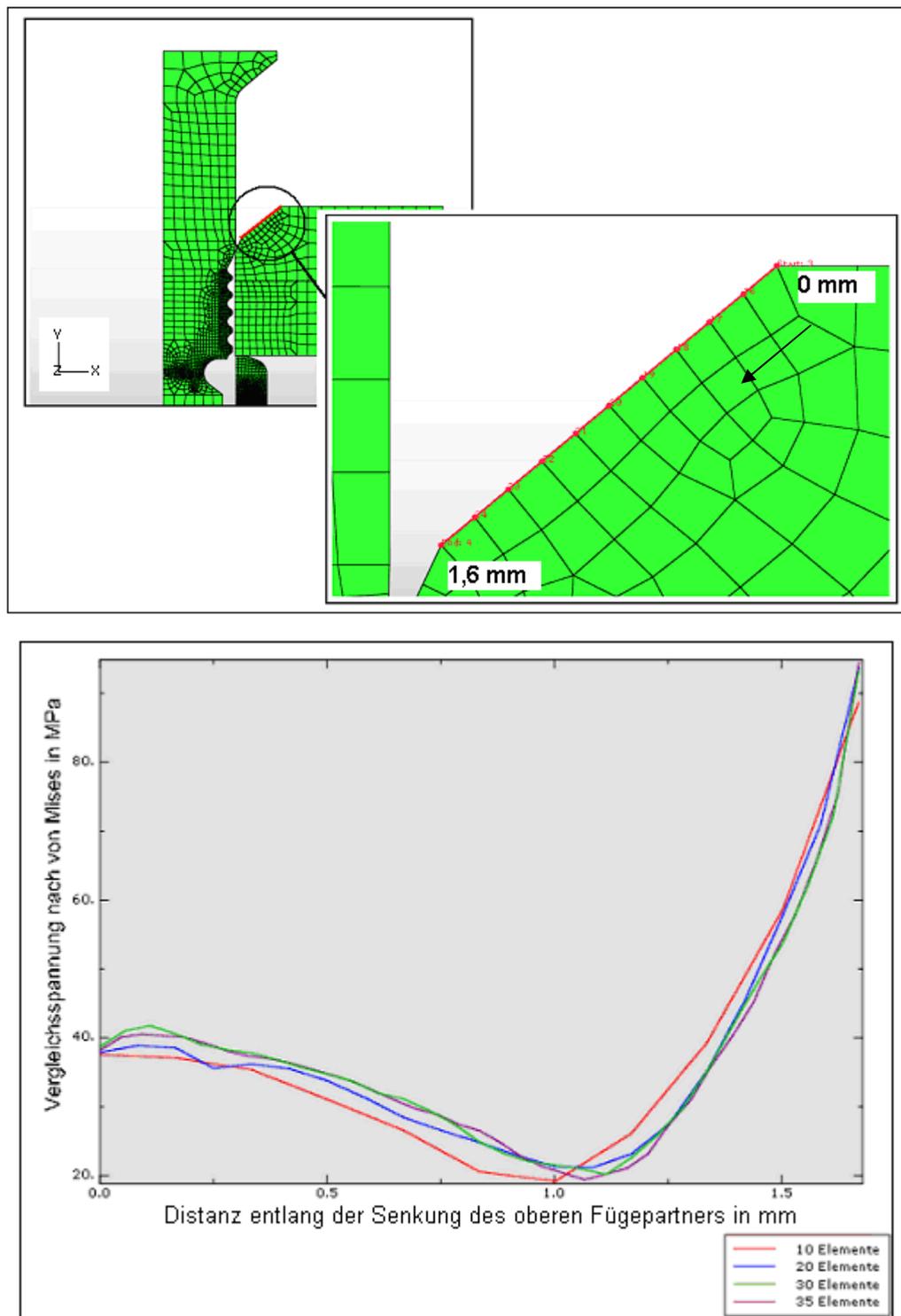


Abbildung 42: Auswerteweg entlang der Blechkante des oberen Fügepartners (oben) und Vergleichsspannung während des STEP 2 (unten)

Während des Umformvorgangs zeigt sich bei den Varianten mit 10, 20 und 36 Elementen ein ähnlicher Verlauf, Abbildung 43. Jedoch ist dieser bei 20

Elementen am wenigsten schwingungsbehaftet. Bei der Variante mit einer Vernetzung von 35 Elementen treten die meisten Schwingungen auf.

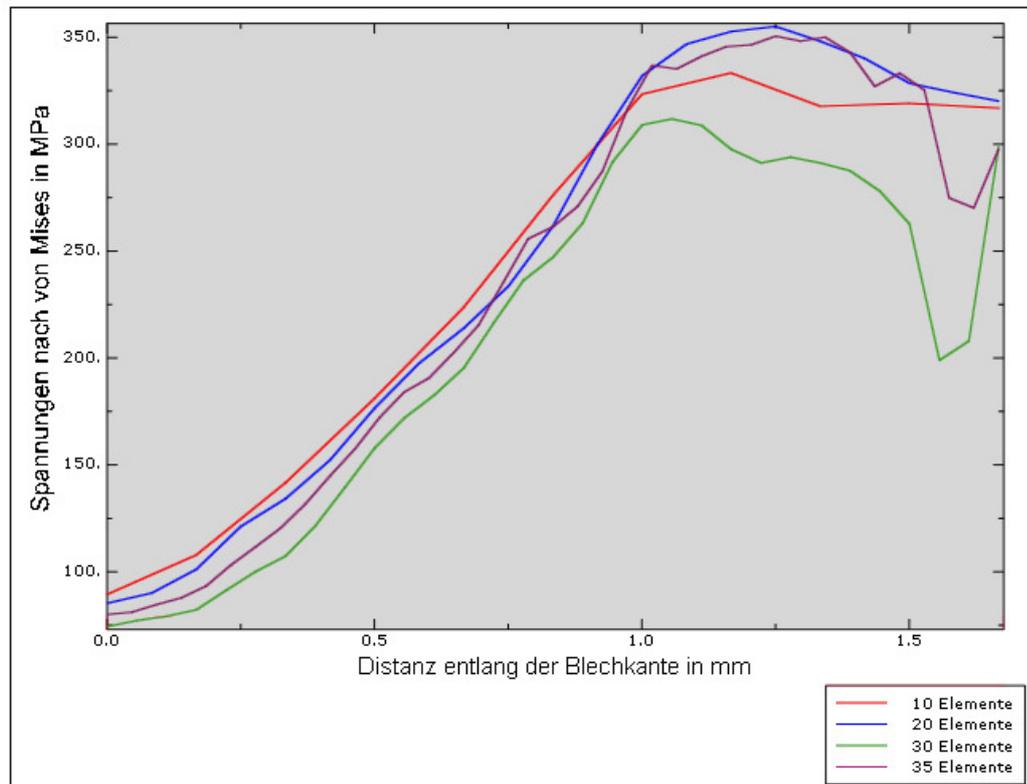


Abbildung 43: Vergleichsspannung nach von Mises während des STEP 3 im Bereich der Senkung des oberen Fügepartners

Man kann also davon ausgehen, dass eine Vernetzung mit 20 Elementen im Bereich der Senkung ein Optimum darstellt und daher wird diese bei allen weiteren Untersuchungen verwendet.

5.5 Absicherung einer quasi-statischen Lösung in Abaqus/ Explizit

Bei dieser Simulation wird der explizite Lösungsalgorithmus gewählt und zur Verkürzung der Rechenzeit ein „Mass Scaling“ durchgeführt. Bei dieser sogenannten Massenskalierung wird jedem Element eine bestimmte Masse zugewiesen. Diese richtet sich nach der Zeitschrittweite. Umso größer die

Zeitschrittweite gewählt wird, umso größer ist auch die Masse, die den einzelnen Elementen zugewiesen wird. Bei niedriger Zeitschrittweite wird den einzelnen Elementen weniger Masse zugewiesen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Rechenaufwand mit niedriger Zeitschrittweite jedoch vergrößert wird. Daher sollte die Wahl der Zeitschrittweite gut überlegt sein und wird deshalb im Folgenden untersucht.

Im Allgemeinen kann die Modellierung des Setzprozesses einer Schließringbolzen-Verbindung als quasi-statisch angenommen werden, da bei den technisch genutzten Installationsgeschwindigkeiten keine wesentlichen dynamischen Einflüsse feststellbar sind [vgl. 5].

Bei einer Simulation in Abaqus/ Explicit muss daher sichergestellt werden, dass die gewählten Berechnungsparameter ebenfalls keine dynamischen Effekte im Modell bewirken und das Ergebnis verfälschen.

Für diesen Nachweis kann ein Vergleich zwischen kinetischer und innerer Energie des gesamten Modells herangezogen werden. Ein Anhaltspunkt dafür, dass es sich um eine quasi-statische Lösung handelt, ist, dass die kinetische Energie nicht größer als einige Prozent der inneren Energie sein sollte. Zudem muss die kinetische Energie auch unabhängig von der inneren Energie betrachtet werden, um dynamische Effekte auszuschließen, das heißt, im Berechnungsverlauf sollten keine nennenswerten Schwingungen im kinetischen Energieverlauf auftreten.

Zur Bewertung werden daher fünf Modelle mit unterschiedlichem „Mass Scaling“ betrachtet. Dafür werden die Zeitschrittweite variiert. Die Berechnungen sind mit den Zeitschritten von 10^{-5} s, 10^{-6} s, 10^{-7} s, $8 \cdot 10^{-8}$ s und 10^{-8} s durchgeführt worden.

Für die Berechnungen in ABAQUS/Explicit wird die Option „double precision“ verwendet. Bei dieser sogenannten doppelten Präzision werden die Berechnungsergebnisse als doppelt genaue Fließkommazahl in einer Länge von 64 bits, statt gewöhnlichen 32 bits ausgegeben [1].

Bei der Zeitschrittweite 10^{-8} s wurde neben der „double precision“ auch mit einer „single precision“ gerechnet. Das ausgerechnet die Zeitschrittweite 10^{-8} s für eine „single precision“ ausgewählt wurde hat keinen speziellen Grund. Hier soll nur einmal exemplarisch das Verhalten der Rundungsfehler, die sich bei einer „single precision“ aufaddieren, aufgezeigt werden.

Der Vergleich der kinetischen und inneren Energien bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten ist in Abbildung 44 dargestellt.

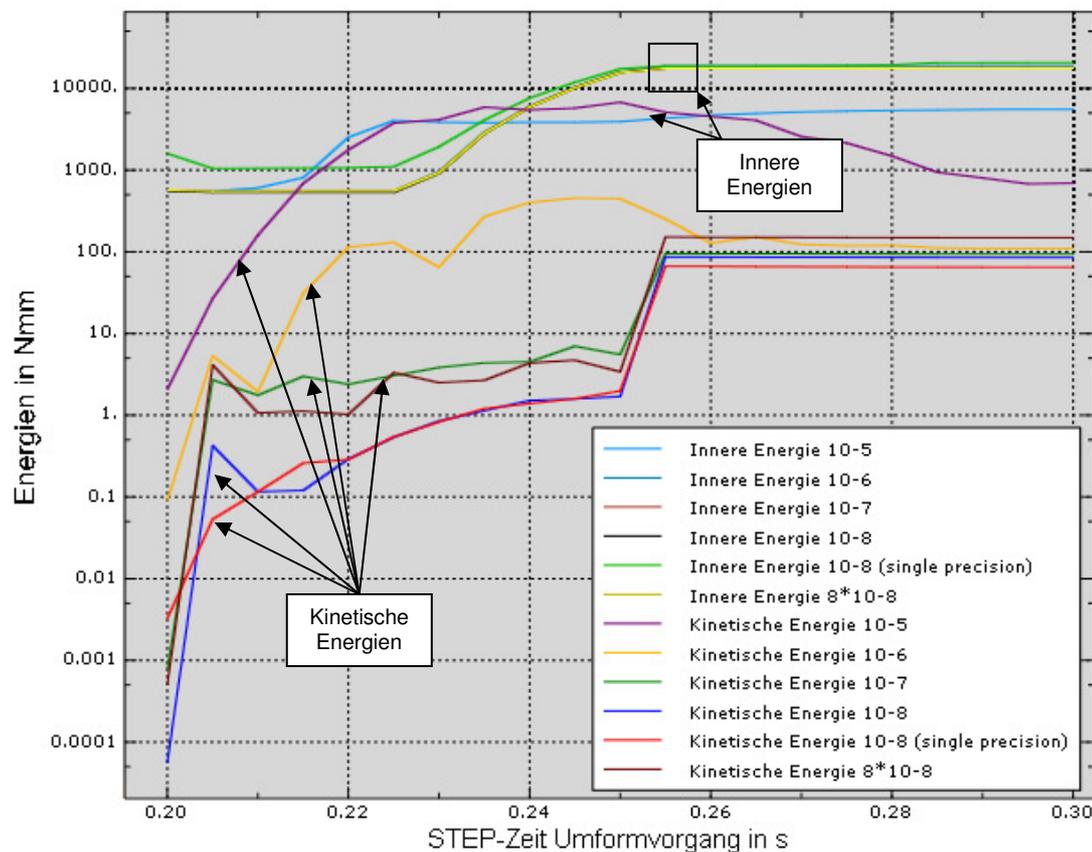


Abbildung 44: Energie-Diagramm mit kinetischer und innerer Energie für den Umformvorgang

Die logarithmische Auftragung der Energien ermöglicht eine gemeinsame Darstellung von innerer und kinetischer Energie in einem Diagramm.

Sehr gut ist zu erkennen, dass die innere Energie für alle gewählten Zeitschrittweiten sehr eng beieinander liegen und keine großen Unterschiede aufweisen.

Die kinetischen Energien dagegen unterscheiden sich stark voneinander und sind in ihrer Höhe von der gewählten Zeitschrittweite abhängig.

Für einen Zeitschritt von 10^{-6} s zeigen sich zum einen starke Schwingungen im kinetischen Energieverlauf, die nicht auf entsprechende Umformungen zurückzuführen sind. Der kinetische Energieverlauf für eine Zeitschrittweite von

10^{-5} s erreicht sogar das Niveau der inneren Energie. Somit kann davon ausgegangen werden, dass dynamische Prozesse in der Simulation das Endergebnis beeinflussen und somit die Voraussetzungen für eine quasi-statische Belastung nicht erfüllt sind.

Für die Zeitschritte 10^{-7} s zeigen sich dagegen geringe und für 10^{-8} s gar keine Schwingungen. Die kinetischen Energien sind hier wesentlich geringer und betragen für 10^{-7} s maximal 0,43% und für 10^{-8} s maximal 0,005 % der inneren Energie, gemessen bei einer Step-Zeit von 0,220 s.

Bei einer Zeitschrittweite von $8 \cdot 10^{-8}$ s zeigen sich mehr Schwingungen gegenüber einer Zeitschrittweite von 10^{-7} s.

Für die „Single- und Double-Precision“ Option bei der Zeitschrittweite 10^{-8} s sind keine wesentlichen Unterschiede zu erkennen. Hier ist für die „Double-Precision“ im Kurvenverlauf lediglich eine Energiespitze zu Beginn des Umformens auszumachen, welche bei der „Single Precision“ nicht auftritt.

Am Günstigsten ist also eine Zeitschrittweite von 10^{-8} s, da sie am wenigsten Schwingungen verursacht und ein großes Verhältnis zwischen kinetischer und innerer Energie aufweist. Für diese Zeitschrittweite beträgt die relative Prozessorzeit jedoch das 10-fache der Zeit, die bei einer Rechnung mit einer Zeitschrittweite von 10^{-7} s benötigt wird.

Die Prozessorzeit bezeichnet die gemessene Zeit in Stunden, Minuten und Sekunden, in der ein laufendes Programm oder eine Rechnung seit dem letzten Programmstart tatsächlich Kommandos an den Prozessor gesendet hat. Diese Summe ist praktisch immer niedriger als die gesamte Laufzeit des Programms bzw. der Rechnung, da diese selbst bei intensiver Nutzung kaum pausenlos Befehle an den Prozessor senden. Ein Überblick über die relativen Prozessorzeiten bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten ist in Tabelle 17 dargestellt.

Target Time Increment (Zeitschrittweite)	Relative CPU time (Relative Prozessorzeit)
10^{-5} s	0,011
10^{-6} s	0,077
10^{-7} s	1,0
$8 \cdot 10^{-8}$ s	1,246
10^{-8} s	10,38
10^{-8} s (single precision)	8,46

Tabelle 17: Vergleich der Prozessorzeit bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten

Ausgehend von diesen Ergebnisse und einer sehr viel höheren Rechenzeit für die Simulation mit einer Zeitschrittweite von 10^{-8} s werden alle weiteren Untersuchungen bezüglich des Umformvorgangs mit einer Zeitschrittweite von 10^{-7} s ausgeführt.

Der Umformvorgang ist für die gesamte Lockbolt-Installation der wichtigste STEP. Um aber die Gesamtrechenzeit zu verkürzen, müssen auch die anderen STEPS untersucht werden. Für diese wird momentan die gleiche Zeitschrittweite angenommen, wie für den Umformvorgang.

Für den Klemmvorgang lässt sich eine Konvergenz der kinetischen Energien für die Zeitschrittweiten 10^{-7} s, $8 \cdot 10^{-8}$ s und 10^{-8} s feststellen. Da der kinetische Energieverlauf für 10^{-6} s allerdings wenig schwingungsbehaftet ist und auch weit unterhalb des inneren Energieverlaufes liegt, könnte man in einer gesonderten Untersuchung die Zeitschrittweite hier auf 10^{-6} s heraufsetzen. So hat man für den Klemmvorgang Prozessorzeit eingespart, erhält aber keine Unterschiede in den Rechenergebnissen.

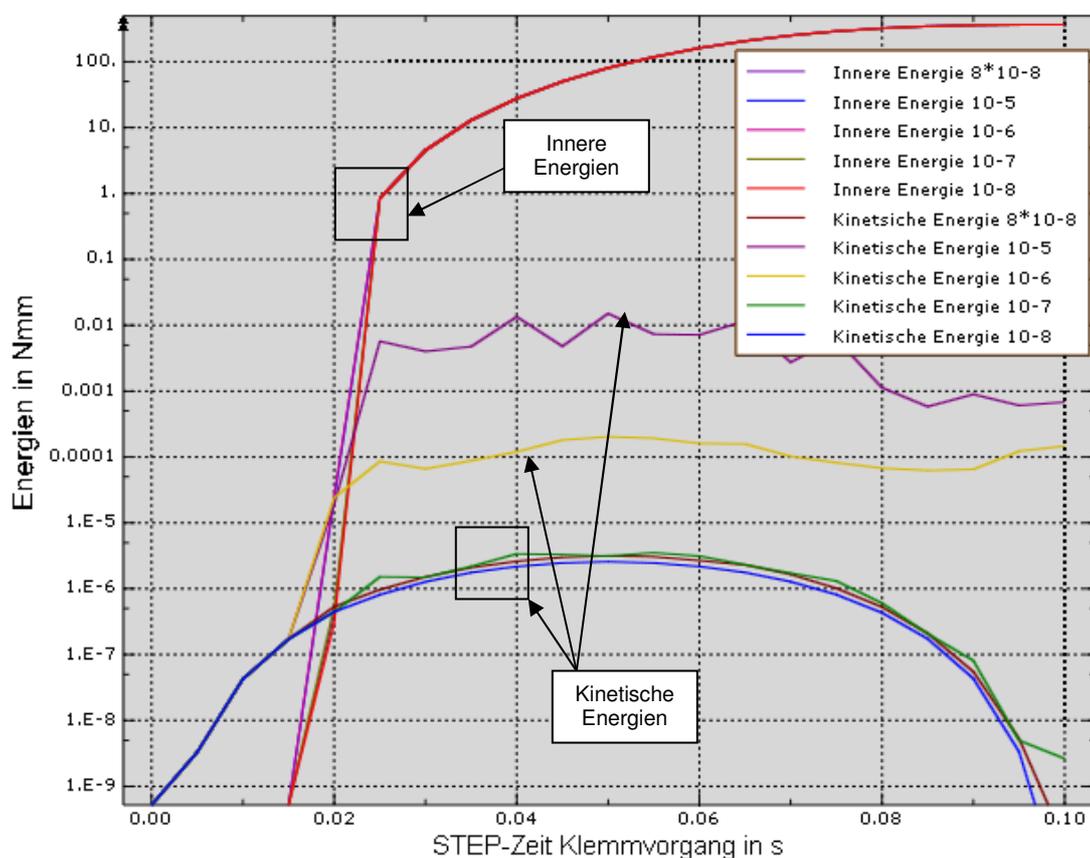


Abbildung 45: Energie-Diagramm mit kinetischer und innerer Energie für den Klemmvorgang

Gleiches gilt für den Einziehvorgang. Die Energieverläufe sind hier aus Abbildung 45 zu entnehmen. Es wird deutlich, dass auch hier bei den Zeitschrittweiten 10^{-7} s, $8 \cdot 10^{-8}$ s und 10^{-8} s kaum Unterschiede zu erkennen sind. Aber auch hier kann möglicherweise der Einziehvorgang mit einer Zeitschrittweite von 10^{-6} s gerechnet werden, da der Energieverlauf eine „quasi-statische“ Annahme absichert.

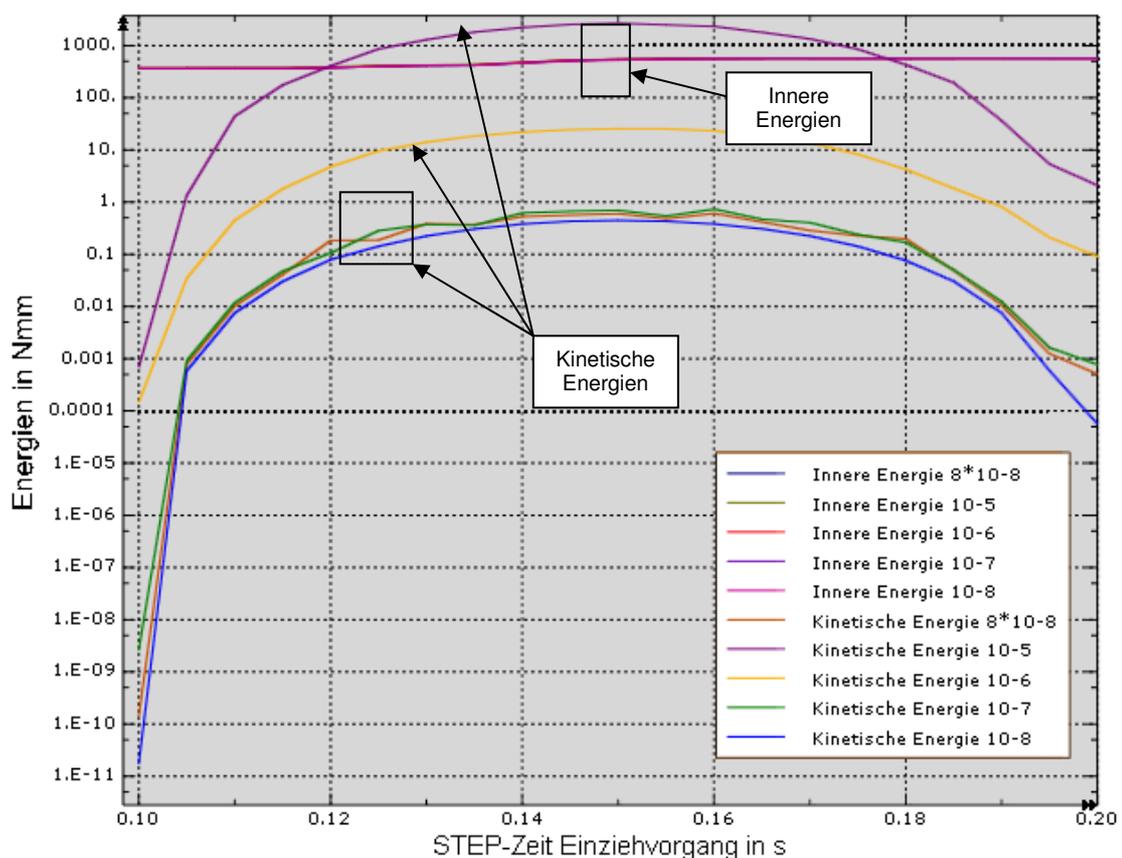


Abbildung 46: Energie-Diagramm mit kinetischer und innerer Energie für den Einziehvorgang

5.6 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Experimenten

Das Simulationstool wurde hinsichtlich der Referenz-Lockbolt-Verbindung optimiert. Deshalb wird im Folgenden für einen Vergleich die Al-LB-A-Probenreihe aus den experimentellen Untersuchungen herangezogen.

In Diagramm 11 ist der Kraft-Weg-Verlauf für den Umformvorgang aus den experimentellen Untersuchungen dem Kraft-Weg-Verlauf aus der Simulation gegenübergestellt. Das Simulationsmodell basiert auf den vorgenommenen Änderungen der vorangegangenen Kapitel.

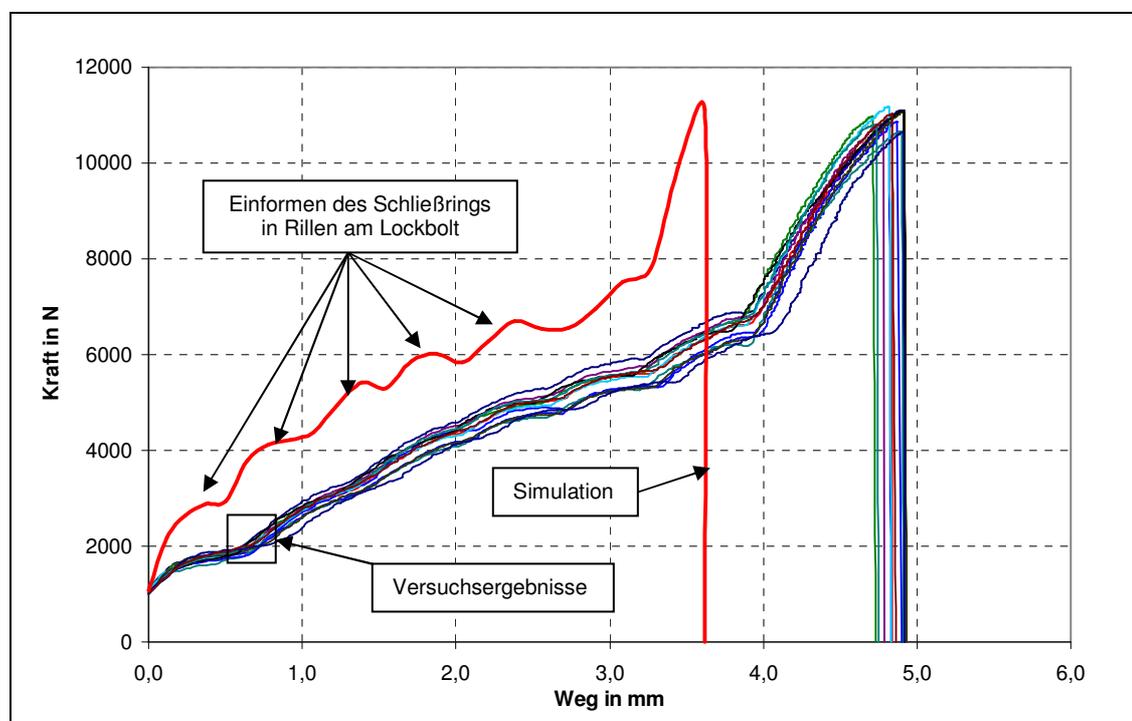


Diagramm 11: Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A im Vergleich zum FE-Modell bei der Installation

Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Abreißkraft aus der Simulation mit den experimentellen Ergebnissen gut übereinstimmt. Das lässt darauf schließen, dass das gewählte Abreißkriterium aus der Simulation zumindest für die Al-LB-A-Probenreihe zutreffend ist.

Das Einformen des Schließrings in die Rillen des Lockbolts bei der Simulation ist gut zu erkennen und liegt auf gleichem Kraft-Weg-Niveau wie bei den Versuchsergebnissen.

