



Florian Dietmar Hönsch, BSc

Experimentelle Untersuchung und statistische Analyse wesentlicher Prozessparameter beim Stanznieten von Aluminiumblechen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch

Institut für Werkstoffkunde, Füge-technik und Umformtechnik

Arbeitsgruppe Tools & Forming | Member of [FSI]

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Vollmer

Graz, März 2017

Eidesstattliche Erklärung / Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Diplomarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master thesis.

Graz, am

.....

(Unterschrift/signature)

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern des Institutes für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik an der TU Graz bedanken, welche mir mit ihrem fachkundigen Wissen während der Masterarbeit zur Seite standen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch für die Beurteilung und Betreuung der Arbeit bedanken.

Ich danke auch Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Vollmer und Herrn DDipl.-Ing. Dr.mont. Josef Domitner, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen und mich mit ihrem Fachwissen unterstützen.

Großer Dank gilt auch den Mitarbeitern in der Werkstatt Heinz Fasching, Nino Müllner, Patrick Lichtenegger und Labinot Qollaku, die bei der Fertigung der Werkzeuge und Proben unersetzlich waren.

Weiters möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Werkstoffprüfung und der Forschungs- und Entwicklungsabteilung im Bereich Leichtbau der MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG bedanken, die diese Arbeit erst ermöglicht und mich unterstützt und geleitet haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Partnerin Kerstin, meinen Eltern Sonja und Günther und allen anderen Familienmitgliedern für die sowohl finanzielle als auch mentale Unterstützung bedanken.

Kurzfassung

Um die Entwicklungszeiten zu reduzieren kommen heutzutage im Zuge des Simultaneous Engineering schon in der Produkt- und Produktions-Planung Simulationsmethoden zum Einsatz. Unter anderem sollen die Simulationsergebnisse die Eignung des vorgeschlagenen Fügeprozess für die jeweilige Aufgabe aufzeigen. Sie sind deshalb ungemein wichtig für den Entwurf der Produktionslinie. Die Zielsetzung ist, dass die Modelle die Realität so gut abbilden, sodass in Zukunft keine Realversuche mehr nötig sein werden, um die Machbarkeit von Fügeoperation zu gewährleisten. Dies bedingt die Erstellung von Material- und Bauteil-Datenbanken, welche für den Modellaufbau eines jeden nur erdenklichen Produktionsprozesses notwendig sind.

Im Automobilbau wird durch stetige Applikation neuer Werkstoffe und Verfahren versucht, das Leichtbaupotential neuer Fahrzeuge bestmöglich auszunutzen. Ein Trend geht hierbei zur Verwendung von Aluminiumlegierungen, da diese gute mechanische Eigenschaften bei gleichzeitig geringem Gewicht aufweisen. Das Fügen von Aluminium stellt allerdings einige Herausforderungen bereit, da thermische Fügeverfahren wie das Punktschweißen nur begrenzt bzw. nicht angewandt werden können. Aus diesem Grund werden hierfür oft Prozesse aus dem Bereich der mechanischen Fügeverfahren wie Nieten oder Clinchen gewählt.

Die Vorteile des Halbhohlstanznietens sind unter anderem die einfache Automatisierbarkeit, die guten mechanische Eigenschaften und dass keine zusätzliche Wärmeeinbringung ins Bauteil erfolgt. Da die Karosserie im Crash sehr hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt ist, werden verschiedene Versuche, wie Kopfzug-, Scherzug- und Schälzug-Versuch durchgeführt. Die in diesen Tests erfassten mechanischen Kennwerte sind wichtige Eingabeparameter für die nachfolgenden Simulationen. Die Simulation des Setzprozesses mit nachfolgendem virtuellem Testen soll einen Realversuch obsolet machen und somit Kosten und Zeit sparen.

Im Zuge der Masterarbeit wurde eine Halbhohlstanznietanlage so umgerüstet, dass aus einer Kraft-Weg-Messung die notwendigen Parameter für eine spätere Simulation des Setzprozesses ermitteln werden können. Es wurden hierfür Aluminiumblechproben hergestellt, gefügt und deren mechanische Kennwerte aus den Kopfzug- und Scherzug-Versuchen ermittelt. Für die Probenherstellung mussten eigens entwickelte Biege- und Bohr-Vorrichtungen entworfen und gebaut werden. Des Weiteren wurden Schliffproben zur optischen Untersuchung mittels Mikroskop hergestellt, um die charakteristischen Maße der Verbindungen zu erfassen und eine qualitative Beurteilung dieser zu ermöglichen. Um Streuungseffekte des Prozesses zu untersuchen, wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan erstellt, der durch dreifache Wiederholung der Versuche statistisch abgesichert ist. Die Ergebnisse aus der DoE wurden mit den Ergebnissen aus der Kraft-Weg-Messung in Zusammenhang gebracht und der Einfluss der Parameter dargestellt.

Aus den Ergebnissen der Diplomarbeit kann eine Verbesserung der mechanischen Kennwerte erwarten werden. Indem man die in der DoE beschriebenen Einflussfaktoren optimiert und die Kraft-Weg-Kurven in Echtzeit überwacht, wird die Streuungsbreite der erzeugten Verbindungen geringer und somit die durchschnittlichen mechanischen Kennwerte verbessert. Die Werte aus den Messungen gepaart mit den Ergebnissen aus den Versuchen sollen als Grundlage für die Erstellung von Simulationsmodellen dienen, welche ein virtuelles Testen der Fügestelle erlauben und somit die Zahl der nötigen Versuche minimieren sollen.

Abstract

Due to the reduction of the time-to-market of new products simulation tools are used as early as possible. The results of the simulations should prove the suitability of certain joining processes for the application in the production process and therefore they are extremely important for developing the production line. The models used in the simulations should reflect reality in a way so that real trials can be minimized or skipped in future. For this reason material and component databases which represent the behaviour of the components perfectly and allow simulation of all imaginable production processes have to be created.

In order to reduce the weight of modern vehicles, new materials and processes are being developed in very short time periods. The trend in vehicle engineering is to use aluminium alloys due to their good mechanical properties and significant weight advantages. However the joining of aluminium parts causes some difficulties because thermal joining technologies such as dot-welding often cannot be applied. For this reason it is much easier to use mechanical joining processes such as riveting or clinching, where no additional heat gets into the part.

The advantages of the self-piercing riveting process are that it is easy to automate, also the joints have good mechanical properties and furthermore there is no heat transferred to the part. In case of a crash, the chassis is exposed to very high forces. Because of that, extensive testing such as cross tension, shear tension and peel tests are obligatory. The parameters measured during the tests can be used to build up simulations which should replace real tests in the future and generate data for crash test simulations.

During the course of my master thesis a self-piercing half-hollow riveting machine was equipped with a force-distance-measuring system which was used to get data for validation and simulation. Several aluminium specimens have been manufactured, joined and validated with cross tension and shear tension tests. To produce these specimen special tools for bending and drilling had to be planned and manufactured. For optical analysis under the microscope polished specimen were manufactured and analysed. The measurements taken under the microscope determine the quality of the joint. Statistical analysis of data output from the force-distance-measuring system and the mechanical properties was used to investigate variations within the process to optimize the joints.

Due to a drastic reduction of variation effects better mechanical properties can be expected by the output of this thesis. Implementing a process monitoring system with integrated closed-loop control will contribute to the quality of the joints. Optimizing the parameters determined in the DoE will also lead to better mechanical properties. The data generated from the measuring system and the tests should be the basis for a simulation model, which allows virtual testing of the joints and helps reducing the required amount of real tests.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	4
2.1	Einteilung der Fügeverfahren	4
2.2	Halbhohlstanznieten	11
2.3	Clinchen	13
2.4	Hybridfügen.....	16
2.5	Messequipment	21
3	Aufgabenstellung.....	24
4	Aufbau der Nietanlage	26
4.1	Nietzange	26
4.2	Nietsteuerung	29
5	Setzen von Nietverbindungen	30
5.1	Setzen von Nietverbindungen für Schliffproben.....	30
5.2	Setzen von Nietverbindungen für KS2 Proben	31
6	Probenherstellung	33
6.1	KS2 Proben.....	33
6.1.1	Herstellung der Blechstreifen	34
6.1.2	Biegewerkzeug	37
6.1.3	Konstruktion des Biegewerkzeugs.....	38
6.1.4	Biegen der Proben	39
6.1.5	Bohrvorrichtung	40
6.1.6	Konstruktion der Bohrvorrichtung	40
6.1.7	Bohren der Proben.....	41
6.2	Schliffproben	43
6.2.1	Analyse der Rotationssymmetrie	44
6.2.2	Sensibilitätsanalyse des Setzdruckes.....	46
6.2.3	Sensibilitätsanalyse der Exzentrizität	49
7	Kraft-Weg-Messung	52
7.1	Konstruktion der Kraftmessvorrichtung	52
7.2	Aufzeichnung der Messdaten	54
8	Prüfung der KS2 Proben und Statistische Analyse	56
8.1	Modell technischer Prozesse	56
8.2	Versuchsplanung	57
8.3	Erstellen einer Versuchsmatrix.....	59

8.4	Prüfen der KS2 Proben	60
8.4.1	Kopfzugprüfung	60
8.4.2	Scherzugprüfung	63
9	Analyse der Ergebnisse	66
9.1	Grundlagen der statistischen Auswertung von Versuchsplänen	66
9.2	Auswertung der Ergebnisse aus den Kopfzugversuchen	69
9.3	Auswertung der Ergebnisse aus den Scherzugversuchen	72
10	Zusammenfassung und Ausblick	75
	Abbildungsverzeichnis	79
	Tabellenverzeichnis	83
	Diagrammverzeichnis	85
	Abkürzungsverzeichnis	87
Anhang A:	Prüfprotokoll der Blechvordehnung	89
Anhang B:	Prüfprotokoll Kopfzugversuche	95
Anhang C:	Prüfprotokoll Scherzugversuch	103
	Literaturverzeichnis	113

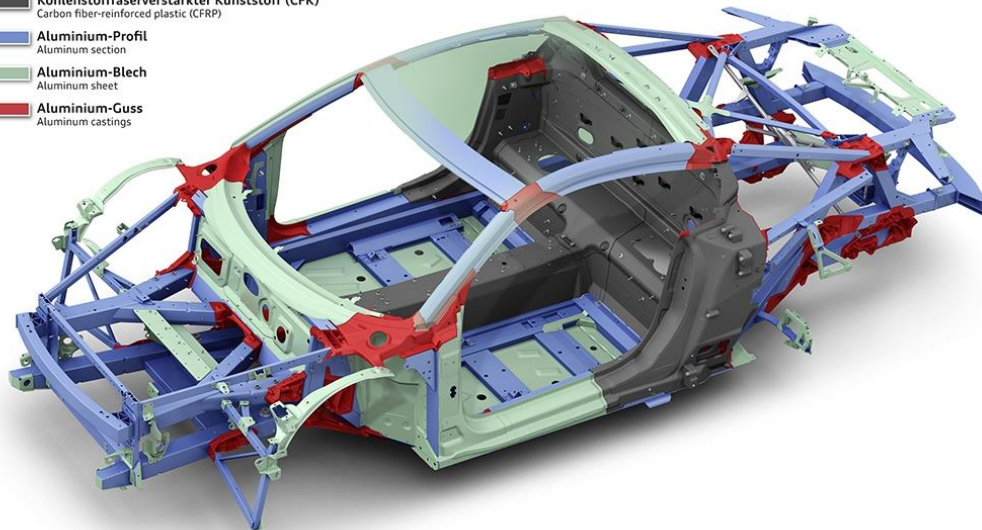
1 Einleitung

Leichtbau ist seit Jahren eines der zentralen Themen im Fahrzeugbau mit denen sich jeder Hersteller auseinandersetzen muss, um die vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Richtlinien einhalten zu können. Durch Gewichtseinsparungen kann die Leistung eines modernen Fahrzeugs deutlich verbessert werden, während gleichzeitig im Zuge des Downsizings kleinere und zugleich sparsamere Motoren eingesetzt werden können. Ein Trend in der Leichtbautechnik geht in Richtung Multimaterialbauweise (siehe Abbildung 1), in der die eingesetzten Materialien auf die Anforderungen im jeweiligen Einsatzgebiet abgestimmt sind und somit das Leichtbaupotential bestmöglich ausgenutzt wird. Diese Materialvielfalt bedingt jedoch auch eine Fügestelle zwischen den verschiedenen Materialien. Genau diese Fügstellen stellen die Entwickler vor große Herausforderungen und führten in den letzten Jahren zur Erprobung von diversen mechanischen Fügeverfahren.

Audi R8 Coupé

Audi Space Frame in Multimaterialbauweise
Audi space frame in multimaterial construction
03/15

- Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK)
Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP)
- Aluminium-Profil
Aluminum section
- Aluminium-Blech
Aluminum sheet
- Aluminium-Guss
Aluminum castings



Audi

Abbildung 1 Multimaterialbauweise anhand eines modernen Fahrzeugs (Audi)

Die herkömmlichen thermischen Fügeverfahren wie Punktschweißen und Lichtbogenschweißen stoßen aufgrund der komplett verschiedenen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Fügepartner schnell an ihre Grenzen. Die Forschung an innovativen Fügeverfahren wird stetig vorangetrieben, um die steigenden Anforderungen erfüllen zu können. Dies macht sich vor allem im Luxusklasse- und Sportwagen-Segment bemerkbar, da in diesen Segmenten die höheren Kosten, die durch die Multimaterialbauweise entstehen mit dem Mehrwert an Leistung und Verarbeitung gerechtfertigt werden können. Wie schon bei anderen Technologiersprüngen (ABS, ESP, ASR, etc.) werden aber auch diese Technologien, sobald sie ausreichend erprobt sind und wirtschaftlich angewandt werden können, in geraumer Zeit Einzug in der Massenfertigung aller Fahrzeugklassen halten.