Allerdings kommt es bei der Simulation zu einem früheren Beenden der Umformung als bei den Experimenten, wie aus Diagramm 11 und 12 zu entnehmen ist. Es ist also möglich, dass die Umformung des Collars in der Simulation nicht vollständig durchgeführt wird. Daher ist es notwendig, die Geometrie des Collars nach dem Umformvorgang genauer zu untersuchen und mit den experimentell ermittelten Daten zu vergleichen. Dieses wird in Kapitel 5.6.1 diskutiert.

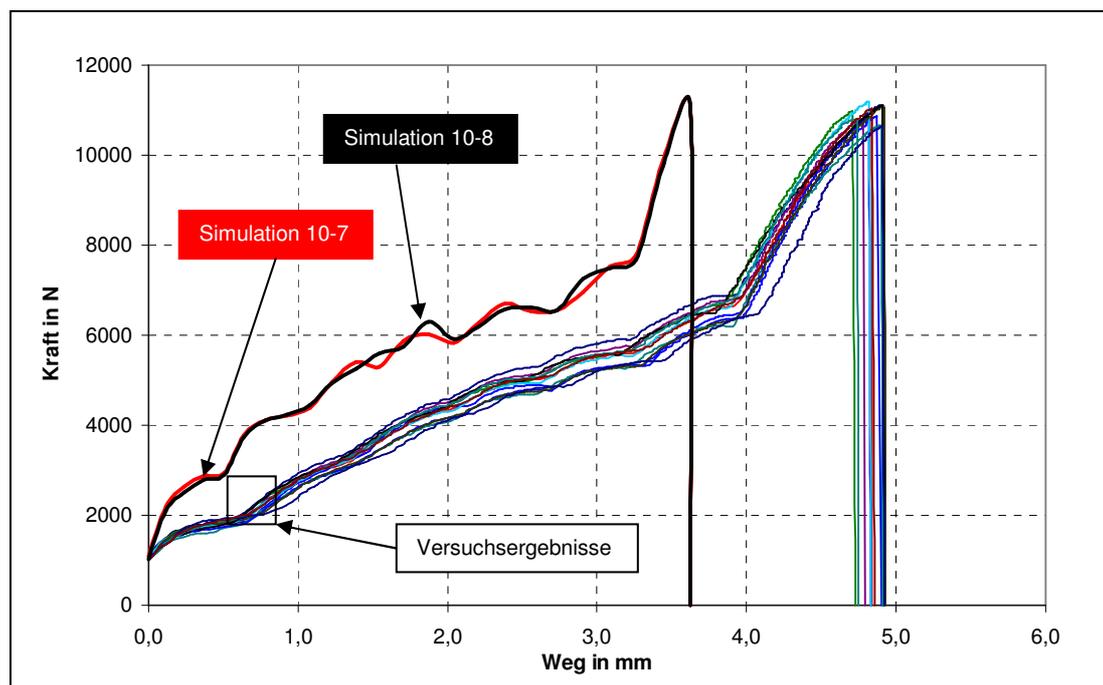


Diagramm 12: Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A im Vergleich zum FE-Modell mit verschiedenen Zeitschrittweiten bei der Installation

Diagramm 12 zeigt, zusätzlich zu Diagramm 11, einen Vergleich mit einer anderen Zeitschrittweite, hier 10^{-8} s. Wie erwartet, zeigt sich trotz kleinerer gewählte Zeitschrittweite keine Veränderung im Kraft-Weg-Verlauf während des Umformvorgangs (vgl. Kapitel 5.5).

5.6.1 Geometrie des Collars aus der Simulation

Wie in Kapitel 4.5.1 bereits diskutiert, wurden alle Collar jeder Probenreihe nach der Installation vermessen. Nun soll eine Gegenüberstellung mit den Simulationsdaten erfolgen.

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse aus der Simulationsvermessung den Ergebnissen aus Kapitel 4.5.1 gegenübergestellt.

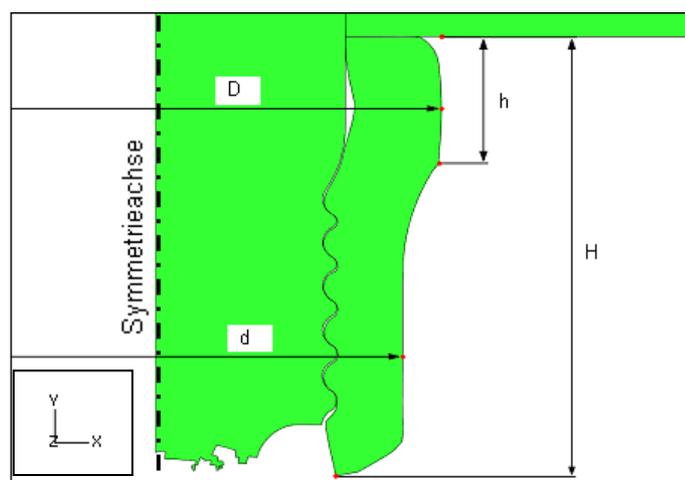


Abbildung 47: Definition der Messgrößen am verformten Collar

		Minimaler Klemmbereich/ Presspassung* (Probenreihe A) EXPERIMENTELL		Minimaler Klemmbereich/ Presspassung* SIMULATION	
D	6,971 mm	Min: 6,915 mm	Max: 7,027 mm	D	7,223 mm
d	6,100 mm	Min: 6,063 mm	Max: 6,125 mm	d	6,244 mm
H	5,954 mm	Min: 5,867 mm	Max: 6,052 mm	H	5,884 mm
h	1,397 mm	Min: 1,318 mm	Max: 1,542 mm	h	1,655 mm
* Anzahl gemessener Collar: 8				* Anzahl gemessener Collar: 1	

Tabelle 18: Collar-Maße nach der Installation im Vergleich

In der Tabelle 18 ist zu erkennen, dass die Messdaten aus der Simulation für den Außendurchmesser d und D , sowie für die gestauchte Höhe h des Collars größer sind als bei den experimentellen Ergebnissen. Die Abweichung beträgt für den Außendurchmesser D 0,262 mm, für den Außendurchmesser d 0,144 mm und für die gestauchte Höhe h 0,258 mm. Nur die Gesamthöhe H des Collars aus der Simulationsmessung liegt im Toleranzbereich der experimentellen Ergebnisse.

Daraus lässt sich schließen, dass die Einförmigkeit in der Simulation schneller beendet ist als in der Realität.

Im Folgenden soll daher die Geometrie des unverformten Collars im Modell überprüft werden, sowie anschließend die Reibung zwischen Werkzeug (Zugkopfhülse) und Collar neu generiert werden.

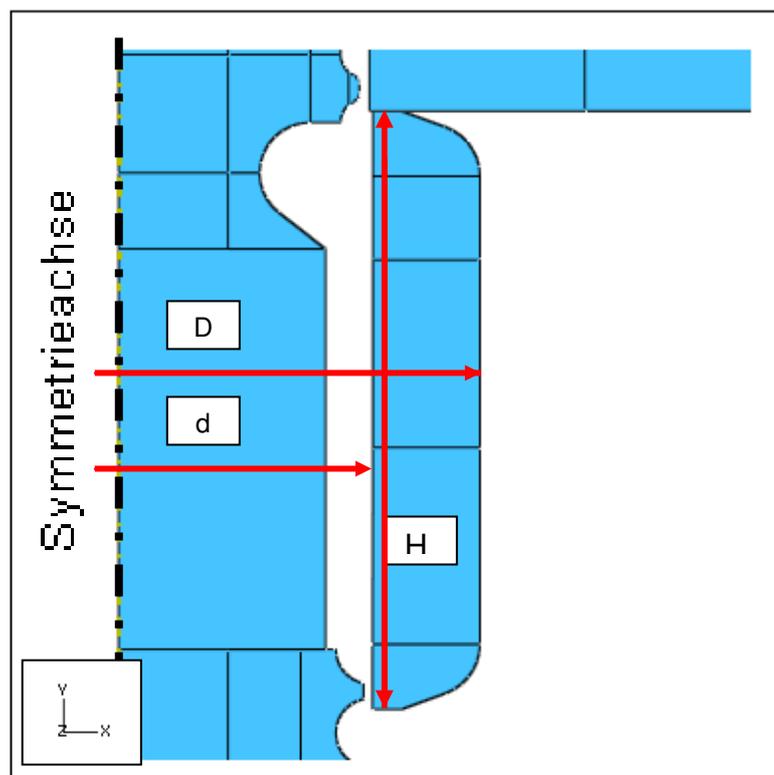


Abbildung 48: Definition der Messgrößen am unverformten Collar

Nach der in Abbildung 48 definierten Messgrößen am unverformten Collar werden 10 exemplarische Collar-Vermessungen experimentell durchgeführt und den Messungen aus der Simulation gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 aufgeführt.

Minimaler Klemmbereich/ Presspassung* (Probenreihe A) EXPERIMENTELL				Minimaler Klemmbereich/ Presspassung* SIMULATION			
	D	d	H		D	d	H
1	6,86 mm	4,70 mm	5,66 mm	1	6,88 mm	4,83 mm	5,72 mm
2	6,86 mm	4,71 mm	5,72 mm	Daraus ergibt sich eine Wandstärke t des Collars von 1,025 mm, Abbildung 48. Die Durchschnittswerte aus der experimentellen Vermessung ergeben eine Wandstärke des Collars von 1,08 mm. Die Abweichung liegt damit bei 0,055 mm.			
3	6,86 mm	4,68 mm	5,75 mm				
4	6,85 mm	4,71 mm	5,68 mm				
5	6,86 mm	4,68 mm	5,77 mm				
6	6,83 mm	4,61 mm	5,78 mm				
7	6,84 mm	4,74 mm	5,81 mm				
8	6,86 mm	4,70 mm	5,73 mm				
9	6,85 mm	4,71 mm	5,74 mm				
10	6,83 mm	4,67 mm	5,82 mm				
Ø	6,85 mm	4,69 mm	5,75 mm				
* Anzahl gemessener Collar: 10				* Anzahl gemessener Collar: 1			

Tabelle 19: Experimentelle Vermessung der Collar im Vergleich zu den Eingabedaten in der Simulation

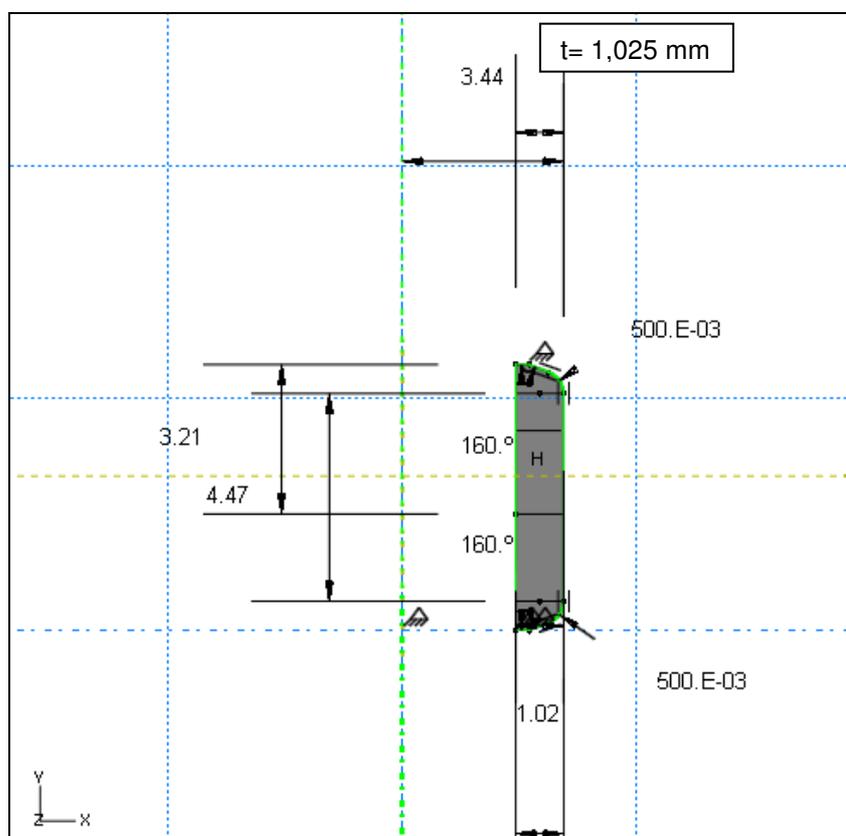


Abbildung 49: Maße am Collar aus dem ABAQUS-Sketcher

Die Untersuchung ergibt, dass die Collar-Geometrie aus der Simulation mit der Realität übereinstimmt. Hier liegt die Abweichung der Wandstärke bei $55\ \mu\text{m}$. Dies liegt im Rahmen der Streuung.

5.6.2 Reibungseinfluss

Durch die Variation des Reibkoeffizienten zwischen Zugkopfhülse und Collar soll nun untersucht werden, wie groß der Einfluss auf das Simulationsergebnis ist. Dazu wird der Reibkoeffizient von 0,1 auf 0,0 geändert. Es wird also keine Reibung zwischen Werkzeug und Schließring angenommen. Erwartet wird nun, dass die Einförmung des Collars während der Installation später beendet wird. So soll eine Annäherung an die Versuchsergebnisse erzielt werden.

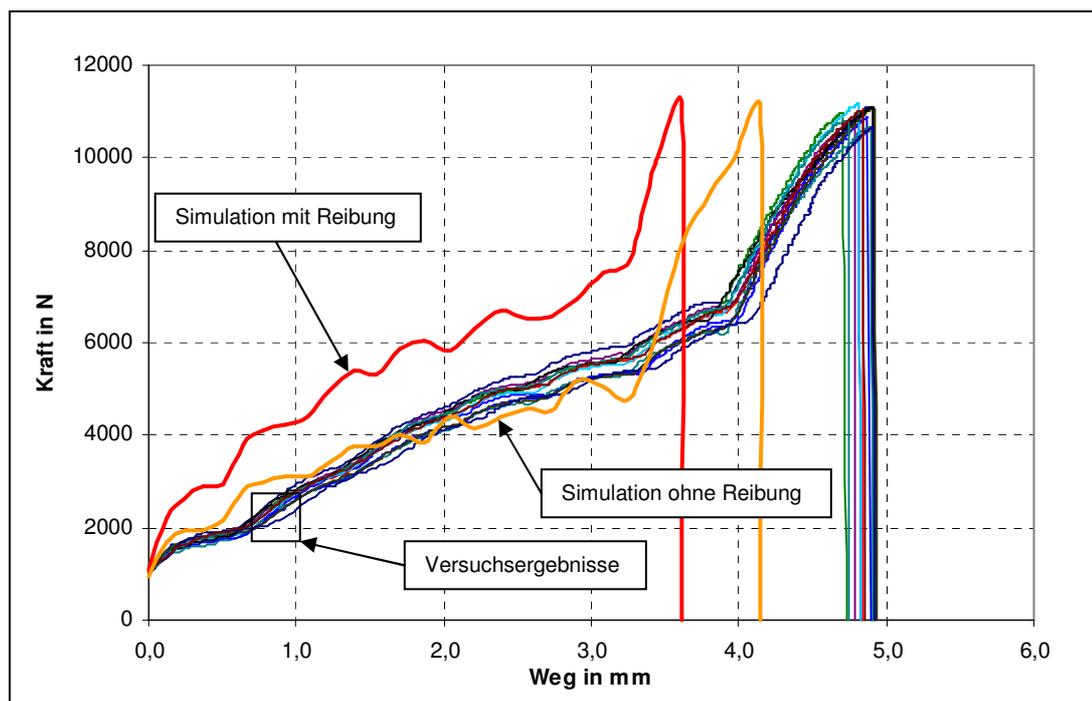


Diagramm 13: Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A im Vergleich zum FE-Modell „mit“ und „ohne“ Reibung bei der Installation

Diagramm 13 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf der Simulation „mit“ und „ohne“ Reibung, verglichen mit den Versuchsergebnissen, und bestätigt die Vermutung, dass der Umformvorgang später beendet wird, wenn ein Reibkoeffizient in der Simulation von Null gewählt wird.

Es ist eine deutliche Annäherung an die experimentellen Ergebnisse zu erkennen. Zum einen wird erreicht, dass der Umformvorgang zeitlich verlängert wird, zum anderen passt sich das Niveau der Rilleneinförmung aus der Simulation dem Kraft-Weg-Verlauf aus der experimentellen Untersuchung an.

Diese Untersuchung bringt jedoch auch einige Nachteile mit sich, wie ein Geometrievergleich nach dem Umformvorgang zeigt, Abbildung 50.

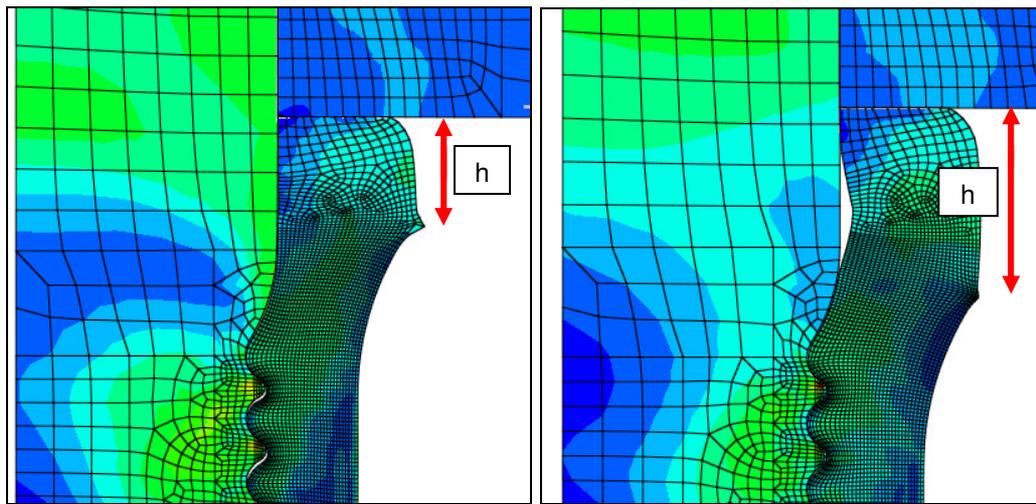


Abbildung 50: Geometrievergleich nach dem Umformvorgang ohne Reibung (links) und mit Reibung (rechts)

So wird bei einem Reibkoeffizienten von Null der Schließring zu weit eingeförm. Hier beträgt die gestauchte Höhe h nur 1,006 mm im Vergleich zu 1,665 mm bei einem Reibkoeffizienten von 0,1. In der Realität liegt die gestauchte Höhe h bei 1,397 mm (vgl. Tabelle 18).

An dieser Stelle wird aus zeitlichen Gründen auf eine weitere Untersuchung des Reibungseinflusses verzichtet. Es soll aber deutlich werden, dass hier eine Stellschraube gefunden wurde, an der noch weiter „gedreht“ werden muss. So könnte zum Beispiel ein Reibkoeffizient von 0,05 gewählt werden, um die Einförmung des Schließrings wieder zu reduzieren. Hier sind weitere FE-Rechnungen durchzuführen.

5.6.3 Ermittlung einer Korrekturfunktion für die experimentellen Kraft-Weg-Verläufe

Wie bereits in Kapitel 4.5.1 für die Simulation angedeutet, sind auch die experimentellen Versuchsdaten kritisch zu betrachten. Durch die Integration neuer Adapterstücke zur Aufnahme einer Kraftmessung für den Setzprozess sind die ermittelten Kraft- Weg- Verläufe, aufgrund der elastischen Teile im Kraftfluss, nicht vergleichbar mit den Kraft- Weg- Verläufen des Simulationsmodells.

Für eine entsprechende Korrektur gibt es entweder die Möglichkeit, das Werkzeug in der Simulation, das bisher nur als starrer Körper realisiert wurde, neu zu generieren und mit elastischen Materialkennwerten zu bestücken, oder aber den elastischen Anteil der Versuchsergebnisse mit einer Korrekturfunktion herauszurechnen. Diese Möglichkeit erweist sich vom Arbeitsaufwand als vorteilhafter.

Zur Bestimmung einer Korrekturfunktion wurden 3 Schließringbolzen ohne Einförmung eines Schließringes experimentell abgerissen.

Die Korrekturfunktion, Gleichung (5), ist der Kehrwert der ermittelten Steigung im linearen Bereich (Nachgiebigkeit des Systems) abzüglich der Nachgiebigkeit des Schließringbolzens, Gleichung (6).

$$\delta_{\text{elastischeTeile}} = \delta_{\text{system}} - \delta_{\text{Schließringbolzen}} \quad (5)$$

$$\delta_{\text{Schließringbolzen}} = \frac{l}{E \cdot A} = \frac{15 \text{ mm}}{107658 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{4,8 \text{ mm}}{2} \right)^2 \right)} = 0,000008 \frac{\text{mm}}{\text{N}} \quad (6)$$

Aus den drei Versuchen wird eine mittlere Steigung berechnet, dessen Kehrwert aus Diagramm 14 zu entnehmen ist.

Alle experimentellen Kurvenverläufe werden mit dieser Funktion korrigiert. Das Ergebnis ist dem Diagramm 15 zu entnehmen.

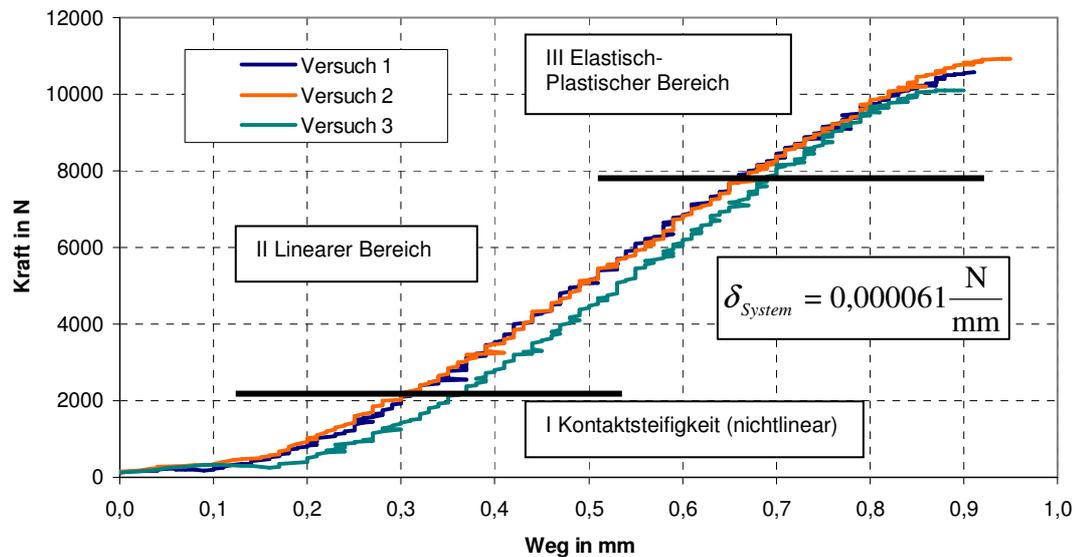


Diagramm 14: Ermittlung der Nachgiebigkeit des Systems über die Korrekturfunktion

Durch die Korrektur zeigt sich eine bessere Übereinstimmung der Kraft-Weg-Verläufe mit dem Kraft-Weg-Verlauf aus der Simulation. Die elastische Verformung des Setzwerkzeuges hat also einen großen Einfluss.

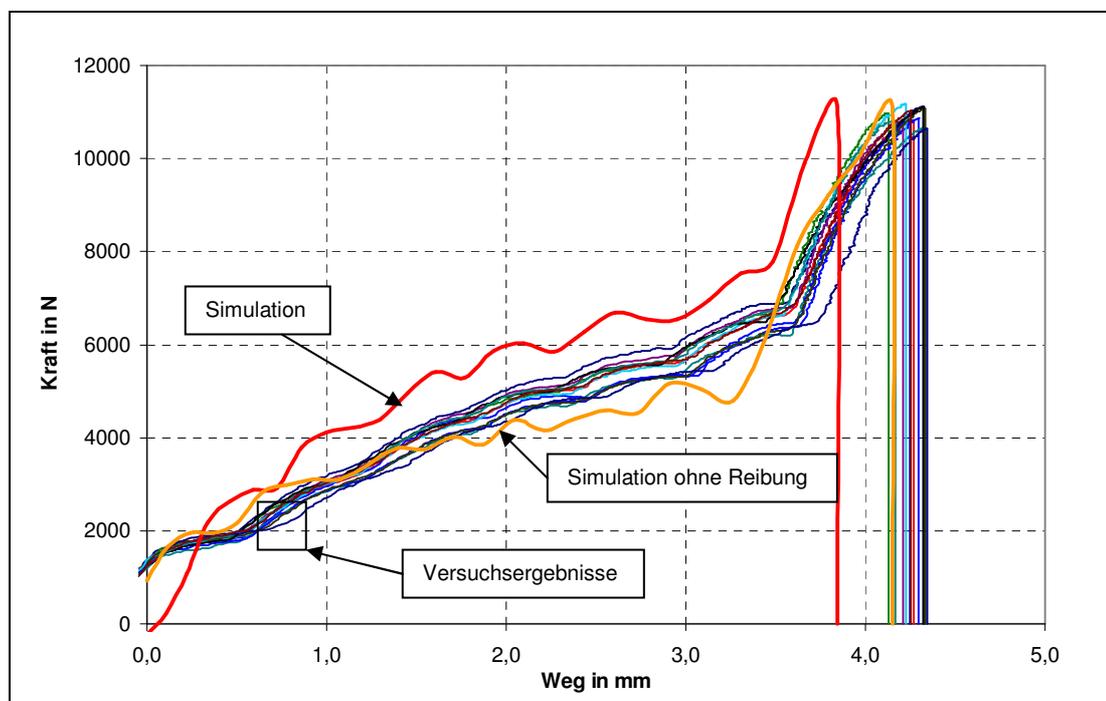


Diagramm 15: Kraft-Weg-Verlauf für Referenz-Probe Al-LB-A im Vergleich zum FE-Modell bei der Installation nach Korrektur

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Flugzeugbau werden zur Montage hochbeanspruchter Bauteile u. a. Schließringniet-Systeme eingesetzt. Eine derartige Verbindung besteht aus einem Schließringbolzen (Lockbolt) und einem Schließring (Collar). Durch ein Umformen des Schließringes in entsprechende Rillen am Schließringbolzen entsteht die kraft- und formschlüssige Verbindung.

Vor der Einführung neuer Verbindungselemente in der Flugzeugmontage wird grundsätzlich eine Überprüfung dieser Systeme durchgeführt, welche heutzutage fast ausschließlich experimentell ermittelt wird, da genaue Simulationstools kaum vorhanden sind.

Um dennoch ein aussagekräftiges Simulationstool aufzubauen, sind einige Prozessdaten und Geometrieangaben aus der Praxis notwendig, die im Rahmen dieser Arbeit in einer komplexen Versuchsmatrix ermittelt wurden.

Getestet wurden ausschließlich Lockbolts aus Titan als Senkkopf-Variante in Aluminium-Verbindungen.

Bis auf eine Versuchsreihe, die aufgrund von Lieferschwierigkeiten des Materials noch nicht getestet wurde, sind alle anderen Versuchsreihen untersucht und sämtliche Prozess- und Geometriedaten dokumentiert worden.

Hierunter fallen Niet- und Bohrungsdurchmesser, Klemmlänge, Passung, Nietkopfüberstand, Collar-Maße und Kraft-Weg-Messungen.

Zusätzlich wurden Schliffbilder erstellt und Versagensmodi der Verbindungen dokumentiert. Nun können für jede Lockbolt-Variante entsprechende Prozessdaten aus der Dokumentation herausgelesen werden, um einen Abgleich mit dem Simulationstool vorzunehmen. Diese Daten sind dem Anhang dieser Arbeit zu entnehmen.