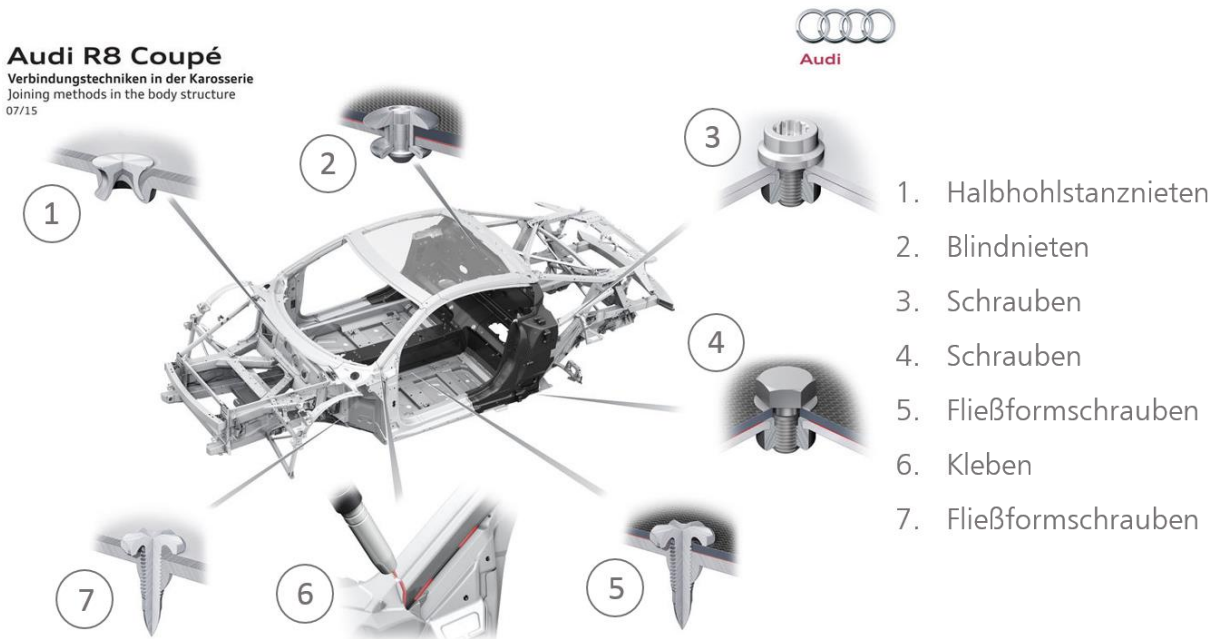


Abbildung 2 Verbindungstechniken im Audi R8 Coupé (Audi)

Es steht allerdings nicht nur die Entwicklung neuer Verfahren im Fokus. Auch bekannte und erprobte Verfahren werden sukzessive optimiert und adaptiert. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wird für das Fügen einer modernen Karosserie nicht nur ein Fügeverfahren angewandt. Um die bestmöglichen mechanischen Eigenschaften bei jeder Fügestelle zu erreichen, wird je nach Materialpaarung und Beanspruchung ein anderer Prozess eingesetzt. So kann das Gewicht gering gehalten und gleichzeitig die Crashesicherheit verbessert werden. Neben den Schweißverfahren erlangen die mechanischen Fügeverfahren für den Fahrzeugbau immer mehr an Bedeutung und rücken somit in den Fokus der Forschung. Speziell in Kombination mit Kleben sind diese im Karosseriebau auf dem Vormarsch und verdrängen die gängigen Verfahren zusehends.

Eines der am häufigsten eingesetzten Verfahren ist das Halbhohlstanznieten, welches das zentrale Thema dieser Arbeit ist. Dieses findet vermehrt Anwendung in der Füge-technik von Aluminium- und Aluminium-Stahl-Karosserien, wobei meist tragende Strukturbauteile genietet werden (Abbildung 3). Die Verbindung zeichnet sich durch ihre guten mechanischen Eigenschaften und vor allem durch die Möglichkeit, verschiedene Materialien verbinden zu können aus. Andere Verfahren wie Clinchen eignen sich nicht zum Fügen von Crash relevanten Teilen, da diese nicht die nötigen mechanischen Festigkeitswerte erreichen. Es werden je nach Fahrzeugklasse und Karosseriematerial bis zu 4000 Nieten verwendet, was im Vergleich zu einer rein punktgeschweißten Stahlkarosse eine Reduktion der Fügepunkte von bis zu 35% bedeutet (z.B. Range Rover: 3886 Stanznieten im Vergleich zu Volvo XC90: 5353 Schweißpunkte wobei auch noch andere Verfahren zum Einsatz kommen). Bei Fahrzeugen der neuesten Generation kommen oft mehr als 10 verschiedenen Fügeverfahren zum Einsatz. Es wurde deshalb das WSE (Weldspot Equivalent) eingeführt, das den Anteil des jeweiligen Verfahrens an den Gesamtfügeoperationen repräsentieren soll.

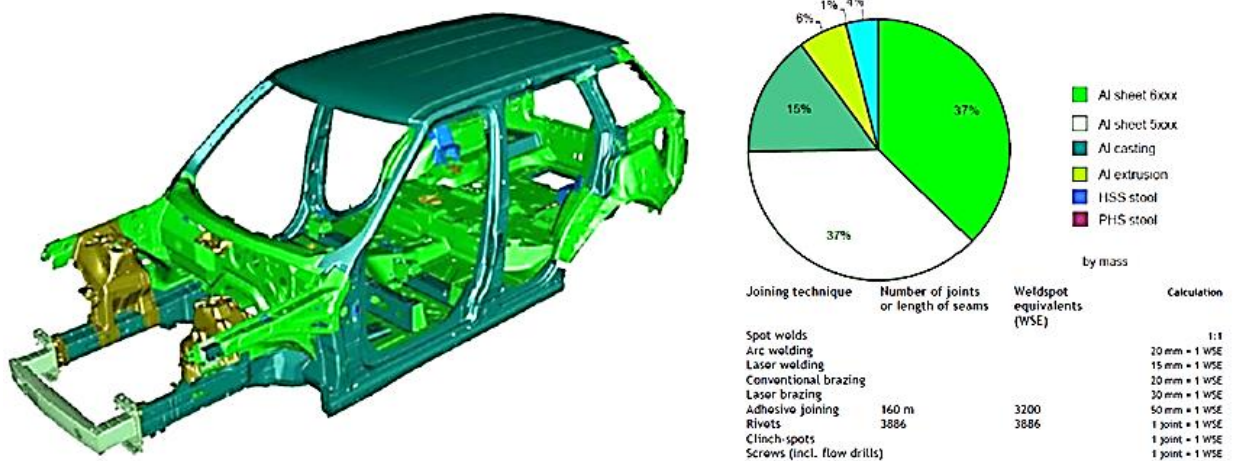


Abbildung 3 Range Rover Aluminiumkarosserie (Lloyd et al.)

Da die Zeit, die für die Entwicklung eines neuen Fahrzeuges zur Verfügung steht immer kürzer wird, kommen vermehrt CAx Systeme zum Einsatz, die vom Design bis zur Fertigung der Fahrzeuge jeden Schritt abbilden können. Hierfür werden naturgetreue Computermodelle benötigt, welche oft nicht leicht zu beschreiben sind. Eine Analyse, welches oder ob ein Fügeverfahren für die gegebene Materialkombination geeignet ist, könnte mittels Simulationsmodellen bereits frühzeitig vorausgesagt werden. Folglich werden auch zuverlässige Simulationsmodelle zur Versagensprognose der Fügepunkte benötigt.

Zur Validierung solcher Modelle müssen sowohl Proben hergestellt und Versuche durchgeführt werden, als auch statistische Auswertungen erfolgen. Mit den Ergebnissen aus den Versuchen kann das Modell an die wirklichen Gegebenheiten angepasst und so genauere Vorhersagen getroffen werden, wie sich das Material bzw. der Fügepunkt bei einer bestimmten Belastung verhalten wird. Die für die Validierung notwendigen Proben werden im Zuge dieser Arbeit hergestellt und geprüft. Hierfür müssen neue Werkzeuge entwickelt, gefertigt und erprobt werden. Zur Beurteilung des Prozesses wird eine statistische Versuchsplanung ausgearbeitet, in der die für die Fertigung relevanten Parameter in definierten Fenstern variiert werden. Ziel ist es aus den Ergebnissen der zerstörenden Prüfung der Proben wichtige Erkenntnisse für die Simulationsmodelle zu generieren und eine Methodenplanung für die Fertigung und Prüfung von Stanznietproben zu erarbeiten.

2 Stand der Technik

Die im Karosseriebau zum Einsatz kommenden Fügeverfahren sind variantenreich und in großem Maße von den eingesetzten Materialien abhängig. Im Folgenden Kapitel soll ein Überblick über die gängigen Fügeverfahren im Fahrzeugbau gegeben und schließlich näher auf die mechanischen Fügeverfahren bzw. das Halbholstanznieten eingegangen werden. Des Weiteren werden gängige Messverfahren zur Kraft- und Weg-Messung erläutert und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt.

2.1 Einteilung der Fügeverfahren

Fügen ist laut Definition in DIN 8593 das Zusammenbringen mehrerer Werkstücke mit geometrisch bestimmter fester Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosen Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhang örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt. (Enzinger 2014)

Die Einteilung der Fügeverfahren nach DIN 8593 erfolgt wie in Abbildung 4 gezeigt in acht Gruppen.

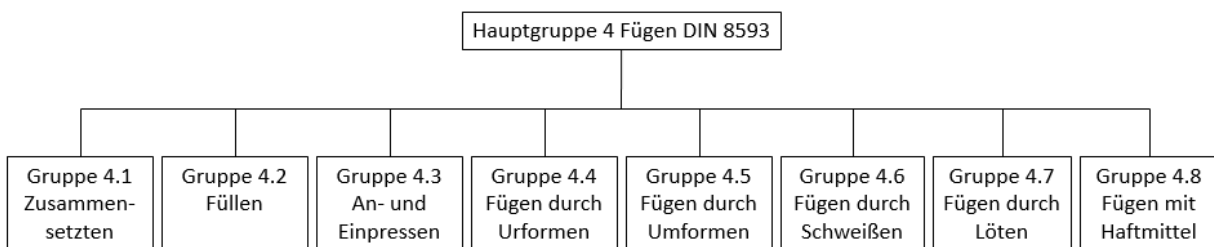


Abbildung 4 Fügeverfahren nach DIN 8593

Die ersten drei Gruppen spielen für die Fügechnik an sich keine wichtige Rolle, da diese ohne Form- und/oder Gefüge-Änderungen der Fügepartner ablaufen. Die für die heutige Automobilindustrie wichtigsten Fügeverfahren sind das Schweißen, das Fügen durch Umformen und das Kleben (siehe Beispiele in Abbildung 5). Auch das Fügen durch Löten spielt den Bereichen von Dach und Heckklappen sowie der Fahrzeugelektronik eine bedeutende Rolle.

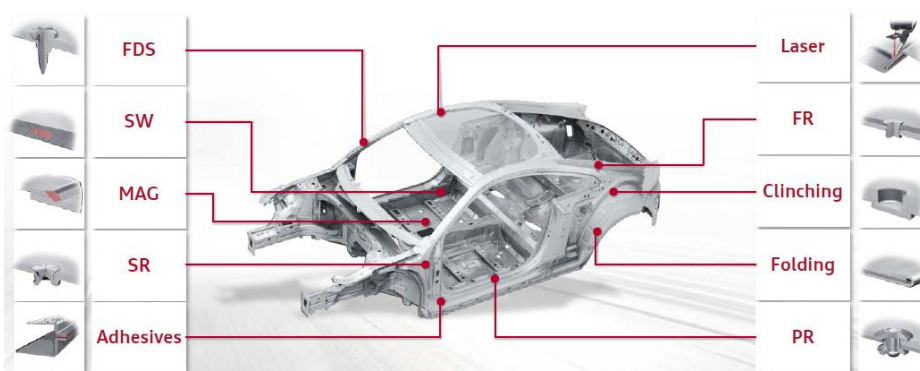


Abbildung 5 Audi TT Coupé Fügechnik (Schmid und Seehafer 2014)

Fügen durch Urformen:

Beim Fügen durch Urformen wird ein Werkstück mit einem formlosen Stoff umhüllt und dadurch eine formschlüssige Verbindung hergestellt. Typische Verfahren aus dieser Gruppe sind Ausgießen, Einbetten, Vergießen, Ummanteln und Eingalvanisieren. (Enzinger 2014)

Diese Verfahren spielen im Karosseriebau eine untergeordnete Bedeutung und werden aus diesem Grund nicht näher beleuchtet.

Fügen durch Schweißen:

Mittels Schweißen werden artgleiche oder artfremde Werkstoffe vereinigt oder beschichtet. Die Schmelztemperatur sowie die chemische Zusammensetzung muss dabei ähnlich sein, um gute Eigenschaften der Verbindung garantieren zu können. Der Schweißvorgang selbst kommt durch die Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Zusatzwerkstoff zu Stande. Schweißverbindungen sind unlösbare Verbindungen, was eine nachträgliche Reparatur oder Konstruktionsänderung erschwert. (Enzinger 2014)

Im Laufe der Zeit hat sich eine Vielzahl von Schweißtechniken entwickelt. Der große Unterschied zwischen den Verfahren liegt in der Art der Energieeinbringung und in der Energieerzeugung. Wärmeenergie kann durch Reibung, Induktion, elektrische Entladungen in Form eines Lichtbogens, einer Gasflamme, elektromagnetischer Strahlung oder Ultraschall eingebracht werden. Verfahren, die ausschließlich auf dem Wärmeeintrag in die Fügestelle basieren, nennt man Schmelzschweißverfahren. Das in der Automobilindustrie am häufigsten angewandte Schweißverfahren ist das in Abbildung 6 dargestellte Punktschweißen.

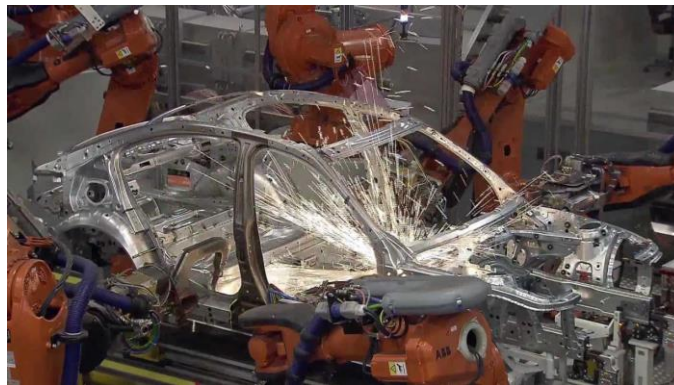


Abbildung 6 Punktschweißen einer BMW 3er Karosserie (BMW)

Bei manchen Prozessen muss zusätzlich zum Wärmeeintrag auch noch eine Kraft aufgebracht werden. Zu diesen Verfahren zählen die Pressschweißverfahren, das Diffusionsschweißen oder auch das Reibschweißen. Einen Extremfall stellt das Sprengschweißen dar, wo durch die großen auftretenden Kräfte die Notwendigkeit eines Wärmeeintrags entfällt. Spezialverfahren wie Sprengschweißen, Thermiterschweißen oder Diffusionsschweißen finden ihren Einsatz aber nur für Spezialanwendungen. Da Schweißen ein hoch instationärer Prozess ist, kann eine Vielzahl von Fehlern eintreten. Wie gut sich eine Schweißverbindung realisieren lässt, ist von der Schweißbeignung des Werkstoffs, der Schweißmöglichkeit der Fertigung und der Schweißsicherheit der Konstruktion abhängig.

Die Schweißbeignung des Werkstoffs wird durch die chemische Zusammensetzung, die metallurgischen Eigenschaften und die physikalischen Eigenschaften der Fügepartner bestimmt. Die Schweißsicherheit der Konstruktion hängt von der konstruktiven und beanspruchungsgerechten Gestaltung der Schweißkonstruktion ab. Die Vorbereitung des Schweißens, die Ausführung der Schweißarbeiten und die Nachbearbeitung sind ausschlaggebend für die Schweißmöglichkeit der Fertigung. (Enzinger 2014)

Auch wenn alle Vorgaben eingehalten werden, kann es trotzdem zur Ausprägung von Fehlern kommen. Solche Fehler können Poren, Schlackeneinschlüsse, Risse, Bindefehler, Einbrandkerben, Wurzelfehler etc. sein. Um die Qualität der Schweißverbindung gewährleisten zu können, kommen verschiedene Prüfverfahren, wie Ultraschall- oder Röntgen-Prüfung zum Einsatz. Diese sind allerdings Kosten und Zeit aufwendig.

Fügen durch Löten:

Beim Fügen durch Löten werden zwei Bauteile durch einen Zusatzwerkstoff, das Lot, miteinander verbunden. Entscheidend für die Lötstelle ist die Diffusion zwischen Grundwerkstoff und Lot. Hierfür spielen die Benetzung und die Löslichkeit von Lot und Grundwerkstoff eine wichtige Rolle. Des Weiteren ist der Lötspalt von entscheidender Bedeutung. Ist er zu klein, kann das Lot nicht in den Spalt eindringen und es kommt nicht zur ausreichenden Verbindung der Bauteile. Ist der Lötspalt zu groß, tritt dasselbe Problem auf. (Enzinger 2014)

Die Vorteile von Löten sind:

- Auch schlecht zugängliche Stellen können gelötet werden
- Löten ist gut automatisierbar
- Das Gefüge des Grundwerkstoffs bleibt aufgrund der geringen Wärmeeinbringung weitestgehend erhalten
- Artfremde Werkstoffe können gefügt werden

Ein Nachteil von Lötverbindungen gegenüber Schweißverbindungen ist die geringere Festigkeit der Fügestelle. Um die Lötbarkeit zu verbessern, können Flussmittel oder Lötenschutzgase zum Einsatz kommen. Flussmittel reduzieren die Werkstückoberfläche und verhindern die Bildung einer neuen Oxidschicht. Zusätzlich reduziert das Flussmittel die Oberflächenspannung im Lot, was zu einer verbesserten Benetzung des Werkstücks führt. Nach dem Löten ist das Flussmittel zu entfernen, da ansonsten Korrosionsgefahr besteht. Lötenschutzgase kommen vorwiegend beim Hochtemperaturlöten zum Einsatz, da das Flussmittel bei Temperaturen über 900° verdampfen würde. Das Schutzgas hat die Aufgabe das Lot und die Werkstückoberfläche vor Oxidation zu schützen und durch seine reduzierende Wirkung vorhandene Oxidschichten abzutragen. Beim Löten werden die Verfahren nach der Schmelztemperatur des Lotes in Weichlöten, Hartlöten und Hochtemperaturlöten unterteilt. Man kann aber auch eine Einteilung nach Art der Wärmequelle vornehmen. Diese werden dann in Festkörper, Flüssigkeiten, Gase und elektrischer Strom unterteilt. Mögliche Fehler, die beim Löten auftreten können sind Korrosion durch ungenügendes Entfernen des Flussmittels, Schlechte Verbindung durch unzureichende Benetzung oder schlechter Reinigung oder das Entstehen einer Kaltlötstelle aufgrund zu niedriger Löttemperatur oder Erschütterungen während des Lötprozesses. (Enzinger 2014)

Fügen durch Kleben:

Das Kleben beeinflusst den Grundwerkstoff im Vergleich zu Schweißen oder Löten am wenigsten. Es können verschiedenste Werkstoffe und Werkstoffpaarungen geklebt werden. Die Klebeverbindung entsteht durch Energiezufuhr im Klebstoff, wodurch die Monomere im Klebstoff zu Polymeren entwickelt werden. Die wichtigsten Mechanismen beim Kleben sind Adhäsion zwischen Klebstoff und Grundwerkstoff und Kohäsion im Klebstoff selbst (siehe Abbildung 7). Bei einer guten Klebeverbindung sind die Adhäsionskräfte immer größer als die Kohäsionskräfte. Die Adhäsion wird von verschiedenen Mechanismen beeinflusst. Dazu zählen die mechanische Verklammerung von Klebstoff und Grundwerkstoff, intermolekulare Kräfte zwischen Klebstoff und Grundwerkstoff, thermodynamische Grenzflächenvorgänge und chemische Verbindungen. Die Adhäsion wird vor allem von der Benetzung des Grundwerkstoffs bestimmt. Die Kohäsion dagegen wird von Aushärtungsvorgängen im Klebstoff selbst beeinflusst. (Enzinger 2014)

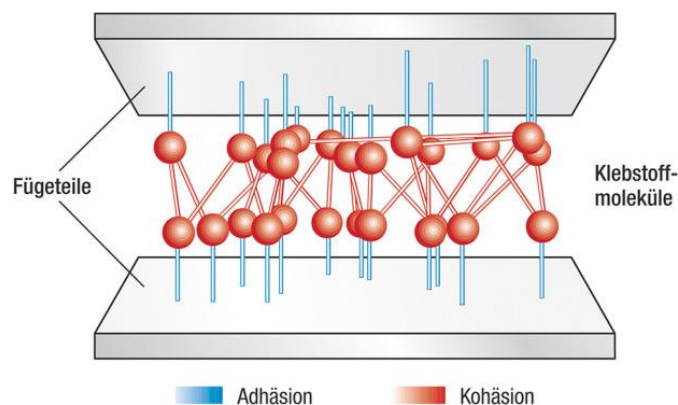


Abbildung 7 Klebeverbindung (Warenzeichenverband Edelstahl Rostfrei E.V.)

Die Vorteile von Kleben sind:

- Gleichmäßige Spannungsverteilung in der Fügezone
- Keine Beeinflussung des Grundwerkstoffs durch den Klebstoff
- Der Klebstoff fungiert als Isolator zwischen den Fügepartnern
- Die Fügestelle ist flüssigkeits- und gas-dicht
- Der Klebstoff wirkt dämpfend
- Das Verfahren lässt sich gut mit anderen Fügeverfahren kombinieren

Nachteilig ist, dass:

- die Verbindung thermisch nur gering belastbar ist
- eine zerstörungsfreie Prüfung kaum möglich ist
- die Langzeitstabilität nur bedingt gegeben ist
- die Vorbereitung sehr aufwendig ist
- es zum Einsatz toxischer Komponenten kommen kann
- die Reparaturmöglichkeit nur bedingt gegeben ist

Mögliche Fehlerquellen bei Kleben können die falsche Auswahl des Klebstoffs oder eine ungenügenden Vorbereitung sein. Auch die Einhaltung einer genau definierten Prozessführung spielt eine entscheidende Rolle für die Qualität der Verbindung. Einige wichtige Kriterien für die Klebstoffauswahl sind die mechanische Belastung, Witterung, Temperatur, chemische Belastung und Alterung. Zur Anwendung kommt das Kleben vor allem beim Verbinden ungleichartiger Werkstoffe und leichten großen Bauteilen. Es kommt in fast allen Branchen wie Automobil-, Flugzeug-, Schiffs- und Schienenfahrzeug-Bau etc. zum Einsatz.

Fügen durch Umformen:

Fügen durch Umformen geschieht durch das Verformen der Fügeteile. Die Verbindung ist durch den Formschluss gegen ungewolltes lösen gesichert. (Enzinger 2014)

Charakteristische Merkmale dieser Verfahren sind kurze Fügezeiten, wenig Vor- und Nach-Bereitung, keine Wärmebeeinflussung der Fügezone und die Möglichkeit artfremde Materialien zu fügen. Nachteilig ist, dass nur Überlappverbindungen möglich sind, relativ geringe statische Festigkeiten erreicht werden und Unebenheiten im Bereich der Fügezone entstehen.

Die Gruppe lässt sich in vier Untergruppen einteilen:

- Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper
- Fügen durch Umformen bei Blech-, Rohr-, oder Profil-Teilen
- Innenhochdruckfügen
- Fügen mittels Nietverfahren

Zur ersten Untergruppe gehören Verfahren wie Drahtflechten (Anwendung bei Maschendrahtzäunen), Verseilen (Seilherstellung), Spleißen (Verbinden von Seilen) und Knoten. Verfahren wie Körnen, gemeinsames Ziehen, Weiten, Engen, Bördeln, Falzen und Clinchen zählen zur zweiten Untergruppe.

Das Innenhochdruckfügen setzt eine plastische Verformbarkeit beider Fügepartner voraus und funktioniert durch die plastische und elastische Verformung während des Beaufschlagens unter sehr hohem Druck. Nach dem Wegnehmen des Druckes geht der elastische Anteil der Verformung zurück und eine kraftschlüssige Verbindung ist die Folge. In Abbildung 8 ist die Funktionsweise des Innenhochdruckfügens anhand einer Welle-Nabe-Verbindung dargestellt.

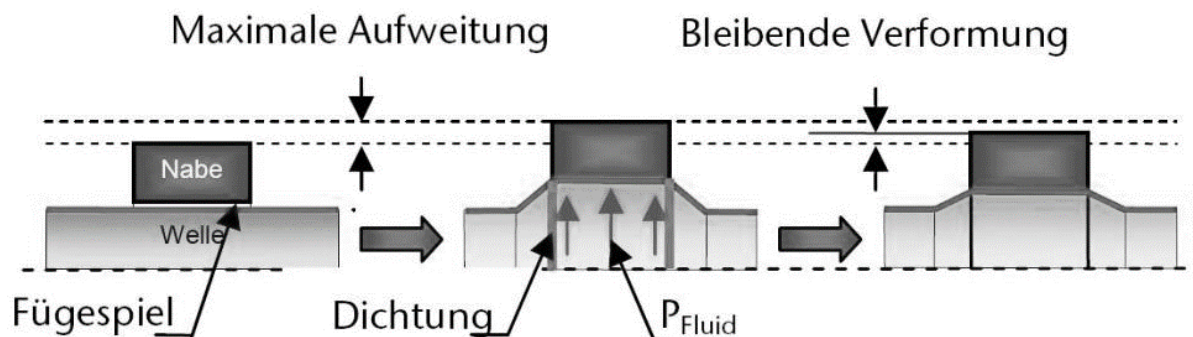


Abbildung 8 Innenhochdruckfügen (TU Clausthal 2010)

Die vierte Untergruppe beschäftigt sich mit den verschiedenen Nietverfahren. Hierbei unterscheidet man zwischen Hohnnieten, Vollnieten, Zapfnieten, Stanznieten und Variationen dieser. Einige der genannten Nietverbindungen sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Nietverfahren zählen zu den sogenannten mechanischen Fügeverfahren. Zu diesen zählen des weiteren Fertigungsverfahren wie Clinchen, bei dem kein Fügeelement zum Einsatz kommt oder auch das Fügen mittels Schließringbolzen.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der genannten Prozesse ist die Herstellung der für den Prozess meist notwendigen Bohrung. Diese kann vor dem Fügen in einem eigenen Arbeitsschritt gefertigt werden, oder aber stanzend durch das Fügeelement entstehen.