Für das Simulationstool der Referenz-Verbindung wurde im Rahmen einer Energie-Auswertung ein Nachweis für eine quasi-statische Lösung erbracht und verschiedene Zeitschrittweiten zur Verkürzung der Rechenzeit untersucht. Zudem wurde die Elementierung in bestimmten Bereichen der Verbindung angepasst und für den Umformvorgang eine Gegenüberstellung mit den Prozessdaten aus den experimentellen Untersuchungen vorgenommen, hier insbesondere der Kraft-Weg-Verlauf.

Hierzu war es notwendig, die ermittelten experimentellen Prozessdaten der Kraft-Weg-Verläufe mit einer Funktion zu korrigieren, um den Einfluss der elastischen Werkzeugteile auszuschalten. Nur so ist ein Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den experimentellen Daten möglich und aussagekräftig.

Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass der Reibungseinfluss zwischen Werkzeug und Schließring eine große Rolle spielt. Durch die Änderung des Reibkoeffizienten können die Ergebnisse aus der Simulation den Ergebnissen aus den experimentellen Untersuchungen gut angepasst werden.

Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass bei Betrachtung aller in dieser Arbeit angesprochenen Faktoren und Parameter eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Untersuchungen erreichen lässt.

Zur Optimierung der Simulation ist es erforderlich, sich künftig verstärkt mit den Werkstoffeigenschaften auseinander zu setzen, da bislang die plastischen Materialkennwerte des Collars auch den Blechen zugeordnet wurden, obwohl sich das Material der Collar und der Bleche durch den Zusatz T42 bzw. T351 unterscheidet. Für die Bleche sind ggf. plastische Materialwerte experimentell zu ermitteln.

Außerdem sind Lockbolt-Verbindungen mit variierter Klemmlänge für das Simulationstool zu untersuchen und mit den Experimenten zu vergleichen.

Für die Lockbolt-Verbindungen mit variiertem Nenndurchmesser ist das Simulationstool anzupassen. Hier müssen Zugkopfhülse und Lockbolt-Geometrie angepasst werden.

Zusätzlich muss ein Scherzug-Simulationstool generiert werden, um auch hier einen Vergleich zwischen den experimentell ermittelten Daten vornehmen zu können. Die Geometriedaten für die Lockbolt-Verbindungen des Scherzug-Tools können dafür aus dieser Arbeit entnommen werden und sind im Anhang hinterlegt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] ABAQUS/CAE Finite Elemente Programm, Version 6.7-1; ABAQUS, Getting Started with Abaqus – Interactive Edition, Version 6.7 : Hibbit, Karlsson, Sorensen, Inc., Providence, Rhode Island, USA, 2007

- [2a] AIRBUS: Fertigungs-Handbuch, 80-T-34-5812, Ausgabe 06/03
- [2b] AIRBUS: Interner Stellenmarkt, September (1) 2008
- [2c] AIRBUS: Interne Materialdatenbank, 2008

- [3] Alcoa Fastening Systems: LGP-Lockbolts – Process Manual, Carson Operations – Aerospace Products, California USA, 2006

- [4] Awiszus; Bast; Dürr; Matthes (Hrsg.): Grundlagen der Fertigungstechnik, Fachbuchverlag Leipzig, 2003

- [5] Berner, M.: Unveröffentlichte Diplomarbeit, Simulation des Setzprozesses von Schließringbolzen im Flugzeugbau, Juni 2008

- [6] Deutscher Kalibrierdienst (DKD): Zwick Service, Kalibrierlaboratorium, Zwick GmbH & Co. KG, August-Nagel-Straße 11, 89079 Ulm, 7.4.2008

- [7] Falk K. Wittel: Eine kurze Einführung in die Finite Element Methode – FEM for 4, ETH Zürich, Gruppe H.J. Hermann – Rechnergestützte Physik der Werkstoffe, Institut für Baustoffe, 2007

- [8] Fischer, U.: Tabellenbuch Metall, Europa-Lehrmittel, 41. Ausgabe, 1999

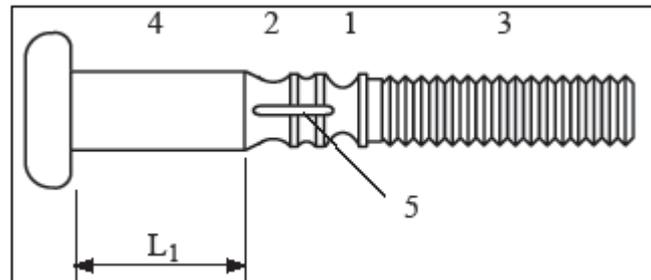
- [9] Hahn, O.; Klemens, U.: Fügen durch Umformen – Niet- und Durchsetzfügesysteme in der Praxis. Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. und Laboratorium für Werkstoff- und Fügechnik der Universität Paderborn, 1996

- [10] Klein, B.: FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, Vieweg Verlag, 2007
- [11] Laging, Prof. Dr. Ing. G.: Einführung in die Finite Element Methode, Vorlesungsunterlagen Theorie, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Wintersemester 2002/2003
- [12] Ranke, N.: Unveröffentlichter Praxissemesterbericht, Numerische und experimentelle Analyse des Setzprozesses von Lockbolt-Verbindungen
- [13] Matthes, K.-J.; Riedel, F. (Hrsg.): Fügetechnik – Überblick Lötten – Kleben – Fügen durch Umformen, Fachbuchverlag Leipzig, 2003
- [14] Spur, G.; Stöferle, Th.: Handbuch der Fertigungstechnik Band 5 – Fügen, Handhaben, Montieren –, Carl Hanser Verlag, München/Wien 1986
- [15] http://www.hishear.org/fastener_hk_hk1.htm:
HiShear Corporation, 2800 Skypark Drive, Torrance, CA 90509, USA, abgerufen am 24.08.2008
- [16] <http://www.patent-de.com/20070705/DE102005044824B4.html>:
PatentDe, abgerufen am 20.08.2008
- [17] http://www.qualityproducts.de/quality/db_titan.htm:
Quality Product, Inh. Thomas Ratsch, Aiblinger Str. 33, 83104 Tuntenhausen, abgerufen am 21.08.2008
- [18] <http://www.rz.uni-karlsruhe.de>:
Juling, Prof. Dr. Wilfried: Direktor des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe (TH), 76128 Karlsruhe, abgerufen am 24. Juli 2008

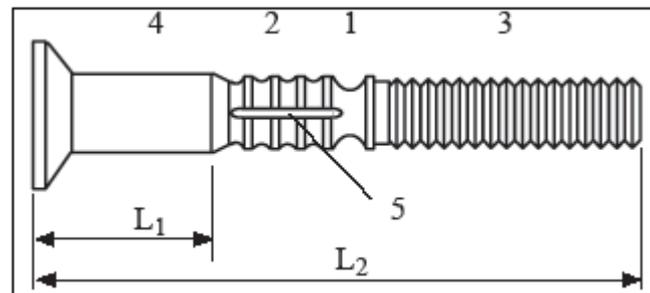
8 Anhang

Anlage I: Beispiele für Passbolzen mit Universal- und Senkkopf [ABS]

Passbolzen mit Universalkopf und Dichtmassen- bzw. Korrosionsschutzpastenaustrittsrille für Scherbeanspruchung

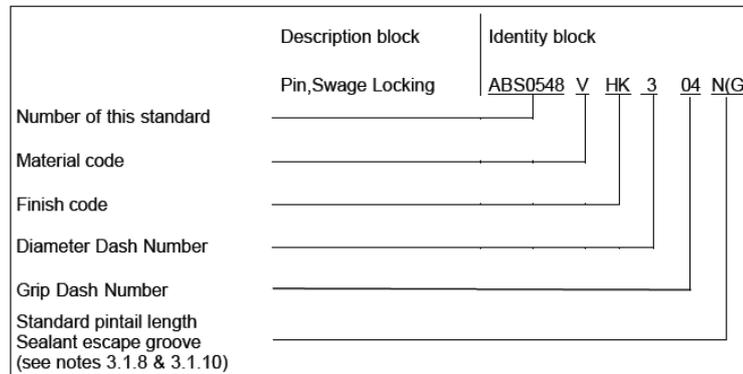


Passbolzen mit 100° Senkkopf für Zugbeanspruchung



Erläuterung:	1	= Sollbruchstelle
	2	= Quetschbereich
	3	= Zugteil
	4	= Schaft
	5	= Dichtmassen- bzw. Korrosionsschutzpastenaustrittsrille
	L_1	= Klemmlänge
	L_2	= Gesamtlänge des Verbindungselementes

Anlage II: Auszug aus Airbus-Norm: Bezeichnung für einen Lockbolt



Material Code:

Table 1: Material and surface treatment

Material	Surface treatment	Code
Titanium alloy AMS4967	Aluminium coating 'Kalgard 2245' 'Hi-Kote 1' per NAS4006 plus Cetyl alcohol lube per MIL-L-87132	VHK
	Sulphuric acid Anodise plus Cetyl alcohol lube per MIL-L-87132	No code

Diameter Dash Number:

Table 2 Nominal Dimensions Dimensions in inch (mm)

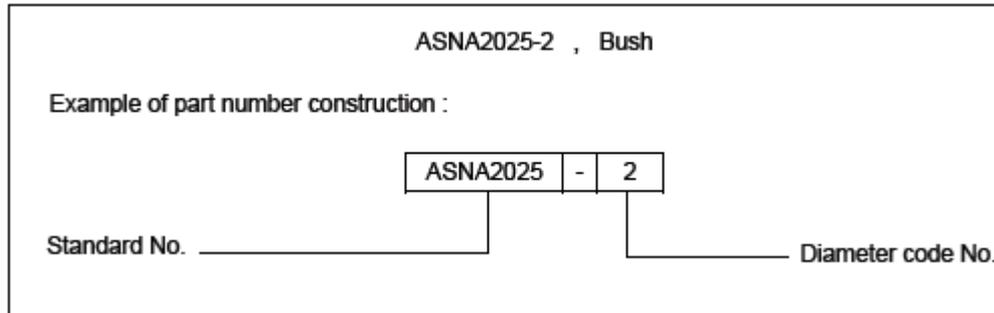
Ø Dash No	Nominal Ø	ØA (No Code)		ØA (Code HK)		ØB Nom	C Nom	ØG Gauge Ø		H Gauge Height	
		Max	Min	Max	Min			Max	Min	Max	Min
		3	3/16	0.1895 (4,813)	0.1890 (4,801)			0.1895 (4,813)	0.1885 (4,788)	0.3224 (8,189)	0.0560 (1,422)
3A	7/32	0.2182 (5,542)	0.2177 (5,530)	0.2182 (5,542)	0.2172 (5,517)	0.3715 (9,436)	0.0646 (1,641)	0.2982 (7,574)	0.2980 (7,569)	0.0323 (0,820)	0.0293 (0,744)
4	1/4	0.2495 (6,337)	0.2490 (6,325)	0.2495 (6,337)	0.2485 (6,312)	0.4234 (10,754)	0.0732 (1,859)	0.3315 (8,420)	0.3313 (8,415)	0.0402 (1,021)	0.0370 (0,940)
5	5/16	0.3120 (7,925)	0.3115 (7,912)	0.3120 (7,925)	0.3110 (7,899)	0.5305 (13,475)	0.0919 (2,334)	0.4320 (10,973)	0.4318 (10,968)	0.0432 (1,097)	0.0396 (1,006)
6	3/8	0.3745 (9,512)	0.3740 (9,500)	0.3745 (9,512)	0.3735 (9,487)	0.6357 (16,147)	0.1098 (2,789)	0.4854 (12,329)	0.4852 (12,324)	0.0649 (1,648)	0.0613 (1,557)
7	7/16	0.4370 (11,100)	0.4365 (11,087)	0.4370 (11,100)	0.4360 (11,074)	0.7360 (18,694)	0.1257 (3,193)	0.6582 (16,718)	0.6580 (16,713)	0.0347 (0,881)	0.0307 (0,780)

Grip Dash Number:

Table 3 Grip Dimensions Dimensions in inch (mm)

Grip Dash No	Grip range		Ø Dash No 3				Ø Dash No 3A			
			Y		Z		Y		Z	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
02	0.125 (3,18)	0.063 (1,60)	---	---	---	---	0.345 (8,76)	0.325 (8,26)	0.958 (24,33)	0.898 (22,81)
03	0.188 (4,78)	0.126 (3,20)	0.350 (8,89)	0.330 (8,38)	0.997 (25,32)	0.937 (23,79)	0.408 (10,36)	0.388 (9,86)	1.021 (25,93)	0.961 (24,41)
04	0.250 (6,35)	0.189 (4,80)	0.412 (10,46)	0.392 (9,96)	1.059 (26,90)	0.999 (25,37)	0.470 (11,94)	0.450 (11,43)	1.083 (27,51)	1.023 (25,98)
05	0.312 (7,92)	0.251 (6,38)	0.474 (12,04)	0.454 (11,53)	1.121 (28,47)	1.061 (26,95)	0.532 (13,51)	0.512 (13,00)	1.145 (29,08)	1.085 (27,56)
06	0.375 (9,52)	0.313 (7,95)	0.537 (13,64)	0.517 (13,13)	1.184 (30,07)	1.124 (28,55)	0.595 (15,11)	0.575 (14,60)	1.208 (30,68)	1.148 (29,16)
07	0.438 (11,13)	0.376 (9,55)	0.600 (15,24)	0.580 (14,73)	1.247 (31,67)	1.187 (30,15)	0.658 (16,71)	0.638 (16,21)	1.271 (32,28)	1.211 (30,76)

Anlage III: Auszug aus Airbus-Norm: Bezeichnung für einen Collar

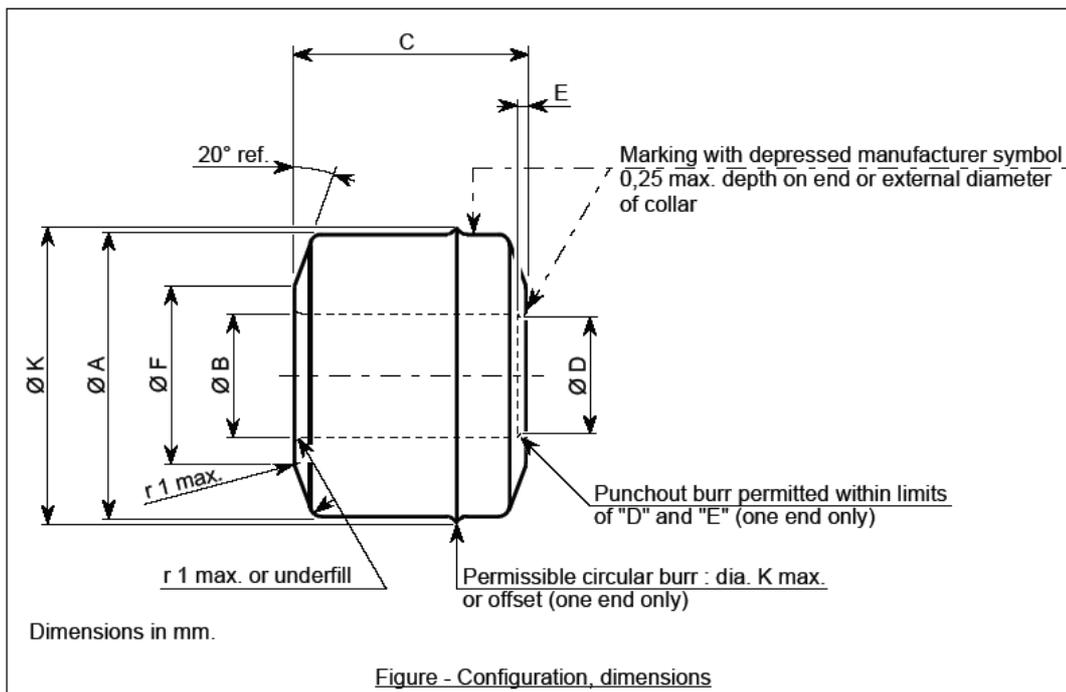


Diameter Code Number:

Table 1 - Dimensions, tolerances, mass

Ø CODE No.	NOMINAL Ø	Ø A ± 0,051	Ø B ± 0,051	C ± 0,25	Ø D min.	E max.	Ø F max.	Ø K max.	MASS (g)
2	4,17	6,22	4,140	5,61	4,01	0,41	4,78	6,38	0,26
3	4,83	6,86	4,826	5,71	4,70		5,38	7,01	0,29
3A	5,51	7,92	5,512	7,19	5,38		6,02	8,08	TBD
4	6,35	9,04	6,325		6,22		7,11	9,19	0,64
5	7,94	11,33	7,925	8,48	7,80	0,79	8,92	11,48	1,18
6	9,52	13,49	9,563	9,50	9,45		10,69	13,64	1,82
7	11,11	15,75	11,125	11,30	11,02		11,51	15,90	2,98
8	12,70	17,86	12,725	12,57	12,62		13,21	18,00	4,18

Dimensions in mm.



Anlage IV: Messungen der Bohrungen [in mm]

Blech	0°	90°	dm	Niet	Blech	0°	90°	dm	Niet
A-IS1-1	4,760	4,770	4,765	N33	D-IS1-1	4,745	4,733	4,739	N77
A-IS1-2	4,735	4,743	4,739	N25	D-IS1-2	4,750	4,754	4,752	N71
A-IS2-1	4,759	4,765	4,762	N4	D-IS2-1	4,744	4,734	4,739	N75
A-IS2-2	4,761	4,766	4,764	N13	D-IS2-2	4,748	4,738	4,743	N78
A-IS3-1	4,748	4,773	4,761	N38	D-IS3-1	4,755	4,759	4,757	N79
A-IS3-2	4,762	4,763	4,763	N6	D-IS3-2	4,725	4,748	4,737	N83
A-IS4-1	4,758	4,761	4,760	N30	D-IS4-1	4,738	4,752	4,745	N80
A-IS4-2	4,754	4,752	4,753	N31	D-IS4-2	4,750	4,746	4,748	N76
A-IS5-1	4,763	4,768	4,766	N9	D-IS5-1	4,735	4,755	4,745	N81
A-IS5-2	4,750	4,766	4,758	N23	D-IS5-2	4,744	4,748	4,746	N82
A-IS6-1	4,759	4,769	4,764	N8	D-IS6-1	4,735	4,742	4,739	N72
A-IS6-2	4,754	4,767	4,761	N22	D-IS6-2	4,750	4,748	4,749	N73
A-IS7-1	4,750	4,768	4,759	N39	D-IS7-1	4,742	4,744	4,743	N70
A-IS7-2	4,745	4,770	4,758	N26	D-IS7-2	4,743	4,746	4,745	N74
Ba-IS1-1	4,757	4,762	4,760	N60	E-IS1-1	4,758	4,760	4,759	
Ba-IS1-2	4,752	4,758	4,755	N53	E-IS1-2	4,746	4,778	4,762	
Ba-IS2-1	4,769	4,753	4,761	N59	E-IS2-1	4,771	4,772	4,772	
Ba-IS2-2	4,747	4,769	4,758	N55	E-IS2-2	4,765	4,767	4,766	
Ba-IS3-1	4,762	4,765	4,764	N58	E-IS3-1	4,767	4,774	4,771	
Ba-IS3-2	4,761	4,768	4,765	N54	E-IS3-2	4,753	4,778	4,766	
Ba-IS4-1	4,755	4,762	4,759	N57	E-IS4-1	4,769	4,774	4,772	
Ba-IS4-2	4,763	4,761	4,762	N52	E-IS4-2	4,771	4,777	4,774	
Ba-IS5-1	4,755	4,751	4,753	N50	E-IS5-1	4,769	4,774	4,772	
Ba-IS5-2	4,762	4,759	4,761	N56	E-IS5-2	4,772	4,779	4,776	
Ba-IS6-1	4,750	4,752	4,751	N61	E-IS6-1	4,770	4,779	4,775	
Ba-IS6-2	4,763	4,776	4,770	N51	E-IS6-2	4,767	4,776	4,772	
					E-IS7-1	4,772	4,777	4,775	
					E-IS7-2	4,767	4,777	4,772	
Ca-IS1-1	4,746	4,765	4,756	N41					
Ca-IS1-2	4,762	4,767	4,765	N40					
Ca-IS2-1	4,766	4,769	4,768	N15	Fa-IS1-1	4,790	4,798	4,794	N16
Ca-IS2-2	4,756	4,758	4,757	N35	Fa-IS1-2	4,797	4,796	4,797	N1
Ca-IS3-1	4,758	4,769	4,764	N2	Fa-IS2-1	4,795	4,802	4,799	N28
Ca-IS3-2	4,764	4,766	4,765	N20	Fa-IS2-2	4,796	4,804	4,800	N36
Ca-IS4-1	4,755	4,752	4,754	N12	Fa-IS3-1	4,797	4,801	4,799	N37
Ca-IS4-2	4,763	4,765	4,764	N7	Fa-IS3-2	4,795	4,807	4,801	N21
Ca-IS5-1	4,760	4,770	4,765	N18	Fa-IS4-1	4,799	4,806	4,803	N43
Ca-IS5-2	4,757	4,763	4,760	N34	Fa-IS4-2	4,796	4,802	4,799	N24
Ca-IS6-1	4,760	4,767	4,764	N14	Fa-IS5-1	4,791	4,805	4,798	N5
Ca-IS6-2	4,756	4,759	4,758	N27	Fa-IS5-2	4,790	4,807	4,799	N10
Ca-IS7-1	4,762	4,765	4,764	N17	Fa-IS6-1	4,794	4,798	4,796	N29
Ca-IS7-2	4,766	4,775	4,771	N19	Fa-IS6-2	4,792	4,801	4,797	N11
Ca-IS8-1	4,754	4,760	4,757	N42	Fa-IS7-1	4,796	4,805	4,801	N44
Ca-IS8-2	4,759	4,764	4,762	N32	Fa-IS7-2	4,797	4,799	4,798	N3

Blech	0°	90°	dm	Niet	Blech	0°	90°	dm	Niet
Ga-S1-1				N113	Gb-S1-1	6,320	6,323	6,322	N107
Ga-S1-2				N114	Gb-S1-2	6,319	6,321	6,320	N108
Ga-S2-1				N115	Gb-S2-1	6,322	6,320	6,321	N112
Ga-S2-2				N116	Gb-S2-2	6,321	6,331	6,326	N110
Ga-S3-1				N117	Gb-S3-1	6,322	6,318	6,320	N105
Ga-S3-2				N118	Gb-S3-2	6,320	6,322	6,321	N103
Ga-S4-1				N119	Gb-S4-1	6,321	6,219	6,320	N106
Ga-S4-2				N120	Gb-S4-2	6,321	6,330	6,326	N104
Ga-S5-1				N121	Gb-S5-1	6,321	6,319	6,320	N109
Ga-S5-2				N122	Gb-S5-2	6,329	6,329	6,329	N102
Ga-S6-1				N123	Gb-S6-1	6,321	6,322	6,322	N111
Ga-S6-2				N124	Gb-S6-2	6,320	6,322	6,321	N100
Ga-S7-2				N125					
Ga-S7-2				N126					
Fa-K1-1	4,799	4,800	4,800	N65	Ca-K1-1	4,795	4,796	4,798	N89
Fa-K1-2	4,798	4,801			Ca-K1-2	4,798	4,800		
Fa-K2-1	4,796	4,798	4,798	N88	Ca-K2-1	4,801	4,802	4,800	N69
Fa-K2-2	4,797	4,799			Ca-K2-2	4,798	4,799		
Fa-K3-1	4,797	4,801	4,798	N49	Ca-K3-1	4,796	4,798	4,798	N66
Fa-K3-2	4,799	4,796			Ca-K3-2	4,799	4,800		
Fa-K4-1	4,798	4,800	4,800	N87	Ca-K4-1	4,794	4,795	4,796	N68
Fa-K4-2	4,799	4,801			Ca-K4-2	4,798	4,797		
Fa-K5-1	4,795	4,799	4,796	N86	Ca-K5-1	4,802	4,799	4,800	N47
Fa-K5-2	4,795	4,796			Ca-K5-2	4,800	4,800		
Fa-K6-1	4,798	4,801	4,800	N63	Ca-K6-1	4,801	4,802	4,801	N85
Fa-K6-2	4,800	4,800			Ca-K6-2	4,802	4,800		
A-K1-1	4,760	4,758	4,761	N45					
A-K1-2	4,763	4,764							
A-K2-1	4,771	4,769	4,767	N46					
A-K2-2	4,763	4,765							
A-K3-1	4,756	4,760	4,761	N67					
A-K3-2	4,765	4,764							
A-K4-1	4,775	4,773	4,771	N62					
A-K4-2	4,769	4,768							
A-K5-1	4,755	4,756	4,758	N48					
A-K5-2	4,760	4,762							
A-K6-1	4,779	4,780	4,780	N64					
A-K6-2	4,778	4,781							

Anlage V: Messungen der Niete [in mm]

NIET	0°	90°	Dm	NIET	0°	90°	Dm
N1	4,804	4,801	4,801	N24	4,801	4,806	4,804
	4,797	4,802			4,802	4,807	
N2	4,797	4,799	4,798	N25	4,788	4,787	4,789
	4,797	4,799			4,791	4,791	
N3	4,802	4,802	4,802	N26	4,791	4,799	4,794
	4,802	4,802			4,792	4,795	
N4	4,799	4,795	4,797	N27	4,790	4,795	4,793
	4,799	4,795			4,790	4,795	
N5	4,802	4,803	4,803	N28	4,801	4,803	4,803
	4,802	4,803			4,803	4,804	
N6	4,796	4,794	4,796	N29	4,797	4,799	4,799
	4,798	4,796			4,801	4,799	
N7	4,795	4,799	4,798	N30	4,797	4,794	4,796
	4,798	4,799			4,797	4,794	
N8	4,795	4,796	4,797	N31	4,788	4,793	4,791
	4,798	4,797			4,790	4,793	
N9	4,791	4,813	4,799	N32	4,800	4,838	4,820
	4,791	4,801			4,800	4,840	
N10	4,801	4,808	4,805	N33	4,795	4,800	4,798
	4,802	4,809			4,795	4,800	
N11	4,799	4,803	4,801	N34	4,798	4,794	4,796
	4,798	4,803			4,798	4,794	
N12	4,794	4,792	4,793	N35	4,792	4,794	4,793
	4,795	4,792			4,792	4,795	
N13	4,797	4,793	4,796	N36	4,804	4,807	4,806
	4,797	4,795			4,805	4,809	
N14	4,796	4,799	4,798	N37	4,802	4,801	4,804
	4,797	4,798			4,805	4,806	
N15	4,800	4,797	4,799	N38	4,794	4,794	4,796
	4,800	4,797			4,800	4,796	
N16	4,800	4,799	4,799	N39	4,800	4,797	4,795
	4,800	4,798			4,802	4,780	
N17	4,797	4,798	4,798	N40	4,792	4,802	4,798
	4,799	4,797			4,794	4,805	
N18	4,795	4,799	4,798	N41	4,789	4,792	4,793
	4,798	4,800			4,795	4,796	
N19	4,794	4,800	4,799	N42	4,859	4,799	4,836
	4,794	4,808			4,885	4,799	
N20	4,796	4,797	4,798	N43	4,806	4,808	4,806
	4,800	4,800			4,804	4,805	
N21	4,804	4,811	4,808	N44	4,796	4,804	4,800
	4,806	4,811			4,797	4,801	
N22	4,794	4,797	4,796	N45	4,810	4,813	4,810
	4,796	4,797			4,808	4,810	
N23	4,794	4,794	4,794	N46	4,802	4,806	4,805
	4,795	4,794			4,804	4,807	