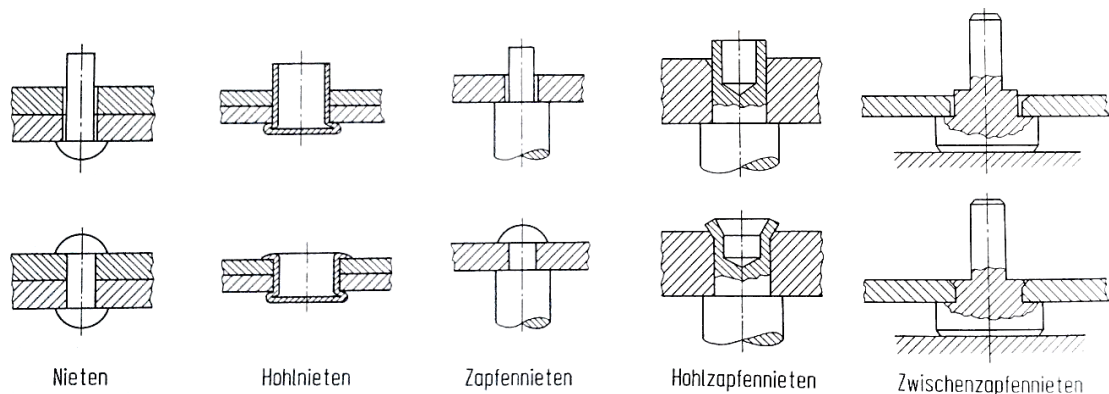


Abbildung 9 Niet-Arten (Lange 1993)

Die Verbindung der Fügepartner erfolgt durch Kraft- und/oder Formschluss. Je nachdem, ob oder welches Fügeelement zum Einsatz kommt, kann man mechanische Fügeverfahren auch wie in Abbildung 10 aufgezeigt einteilen.

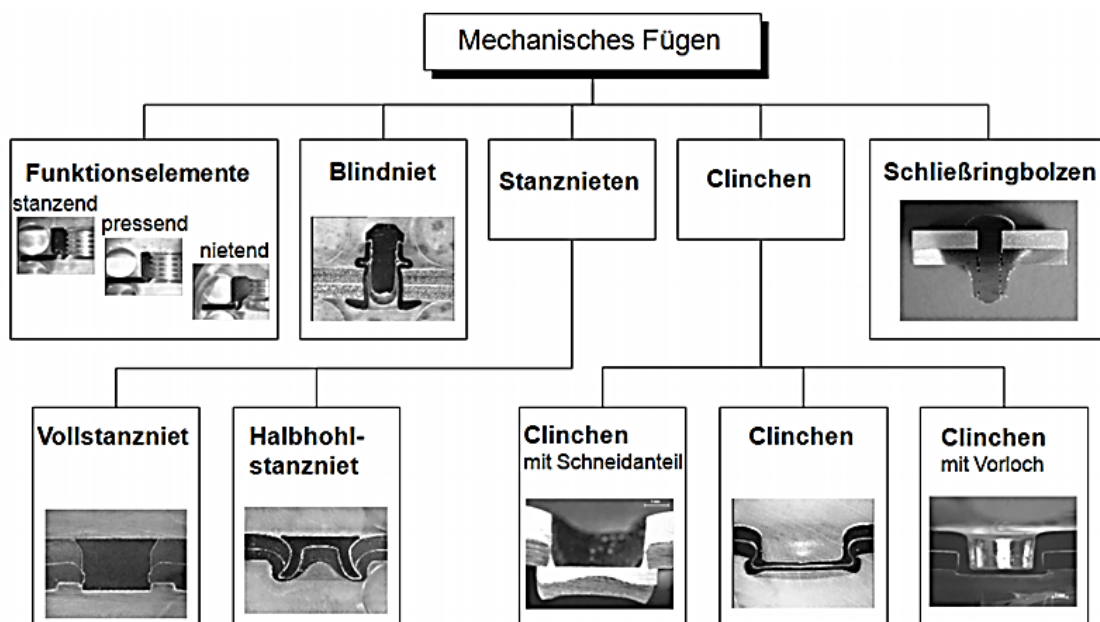


Abbildung 10 Mechanische Fügeverfahren (TU Dresden)

Wichtige Fragestellungen, die man für die Auswahl des richtigen Fügeverfahrens beachten muss, betreffen die Zugänglichkeit der Fügestelle, die notwendigen Vorbereitungsmaßnahmen wie Vorbohren und die geforderten mechanischen Charakteristika wie statische und dynamische Festigkeit und Dauerfestigkeit.

Vorteile von mechanischen Fügeverfahren sind:

- Kein zusätzlicher Wärmeeintrag in die Fügestelle
- Verschiedene Werkstoffe und Materialstärken sind ffügbar
- Keine Oberflächenvorbehandlung nötig
- Keine elektrische Leitfähigkeit der Fügepartner nötig
- Gute dynamische Beständigkeit
- Gut automatisierbar
- Einfache Herstellung
- Kostengünstig
- (normalerweise) Keine Nachbehandlung nötig
- Keine Schutzatmosphäre nötig

Nachteile von mechanischen Fügeverfahren sind:

- Geringe statische Festigkeit
- Problematisch mit spröden Werkstoffen
- Keine glatte Fügestelle möglich
- Potentialunterschiede beim Fügen unterschiedlicher Werkstoffe
- Kerbwirkung durch Einbringen eines Fremdkörpers oder Ausbildung der Fügestelle

Die Einsatzgebiete des jeweiligen Fügeverfahrens sind stark von den erzielbaren statischen und dynamischen Festigkeitskennwerten abhängig. In Abbildung 11 ist ein Vergleich der statischen Festigkeitskennwerte von einigen mechanischen Fügeverfahren dargestellt. Man kann daraus schlussfolgern, dass Verfahren wie Halbhohlstanznieten für höhere Beanspruchungen geeignet sind als z.B. Clinchen. Dies spiegelt den jeweiligen Einsatzbereich der Verfahren wieder. Während Halbhohlstanznieten zur Verbindung sicherheitsrelevanter Bauteile zum Einsatz kommt, wird Clinchen eher zum Verbinden von wenig belasteten Bauteilen wie Motorhauben oder Kofferraumdeckel angewandt.

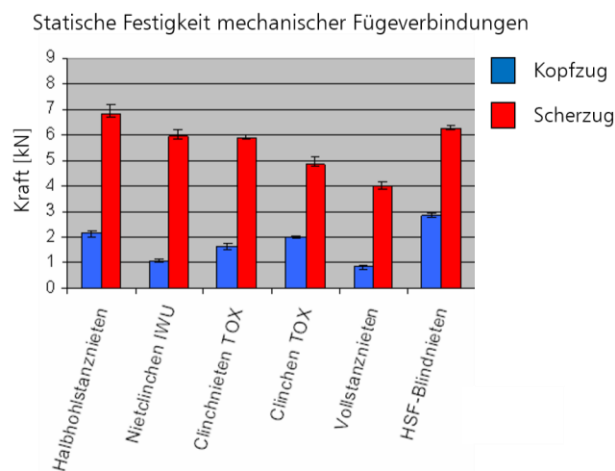


Abbildung 11 Statische Festigkeit mechanischer Fügeverbindungen (Reinstettel 2007)

2.2 Halbhohlstanznieten

Das Halbhohlstanznieten gehört zu den mechanischen Fügeverfahren, welche durch Einbringen eines Niets eine kraft- und form-schlüssige Verbindung herstellen. Die Fügestelle muss von beiden Seiten zugänglich sein; das Vorbohren eines Loches ist hierbei nicht nötig. Dieses Verfahren kommt aufgrund seiner guten statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften häufig zum Verbinden von sicherheitsrelevanten Bauteilen von Fahrzeugkarosserien wie z.B. Dachschienen oder B-Säulen zum Einsatz.

Die Arbeitsprozesse laufen wie in Abbildung 12 gezeigt ab. Zuerst erfolgt die Positionierung der Bleche zwischen Niederhalter und Matrize. Anschließend werden die Bleche geklemmt, wobei eine gewisse Niederhalterkraft das Aufbiegen dieser während des Nietvorgangs vermindern soll. Der Niet wird entweder einzeln oder mittels eines automatischen Systems zugeführt und durch den Stempel in das matrizenseitige Blech eingedrückt. Nach dem Durchstanzen des ersten Bleches erfolgt die Hinterschnittbildung im zweiten Blech. Es ist sehr wichtig, dass der Niet das zweite Blech nicht mehr durchstanz, sodass eine ausreichende Restbodenstärke sowie maximaler horizontaler und vertikaler Hinterschnitt erreicht werden. (Eckstein 2009)

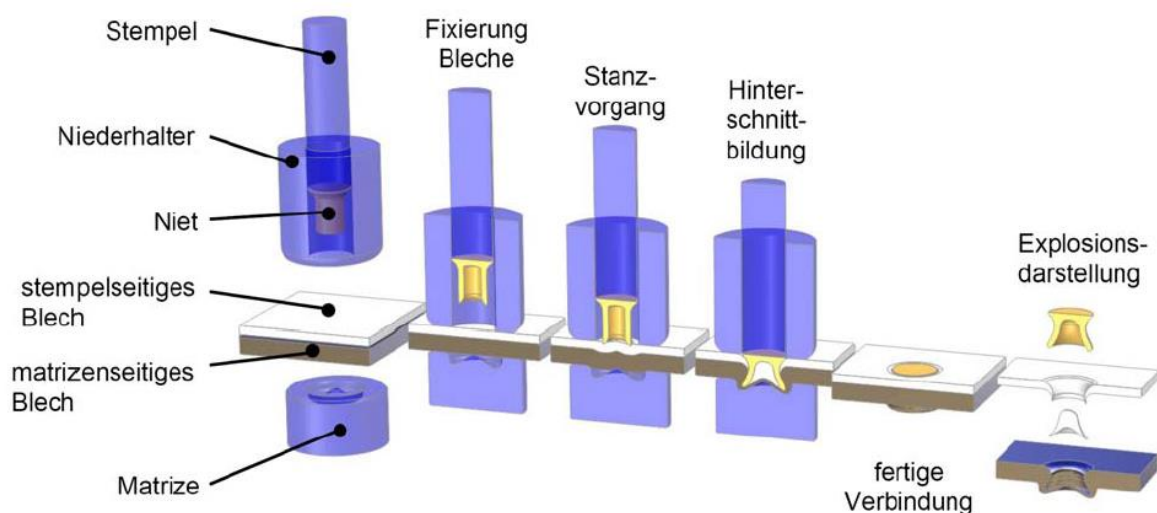


Abbildung 12 Herstellungsprozess einer Halbhohlstanznietverbindung (Eckstein 2009)

Die mechanischen Eigenschaften sind hauptsächlich von der Hinterschnittbildung abhängig. Die Restbodenstärke und die Nietkopfdlage spielen eine große Rolle für die Dichtheit und folglich auch für die Korrosionsbeständigkeit der Verbindung. Im Optimalfall bildet der Nietkopf mit der Oberfläche des stempelseitigen Blechs eine ebene Fläche und der Niet hat vollen Kontakt mit den zwei Blechen, sodass kein Hohlraum zwischen Niet und Blech entsteht. Die wichtigsten Maße und Bestandteile einer Halbhohlstanznietverbindung sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Grenzwerte der in Abbildung 13 gezeigten Parameter werden vom Kunden vorgegeben und können von Fall zu Fall leicht variieren.

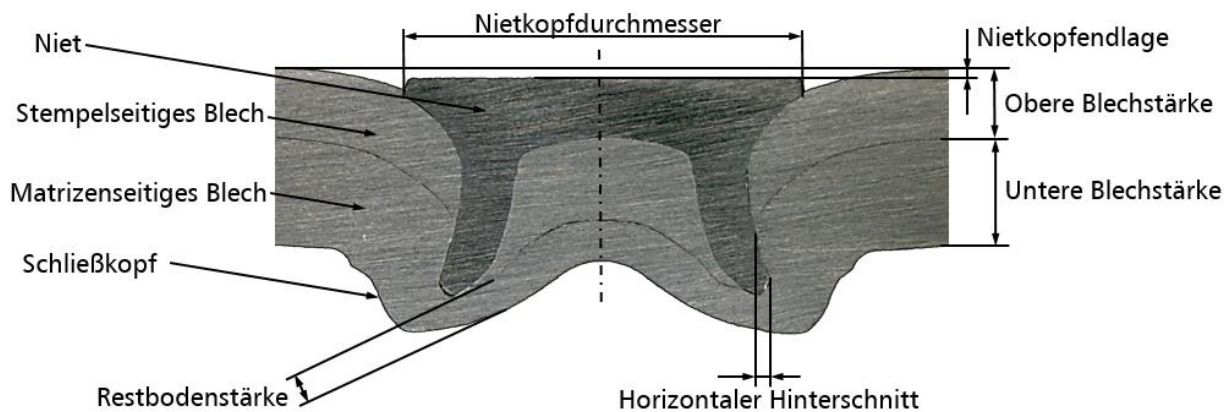


Abbildung 13 Maße und Bestandteile einer Halbhohlstanznietverbindung

Der Nietkopfdurchmesser ist ein durch die Nietgeometrie bestimmtes Maß und wird zur Ermittlung der Exzentrizität von Niet und Schließkopf herangezogen. Die Exzentrizität spielt eine große Rolle für die Ausbildung der Nietverbindung und folglich auch für die erreichbaren mechanischen Kennwerte. Sie ist von der Einbringung des Niets abhängig und wird vom Achsenversatz von Niet und Matrize bestimmt. Die Lage der Nietachse wird durch die Position des Hydraulikzylinders im C-Gestell definiert. Die Positionierung des Hydraulikzylinders kann durch das Verdrehen zweier exzentrischer Hülsen erfolgen. Die Lage der Matrizenachse ist fix, da diese durch die Aufnahmebohrung für die Matrize im C-Gestell definiert wird. Eine nähere Erläuterung zur Einstellung der Exzentrizität erfolgt in Kapitel 4.1.