N47	4,804	4,801	4,800	N71	4,799	4,801	4,801
	4,806	4,799			4,801	4,802	
N48	4,805	4,800	4,800	N72	4,792	4,799	4,794
	4,799	4,795			4,794	4,792	
N49	4,807	4,805	4,801	N73	4,799	4,800	4,800
	4,810	4,800			4,802	4,798	
N50	4,798	4,803	4,799	N74	4,800	4,799	4,798
	4,799	4,795			4,798	4,795	
N51	4,826	4,808	4,817	N75	4,790	4,796	4,794
	4,822	4,811			4,800	4,789	
N52	4,798	4,806	4,805	N76	4,796	4,804	4,800
	4,803	4,813			4,798	4,801	
N53	4,796	4,801	4,801	N77	4,791	4,795	4,793
	4,808	4,799			4,794	4,792	
N54	4,806	4,806	4,807	N78	4,795	4,796	4,795
	4,808	4,807			4,794	4,795	
N55	4,804	4,801	4,803	N79	4,808	4,807	4,809
	4,808	4,800			4,809	4,810	
N56	4,803	4,804	4,805	N80	4,791	4,798	4,795
	4,806	4,805			4,796	4,795	
N57	4,801	4,803	4,802	N81	4,796	4,796	4,797
	4,802	4,802			4,798	4,797	
N58	4,807	4,808	4,810	N83	4,792	4,793	4,793
	4,809	4,814			4,793	4,793	
N59	4,805	4,803	4,804	N84	4,796	4,800	4,799
	4,806	4,800			4,802	4,797	
N60	4,802	4,804	4,804	N85	4,809	4,806	4,809
	4,806	4,805			4,813	4,809	
N61	4,801	4,802	4,798	N86	4,797	4,799	4,798
	4,795	4,793			4,797	4,799	
N62	4,805	4,802	4,805	N87	4,794	4,800	4,799
	4,808	4,805			4,794	4,808	
N63	4,794	4,798	4,797	N88	4,806	4,808	4,806
	4,796	4,799			4,804	4,805	
N64	4,793	4,803	4,799	N89	4,802	4,803	4,803
	4,800	4,801			4,802	4,803	
N65	4,805	4,804	4,805				
	4,804	4,805					
N66	4,806	4,804	4,804	N100	6,321	6,321	6,321
	4,807	4,799			6,322	6,319	
N67	4,799	4,798	4,798	N101	6,328	6,319	6,324
	4,794	4,800			6,323	6,325	
N68	4,802	4,808	4,806	N102	6,330	6,329	6,327
	4,806	4,806			6,325	6,325	
N69	4,802	4,806	4,807	N103	6,320	6,320	6,321
	4,810	4,809			6,321	6,323	
N70	4,795	4,796	4,795	N104	6,326	6,329	6,330
	4,794	4,795			6,335	6,330	

8 Anhang

N105	6,330	6,328	6,327	N113			
	6,325	6,326		N114			
N106	6,325	6,326	6,323	N115			
	6,321	6,321		N116			
N107	6,322	6,321	6,323	N117			
	6,326	6,321		N118			
N108	6,322	6,320	6,322	N119			
	6,324	6,320		N120			
N109	6,325	6,321	6,325	N121			
	6,326	6,326		N122			
N110	6,327	6,328	6,326	N123			
	6,323	6,326		N124			
N111	6,316	6,318	6,319	N125			
	6,323	6,317		N126			
N112	6,317	6,324	6,320				
	6,316	6,321					

Anlage VI: Messungen der Passung und des Nietkopfüberstandes [in mm]

Blech	0°	90°	Dm	Niet	Dm	Passung	Überstd.Innen	Überstd.Außen
A-IS1-1	4,760	4,770	4,765	N33	4,798	-0,033	0,090	0,13-0,14
A-IS1-2	4,735	4,743	4,739	N25	4,789	-0,050	0,075	0,11-0,13
A-IS2-1	4,759	4,765	4,762	N4	4,797	-0,035	0,090	0,11-0,12
A-IS2-2	4,761	4,766	4,764	N13	4,796	-0,032	0,070	0,10-0,12
A-IS3-1	4,748	4,773	4,761	N38	4,796	-0,035	0,065	0,10-0,14
A-IS3-2	4,762	4,763	4,763	N6	4,796	-0,034	0,115	0,14-0,15
A-IS4-1	4,758	4,761	4,760	N30	4,796	-0,037	0,120	0,13-0,14
A-IS4-2	4,754	4,752	4,753	N31	4,791	-0,038	0,105	0,12-0,14
A-IS5-1	4,763	4,768	4,766	N9	4,799	-0,034	0,050	0,08-0,10
A-IS5-2	4,750	4,766	4,758	N23	4,794	-0,036	0,075	0,11-0,13
A-IS6-1	4,759	4,769	4,764	N8	4,797	-0,033	0,040	0,08-0,09
A-IS6-2	4,754	4,767	4,761	N22	4,796	-0,035	0,090	0,11-0,13
A-IS7-1	4,750	4,768	4,759	N39	4,795	-0,036	0,080	0,11-0,13
A-IS7-2	4,745	4,770	4,758	N26	4,794	-0,036	0,050	0,08-0,09
		Mittelwert:	4,760			-0,036		
Ba-IS1-1	4,757	4,762	4,760	N60	4,804	-0,045	0,080	0,08-0,09
Ba-IS1-2	4,752	4,758	4,755	N53	4,801	-0,046	0,045	0,04-0,06
Ba-IS2-1	4,769	4,753	4,761	N59	4,804	-0,043	0,080	0,07-0,09
Ba-IS2-2	4,747	4,769	4,758	N55	4,803	-0,045	0,050	0,05-0,06
Ba-IS3-1	4,762	4,765	4,764	N58	4,810	-0,047	0,060	0,06-0,09
Ba-IS3-2	4,761	4,768	4,765	N54	4,807	-0,043	0,060	0,06-0,08
Ba-IS4-1	4,755	4,762	4,759	N57	4,802	-0,043	0,060	0,05-0,07
Ba-IS4-2	4,763	4,761	4,762	N52	4,805	-0,043	0,080	0,06-0,10
Ba-IS5-1	4,755	4,751	4,753	N50	4,799	-0,046	0,040	0,04-0,05
Ba-IS5-2	4,762	4,759	4,761	N56	4,805	-0,044	0,050	0,05-0,08
Ba-IS6-1	4,750	4,752	4,751	N61	4,798	-0,047	0,050	0,04-0,07
Ba-IS6-2	4,763	4,776	4,770	N51	4,817	-0,048	0,060	0,05-0,09
		Mittelwert:	4,760			-0,045		
Ca-IS1-1	4,746	4,765	4,756	N41	4,793	-0,038	0,075	0,10-0,11
Ca-IS1-2	4,762	4,767	4,765	N40	4,798	-0,034	-0,010	0,04-0,05
Ca-IS2-1	4,766	4,769	4,768	N15	4,799	-0,031	0,075	0,11-0,12
Ca-IS2-2	4,756	4,758	4,757	N35	4,793	-0,036	0,060	0,08-0,10
Ca-IS3-1	4,758	4,769	4,764	N2	4,798	-0,034	0,050	0,09-0,10
Ca-IS3-2	4,764	4,766	4,765	N20	4,798	-0,033	0,065	0,09-0,11
Ca-IS4-1	4,755	4,752	4,754	N12	4,793	-0,040	0,025	0,05-0,08
Ca-IS4-2	4,763	4,765	4,764	N7	4,798	-0,034	0,070	0,10-0,11
Ca-IS5-1	4,760	4,770	4,765	N18	4,798	-0,033	0,080	0,10-0,11
Ca-IS5-2	4,757	4,763	4,760	N34	4,796	-0,036	0,055	0,085-0,095
Ca-IS6-1	4,760	4,767	4,764	N14	4,798	-0,034	0,070	0,10-0,11
Ca-IS6-2	4,756	4,759	4,758	N27	4,793	-0,035	0,065	0,09-0,10
Ca-IS7-1	4,762	4,765	4,764	N17	4,798	-0,035	0,060	0,09-0,11
Ca-IS7-2	4,766	4,775	4,771	N19	4,799	-0,029	0,060	0,08-0,11
		Mittelwert:	4,762			-0,034		

Blech	0°	90°	dm	Niet	dm	Passung	Überstd.Innen	Überstd.Außen
D-IS1-1	4,745	4,733	4,739	N77	4,793	-0,054	0,065	0,05-0,09
D-IS1-2	4,750	4,754	4,752	N71	4,801	-0,049	0,050	0,05-0,06
D-IS2-1	4,744	4,734	4,739	N75	4,794	-0,055	0,070	0,07-0,10
D-IS2-2	4,748	4,738	4,743	N78	4,795	-0,052	0,070	0,06-0,10
D-IS3-1	4,755	4,759	4,757	N79	4,809	-0,052	0,080	0,09-0,11
D-IS3-2	4,725	4,748	4,737	N83	4,799	-0,063	0,050	0,06-0,10
D-IS4-1	4,738	4,752	4,745	N80	4,795	-0,050	0,075	0,07-0,11
D-IS4-2	4,750	4,746	4,748	N76	4,800	-0,052	0,060	0,05-0,08
D-IS5-1	4,735	4,755	4,745	N81	4,797	-0,052	0,080	0,07-0,11
D-IS5-2	4,744	4,748	4,746	N82	4,793	-0,047	0,020	0,01-0,06
D-IS6-1	4,735	4,742	4,739	N72	4,794	-0,055	0,060	0,06-0,07
D-IS6-2	4,750	4,748	4,749	N73	4,800	-0,051	0,040	0,02-0,07
D-IS7-1	4,742	4,744	4,743	N70	4,795	-0,052	0,040	0,05-0,06
D-IS7-2	4,743	4,746	4,745	N74	4,798	-0,053	0,050	0,04-0,06
		Mittelwert:	4,745			-0,053		
Fa-IS1-1	4,790	4,798	4,794	N16	4,799	-0,005	0,050	0,08-0,10
Fa-IS1-2	4,797	4,796	4,797	N1	4,801	-0,005	0,045	0,07-0,09
Fa-IS2-1	4,795	4,802	4,799	N28	4,803	-0,005	0,025	0,04-0,06
Fa-IS2-2	4,796	4,804	4,800	N36	4,806	-0,006	0,060	0,09-0,13
Fa-IS3-1	4,797	4,801	4,799	N37	4,804	-0,005	0,040	0,07-0,09
Fa-IS3-2	4,795	4,807	4,801	N21	4,808	-0,007	0,035	0,06-0,10
Fa-IS4-1	4,799	4,806	4,803	N43	4,806	-0,003	0,025	0,06-0,09
Fa-IS4-2	4,796	4,802	4,799	N24	4,804	-0,005	0,060	0,10
Fa-IS5-1	4,791	4,805	4,798	N5	4,803	-0,005	0,070	0,09-0,10
Fa-IS5-2	4,790	4,807	4,799	N10	4,805	-0,006	0,060	0,10
Fa-IS6-1	4,794	4,798	4,796	N29	4,799	-0,003	0,025	-
Fa-IS6-2	4,792	4,801	4,797	N11	4,801	-0,005	0,040	0,06-0,08
Fa-IS7-1	4,796	4,805	4,801	N44	4,800	0,000	0,030	0,06-0,07
Fa-IS7-2	4,797	4,799	4,798	N3	4,802	-0,004	0,050	0,08-0,14
		Mittelwert:	4,798			-0,005		
Ga-S1-1				N113			0,09	0,09-0,11
Ga-S1-2				N114			0,12	0,14-0,15
Ga-S2-1				N115			0,08	0,08-0,11
Ga-S2-2				N116			0,13	0,15
Ga-S3-1				N117			0,09	0,08-0,10
Ga-S3-2				N118			0,08	0,05-0,12
Ga-S4-1				N119			0,09	0,08-0,10
Ga-S4-2				N120			0,10	0,09-0,12
Ga-S5-1				N121			0,09	0,08-1,10
Ga-S5-2				N122			0,05	0,06-0,08
Ga-S6-1				N123				
Ga-S6-2				N124			0,09	0,09-0,12
Ga-S7-1				N125				
Ga-S7-2				N126			0,08	0,08-0,10
		Mittelwert:						

Gb-S1-1	6,320	6,323	6,322	N107	6,324	-0,002	0,015	0,02
Gb-S1-2	6,319	6,321	6,320	N108	6,322	-0,002	0,07	0,08-0,10
Gb-S2-1	6,322	6,320	6,321	N112	6,320	-0,001	0,10	0,10-0,12
Gb-S2-2	6,321	6,331	6,326	N110	6,326	0,000	0,13	0,13
Gb-S3-1	6,322	6,318	6,320	N105	6,327	-0,007	0,11	0,11-0,13
Gb-S3-2	6,320	6,322	6,321	N103	6,321	0,000	0,14	0,13-0,15
Gb-S4-1	6,321	6,219	6,320	N106	6,323	-0,001	0,14	0,14-0,16
Gb-S4-2	6,321	6,330	6,326	N104	6,330	-0,004	0,13	0,14-0,15
Gb-S5-1	6,321	6,319	6,320	N109	6,325	-0,005	0,14	0,14-0,15
Gb-S5-2	6,329	6,329	6,329	N102	6,323	+0,006	0,13	0,14-0,16
Gb-S6-1	6,321	6,322	6,322	N111	6,319	+0,003	0,15	0,15-0,16
Gb-S6-2	6,320	6,322	6,321	N100	6,321	0,000	0,14	0,13-0,16
			Mittelwert:	6,322		-0,001		
Fa-K1-1	4,799	4,800	4,800	N65	4,805	-0,005	0,13	0,15-0,17
Fa-K1-2	4,798	4,801						
Fa-K2-1	4,796	4,798	4,798	N88	4,806	-0,008	0,12	0,05-0,15
Fa-K2-2	4,797	4,799						
Fa-K3-1	4,797	4,801	4,798	N49	4,801	-0,003	0,15	0,15-0,18
Fa-K3-2	4,799	4,796						
Fa-K4-1	4,798	4,800	4,800	N87	4,799	+0,001	0,10	0,09-0,15
Fa-K4-2	4,799	4,801						
Fa-K5-1	4,795	4,799	4,796	N86	4,798	-0,002	0,14	0,12-0,15
Fa-K5-2	4,795	4,796						
Fa-K6-1	4,798	4,801	4,800	N63	4,797	+0,003	0,09	0,09-0,13
Fa-K6-2	4,800	4,800						
			Mittelwert:	4,799		-0,002		
Ca-K1-1	4,795	4,796	4,798	N89	4,803	-0,005	0,06	0,05-0,12
Ca-K1-2	4,798	4,800						
Ca-K2-1	4,801	4,802	4,800	N69	4,807	-0,007	0,15	0,15-0,16
Ca-K2-2	4,798	4,799						
Ca-K3-1	4,796	4,798	4,798	N66	4,804	-0,006	0,11	0,12-0,15
Ca-K3-2	4,799	4,800						
Ca-K4-1	4,794	4,795	4,796	N68	4,806	-0,012	0,08	0,10-0,13
Ca-K4-2	4,798	4,797						
Ca-K5-1	4,802	4,799	4,800	N47	4,800	0,000	0,15	0,15-0,20
Ca-K5-2	4,800	4,800						
Ca-K6-1	4,801	4,802	4,801	N85	4,809	-0,008	0,14	0,15-0,16
Ca-K6-2	4,802	4,800						
			Mittelwert:	4,799		-0,006		
A-K1-1	4,760	4,758	4,761	N45	4,810	-0,049	0,10	0,12
A-K1-2	4,763	4,764						
A-K2-1	4,771	4,769	4,767	N46	4,805	-0,038	0,08	0,13-0,15
A-K2-2	4,763	4,765						
A-K3-1	4,756	4,760	4,761	N67	4,798	-0,037	0,11	0,15
A-K3-2	4,765	4,764						
A-K4-1	4,775	4,773	4,771	N62	4,805	-0,034	0,10	0,12-0,15
A-K4-2	4,769	4,768						
A-K5-1	4,755	4,756	4,758	N48	4,800	-0,042	0,07	0,10
A-K5-2	4,760	4,762						
A-K6-1	4,779	4,780	4,780	N64	4,799	-0,019	0,10	0,10-0,12
A-K6-2	4,778	4,781						
			Mittelwert:	4,766		-0,037		

Anlage VII: Klasseneinteilung für Längenänderungs-Messeinrichtungen[6]

In der folgenden Tabelle sind die Grenzwerte für die relative Abweichung Anfangs-Gerätetemesslänge, für die Auflösung und die Anzeigeabweichung angegeben. Die relative Anzeigeabweichung „q“ für eine Längenänderung „ l_t “ wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

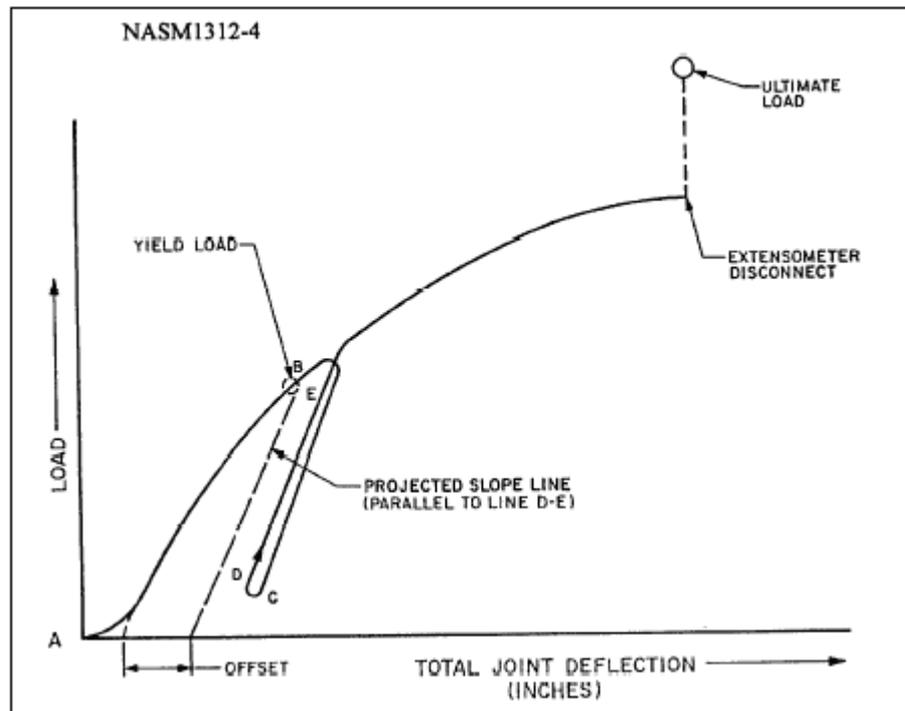
$$q = \frac{l_i - l_t}{l_t} \times 100$$

Klasse der Längenänderungs-Messeinrichtung	Längenänderungs-Messeinrichtung (höchstzulässige Werte)					Kalibriergerät (höchstzulässige Werte)			
	Relative Abweichung der Anfangs-Gerätetemesslänge q_{Le} %	Auflösung ^a		Anzeigeabweichung ^a		Auflösung ^a		Anzeigeabweichung ^a	
		Relativer Wert r/l_i %	Absolutwert r µm	Relativer Wert q %	Absolutwert $l_i - l_t$ µm	Relativer Wert %	Absolutwert µm	Relativer Wert %	Absolutwert µm
	0,2	± 0,2	0,1	0,2	± 0,2	± 0,6	0,05	0,1	± 0,06
0,5	± 0,5	0,25	0,5	± 0,5	± 1,5	0,12	0,25	± 0,15	± 0,5
1	± 1,0	0,5	1,0	± 1,0	± 3,0	0,25	0,5	± 0,3	± 1,0
2	± 2,0	1,0	2,0	± 2,0	± 6,0	0,5	1,0	± 0,6	± 2,0

ANMERKUNG Für kleine Anfangs-Gerätetemesslängen (≤ 25 mm) und für kleine Dehnungen sollte der Anwender eine Längenänderungs-Messeinrichtung der besseren Klassen verwenden.

a Der größere Wert ist jeweils zulässig.

DIN EN 9513:2003

Anlage VIII: Typische Kraft-Weg-Kurve eines Scherzugversuches [2a]

Das Entlasten der Probe zeichnet sich in dem Diagramm durch eine Schleife aus. Hat man die Probe oberhalb der tatsächlichen Dehngrenze (B) der Nietverbindung entlastet, bildet sich beim erneuten Belasten ein anderer Modul als beim Entlasten. Um die tatsächliche Dehngrenze nun zu bestimmen, wird die zweite entwickelte Steigung nun solange in Richtung Ursprung parallel verschoben, bis der Abstand (Offset) auf der X-Achse 0,04 mal den Nenndurchmesser des Bolzens beträgt. Dort wo die Prüfkurve nun geschnitten wird, liegt die Dehngrenze der Nietverbindung, die auf der Y-Achse abzulesen ist.

Anlage IX: Maße der Bleche [in mm]

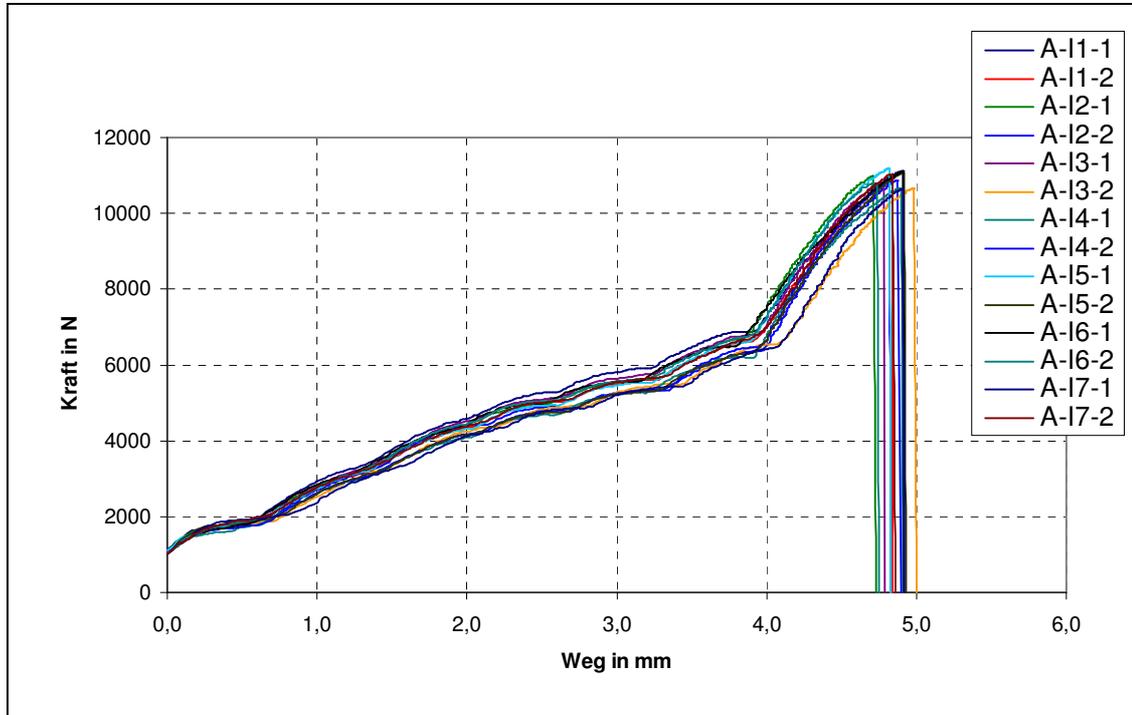
Blech	Blechedicke	Blech	Blechedicke	Blech	Blechedicke	Blech	Blechedicke
A-IS1-1	2,51	D-IS1-1	5,19	Ga-S1-1	3,28	Ca-K1-1	3,06
A-IS1-2	2,50	D-IS1-2	5,18	Ga-S1-2	3,27	Ca-K1-2	3,06
A-IS2-1	2,50	D-IS2-1	5,21	Ga-S2-1	3,27	Ca-K2-1	3,05
A-IS2-2	2,50	D-IS2-2	5,18	Ga-S2-2	3,28	Ca-K2-2	3,06
A-IS3-1	2,50	D-IS3-1	5,18	Ga-S3-1	3,28	Ca-K3-1	3,04
A-IS3-2	2,51	D-IS3-2	5,17	Ga-S3-2	3,27	Ca-K3-2	3,05
A-IS4-1	2,51	D-IS4-1	5,16	Ga-S4-1	3,26	Ca-K4-1	3,05
A-IS4-2	2,52	D-IS4-2	5,17	Ga-S4-2	3,26	Ca-K4-2	3,05
A-IS5-1	2,50	D-IS5-1	5,16	Ga-S5-1	3,27	Ca-K5-1	3,05
A-IS5-2	2,51	D-IS5-2	5,19	Ga-S5-2	3,27	Ca-K5-2	3,07
A-IS6-1	2,51	D-IS6-1	5,17	Ga-S6-1	3,28	Ca-K6-1	3,05
A-IS6-2	2,49	D-IS6-2	5,17	Ga-S6-2	3,27	Ca-K6-2	3,05
A-IS7-1	2,51	D-IS7-1	5,21				
A-IS7-2	2,50	D-IS7-2	5,19				

B-IS1-1	3,30	E-IS1-1	2,49	Gb-S1-1	3,33	A-K1-1	2,48
B-IS1-2	3,30	E-IS1-2	2,47	Gb-S1-2	3,26	A-K1-2	2,48
B-IS2-1	3,29	E-IS2-1	2,49	Gb-S2-1	3,28	A-K2-1	2,48
B-IS2-2	3,29	E-IS2-2	2,51	Gb-S2-2	3,27	A-K2-2	2,50
B-IS3-1	3,29	E-IS3-1	2,50	Gb-S3-1	3,28	A-K3-1	2,48
B-IS3-2	3,29	E-IS3-2	2,50	Gb-S3-2	3,29	A-K3-2	2,48
B-IS4-1	3,28	E-IS4-1	2,50	Gb-S4-1	2,32	A-K4-1	2,49
B-IS4-2	3,30	E-IS4-2	2,50	Gb-S4-2	3,27	A-K4-2	2,48
B-IS5-1	3,29	E-IS5-1	2,49	Gb-S5-1	3,27	A-K5-1	2,50
B-IS5-2	3,29	E-IS5-2	2,51	Gb-S5-2	3,28	A-K5-2	2,49
B-IS6-1	3,29	E-IS6-1	2,51	Gb-S6-1	3,29	A-K6-1	2,49
B-IS6-2	3,30	E-IS6-2	2,50	Gb-S6-2	3,29	A-K6-2	2,49