Häufig ist die Nietkopfdlage ein entscheidendes Kriterium bei der Herstellung von Nietverbindungen. Der Nietkopf sollte eine ebene Fläche mit dem Oberblech bilden oder einen Unterstand dazu aufweisen. Die Restbodenstärke bezeichnet die geringste Blechstärke des untersten Blechs nach dem Fügen. Je nach Material, Setzdruck und Nietform kann diese beim Nietfuß oder versetzt zur Mittelachse auftreten. Als entscheidendes Kriterium für die Festigkeit der Verbindung spielt der horizontale Hinterschnitt eine bedeutende Rolle. Er bezeichnet das Maß zwischen dem äußersten Punkt des Nietfußes und des innersten Punktes des oberen Blechs. Die Form des Schließkopfes lässt auf die Füllung der Matrize und die Lage der Matrizenmittelachse schließen. In Abbildung 13 ist zu sehen, dass die Matrize nicht zur Gänze ausgefüllt wurde. Dies kann entweder an einem zu geringen Setzdruck oder einem Materialmangel im unteren Blech liegen.

Je nach Materialpaarung und Anforderungen kommen verschiedene Niete und Matrizen zum Einsatz (siehe Abbildung 14). Bei der Auswahl derer spielen die geforderten mechanischen Eigenschaften, die Werkstoffe, die Anzahl der Bleche, ob zusätzlich Klebstoff verwendet wird und das Aussehen, falls die Nietstelle von außen sichtbar ist, eine Rolle. Aufgrund des großen Angebots an verschiedenen Niete und Matrizen und auch der vielen verschiedenen Einflussparameter kann es sehr zeitaufwendig werden, die optimalen Komponenten und Parameter für eine Verbindung zu finden.

Grundsätzlich gibt es basierend auf Erfahrungswerten Niet-Matrize-Kombinationen, welche für gewisse Werkstoffpaarungen geeignet sind. Will man jedoch beste mechanische Eigenschaften erzielen, muss durch eine statistische Versuchsplanung die am besten geeignete Kombination für die jeweilige Fügekonfiguration gefunden werden. Hiermit geht neben dem Variieren der Niete und Matrizen auch das Variieren der Nietparameter einher. In Zukunft soll dieser Vorgang simulationsgestützt erfolgen, um eine Vorauswahl zu erleichtern.

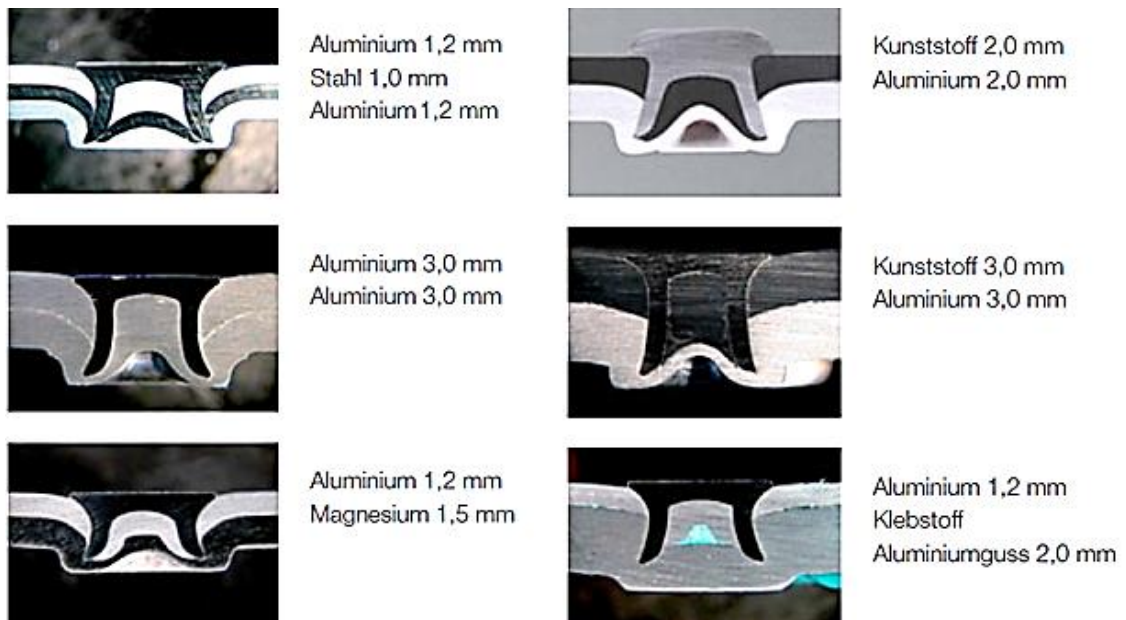


Abbildung 14 Anwendungsbeispiele (Böllhoff 2010)

Da die verwendete Nietanlage druckgesteuert funktioniert, spielt vor allem der Setzdruck, mit dem der Niet in das Blechpaket eingebracht wird eine große Rolle für die erreichbaren mechanischen Kennwerte der Nietverbindung. Weitere Werte, die direkt an der Steuerung beeinflusst werden können sind der Niederhaltedruck und die Haltezeit. Diese Parameter spielen aber eine untergeordnete Rolle im Vergleich zum Setzdruck.

2.3 Clinchen

Beim Clinchen werden zwei oder mehrere überlappende Bleche durch Kaltumformen mittels Stempel und Matrize gefügt. Man unterscheidet hierbei nach der Geometrie des entstandenen Fügepunktes in balkenförmige, runde und komplex-förmige Clinchverbindungen. Des Weiteren unterscheidet man je nach Verfahren in Clinchen mit oder ohne Schneidanteil und in ein- oder mehr-stufiges Clinchen. (Mende 2006)

Clinchen wird vor allem zum Verbinden von nicht sicherheitsrelevanten Bauteilen wie Motorhauben oder Kofferraumdeckel angewandt, die nicht im Sichtbereich liegen.

Beim einstufigen Clinchen ohne Schneidanteil laufen die in Abbildung 15 gezeigten Schritte wie folgt ab. Zuerst werden die Bleche zwischen Matrize und Niederhalter geklemmt. Danach drückt der Stempel auf das obere Blech und der Durchsetzvorgang beginnt. Die Blechstärke bleibt bis zum Kontakt des unteren Bleches mit der Matrize annähernd konstant. Erst beim Eindringen der Bleche in die Matrize nimmt die Blechstärke aufgrund von Fließvorgängen ab. Hierbei entsteht die durch den Stempel und die Matrize vorgegebene kraft- und form-schlüssige Verbindung. (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)

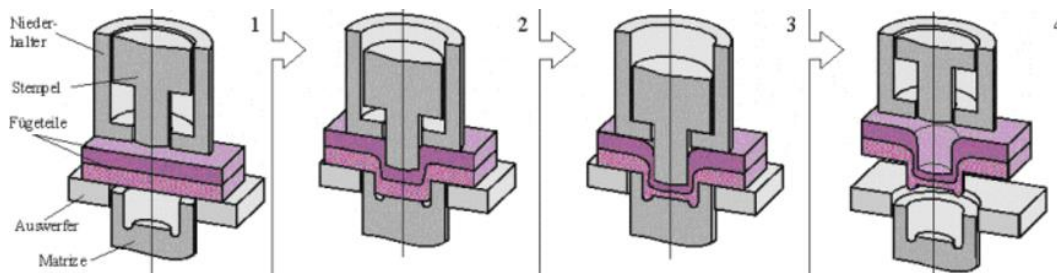


Abbildung 15 Einstufige Clinchverbindung ohne Schneidanteil (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)

Das einstufige Clinchen mit Schneidanteil erfolgt wie in Abbildung 16 gezeigt. Hierbei wird das Blechpaar zwischen Matrizenlamellen und Niederhalter geklemmt. Anschließend drückt der Stempel auf das Oberblech und der Durchsetz- und Einschneide-Vorgang beginnt. Hierbei ändert sich die Blechstärke kaum. Aufgrund des Einschneidens verbleibt nur eine partielle Verbindung der Bleche an der Stempel-Vorderseite und Rückseite. Nachdem das untere Blech den Matrizenamboss berührt beginnt das Stauchen des entstandenen Stegs und eine kraft- und form-schlüssige Verbindung entsteht. (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)

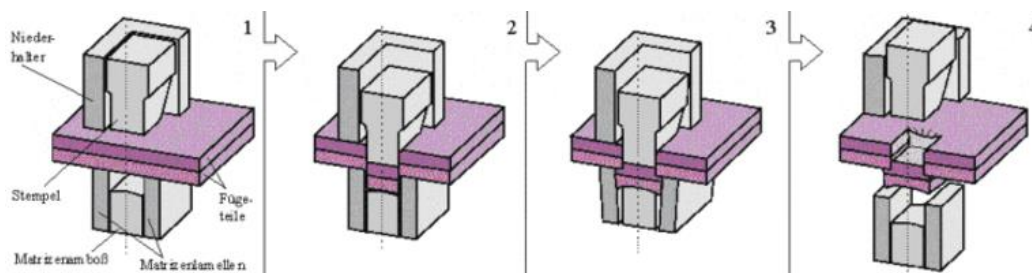


Abbildung 16 Einstufiges Clinchen mit Schneidanteil (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)

Der Ablauf des mehrstufigen Clinchens ohne Schneidanteil ist in Abbildung 17 dargestellt. Im dargestellten Prozess dient der Einsenkstempel gleichzeitig als Niederhalter. Das Blechpaket wird auf die Matrize gelegt, der Einsenkstempel fährt an und durchsetzt die Bleche bis zum Anschlag am Stauchstempel.

Wie auch bei den vorherigen Verfahren bleibt hierbei die Blechstärke nahezu gleich bis im darauffolgenden Schritt die Matrize zurückgezogen und durch Breiten eine form- und kraftschlüssige Verbindung erzeugt wird. (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)

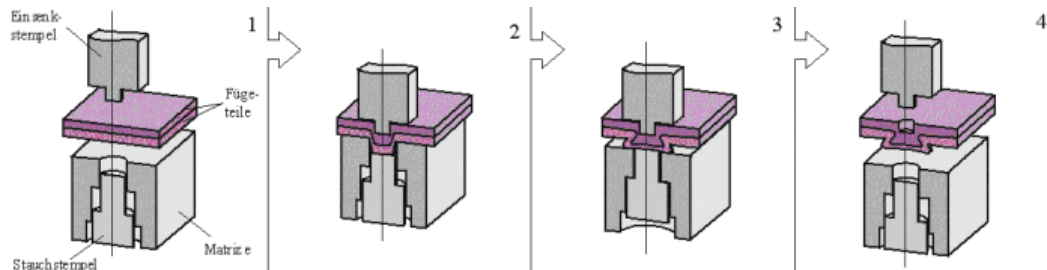


Abbildung 17 Mehrstufige Clinchverbindung ohne Schneidanteil (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)

Beim mehrstufigen Clinchen mit Schneidanteil werden die Bleche im ersten Schritt wie in Abbildung 18 dargestellt zwischen Gegenhalter bzw. Schneidstempel und Schneidmatrize geklemmt. Die Schneidmatrize bewirkt durch eine Abwärtsbewegung im zweiten Schritt das Durchsetzen und Einschneiden der Bleche. Die Blechstärke ändert sich hierbei kaum. Im dritten Schritt fährt die Schneidmatrize hoch und der Stauchstempel bewirkt durch seine Abwärtsbewegung das Breiten des Steges. Durch das Fließen der Bleche wird eine kraft- und form-schlüssige Verbindung hergestellt. (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)

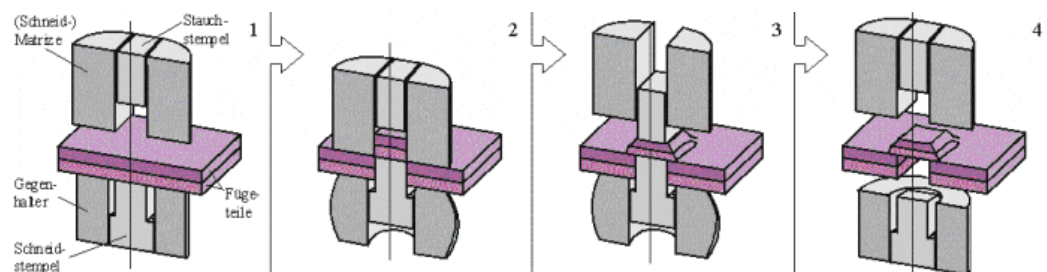


Abbildung 18 Mehrstufige Clinchverbindung mit Schneidanteil (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)

Im Automobilbau kommen größtenteils nicht schneidende runde Clinchverbindungen zum Einsatz. Grund hierfür ist das äußere Erscheinungsbild und die Dichtheit der Verbindung. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Dauerfestigkeit, welche im Gegensatz zu schneidenden Verbindungen aufgrund der geringeren Kerbwirkung erreicht werden kann. Bei den nicht schneidenden Verfahren müssen höhere Fügekräfte als bei den schneidenden Verfahren erwartet werden. Aufgrund dessen müssen kleinere Toleranzen bei der Werkzeugausrichtung eingehalten werden. (Mende 2006)

2.4 Hybridfügen

Seit geraumer Zeit wird die Kombination verschiedener Fügeverfahren, das Hybridfügen, immer häufiger angewandt. Die Vorteile der einzelnen Verfahren merzen hierbei die Nachteile des jeweilig anderen aus. Diese Verfahren sind vor allem beim Schweißen und beim mechanischen Fügen anzutreffen.

Die Kombination von Kleben mit einem anschließenden punktförmigen Fügeverfahren ist häufig im modernen Karosseriebau und anderen Leichtbaubereichen anzutreffen. Die wichtigsten Vertreter aus dieser Gruppe sind das Nietkleben, das Clinchkleben und das Punktschweißkleben, welche im Folgenden näher beschrieben werden sollen. Es werden für diese Art von Verbindungen drei Verfahrensvarianten unterschieden, welche in Abbildung 19 dargestellt sind.