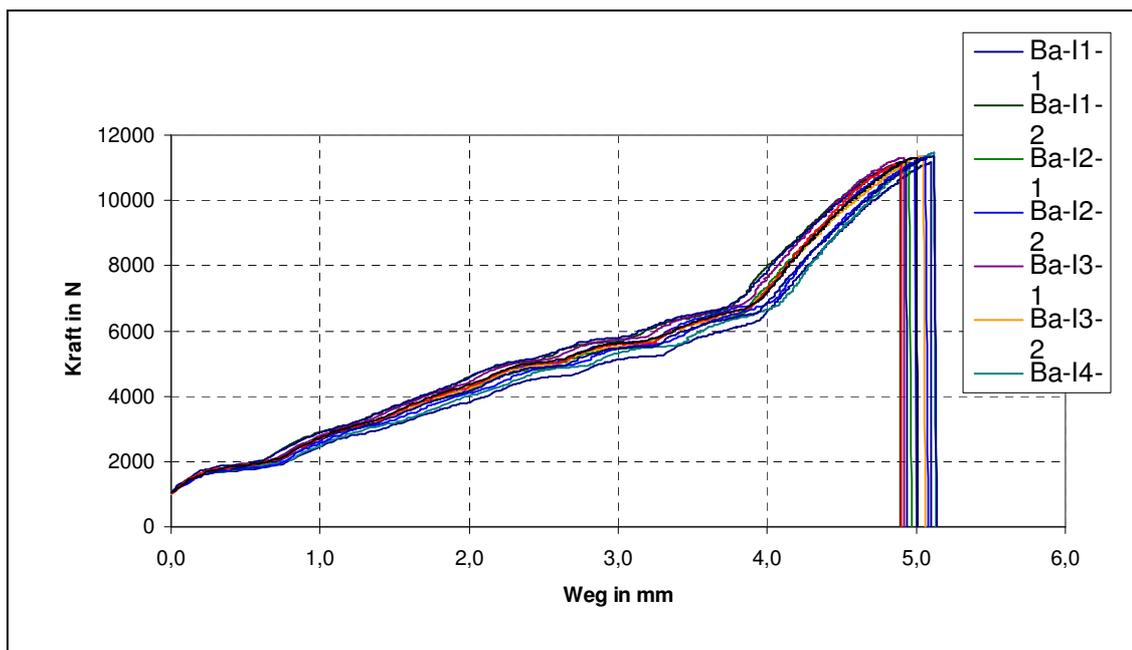
		E-IS7-1	2,51				
Ca-IS1-1	3,10	E-IS7-2	2,52				
Ca-IS1-2	3,09						
Ca-IS2-1	3,09	Fa-IS1-1	2,51	Fa-K1-1	2,50	E-K1-1	
Ca-IS2-2	3,09	Fa-IS1-2	2,50	Fa-K1-2	2,50	E-K1-2	
Ca-IS3-1	3,09	Fa-IS2-1	2,50	Fa-K2-1	2,52	E-K2-1	
Ca-IS3-2	3,10	Fa-IS2-2	2,50	Fa-K2-2	2,48	E-K2-2	
Ca-IS4-1	3,09	Fa-IS3-1	2,50	Fa-K3-1	2,48	E-K3-1	
Ca-IS4-2	3,10	Fa-IS3-2	2,50	Fa-K3-2	2,50	E-K3-2	
Ca-IS5-1	3,10	Fa-IS4-1	2,50	Fa-K4-1	2,50	E-K4-1	
Ca-IS5-2	3,10	Fa-IS4-2	2,50	Fa-K4-2	2,49	E-K4-2	
Ca-IS6-1	3,09	Fa-IS5-1	2,50	Fa-K5-1	2,48	E-K5-1	
Ca-IS6-2	3,09	Fa-IS5-2	2,49	Fa-K5-2	2,50	E-K5-2	
Ca-IS7-1	3,09	Fa-IS6-1	2,50	Fa-K6-1	2,49	E-K6-1	
Ca-IS7-2	3,09	Fa-IS6-2	2,50	Fa-K6-2	2,48	E-K6-2	
Ca-IS8-1	3,10	Fa-IS7-1	2,52				

Anlage X: Installationsergebnisse

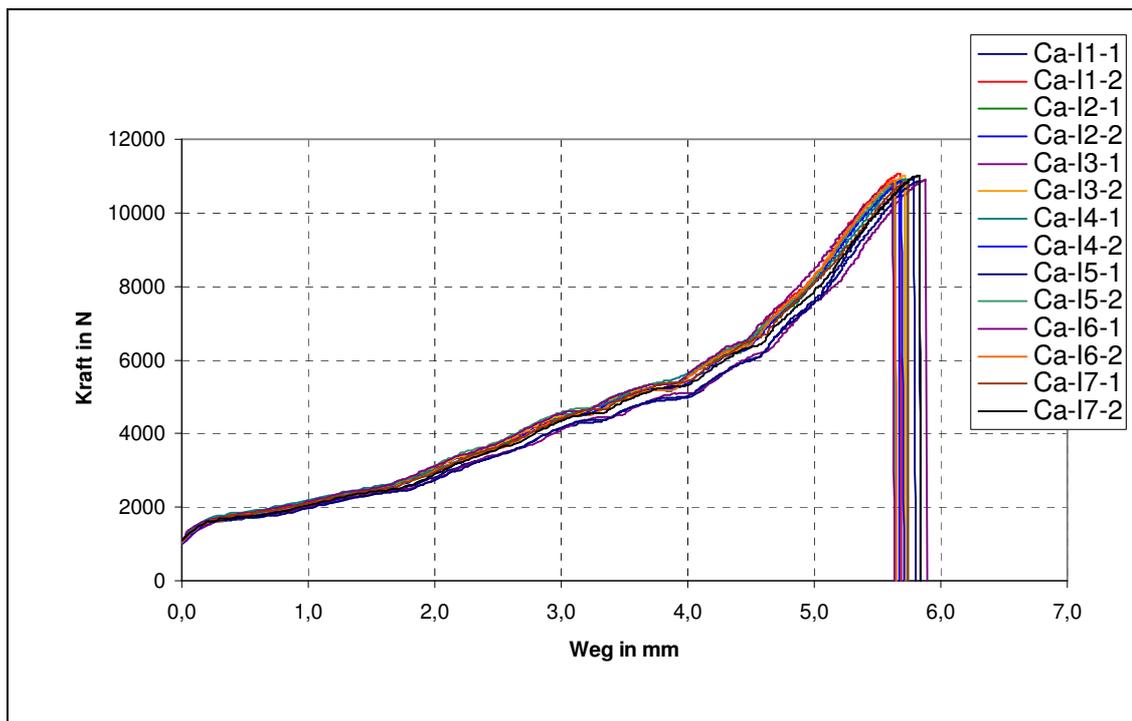
Anmerkung: Die folgenden Kraft-Weg-Verläufe berücksichtigen nicht die Korrektur der elastischen Werkzeugteile, der für einen Vergleich mit der Simulation notwendig ist (vgl. 5.6.3)!



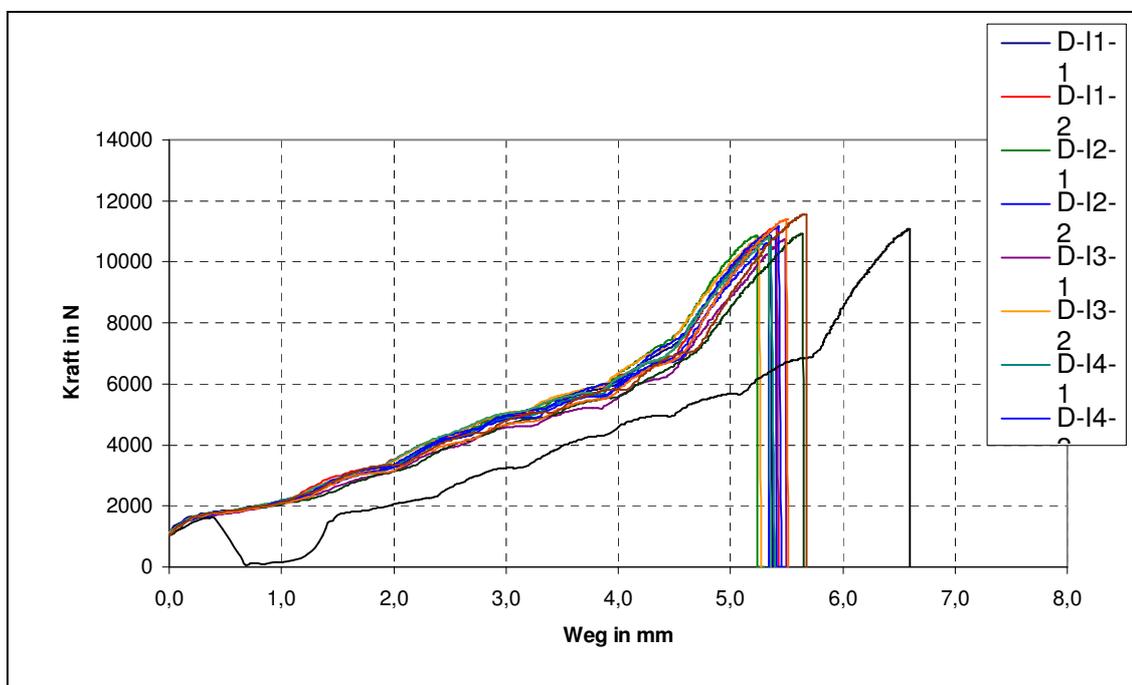
X-1: Kraft-Weg-Verlauf während der Installation für AI-LB-A-Verbindungen [Referenz-Verbindung]



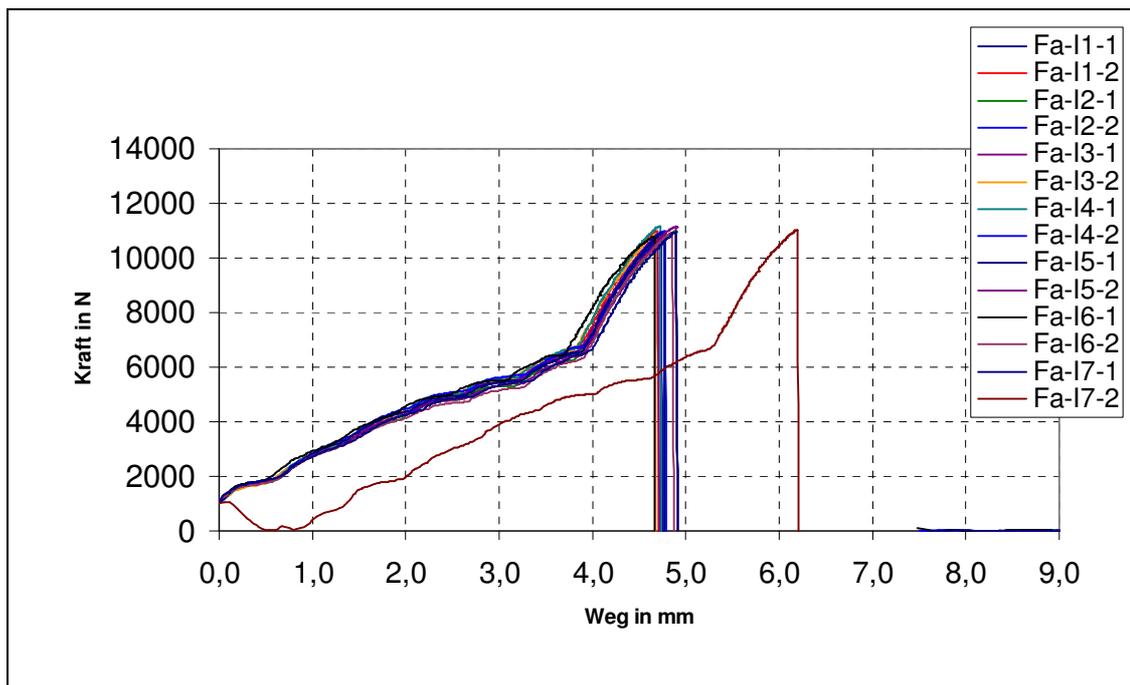
X-2: Kraft-Weg-Verlauf während der Installation für AI-LB-Ba-Verbindungen [Klemmlänge = 6,6 mm]



X-3: Kraft-Weg-Verlauf während der Installation für Al-LB-Ca-Verbindungen [maximaler Klemmlängenbereich]

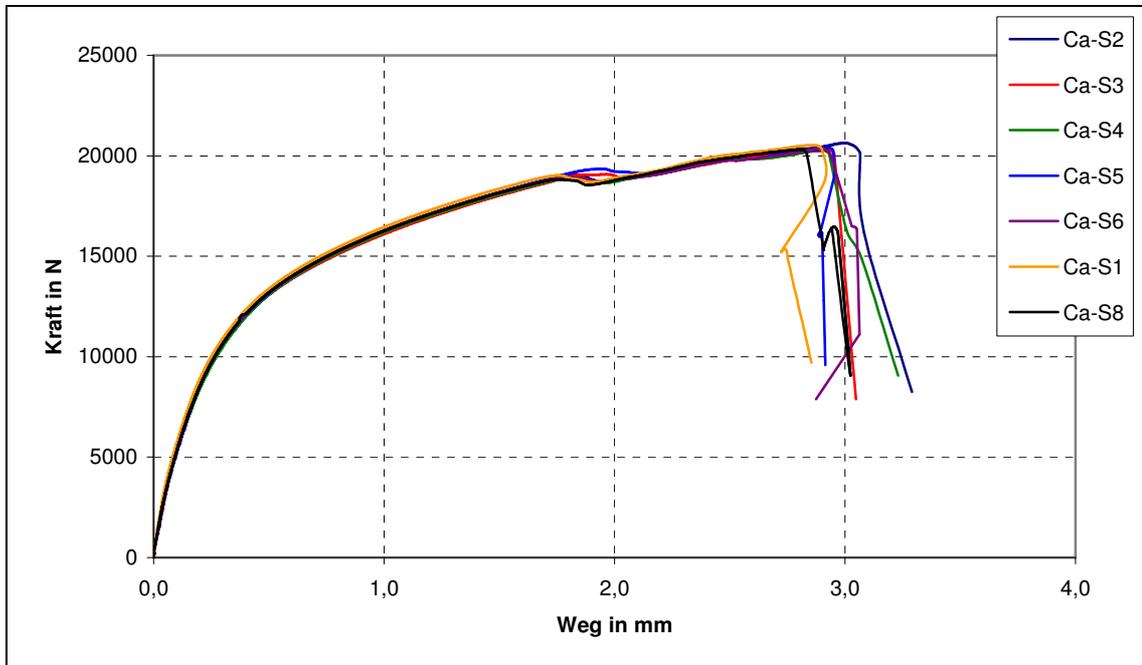


X-4: Kraft-Weg-Verlauf während der Installation für Al-LB-D-Verbindungen [Klemmlänge = 10,4 mm]

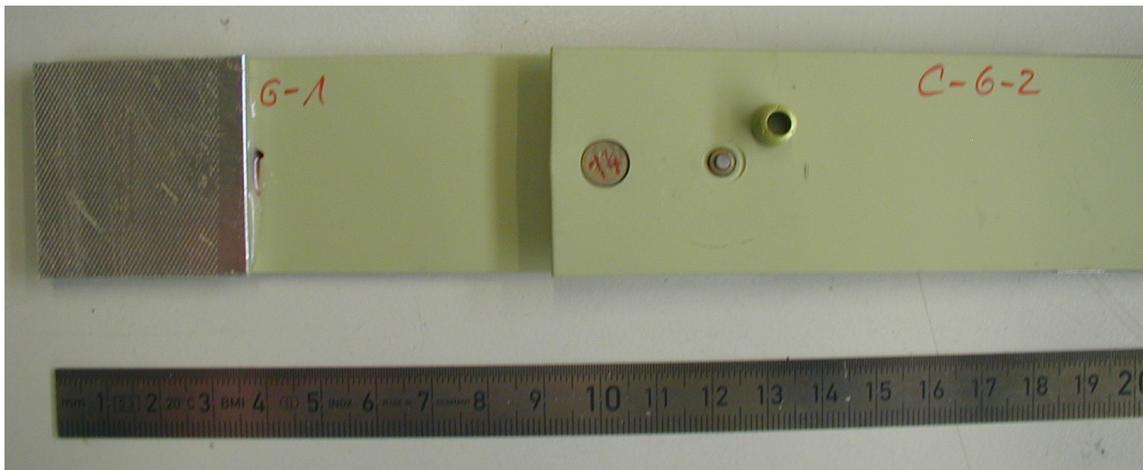


X-5: Kraft-Weg-Verlauf während der Installation für Al-LB-Fa-Verbindungen [Übergangspassung]

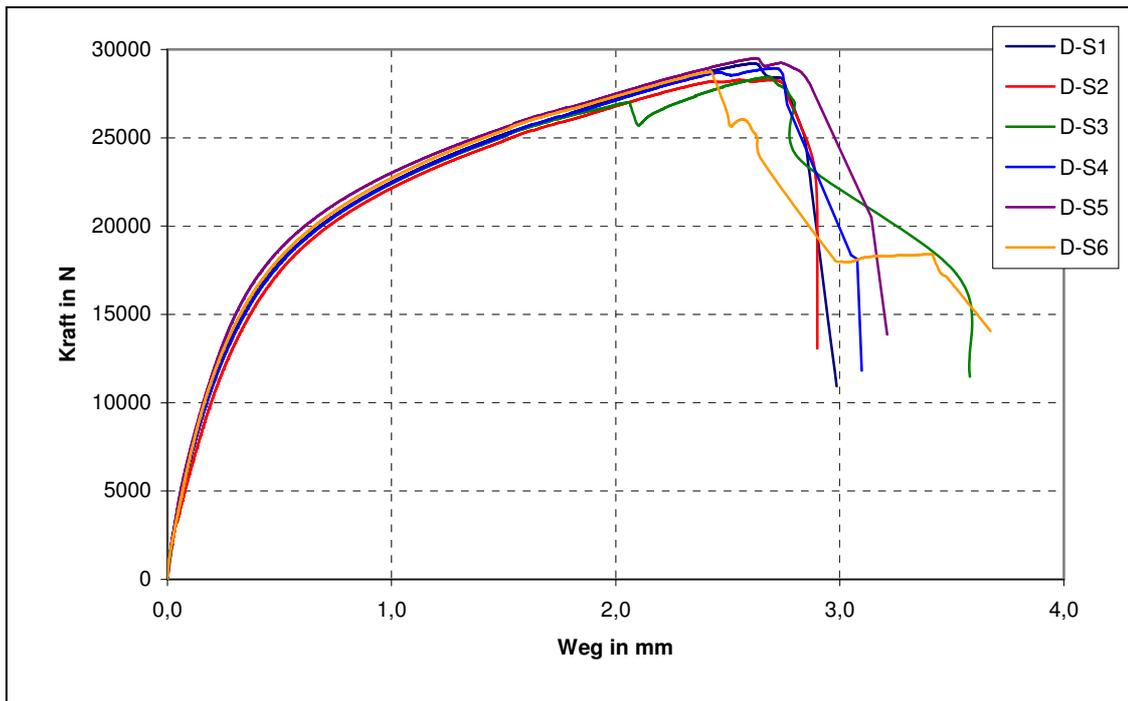
Anlage XI: Scherzugergebnisse



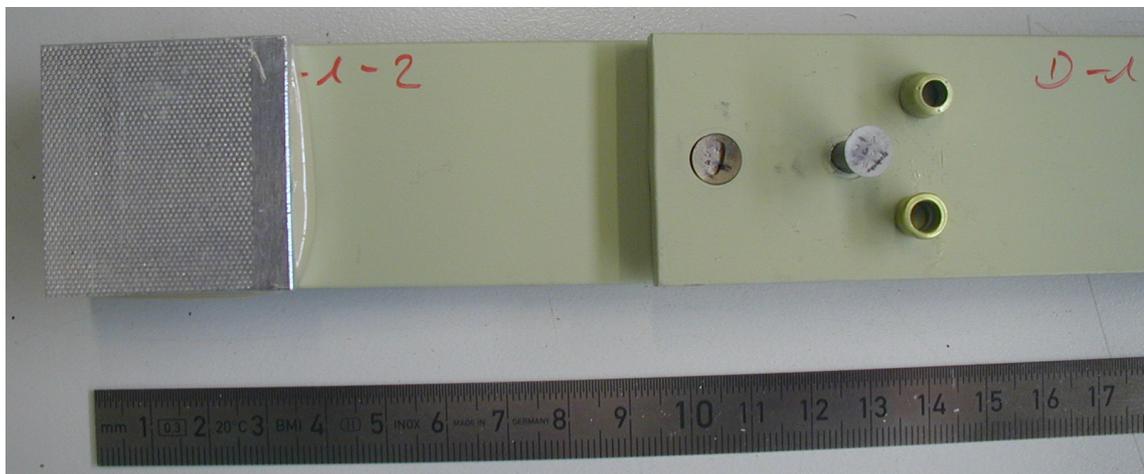
XI-1: Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Ca [maximaler Klemmlängenbereich]



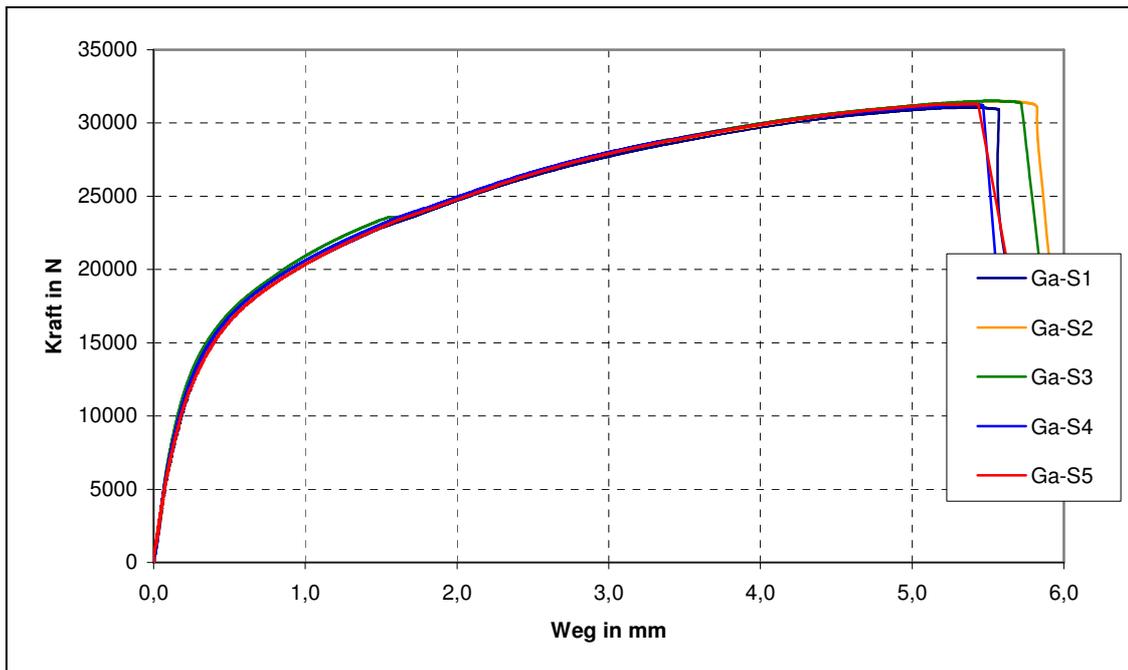
XI-2: Collar-Versagen nach Scherzug für Probe Al-LB Ca-6-1/Ca-6-2



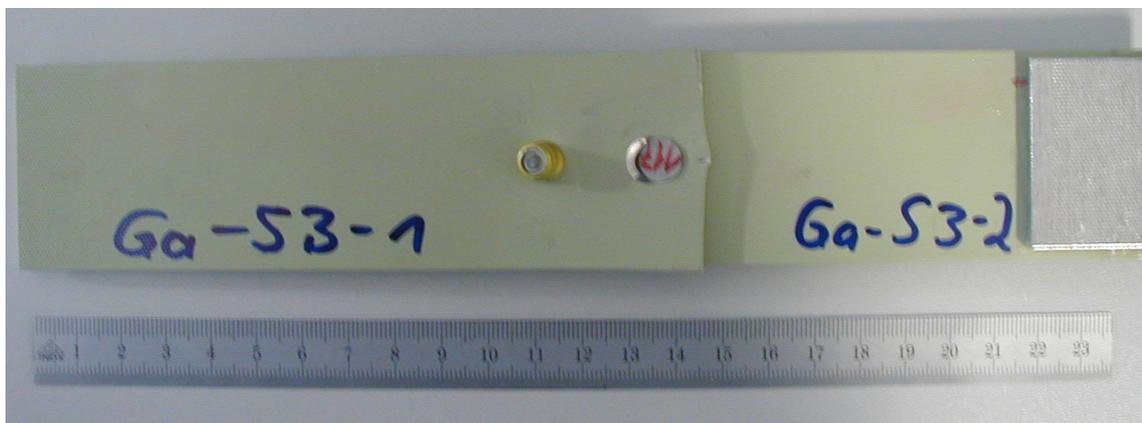
XI-3: Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-D [Klemmlänge = 10,4 mm]



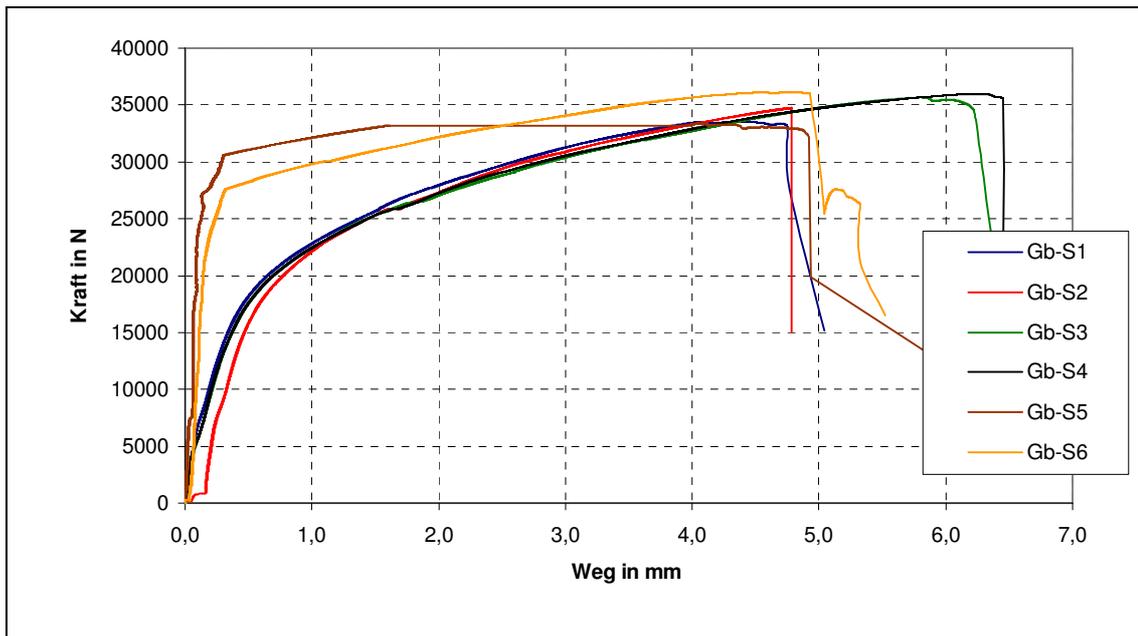
XI-4: Collar-Versagen nach Scherzug für Probe Al-LB D-1-1/D-1-2



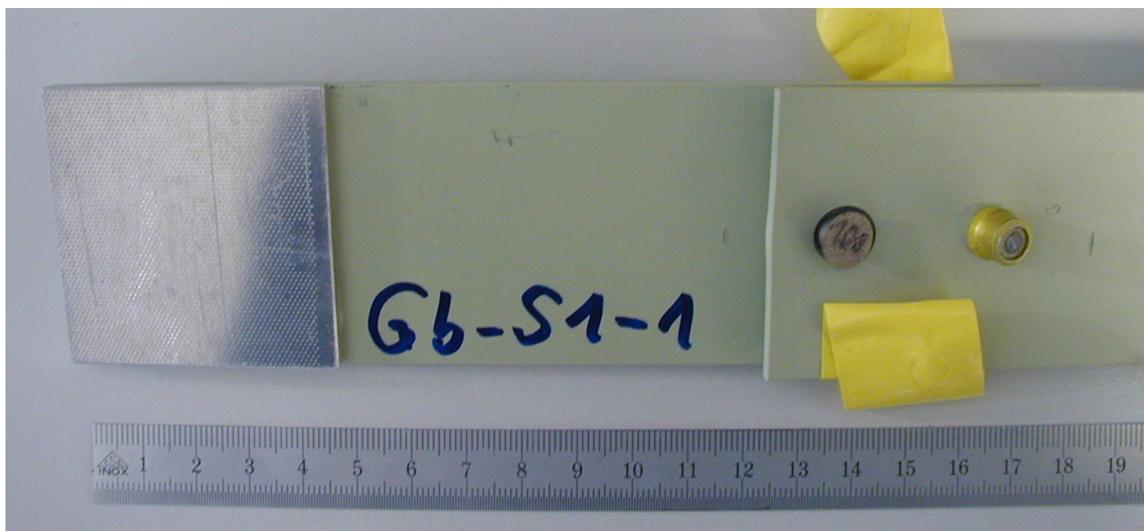
XI-5: Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Ga [Bolzendurchmesser = 5,5 mm, Klemmlänge = 6,4 mm]



XI-6: Blechabscherung nach Scherzug für Probe Al-LB Ga-3-1/Ga-3-2



XI-7: Kraft-Weg-Verlauf für Variante Al-LB-Gb [Bolzendurchmesser = 6,3 mm, Klemmlänge = 6,4 mm]



XI-8: Collar-Versagen nach Scherzug für Probe Al-LB Gb-3-1/Gb-3-2

Anlage XII: Protokoll der Schlifffildanfertigung vom 06.11.2008**Werkstoffprüfung
TBBQ 31**

- Auftraggeber:** Hr. Remmers
- Auftrag:** Erstellen von Übersichtsaufnahmen der Nietverbindungen und verschiedene Abmessungen des Collars ermitteln.
- Probenmaterial:** Titan-Niet
Al-Blech
Al-Collar
- Ergebnisse:** Die ermittelten Abmessungen sind den einzelnen Bildern zu entnehmen.

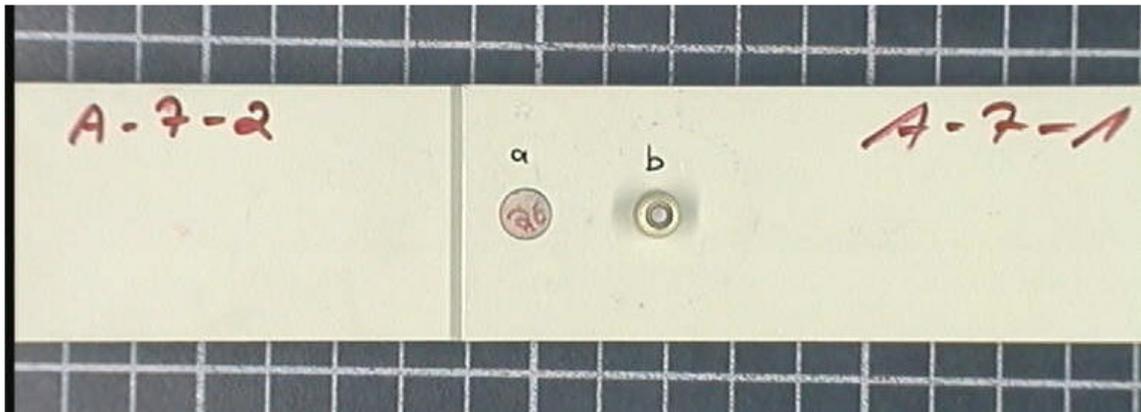
Platten- Bezeichnung	Niet-Nr.:	Schliff-Nr.:	Bild-Nr.:	Seite
A-7-2 / A-7-1	26	18955a	1-6	2-5
	39	19855b		
C-7-2 / C-7-1	19	18956a	7-12	6-9
	17	18956b		
D-7-2 / D-7-1	74	18957a	13-18	10-13
	73	18957b		
F-7-2 / F-7-1	3	18958a	19-24	14-17
	44	18958b		
Ga-6-2 / Ga-6-1	124	18959a	25-28	18-20
Ga-S7-2 / Ga-S7-1	128	18959b	29-32	21-23