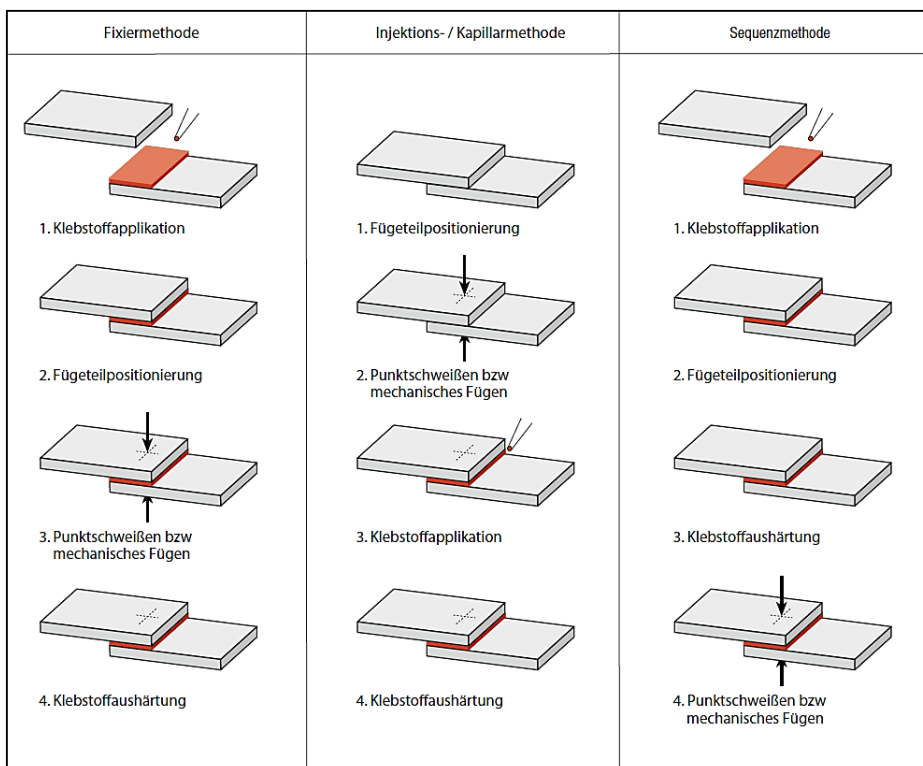


Abbildung 19 Verfahrensvarianten beim Hybridfügen (Fachjournal Adhäsion 2013)

Die in der Industrie vorwiegend eingesetzte Methode ist die Fixiermethode, da bei ihr kurze Taktzeiten möglich sind und der Klebstoff die maximal mögliche Fläche benetzt. Bei der Kapillarmethode kann, um möglichst viel Fläche zu benetzen, nur niedrigviskoser Klebstoff eingesetzt werden, weshalb die Handhabung der Bauteile nach der Klebstoffapplikation schwierig ist. Trotz des niedrigviskosen Klebstoffs kann nicht die ganze Fügefläche benetzt werden, da die Fügestelle dies verhindert. Bei der Sequenzmethode besteht die Gefahr, dass der ausgehärtete Klebstoff aufgrund der nachfolgenden Fügeoperation örtlich geschädigt wird und die Verbindung folglich fehlerhaft ist. Des Weiteren kann die Sequenzmethode aufgrund der Widerstandserhöhung durch die Klebstoffschicht nicht für das Punktschweißen eingesetzt werden. (Fachjournal Adhäsion 2013)

Die Anwendung dieser Fügetechnologien bringt einige Vorteile mit sich. Die Klebstoffschicht isoliert die Fügepartner voneinander und beugt so einer möglichen Kontaktkorrosion vor. Beim Einsatz von mechanischen Fügeverfahren müssen die Verbindungselemente jedoch trotzdem durch geeignete Beschichtungen von den zu Fügenden Blechen getrennt werden, um eine Potentialdifferenz zwischen Fügeelement und Blech zu gewährleisten. Durch die Klebstoffschicht werden die mechanischen Eigenschaften wie Schwingfestigkeit und Verbindungssteifigkeit deutlich verbessert. Auch das Energieaufnahmepotential der Verbindung steigt, was einem plötzlichen Versagen bei schlagartiger Belastung entgegenwirkt. Zusätzlich wird die Klebeschicht bei Schälbelastung oder langzeitiger statischer Last durch den Fügepunkt entlastet. Nachteilig wirken sich der deutliche Mehraufwand zum Reinigen der Oberflächen und die höheren Kosten für den Klebstoff und die Vor- und Nachbereitung aus. Eine mögliche Verschmutzung von Werkzeugen und Bauteilen durch austretenden Klebstoff während des mechanischen Fügens stellt ein weiteres Problem dar. (Fachjournal Adhäsion 2013)

Punktschweißkleben ist ein häufig anzutreffendes Verfahren in der Automobilindustrie und daher viel erprobt. Es kann überall dort zum Einsatz kommen, wo normalerweise das elementare Punktschweißen zum Einsatz kommen würde und mit erhöhten Belastungen zu rechnen ist. Die Prozessparameter wie Schweißstromstärke, Elektrodenkraft und Schweißzeit müssen aber aufgrund der isolierenden Wirkung des Klebstoffs angepasst werden. Die Klebstoffwahl ist bei diesem Verfahren von besonderer Bedeutung. Die konträren Forderungen nach guter Verarbeitbarkeit (geringe Viskosität) und hoher Auswaschbeständigkeit (hohe Viskosität) müssen je nach Anwendungsfall abgewogen und ein Kompromiss gefunden werden. Wichtig bei der Herstellung einer Punktschweißklebeverbindung ist eine ausreichende Abkühlzeit zwischen der Herstellung der einzelnen Schweißpunkte, da viele Klebstoffe bei zu hoher Temperatur zum Entflammen neigen. Die Vorteile hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften sind in Abbildung 20 abgebildet. (Fachjournal Adhäsion 2013)

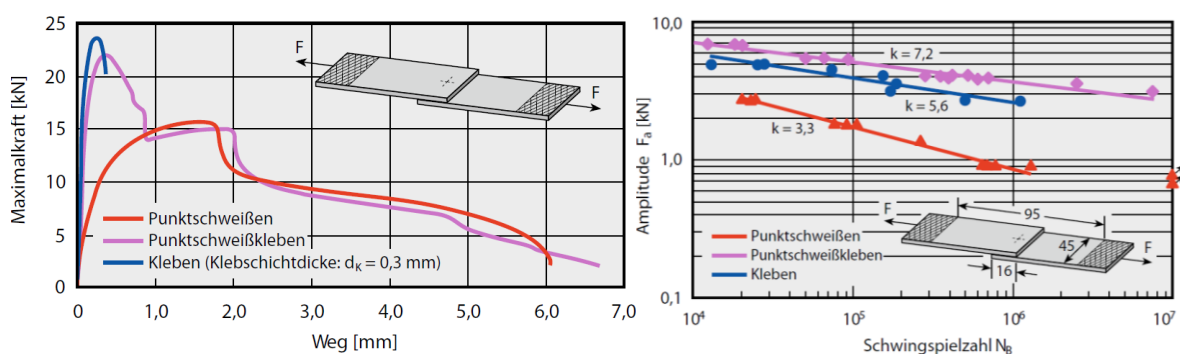


Abbildung 20 Vergleich der mechanischen Eigenschaften (Fachjournal Adhäsion 2013)

Das Nietkleben kommt zum Einsatz, wenn die zu fügenden Teile verzugempfindlich sind oder unterschiedliche Werkstoffe verbunden werden sollen. In Abbildung 21 sind die Arbeitsschritte zur Herstellung einer Hybridfügestelle mittels Fixiermethode dargestellt. Im ersten Schritt wird der Klebstoff auf die vorbereitete Oberfläche aufgetragen. Danach wird in Schritt 2 der Fügepartner auf den Klebstoff gesetzt und in Schritt 3 der mechanische Fügevorgang durchgeführt.

Durch den Niet, der in diesem Beispiel eingebracht wird, kann der Klebstoff unter konstanter Kraft aushärten und die Verbindung erreicht bessere mechanische Eigenschaften (siehe Abbildung 22). Wichtig bei diesem Prozess ist das Austreten des Klebstoffs während des Nietens zu verhindern, um eine Verschmutzung der Werkzeuge zu vermeiden. (Fachjournal Adhäsion 2013)

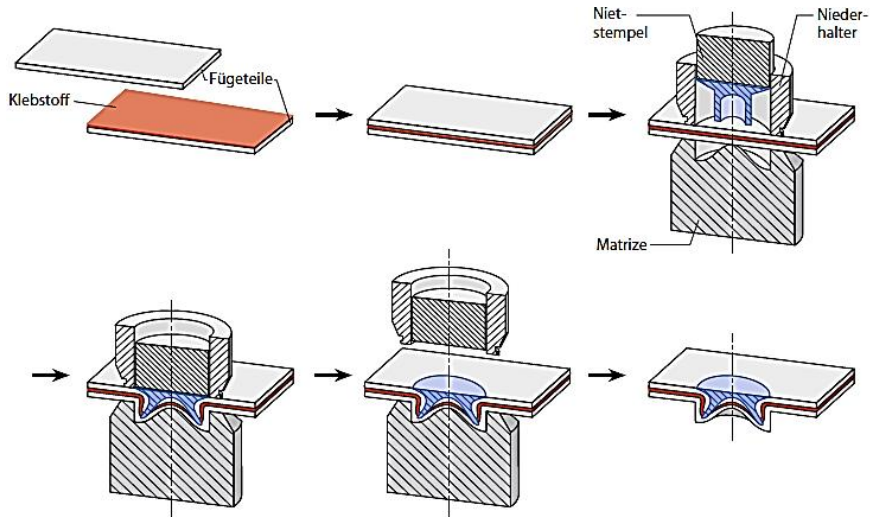


Abbildung 21 Herstellung einer Hybridverbindung (Stahl-Informations-Zentrum)

Der Vergleich zwischen einer elementaren Nietverbindung und einer Hybrid-Fügestelle zeigt die Verbesserung der Verbindungsfestigkeit einer Stanznietverbindung zwischen einem DP600 Stahlblech mit 1 mm Blechstärke und einem AlMg4,5Mn Aluminiumblech mit 1,5 mm Wandstärke durch Einsatz von Betamate 1496 Klebstoff. In Abbildung 22 wird die qualitative Verbesserung der Eigenschaften gezeigt. (TU Dresden)

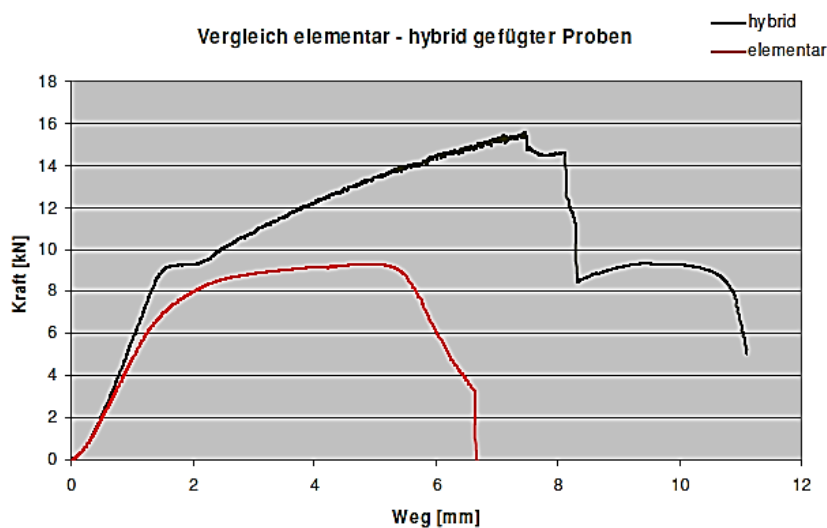


Abbildung 22 Vergleich Hybrid- und Elementar-Fügeverfahren (TU Dresden)

Auch Clinchverbindungen können durch das Aufbringen einer Klebstoffschicht höhere Festigkeiten erreichen. In Abbildung 23 ist der Prozessablauf beim Clinchkleben mittels Fixiermethode dargestellt. Auch bei dieser Art der Fügeverbindung ist es wichtig, dass die Fügepartner vor dem Verkleben entsprechend gereinigt werden und während des Fügeprozesses eine Verunreinigung der Werkzeuge bzw. der Maschine vermieden wird. Aufgrund dieser Anforderungen ist es von Vorteil einen Prozess ohne Schneidanteil und einen pastösen Klebstoff zu verwenden. Die Form der Werkzeuge in Kombination mit dem verwendeten Klebstoff ist wie auch beim Nietkleben für ein optimales Tragverhalten maßgeblich. (Stahl-Informations-Zentrum)

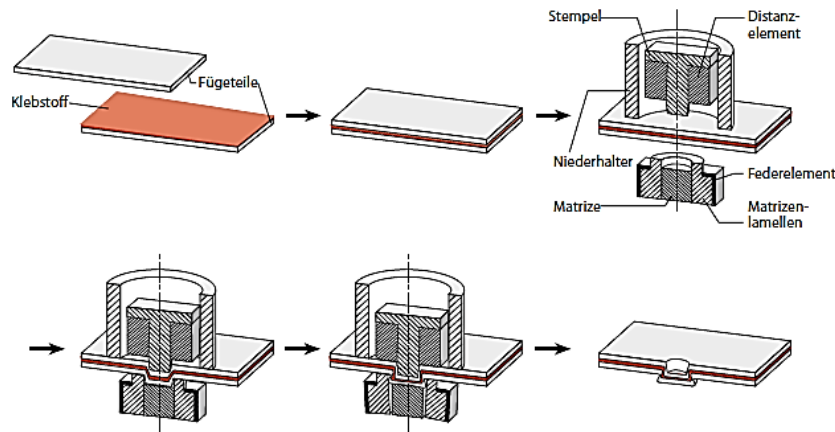


Abbildung 23 Verfahrensablauf beim Clinchkleben (Stahl-Informations-Zentrum)

Generell sind die mechanischen Kennwerte und das Tragverhalten der drei angeführten Verfahren sehr ähnlich, da die Klebeverbindung die dominierende Verbindung ist. Dieser Effekt kommt in Abbildung 24 sehr gut zur Geltung. Hierbei werden Clinchkleben, Stanznietkleben und Schraubkleben mit den elementaren Verfahren verglichen. Interessant hierbei ist, dass die Maximalkraft, die beim elementaren Kleben erreicht werden kann bei keinem Hybridverfahren erreicht wird. Dies ist auf die Schädigung der Klebfläche durch das Fügelement zurückzuführen.

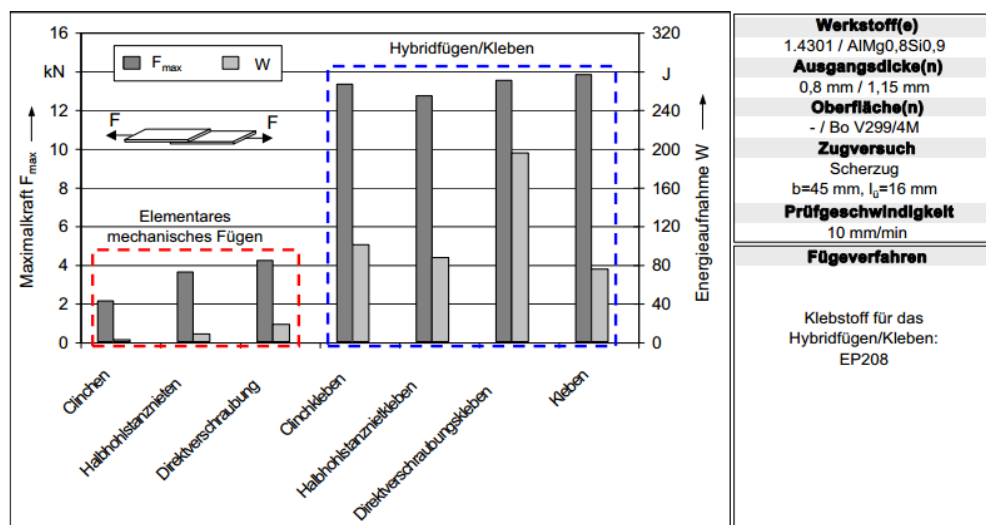


Abbildung 24 Vergleich Elementarer- mit Hybrid-Verbindungen (Disse et al. 2004)

Ein weiteres neuartiges Hybridfügeverfahren verbindet das Halbhohlstanznieten mit dem Widerstandspunktschweißen indem nach dem Setzvorgang ein Stromimpuls über die Fügestelle fließt. Hierbei kommen spezielle Elektroden zum Einsatz, die der Nietkopfform und der Schließkopfform angepasst sind. Der Strom wandert von der oberen Elektrode über das stempelseitige Blech, den Niet und schlussendlich über den Schließkopf zur unteren Elektrode. Dieses Verfahren ist nur bei gewissen Materialpaarungen anwendbar wie zum Beispiel AA6061 Aluminium und DP590 Stahl in Abbildung 25, wobei vor allem das Nietmaterial und das Blechmaterial matrizenseitig von Bedeutung sind. (Lou et al. 2014)

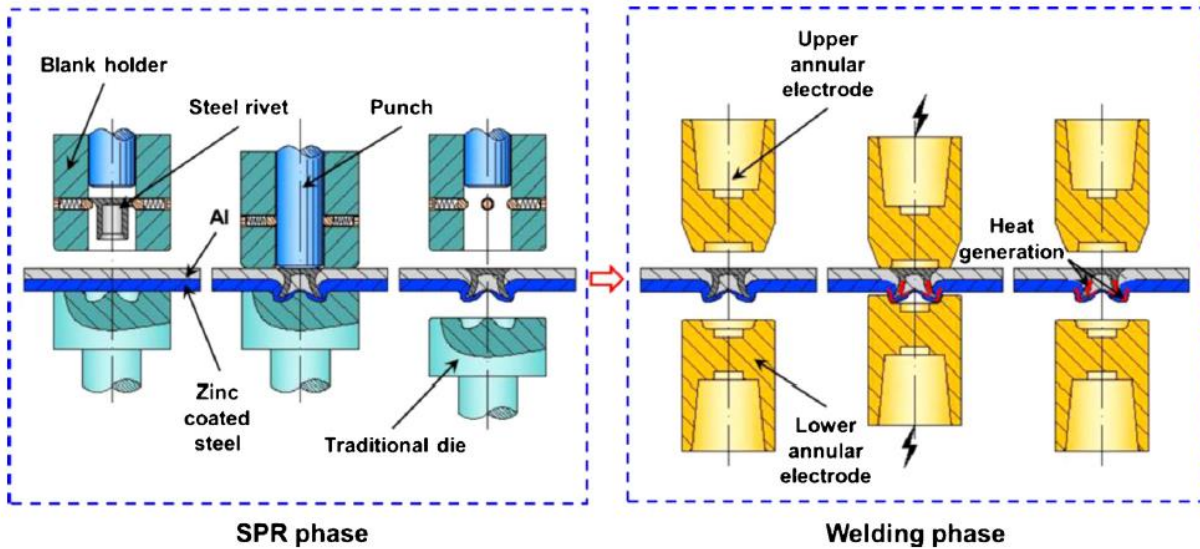


Abbildung 25 Stanznieten mit nachfolgendem Widerstandsschweißprozess (Lou et al. 2014)

Durch den Stromimpuls erfolgt aufgrund des elektrischen Widerstandes eine Temperaturerhöhung in der Fügezone und die Gefüge der Fügepartner verändern sich. Diese Gefügeänderungen haben bei geeigneten Materialien einen Anstieg der Mikrohärtigkeit und folglich auch der mechanischen Kennwerte zur Folge. Bei dieser Art von Hybridverbindung sind die mechanischen Eigenschaften stark von der Aufheizdauer abhängig. Je nachdem welche Materialien zum Einsatz kommen, kann der Wärmeeintrag durch den Widerstand auch zur Verschlechterung der Verbindung führen, weshalb dieses Verfahren bis heute noch in der experimentellen Phase ist. (Lou et al. 2014)

2.5 Messequipment

Die Aussagekraft von wissenschaftlichen Untersuchungen ist maßgeblich von der gewählten Messausrüstung abhängig. Um Fehlerquellen und schwer kalkulierbare Einflüsse zu umgehen, ist es von Vorteil, die zu messende Größe möglichst direkt zu erfassen. Die Berechnung der benötigten Größen in Abhängigkeit von anderen Messgrößen ist immer mit Fehlern behaftet und kann dazu führen, dass geringe Abweichungen aufgrund der Messungenauigkeit falsch interpretiert oder gar nicht wahrgenommen werden. Dies liegt vor allem daran, dass sich physikalische Gesetzmäßigkeiten nicht immer eins zu eins auf andere Messgrößen umrechnen lassen. Die Vorbereitungen für eine Messung müssen mit größter Sorgfalt erfolgen, da durch falschen Einbau bzw. Aufbau der Messgeräte Fehler in das System eingebracht werden können, welche alle Ergebnisse unbrauchbar machen würden.

Um den Ablauf während des Nietens genau beschreiben zu können, ist es nötig, die tatsächliche wirkende Kraft auf die Matrize und den zurückgelegten Weg des Stempels zu kennen. Die ermittelten Kraft-Weg-Kurven bilden später die Basis für Simulationen und können mit den mechanischen Eigenschaften der Verbindung in Korrelation gebracht werden.

Kraftmessung:

Die Kenntnis über die tatsächlich wirkenden Kräfte ist für viele technische Prozesse unerlässlich. Für deren Messung gibt es einige verschiedene Ansätze, welche abhängig von Einsatzgebiet und Größenordnung der zu erwartenden Kräfte angewandt werden. Die gängigsten Methoden sind das Aufbringen von Dehnmessstreifen oder der Einbau von Kraftmessdosen.

Bei Dehnmessstreifen (DMS) wird eine Änderung des elektrischen Widerstands gemessen, wenn diese durch die elastischen Dehnungen beim Einwirken von Kräften verformt werden. Mittels geeigneter Algorithmen kann die Widerstandsänderung in eine Kraftänderung umgerechnet werden. Wichtig beim DMS sind die korrekte Vorbereitung der Messstelle und die korrekte Applikation des DMS. Auch Störgrößen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Kriechen, Hysterese und viele mehr müssen in der Messung berücksichtigt werden und gegebenenfalls muss das Messergebnis korrigiert werden. DMS gibt es in verschiedenen Bauformen wie z.B. Folien-DMS, Draht-DMS und Halbleiter-DMS und in unterschiedlichen Anordnungen wie Vollbrücken-DMS oder Rosetten-DMS. Es werden auch DMS hergestellt die Kräften in mehrere Richtungen messen können. (Untersweg 1999)

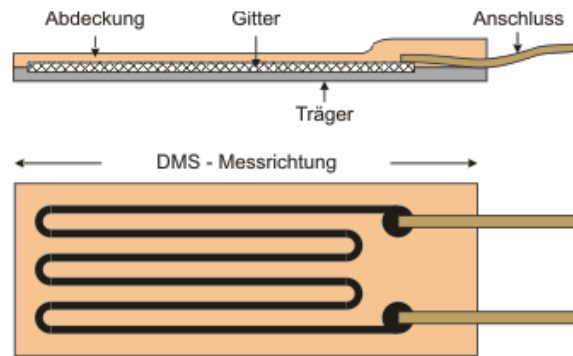


Abbildung 26 DMS Aufbau (Disynet 2016)

Kraftmessdosen werden in verschiedensten Ausführungen angeboten. Ihre Funktionsweise ist für den jeweiligen Anwendungszweck optimiert und so kommen sowohl DMS als auch piezoelektrische Elemente zum Einsatz. Je nach Bauart unterscheidet man in Druckmessdosen, Balkenmessdosen, Ringmessdosen, S-förmige Messdosen und Sonderbauformen. Im Normalfall kann eine Kraftmessdose nur Druckkräfte aufnehmen. Es gibt jedoch auch Bauformen, wo durch eine spezielle Konstruktion sowohl Druck- als auch Zug-Kräfte aufgenommen werden können. (Untersweg 1999)

Bei piezoelektrischen Systemen werden die Eigenschaften von Quarzkristallen genutzt, welche bei mechanischer Belastung eine Spannung aufbauen. Diese Spannung kann wiederum gemessen und in eine Kraft umgerechnet werden. Um Kräfte in verschiedene Richtungen aufnehmen zu können, kann man mehrere Quarzscheiben mit unterschiedlicher Kristallorientierung zu einem System zusammenpacken. Jede Scheibe hat ihren eigenen Anschluss und aufgrund der Orientierung der Kristalle sprechen je nach Krafrichtung unterschiedliche Scheiben stärker oder schwächer an. Weitere Möglichkeiten um Kräfte zu messen sind Magnetoelastische Kraftaufnahmen oder Induktive Kraftaufnahmen. Diese werden allerdings nur für Spezialfälle verwendet und werden daher nicht näher beschrieben. (Untersweg 1999)

Wegmessung:

Die genaue Erfassung von Positionen spielt gleich wie die Krafterfassung eine elementare Bedeutung in maschinenbaulichen Anwendungen. In der Baubranche wird die Wegmessung häufig verwendet, um die Überlastung von Anlagen wie Kräne oder Bagger zu realisieren. In geschlossenen Systemen wie Fertigungshallen oder Laboren dient sie hauptsächlich der Prozessüberwachung und als Steuerungs- bzw. Regelungs-Parameter. Da die Anwendungen wie beschrieben sehr unterschiedlich sind, gibt es auch eine Vielzahl von Wegmesssystemen, welche sich für unterschiedlichen Anwendungen bewährt haben.

Grundsätzlich kann man Wegsensoren in zwei Kategorien unterteilen. Berührende Wegsensoren sind über Kopplungselemente mit dem zu vermessenden Objekt verbunden, während berührungslose Wegsensoren den Weg durch Änderungen von elektromagnetischen Eigenschaften messen. (Untersweg 1999)

Zu den Berührenden Wegsensoren gehören Linear- und Rotations-Potentiometer welche durch einen Schleifkontakt bei Wegänderungen den Widerstand verändern. Diese haben den Nachteil, dass sie mit der Zeit verschleifen und dass sie empfindlich auf schnelle Positionswechsel reagieren. Potentiometer müssen daher zu Wartungszwecken von außen zugänglich sein. Die Vorteile von Potentiometern sind ihr einfacher Aufbau und der vergleichsweise geringe Preis. (Untersweg 1999)

Die gängigsten berührungslosen Wegsensoren arbeiten entweder mit Laserabstandsmessung, optischer Abstandsmessung mittels Codierung, induktiver Wegbestimmung durch Veränderung der Impedanz einer Spule beim Eintauchen eines Eisenkerns oder kapazitiver Wegmessung durch Änderung der Kapazität eines Kondensators, wenn die Kondensatorplatten aufeinander zu oder voneinander weg bewegt werden. Der Einsatz der jeweiligen Technologie ist vor allem von der Umgebung und dem Werkstoff des Messobjekts abhängig. (Untersweg 1999)

In schmutziger Umgebung ist eine optische oder Laser-basierte Abstandsmessung kaum zu realisieren, dasselbe gilt bei spiegelnden Oberflächen.