**Werkstoffprüfung
TBBQ 31**

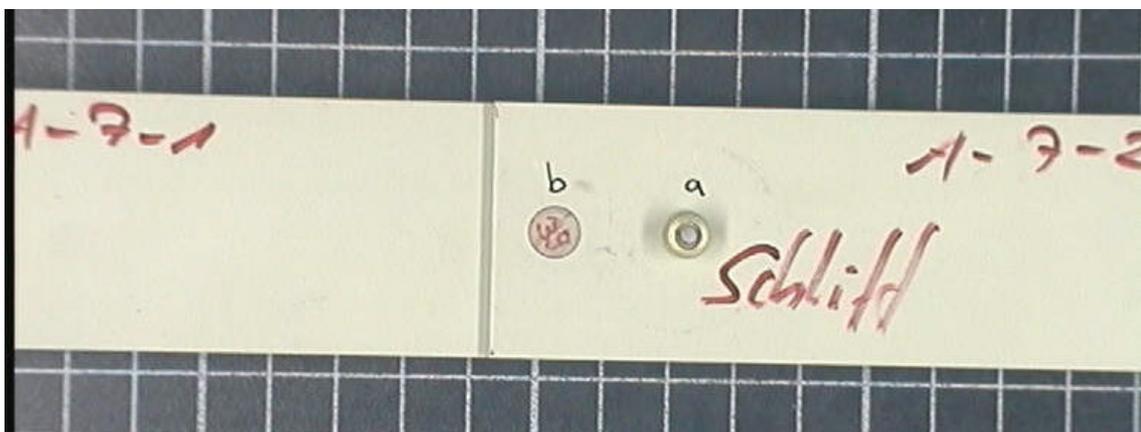


Platte: A-7-2 / A-7-1



Vorderseite

Bild 1



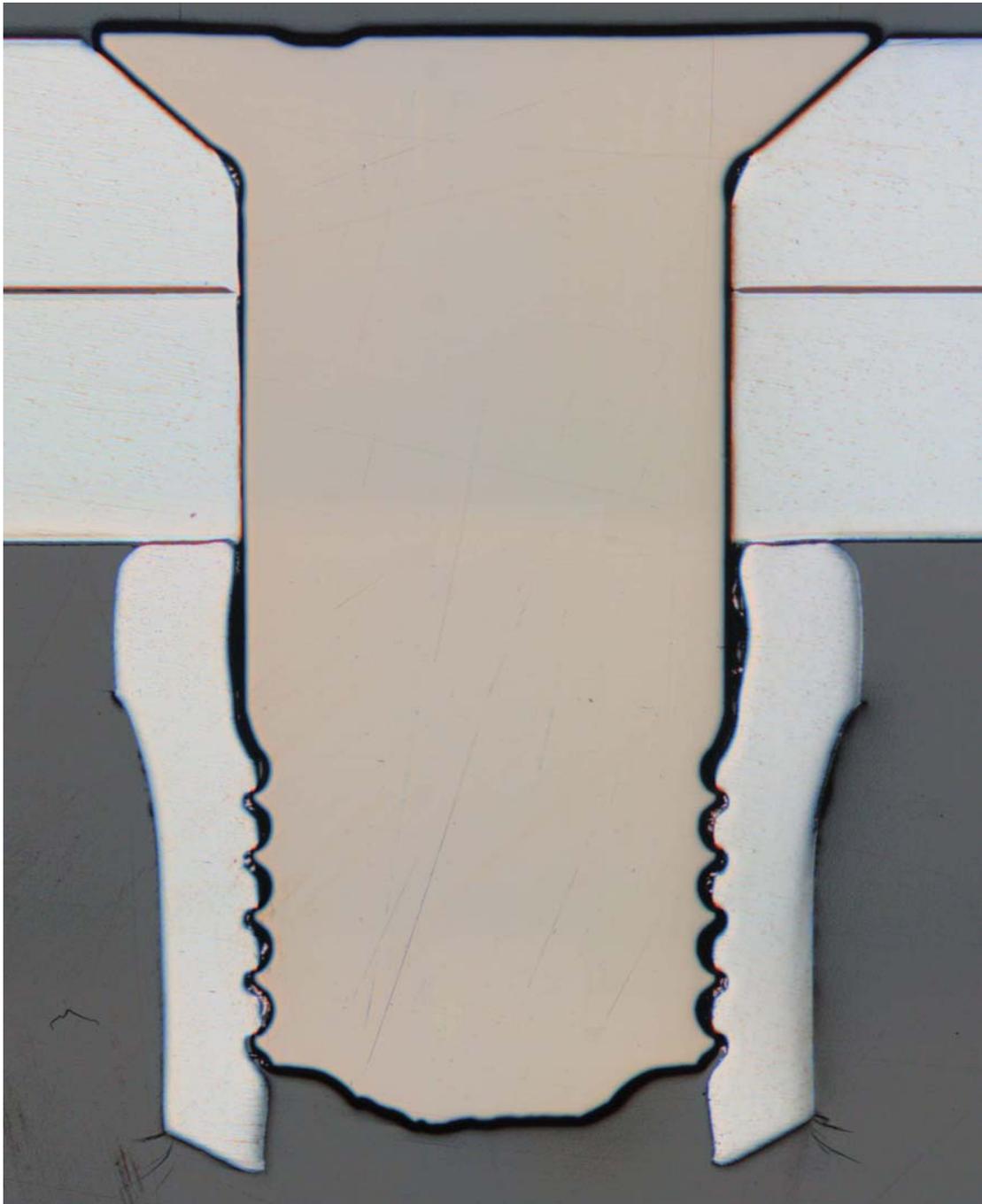
Rückseite

Bild 2





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



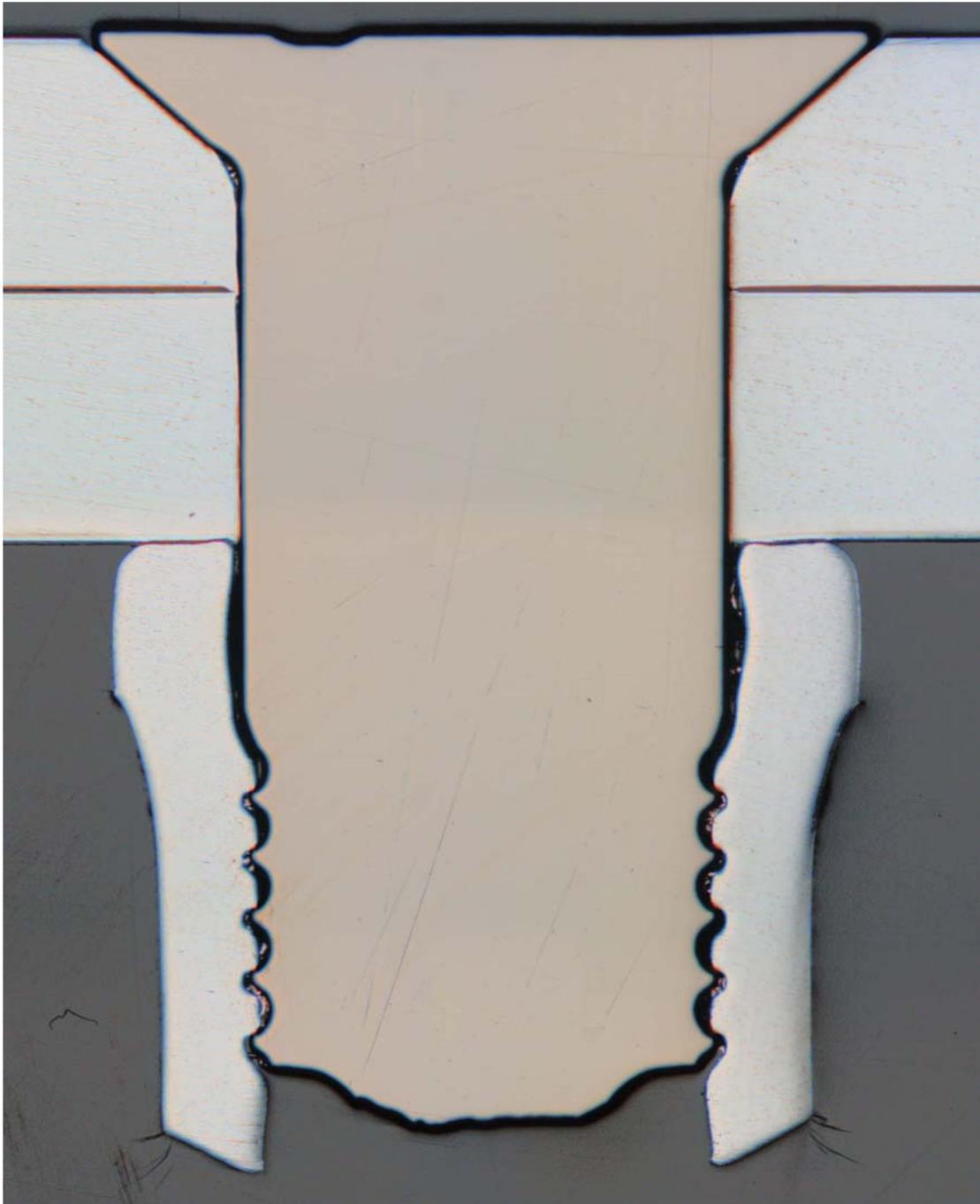
Übersichtsaufnahme Niet 26

Bild 3
Vergr.: 12,5X





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



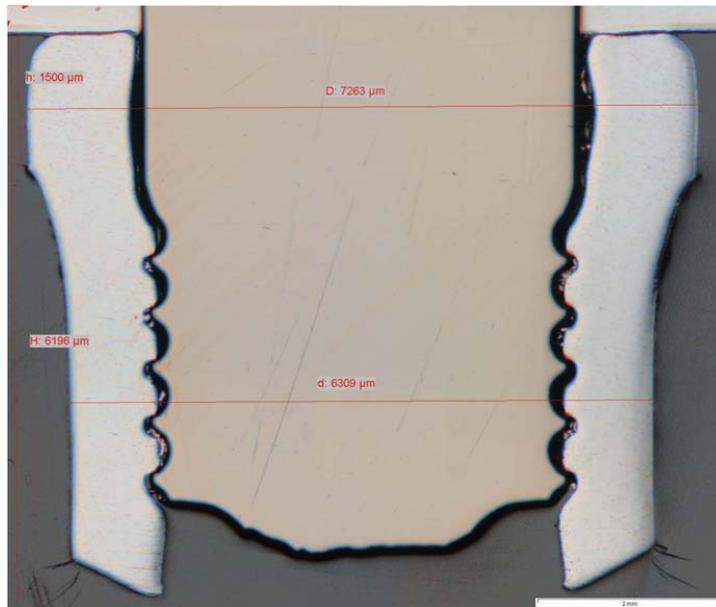
Übersichtsaufnahme Niet 39

Bild 3
Vergr.: 12,5X



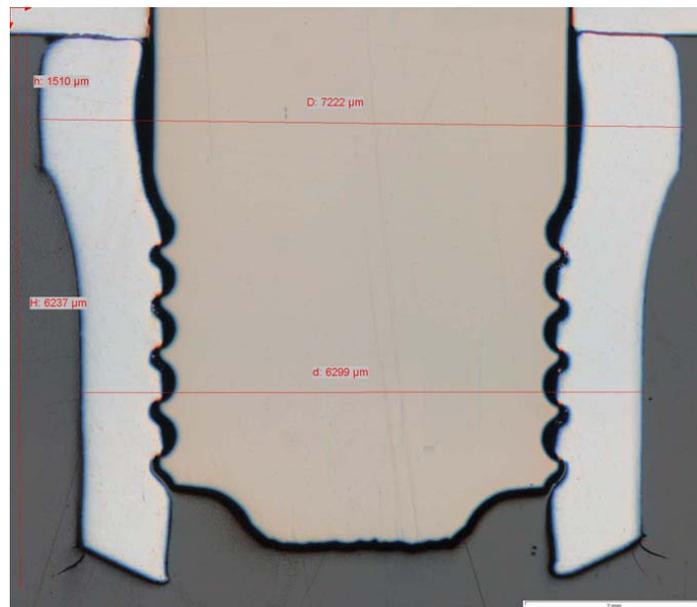


Werkstoffprüfung
TBBQ 31



Niet 26: Abmessungen Collar

Bild 5
Vergr.: 12,5X



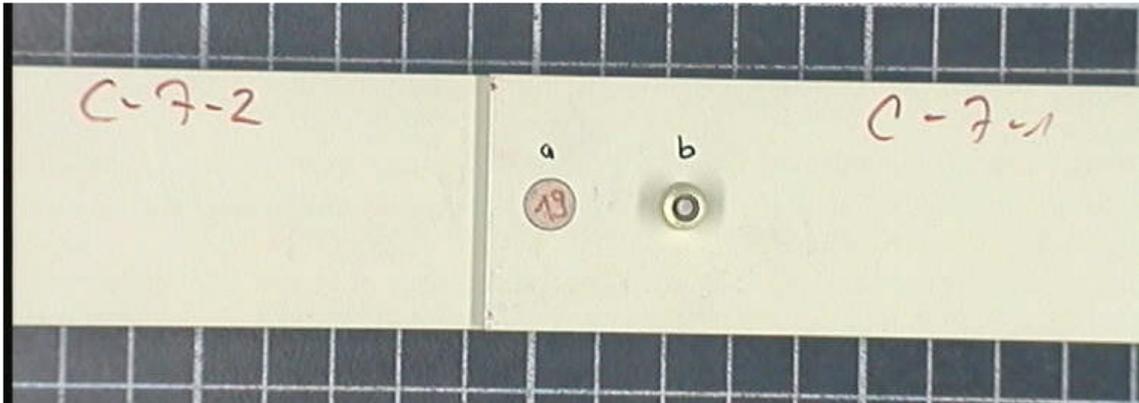
Niet 26: Abmessungen Collar

Bild 6
Vergr.: 12,5X



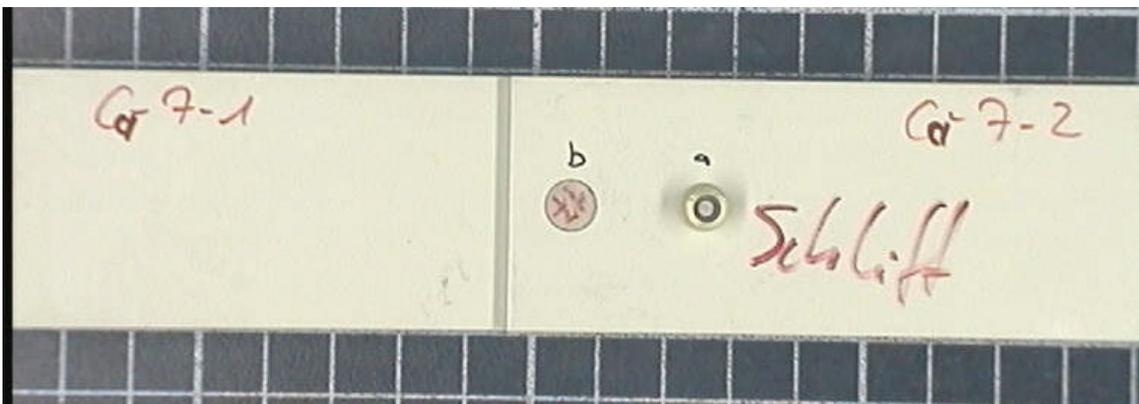
Werkstoffprüfung
TBBQ 31

Platte: C-7-2 / C-7-1



Vorderseite

Bild 7

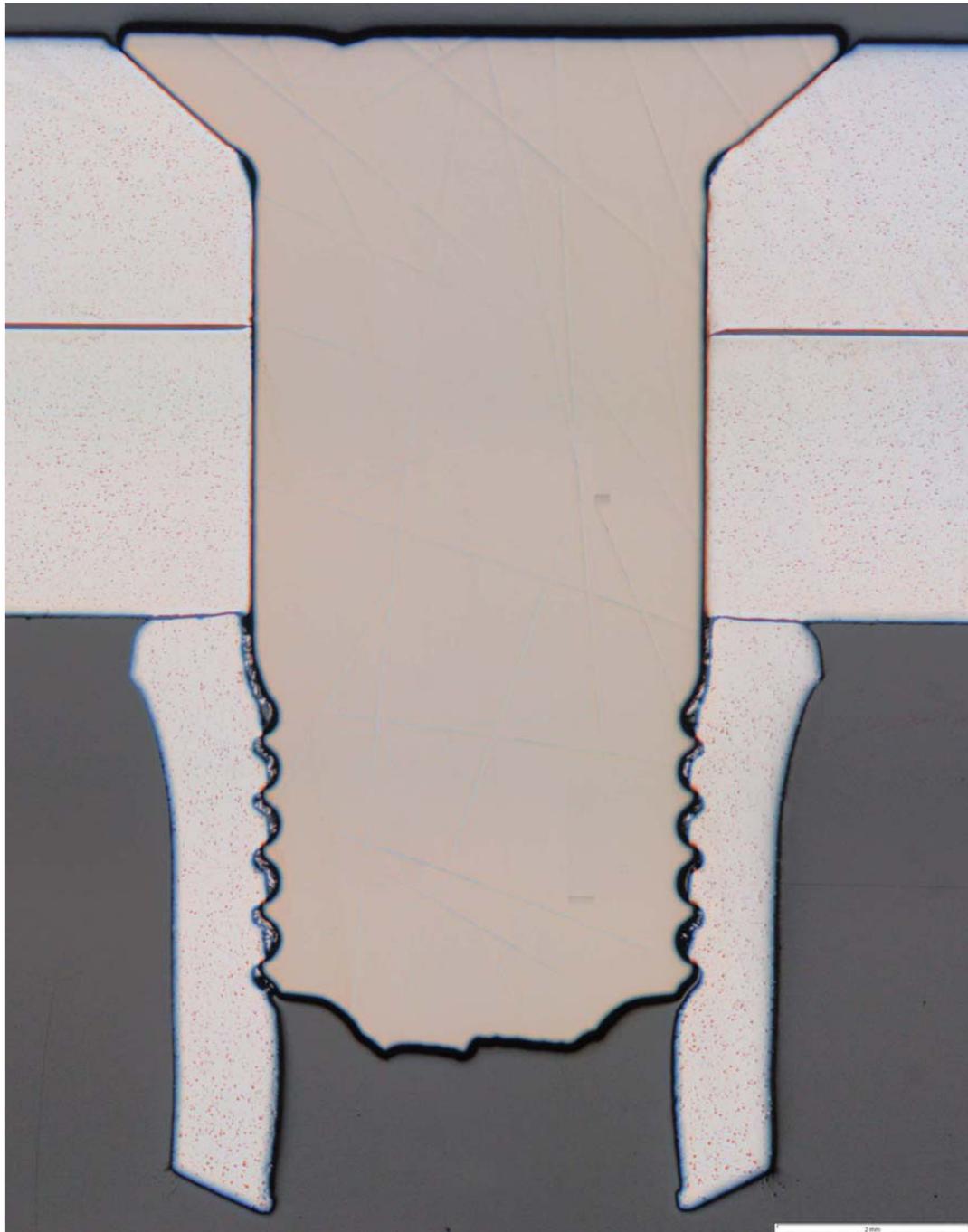


Rückseite

Bild 8



Werkstoffprüfung
TBBQ 31



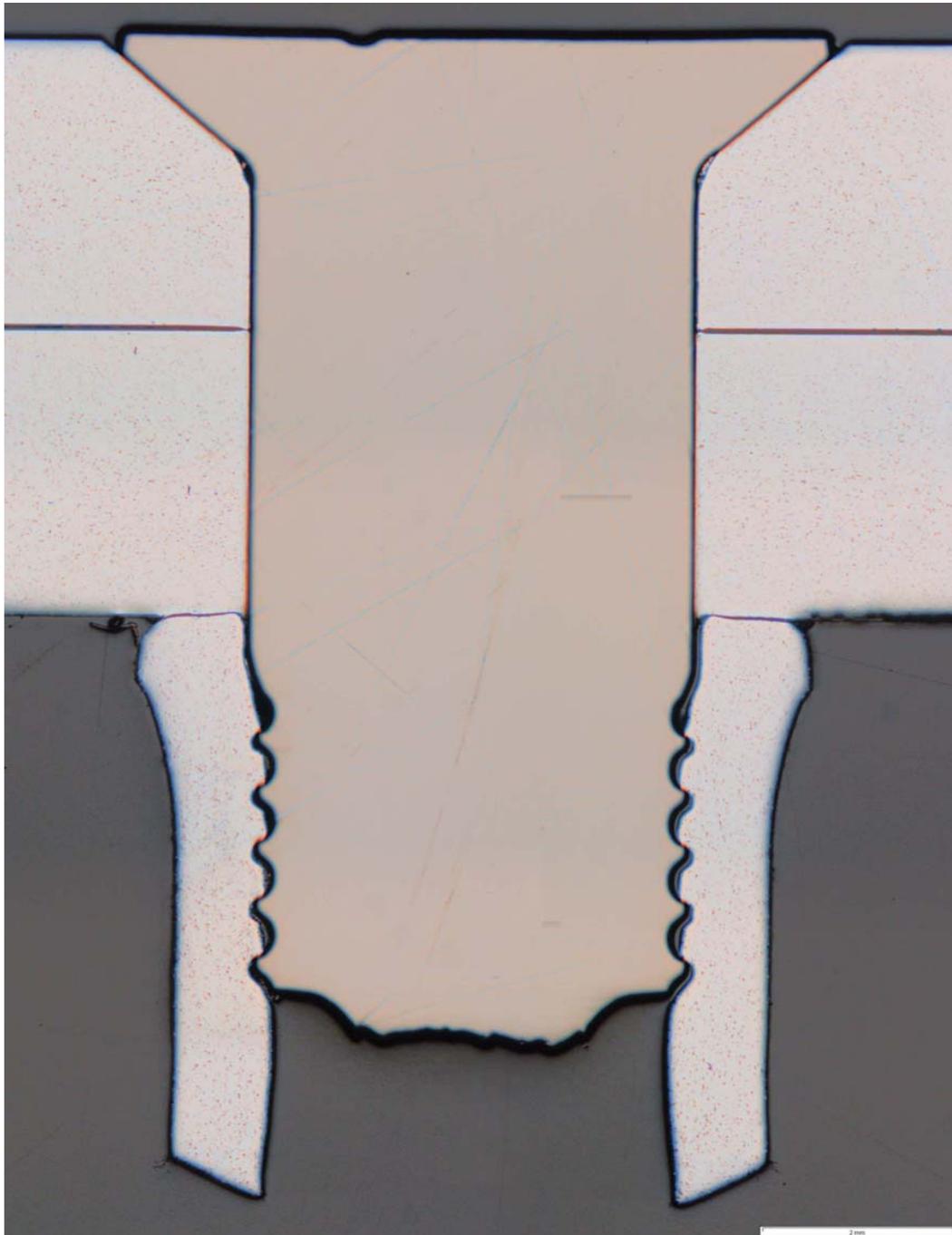
Übersichtsaufnahme Niet 19

Bild 9
Vergr.: 12,5X





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



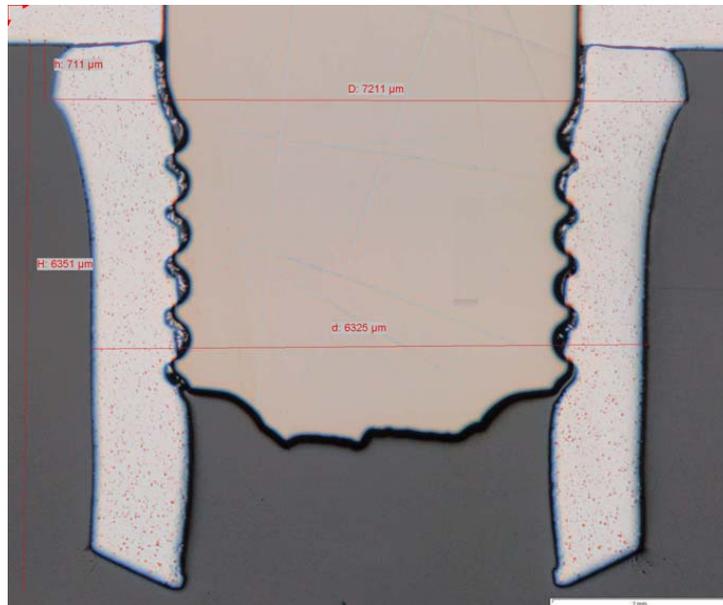
Übersichtsaufnahme Niet 17

Bild 10
Vergr.: 12,5X



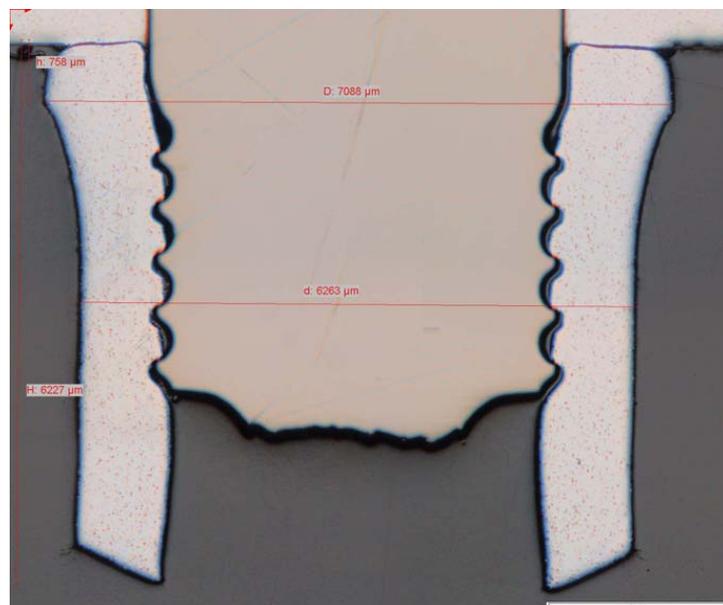


**Werkstoffprüfung
TBBQ 31**



Niet 19: Abmessungen Collar

Bild 11
Vergr.: 12,5X



Niet 17: Abmessungen Collar

Bild 11
Vergr.: 12,5X

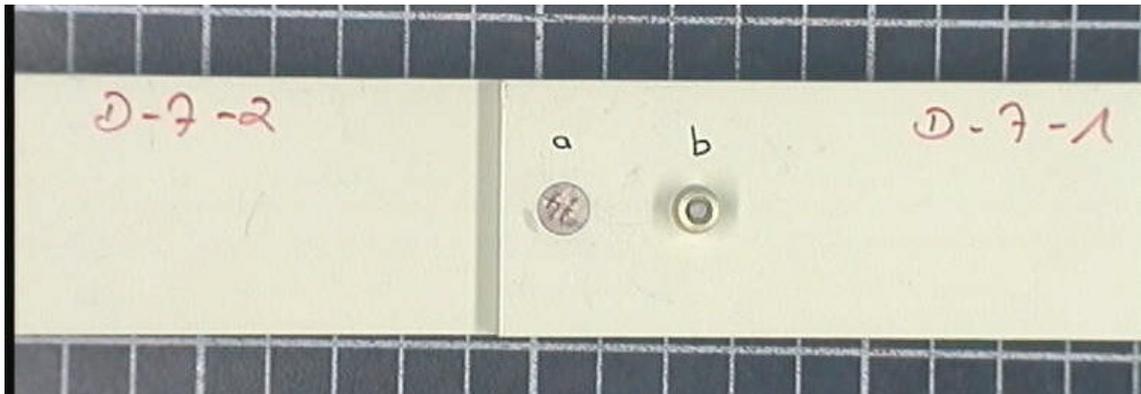




**Werkstoffprüfung
TBBQ 31**

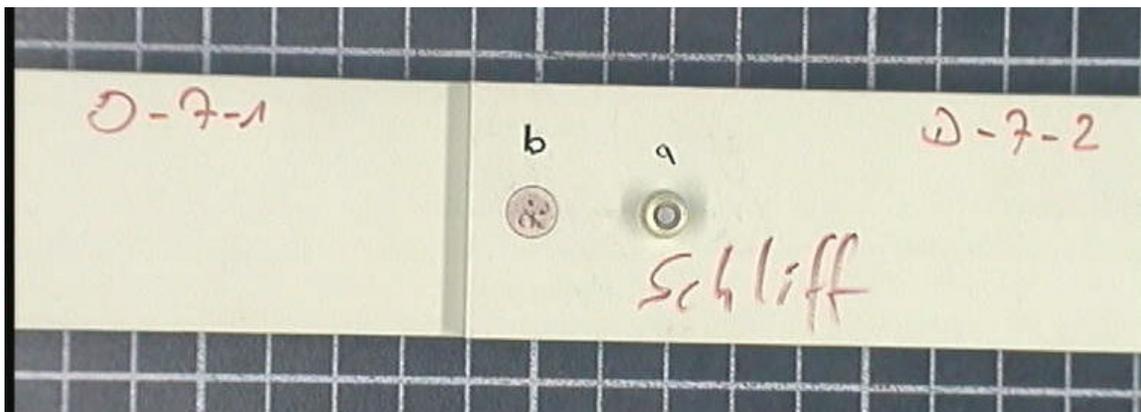


Platte D-7-2 7 D-7-1



Vorderseite

Bild 13



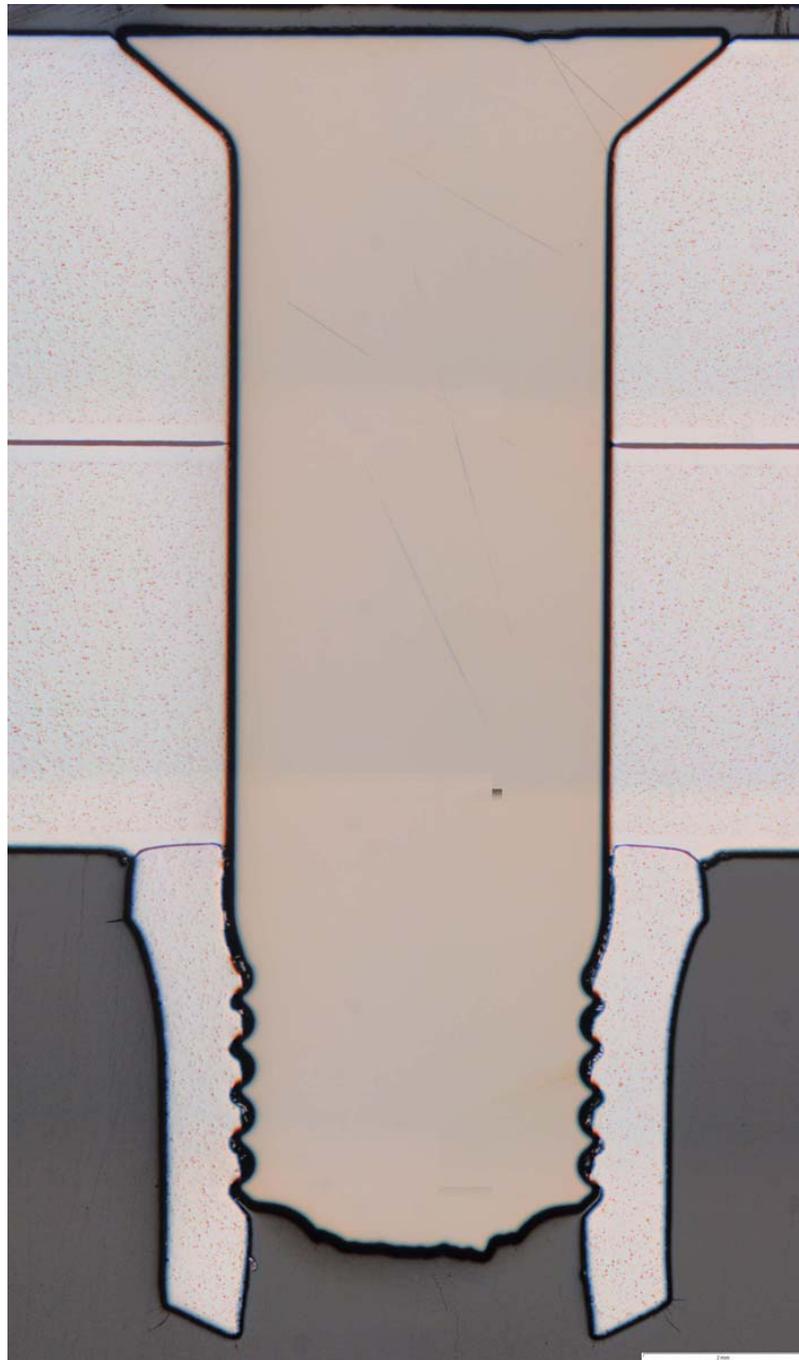
Rückseite

Bild 14





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



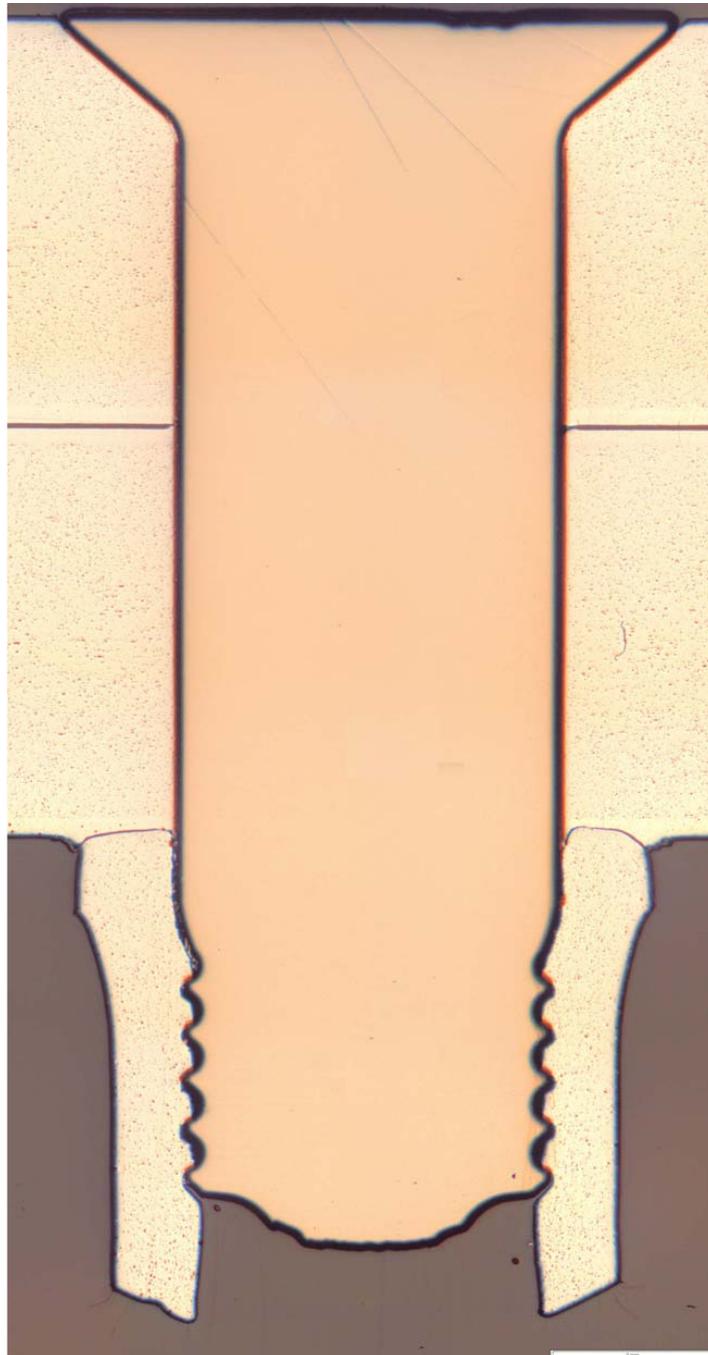
Übersichtsaufnahme Niet 74

Bild 15
Vergr.: 12,5X





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



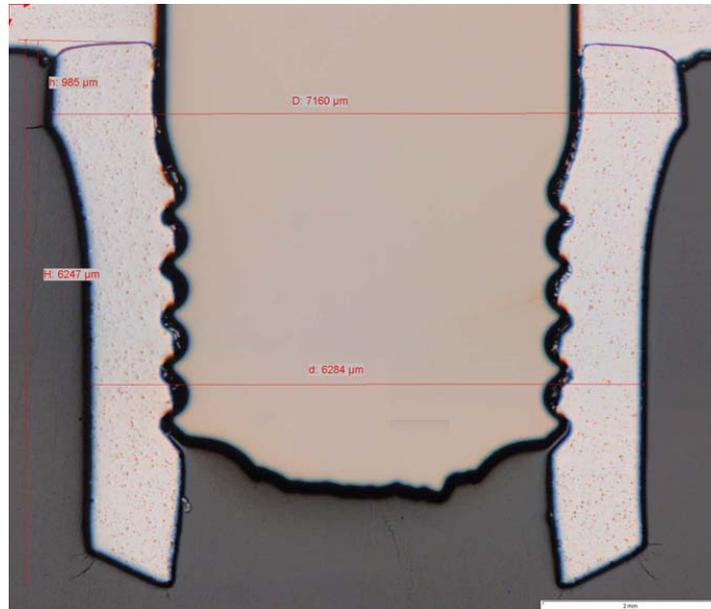
Übersichtsaufnahme Niet 73

Bild 16
Vergr.: 12,5X



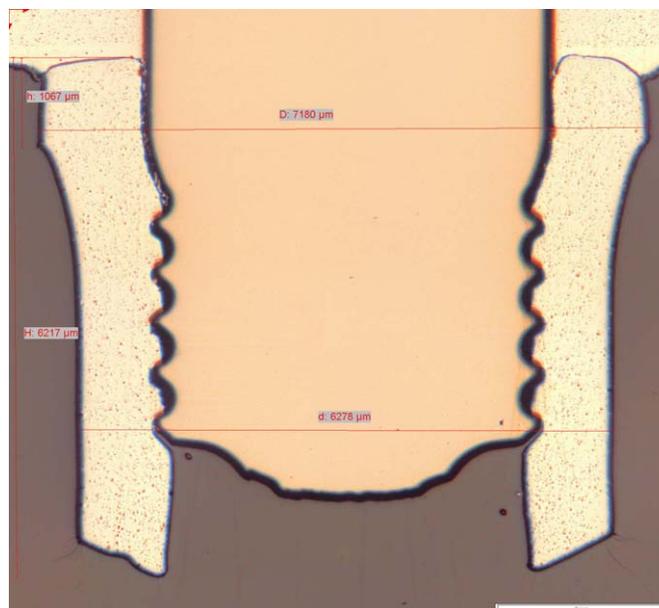


**Werkstoffprüfung
TBBQ 31**



Niet 74: Abmessungen Collar

Bild 17
Vergr.: 12,5X



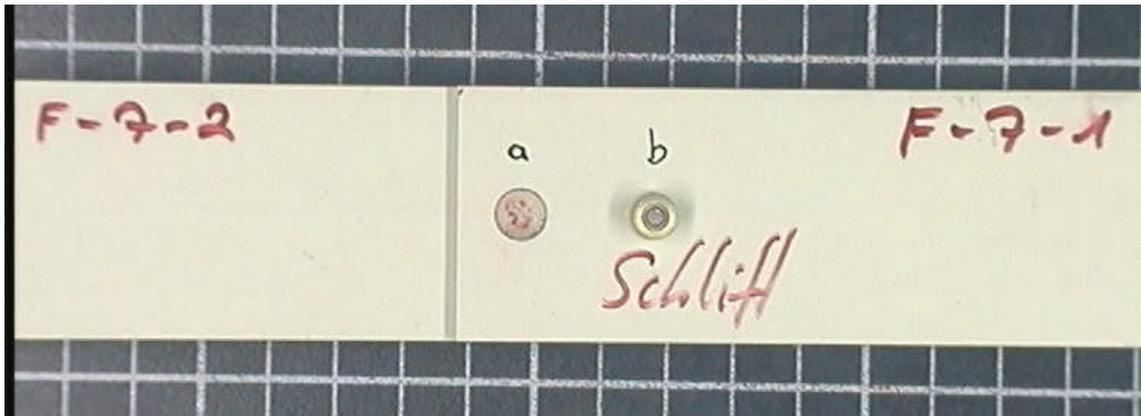
Niet 73: Abmessungen Collar

Bild 18
Vergr.: 12,5X



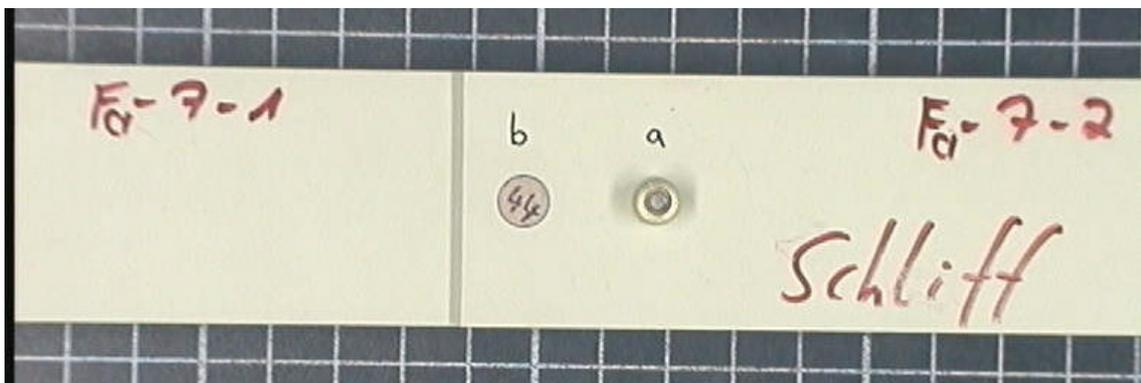
Werkstoffprüfung
TBBQ 31

Platte F-7-2 7 F-7-1



Vorderseite

Bild 19

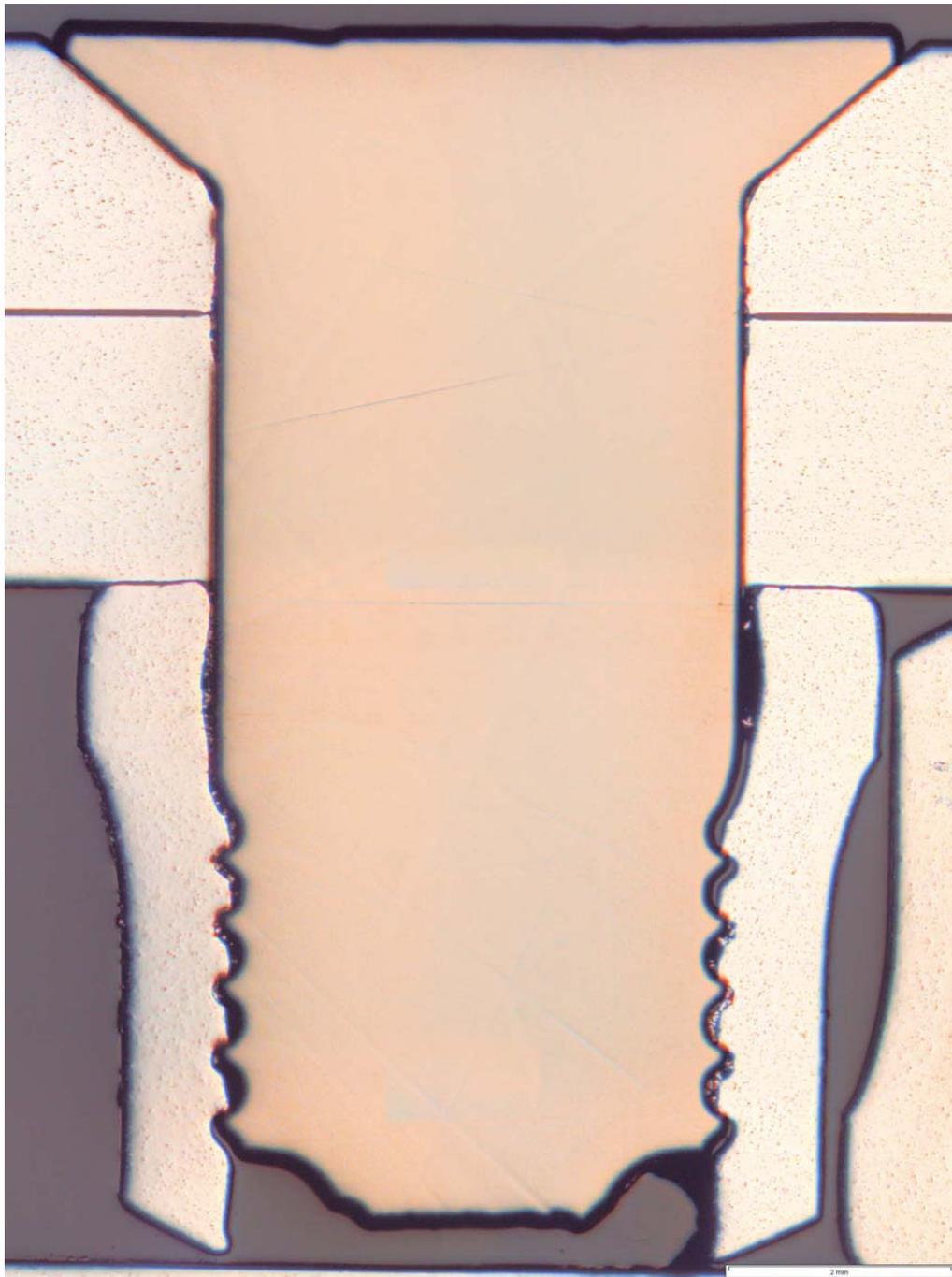


Rückseite

Bild 20



Werkstoffprüfung
TBBQ 31



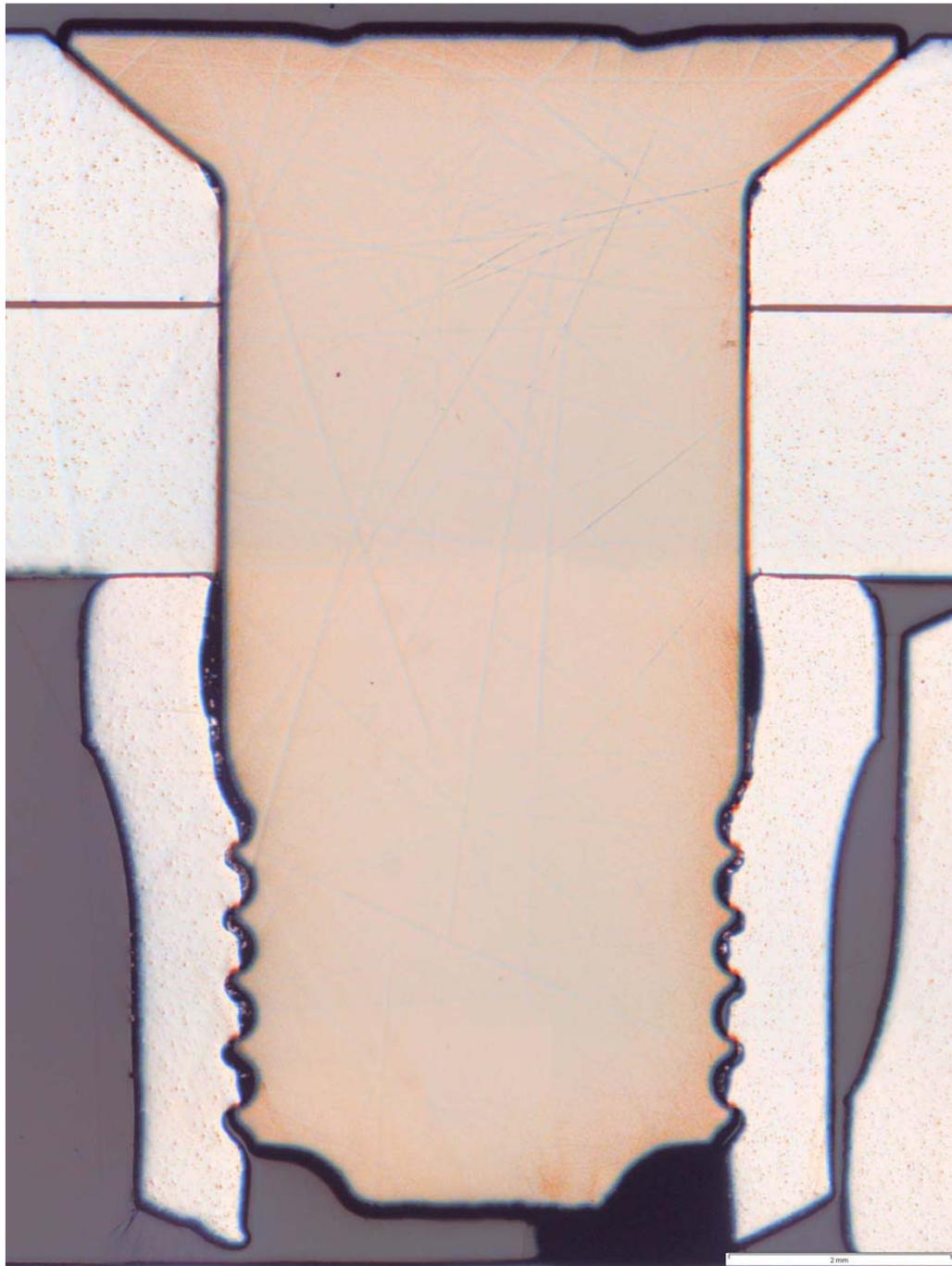
Übersichtsaufnahme Niet 3

Bild 21
Vergr.: 12,5X





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



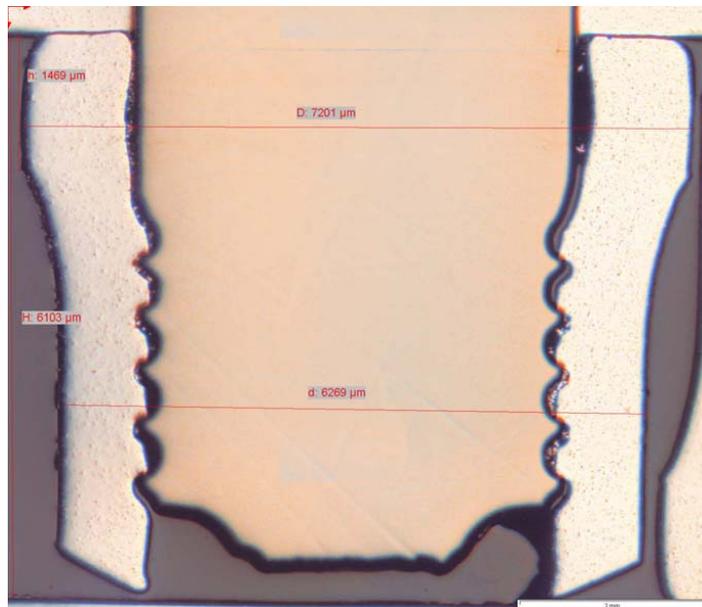
Übersichtsaufnahme Niet 44

Bild 22
Vergr.: 12,5X



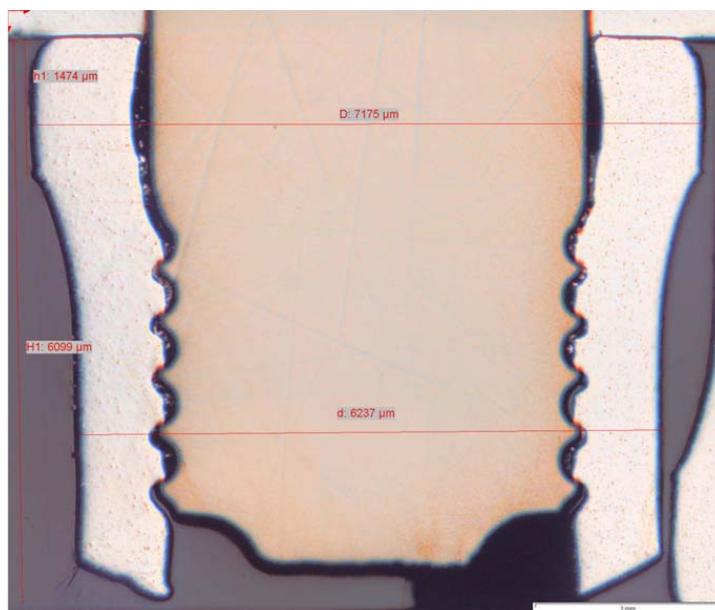


**Werkstoffprüfung
TBBQ 31**



Niet 3: Abmessungen Collar

Bild 23
Vergr.: 12,5X



Niet 44: Abmessungen Collar

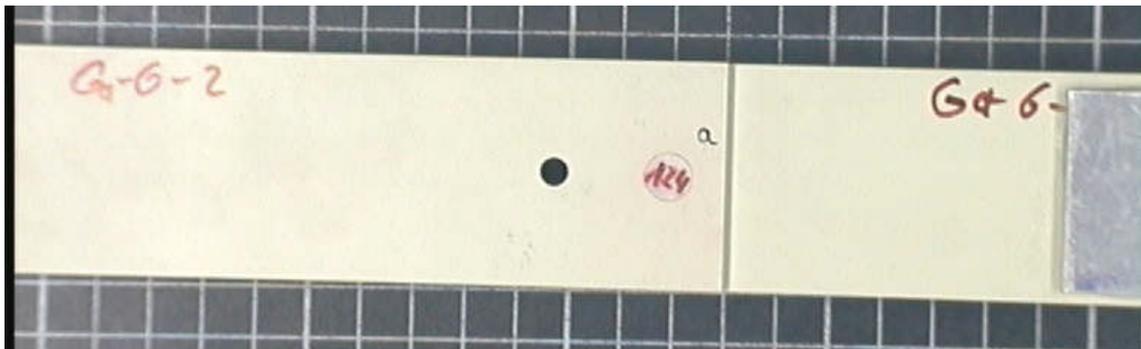
Bild 23
Vergr.: 12,5X



Werkstoffprüfung
TBBQ 31

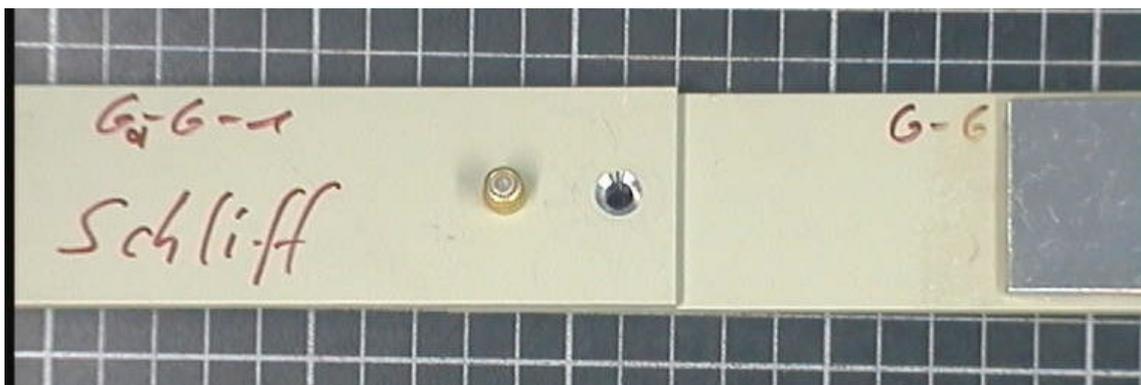


Platte Ga-6-2 7 Ga-6-1



Vorderseite

Bild 25



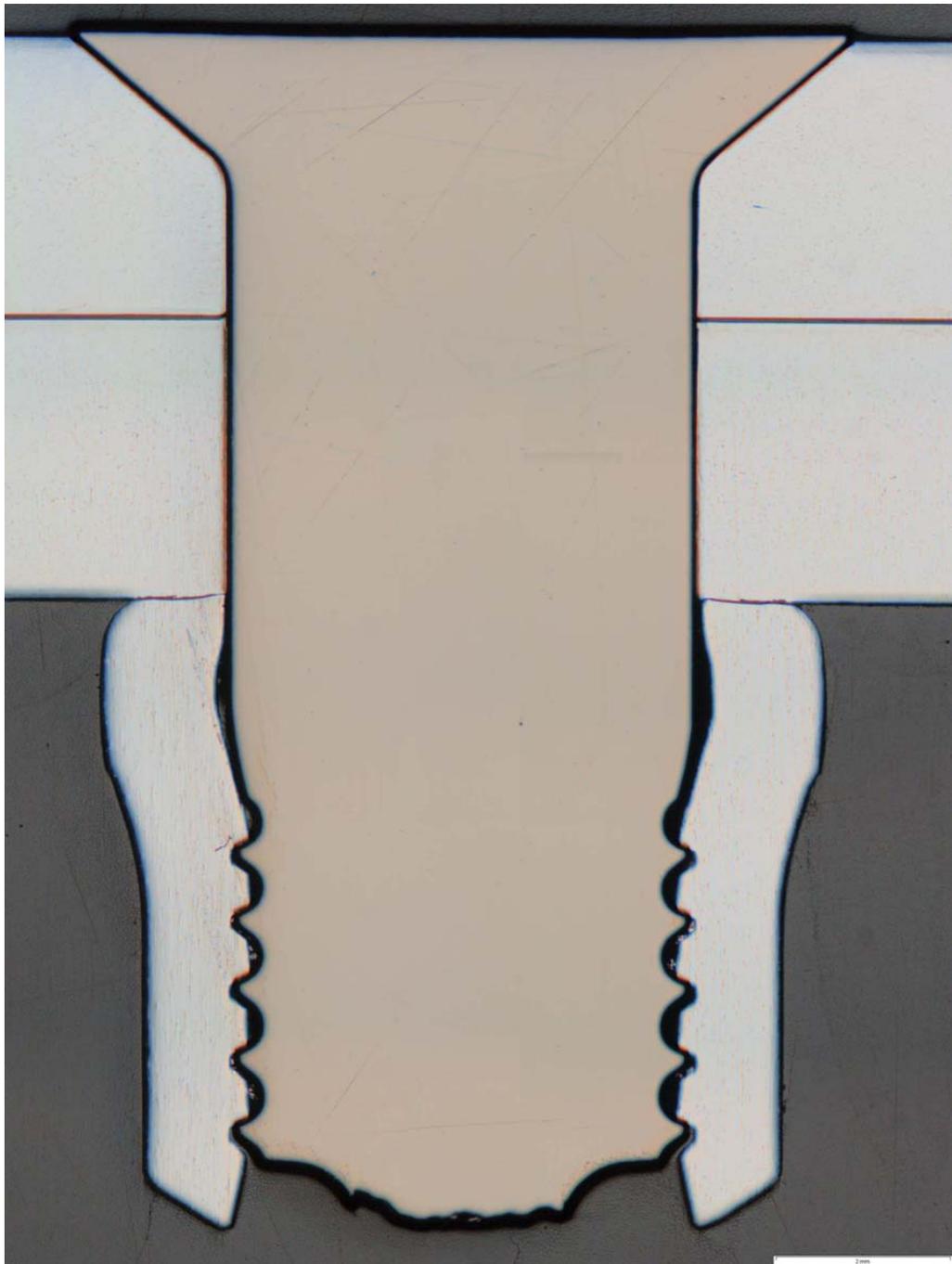
Rückseite

Bild 26





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



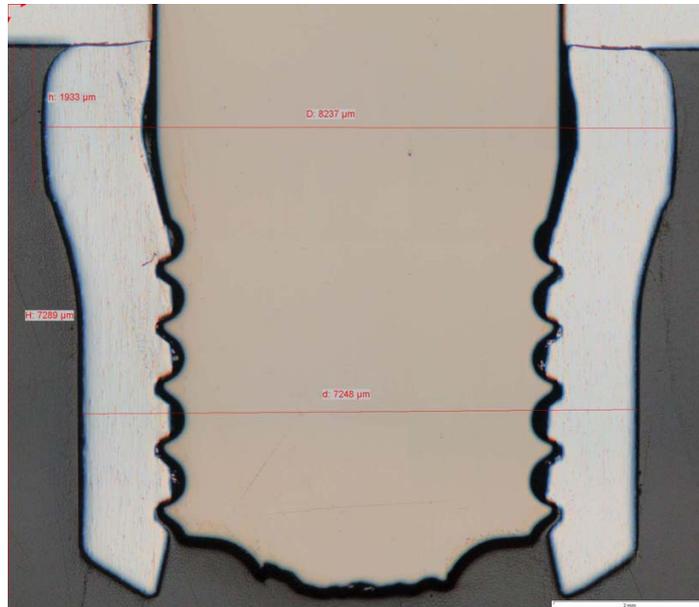
Übersichtsaufnahme Niet 124

Bild 27
Vergr.: 12,5X





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



Niet 124: Abmessungen Collar

Bild 28
Vergr.: 12,5X

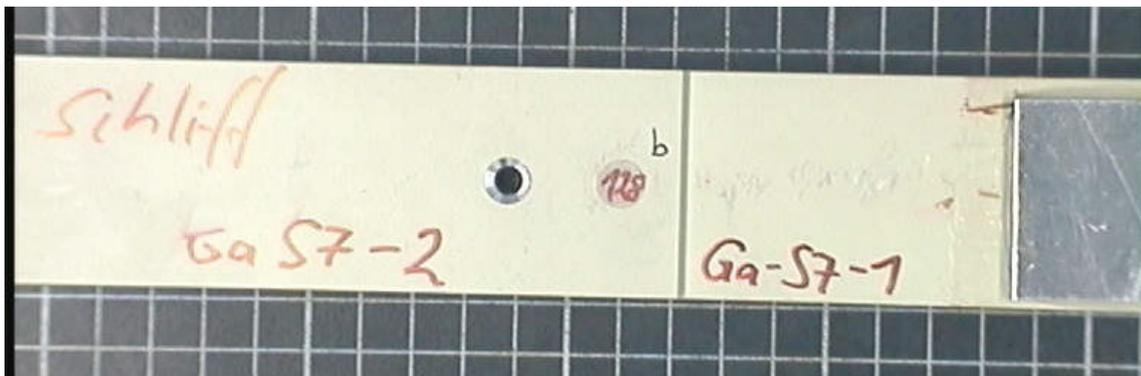




Werkstoffprüfung
TBBQ 31

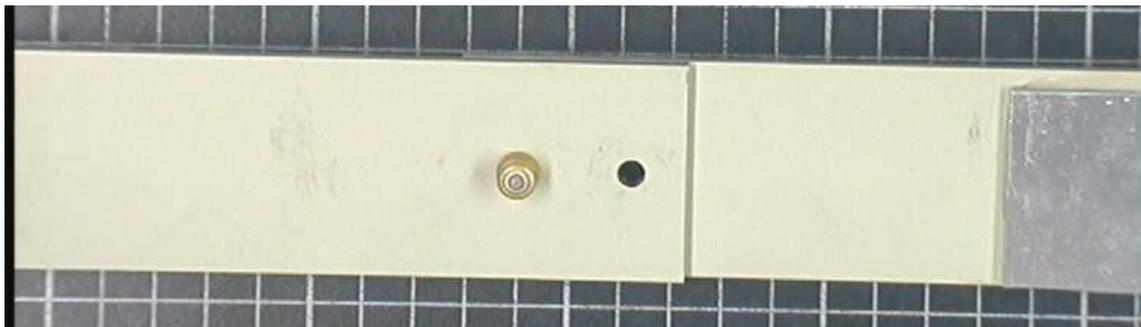


Platte Ga-7-2 7 / Ga-7-1



Vorderseite

Bild 29



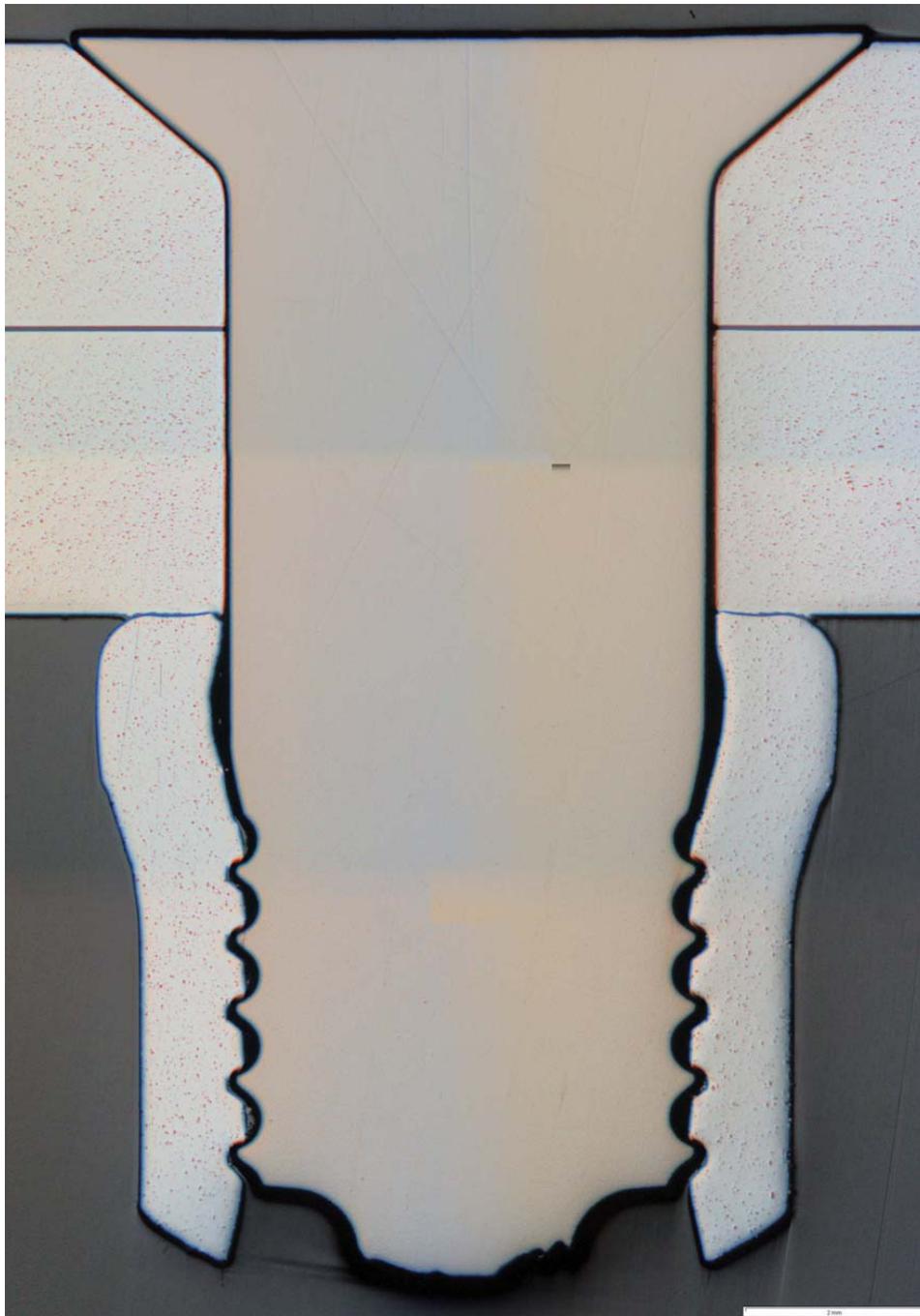
Rückseite

Bild 30





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



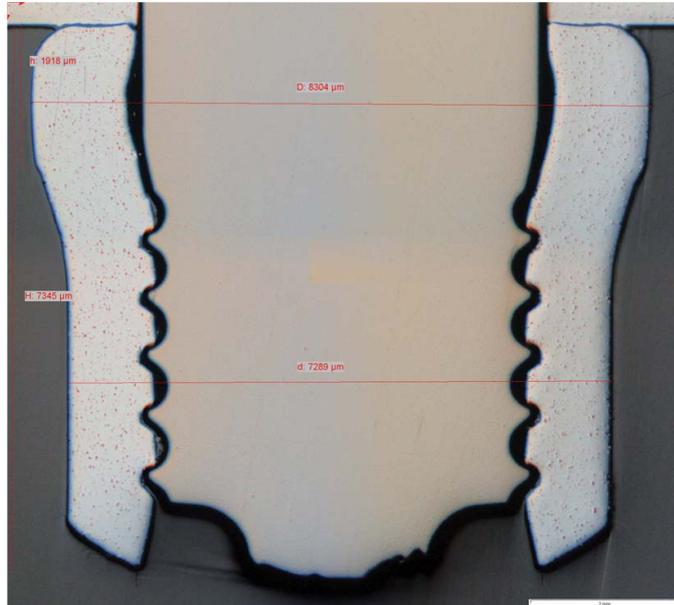
Übersichtsaufnahme Niet 128

Bild 31
Vergr.: 12,5X





Werkstoffprüfung
TBBQ 31



Niet 126: Abmessungen Collar

Bild 32
Vergr.: 12,5X



Anlage XIII: Gekürzte ABAQUS Eingabe Syntax mit Erläuterungen

*Heading

Lockbolt 0548-3-4 min grip range

** Job name: ABS0548-3-4min Model name: Lockbolt explicit

*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO

**** PARTS**

******Hier werden die Parts, also die Geometrien erstellt.*

******Zunächst werden die einzelnen Knoten definiert, d.h. sie werden*

******durchnummeriert und ihre entsprechenden Koordinaten angegeben.*

******Als nächstes werden die Elemente festgesetzt, in dem der Elementtyp*

******benannt wird.*

******Außerdem werden die Elemente auch durchnummeriert (1-158) und die*

******Positionen durch Zuweisung der Knoten festgelegt (z.B. [1, 9, 61, 38]).*

*Part, name=Blech1

*Node

1, 4.79659224, 0.

...

171, 8.83615875, 0.416667134

*Element, type=CAX4R

1, 69, 20, 21, 68

...

143, 171, 45, 7, 46

*Surface, type=ELEMENT, name=Schliessringbolzen

*Surface, type=ELEMENT, name=Blech2

******Abschließend wird bei der Erstellung des Parts noch eine Section zugeteilt,*

******der die Geometrieart (Solid) und das Material zugewiesen ist.*

** Section: Blech_Schliessring-Section

*Solid Section, elset=_PickedSet4, material="AA2024 T42"

1.,

*End Part

*Part, name=Blech2

*Node

1, 4.43747282, 1.79999995

...

225, 8.93874836, 0.357411653

*Element, type=CAX4R

1, 2, 16, 78, 15

...

193, 225, 56, 7, 57

8 Anhang

```
*Surface, type=ELEMENT, name=Schliessring
*Surface, type=ELEMENT, name=Blech1
*Surface, type=ELEMENT, name=Schliessringbolzen
** Section: Blech_Schliessring-Section
*Solid Section, elset=_PickedSet5, material="AA2024 T42"
1.,
*End Part
```

```
*Part, name=Klemmbacke
*End Part
```

******Die Klemmbacke ist ein sogenannter "Rigid Body" und wird nicht vernetzt.
*****Daher werden ihr keine Knoten, Elemente oder Oberflächen zugeordnet.
*****Ihre Position wird später durch einen Referenzpunkt festgelegt.*

```
*Part, name=Schliessring
*Node
  1, 2.41950011, 2.5
  ...
  4870, 3.15912795, 0.218541384
*Element, type=CAX4R
  1, 1, 15, 437, 194
  ...
  4703, 4870, 430, 431, 4486
*Surface, type=ELEMENT, name=Schliessringbolzen
*Surface, type=ELEMENT, name=Zugkopfhülse
** Section: Blech_Schliessring-Section
*Solid Section, elset=_PickedSet5, material="AA2024 T42"
1.,
*End Part
```

```
*Part, name=Schliessringbolzen
*Node
  1, 1.04178488, 0.395998269
  ...
  1884, 1.52142811, 16.8617268
*Element, type=CAX4R
  1, 1, 2, 105, 106
  ...
  1700, 1857, 1868, 1884, 1883
*Surface, type=ELEMENT, name=Blech2
```

```
*Surface, type=ELEMENT, name=Blech1

*Surface, type=ELEMENT, name=Klemmbacke

*Surface, type=ELEMENT, name=Schliessring
** Section: Schliessringbolzen-Section
*Solid Section, elset=_PickedSet1032, material="TiAl 6V4"
1.,
** Section: Abriss-Section
*Solid Section, elset=_PickedSet1033, material="TiAl 6V4Abriss"
1.,

*****Hier wurden dem Part zwei Sektionen zugewiesen, da die
*****Materialeigenschaften innerhalb des Parts unterschiedlich sind.

*End Part

*Part, name=Zugkopfhülse
*****wieder ein Rigid Body
*End Part

** ASSEMBLY

*Assembly, name=Assembly

*****Alle zuvor erstellten Parts können in Form von Instances in den
*****Zusammenbau eingefügt werden. Sie können in beliebiger Anzahl verwendet
*****werden. Zum Positionieren müssen die Koordinaten eingefügt werden

*Instance, name=Blech1-1, part=Blech1
-1.77635683940025e-15, 58.7406989042568, 0.
*End Instance

*Instance, name=Schliessringbolzen-1, part=Schliessringbolzen
2.22044604925031e-16, 40.9725409646347, 0.
*End Instance

*Instance, name=Blech2-1, part=Blech2
0., 56.2406989042568, 0.
*End Instance

*Instance, name=Schliessring-1, part=Schliessring
0., 50.5256989042568, 0.
*End Instance

*Instance, name=Klemmbacke-1, part=Klemmbacke
0., 45.972674365657, 0.
*Node
1, 2.40070009, 0.324999988, 0.
*Nset, nset=Klemmbacke-1-RefPt_, internal
1,
```

```
*Nset, nset=_PickedSet3, internal
1,
*Surface, type=SEGMENTS, name=Schliessringbolzen

*****Da der Rigid Body keine Elemente oder Knoten hat, wird die Oberfläche über
*****die Linien definiert, mit denen die Klemmbacke gezeichnet wurde
*****(SEGMENTS).

*Rigid Body, ref node=Klemmbacke-1-RefPt_, analytical surface=Schliessringbolzen
*Element, type=MASS, elset=_PickedSet3_Inertia-1_
1, 1
*Mass, elset=_PickedSet3_Inertia-1_
0.0001,
*End Instance

*Instance, name=Zugkopfhülse-1, part=Zugkopfhülse
*Node
1, 5.61265707, 48.5, 0.
*Nset, nset=Zugkopfhülse-1-RefPt_, internal
1,
*Surface, type=SEGMENTS, name=Schliessring

*****Wie bei der Klemmbacke

*Rigid Body, ref node=Zugkopfhülse-1-RefPt_, analytical surface=Schliessring
*End Instance

*End Assembly

*Amplitude, name="Kraft Klemmbacke", definition=SMOOTH STEP
0., 0., 0.1, 1.
*Amplitude, name="Weg Klemmbacke", definition=SMOOTH STEP
0., 0., 0.1, 1.

** MATERIALS

*****Hier sind die erforderlichen Materialkennwerte angegeben

*Material, name="AA2024 T42"
*****Aluminium-Legierung
*Density
2.7e-09,
*****Dichte=0,0000000027kg/mm3
*Elastic
70000., 0.34
*****E-Modul= 70000N/mm2; Querkontraktionszahl=0,34
*Plastic
377.6, 0.
383., 0.003
434., 0.03
479.3, 0.06
502., 0.08
```

524.4, 0.106

574.4, 2.106

*****Erste Angabe: Spannung in N/mm²; zweite Angabe: Plastischer Anteil an der
*****Dehnung;

*Material, name="TiAl 6V4"

*****Titan-Legierung

*Density

4.43e-09,

*****Dichte=0,00000000443kg/mm³

*Elastic

112000., 0.3

*****E-Modul= 112000N/mm²; Querkontraktionszahl=0,3

*Plastic

1325., 0.

1370., 0.05

1387., 0.1

1420., 0.2

1445., 0.3

1463., 0.4

1470., 0.5

1487., 0.6

1495., 0.7

1500., 0.8

*Material, name="TiAl 6V4Abriss"

*****Titan-Legierung mit Versagenskriterium für die Abriss-Sektion

*Damage Initiation, criterion=DUCTILE

0.2,0.,0.

*****Plastische Versagensdehnung $\epsilon_{pl} = 0,2$

*Damage Evolution, type=DISPLACEMENT

0.0005,

*****Differenz zwischen der plastischen Dehnung nach dem Versagen, bzw. nach
*****Spannungsabnahme und der kritischen plastischen Dehnung = 0,0005

*Density

4.43e-09,

*Elastic

112000., 0.3

*Plastic

1325., 0.

1370., 0.05

1387., 0.1

1420., 0.2

1445., 0.3

1463., 0.4

1470., 0.5

1487., 0.6

1495., 0.7

1500., 0.8

** INTERACTION PROPERTIES

*****Angabe der Anfangs-Kontaktbedingungen, (Reibung)

*Surface Interaction, name="Fric0,05"

*Friction

0.05,

*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD

*****"Harter Kontakt": Druck wird erst bei Kontakt der Fläche aufgebracht.

*****Durchdringung der Flächen sind dann nicht erlaubt.

*Surface Interaction, name="Fric0,1"

*Friction

0.1,

*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD

*Surface Interaction, name="Fric0,2"

*Friction

0.2,

*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD

** BOUNDARY CONDITIONS

** Name: Rand BC Type: Displacement/Rotation

*Boundary

Bleche-Rand, 1, 1

Bleche-Rand, 6, 6

** Name: Symmetrie BC Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre

*Boundary

Schliessringbolzen-Symmetrie, XSYMM

** -----

*****Nach Angabe der Anfangsbedingungen, werden nun für jeden einzelnen Step
*****die jeweiligen Randbedingungen angegeben.

** STEP: Klemmen

*Step, name=Klemmen

Schliessringbolzen wird mit Klemmbacke geklemmt

*Dynamic, Explicit

, 0.1

***** Dynamische Explizite Rechnung mit einer Stepzeit von 0,1s

*Bulk Viscosity

0.06, 1.2

** Mass Scaling: Semi-Automatic

** Whole Model

*Variable Mass Scaling, dt=1e-07, type=below min, frequency=1

** BOUNDARY CONDITIONS

```
** Name: Klemmbacke BC Type: Displacement/Rotation
*Boundary, amplitude="Weg Klemmbacke"
_PickedSet100, 1, 1, -0.012
_PickedSet100, 2, 2
_PickedSet100, 6, 6
** Name: Zugkopfhülse BC Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet108, 1, 1
_PickedSet108, 2, 2
_PickedSet108, 6, 6

*End Step
** -----
```

** STEP: Einziehen

```
*Step, name=Einziehen
Lockbolt wird in Blech eingezogen (Presspassung)
*Dynamic, Explicit
, 0.1
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
```

** BOUNDARY CONDITIONS

```
** Name: Klemmbacke BC Type: Displacement/Rotation
*Boundary, amplitude="Weg Klemmbacke"
_PickedSet100, 1, 1
_PickedSet100, 2, 2, -5.
** Name: Rand BC Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Bleche-Rand, 2, 2

*End Step
** -----
```

** STEP: Umformen

```
*Step, name=Umformen
Umformvorgang durch Krafteinleitung an der Klemmbacke
*Dynamic, Explicit
, 0.1
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
```

** BOUNDARY CONDITIONS

** Name: Klemmbacke BC Type: Displacement/Rotation

*Boundary, op=NEW, amplitude="Weg Klemmbacke"

_PickedSet100, 1, 1

_PickedSet100, 2, 2, -9.5

_PickedSet100, 6, 6

** Name: Rand BC Type: Displacement/Rotation

*Boundary, op=NEW

Bleche-Rand, 1, 1

Bleche-Rand, 6, 6

*Adaptive Mesh, elset=Schliessring-1.Schließring, frequency=3, op=NEW

******Adaptive Mesh*": Nach jedem dritten Berechnungsschritt wird das Netz des
******Schließrings an die Geometrie neu angepasst. Durch die große Verformung,*
******würden die Elemente sonst zu stark verzerrt und die Berechnun abgebrochen*
******werden*

*End Step

** -----

** STEP: Entlasten

*Step, name=Entlasten

Zugkopfhueelse in X-Richtung wegfahren

*Dynamic, Explicit

, 0.1

*Bulk Viscosity

0.06, 1.2

** BOUNDARY CONDITIONS

** Name: Klemmbacke BC Type: Displacement/Rotation

*Boundary, amplitude="Weg Klemmbacke"

_PickedSet100, 2, 2

** Name: Rand BC Type: Displacement/Rotation

*Boundary

Bleche-Rand, 1, 1

Bleche-Rand, 2, 2

** Name: Zugkopfhueelse BC Type: Displacement/Rotation

*Boundary, amplitude="Weg Klemmbacke"

_PickedSet108, 1, 1

_PickedSet108, 2, 2, -6.

_PickedSet108, 6, 6

*Adaptive Mesh, op=NEW

*End Step