Eine Induktive Abstandsmessung kann in nahezu jeder Umgebung eingesetzt werden, allerdings sind ihr bei schwankenden magnetischen Eigenschaften der Materialien Grenzen gesetzt. Dieses Problem hat die kapazitive Wegmessung nicht. Auch schwankende oder stark unterschiedliche Eigenschaften der Materialien spielen bei ihr fast keine Rolle. (Untersweg 1999)

Bei den digitalen Wegmesssystemen muss man zwischen inkrementellen und absoluten Messen unterscheiden. Die Codelineale können mechanisch oder optisch abgetastet werden. Beim inkrementellen Messen sind die Abstände zwischen den Markierungen immer gleich, deshalb ist nur ein relativer Weg messbar. Beim absoluten Messen wird durch Codierung des Maßstabs und Anfahren eines Referenzpunktes zu Anfang der Messung ein Nullpunkt definiert, von dem aus alle Messungen ausgehen. So kann man absolute Messwerte erhalten, die alle einen gemeinsamen Referenzpunkt als Nullpunkt besitzen. (Untersweg 1999)

Mess-Hardware und -Software:

Neben den schon erwähnten Messsensoren benötigt man zur Auswertung der Signale geeignete Hardware zur Messsignalaufbereitung und Software zur Auswertung. Die Hardware muss die nötigen Schnittstellen für die vorhandenen Sensoren bereitstellen und mit der Messsoftware am PC kommunizieren können. Für diese Aufgaben gibt es kombinierte Systeme aus Hard- und Software, welche für gewisse Sensoren vorkonfiguriert und sonst komplett frei programmierbar sind. Wichtige Eigenschaften für die Hardware sind Echtzeitfähigkeit, modularer Aufbau, hohe Abstraten und ein robuster Aufbau. Softwaretechnisch ist vor allem auf eine schnelle Datenverarbeitung und eine gute grafische Darstellung Wert zu legen, da nur so stark ändernde Signale erfasst und dargestellt werden können. Die Performance der Software ist natürlich auch maßgeblich von der Leistung des PCs und der verwendeten Datenschnittstelle abhängig.

3 Aufgabenstellung

Das Materialverhalten von Niet und Blechpaket beim Halbhohlstanznieten zu beschreiben ist zurzeit nur mit idealisierten Computermodellen möglich. Da in der Realität aber sowohl Geometrien von der Sollgeometrie abweichen sowie unkalkulierbare Einflüsse wie Steifigkeitseinflüsse, Einstellfehler oder Inhomogenitäten auftreten, kann das Nietergebnis deutlich von den Simulationsergebnissen abweichen. Ziel der Arbeit ist es mit Hilfe der Techniken der statistischen Versuchsplanung eine Analyse des Prozesses möglich zu machen und wichtige Erkenntnisse für Simulation und Fertigung zu gewinnen. Diese Erkenntnisse sollen zur Verbesserung des Simulationsmodells beitragen und Versagenskriterien für die untersuchte Verbindung ergeben. Des Weiteren sollen durch die statistische Versuchsplanung die Einflüsse der einzelnen variierten Parameter und deren Bedeutung für den Fügepunkt aufgezeigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine, für die Fertigung freigegebene Verbindung untersucht, mit der alle Versuche und Tests durchgeführt werden und die als Referenz für spätere Simulationen dienen soll. Um einheitliche und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde vom Projektpartner eine hausintern standardisierte Probe (KS2 Probe) konstruiert, mit der alle Versuche durchgeführt werden. Der zu untersuchende Werkstoff ist TL091, welcher zur 6000er Familie der Aluminiumlegierungen zählt. Zusätzlich zu den KS2 Proben werden einige Flachproben zur Anfertigung von Schliffbildern hergestellt. Diese dienen zur Untersuchung der verbindungsspezifischen Maße, welche für die mechanischen Eigenschaften maßgeblich sind und zur Überprüfung der Koaxialität von Niet und Matrize.

Die für die statistische Analyse und Simulation benötigten Daten müssen von einem geeigneten Messsystem erfasst und aufbereitet werden. Die entscheidenden Messgrößen sind hierbei die Fügekraft und der Kolbenweg des Hydraulikzylinders. Um Fehler in der Messkette zu vermeiden ist es von Vorteil die Größen so nah wie möglich an der auftretenden Stelle zu messen. So können Leitungsverluste oder auch Reibungseinflüsse, welche das Signal verfälschen würden minimiert werden. In diesem speziellen Fall bietet es sich an, die Kraft an der Matrize zu messen. Hierfür wird eine Aufnahme konstruiert, welche die Kraft möglichst zentral und querkraftfrei in eine Kraftmessdose einleitet. Das Wegsignal wird von dem, im Hydraulikzylinder eingebauten Wegsensor abgegriffen und mittels der in der Nietsteuerung eingebauten Wegmessung validiert. Beide Sensoren müssen mit der richtigen Messschaltung an den geeigneten Schnittstellen an die Messhardware angeschlossen werden. In der Software werden hierfür Eingänge konfiguriert, in denen sowohl ein Filter verwendet, als auch die Charakteristik der Sensoren hinterlegt wird. Schließlich werden Grafiken erzeugt, die den Verlauf der Messgrößen über der Zeit und den Kraft-Weg-Verlauf während des Nietvorganges darstellen.

Die für die KS2 Proben benötigten Blechstreifen werden aus Aluminiumblechtafeln geschnitten, wobei ein Teil der Streifen für die statistische Versuchsplanung in einer Zugprüfmaschine vorgedehnt werden muss. Die fertigen Blechstreifen werden anschließend auf die Probenmaße zugeschnitten und für das Biegen zu U-förmigen Halbproben vorbereitet. Hierfür müssen alle Proben gereinigt, entgratet, vermessen und nummeriert werden.

Da die Probenabmessungen relativ klein sind und die geforderten Toleranzen mit Standardwerkzeugen nicht eingehalten werden könnten, muss ein Biegewerkzeug entworfen werden, welches die geforderte Geometrie der U-Halbproben in einem Schritt herstellen kann. Neben der Genauigkeit des Werkzeugs ist auch eine schnelle und einfache Bedienung dessen gewünscht, um eine große Anzahl an Proben in geringer Zeit herstellen zu können. Um die fertigen KS2 Proben an der Prüfmaschine aufzunehmen, werden zwei passgenaue Bohrungen gefertigt. Der Prüfling wird mittels zwei Schulterpassschrauben, welche ihn spielfrei mit der Probenaufnahme verbindet aufgenommen. Es besteht daher die Forderung die Bohrung beider Schenkel in einem Schritt zu fertigen. Für die Herstellung der Bohrungen muss eine Bohrvorrichtung konstruiert und gebaut werden, welche die genannten Anforderungen erfüllt und mit Hilfe derer Proben in geringen Taktzeit hergestellt werden können.

Für die Erstellung der DoE Matrix werden die relevanten Parameter und Variationsstufen in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner festgelegt. Auf Basis der erarbeiteten Vorgaben und den Forderungen, die sich aus der DoE an die statistische Signifikanz ergeben, wird eine geeignete Versuchsmatrix erstellt. Anhand der Matrix werden Proben für die Kopfzug- und Scherzug-Prüfung sowie Schliffproben für eine Sensibilitätsanalyse der Parameter hergestellt. Die benötigten Aufnahmen für die zerstörende Prüfung werden ebenfalls im Zuge der Arbeit entworfen und gefertigt. Aus der Vielzahl an den in den KS2 Versuchen generierten Daten erfolgt mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung eine Bewertung der Einflussfaktoren. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern und den Ausgangsgrößen werden ebenfalls in der Auswertung der DoE aufgezeigt. Die Prozessstabilität wird mit den Daten aus der statistischen Auswertung bewertet und die Bedeutung dieser für weitere Untersuchungen ausgearbeitet. In den Schliffbildern wird die korrekte Einstellung der Maschine nachgewiesen und die charakteristischen Maße der Nietverbindungen erfasst.

Mit der Abarbeitung der Arbeitspakete wird das Ziel verfolgt, eine Methodenplanung für eine erfolgreiche Fertigung, Prüfung und Bewertung von Stanznietverbindungen zu erarbeiten. Die gefertigten Werkzeuge werden in zukünftigen Projekten zur Produktion von standardisierten KS2 Proben dienen. Die Setzkraftüberwachung wird für die Validierung von Simulationsmodellen und im Zuge der Prozessüberwachung für den Nachweis eines gültigen Setzprozesses eingesetzt werden. Die in der Prüfung ermittelten Kraft-Weg-Kurven werden nicht nur zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte, sondern auch zur Validierung des virtuellen Prüfmodells verwendet werden. Es wird somit eine standardisierte Vorgehensweise zur Charakterisierung von Stanznietverbindungen entwickelt, die so in zukünftigen Untersuchungen zur Anwendung kommen wird.

4 Aufbau der Nietanlage

Die Anlage besteht aus den zwei großen Baugruppen Nietzange und Nietsteuerung. In der Nietsteuerung ist sowohl die elektronische Steuerung der Anlage mit dazugehörigem Steuerpult, als auch das Hydraulikaggregat untergebracht. Die Nietzange besteht aus der „C“ förmigen Zange und dem Hydraulikzylinder. Die beiden Systeme sind über Sensorkabel und Hydraulikleitungen miteinander verbunden.

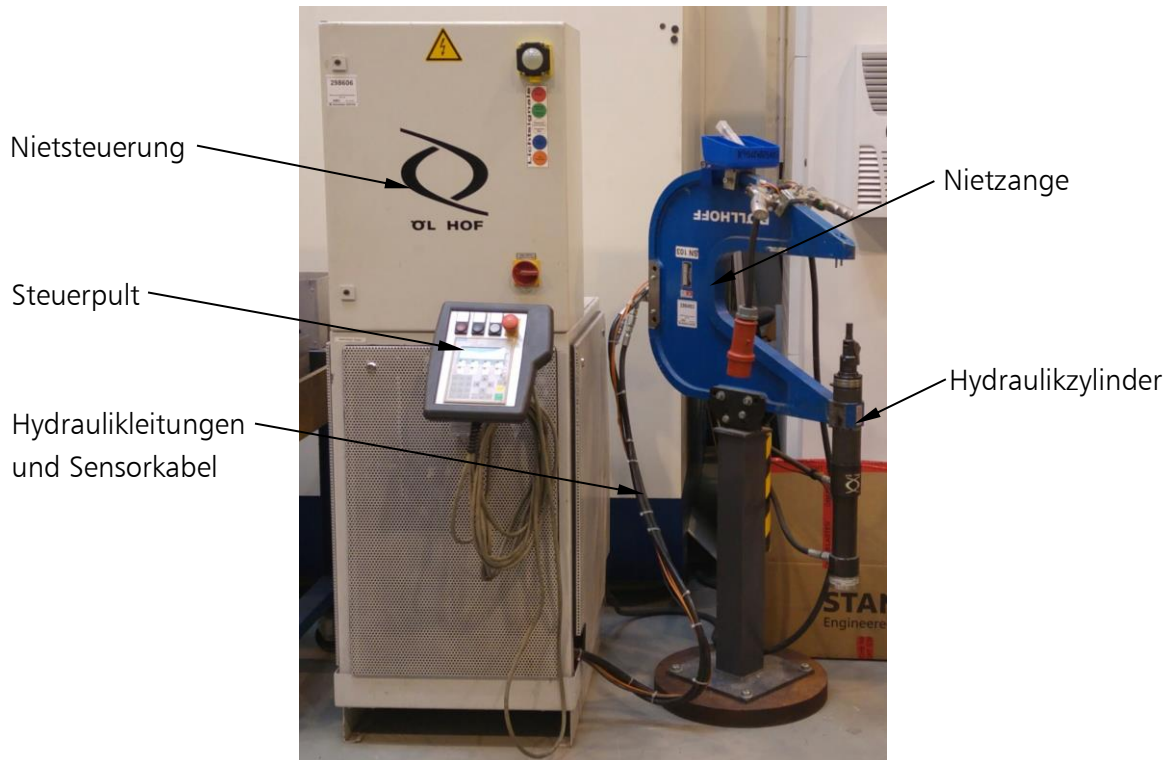


Abbildung 27 Stanznietanlage

4.1 Nietzange

Das C-Gestell ist aus massivem Stahl gefertigt und wurde mit dem Fokus auf maximale Steifigkeit konstruiert. Um den Kolben des Hydraulikzylinders relativ zur Aufnahme der Matrize ausrichten zu können, gibt es in der Bohrung des C-Gestells zwei exzentrische Hülsen. Diese weisen jeweils eine Exzentrizität von 0,5 mm zur Bohrungsmittelachse auf. Durch Verdrehen der Hülsen gegeneinander ist es möglich die Position von Zylinderachse und Matrizenmittelsachse zueinander auszurichten. Die Flucht dieser Achsen ist in großem Maße für die Qualität der gesetzten Nietverbindung verantwortlich.

Der Hydraulikzylinder besitzt zwei, ineinander verschiebbare Kolben, die abhängig von den vorher eingestellten Parametern unterschiedlich weit ausfahren. Der äußere Kolben dient als Niederhalter und fixiert die zuvor eingelegten Bleche bevor der zweite Kolben, der als Stempel dient, den Niet in die Bleche einbringt. Die Wege der Kolben werden mit einem Sensor am unteren Ende des Hydraulikzylinders erfasst, an die Nietsteuerung gesendet und dort ausgewertet.

Der Sensor liefert ein Spannungssignal, welches von der die Nietsteuerung in ein Wegsignal umgerechnet wird und dann als Freigabebedingung für den Nietvorgang fungiert.

In der Steuerung kann ein Weg für die Materialkontrolle definiert werden, welcher laufend mit dem Sensorwert abgeglichen wird. Ist der Sensorwert beim Klemmen der Bleche nicht in einem davor definierten Fenster um den Materialkontrollwert, wird ein Fehler ausgegeben und der Nietvorgang gestoppt.

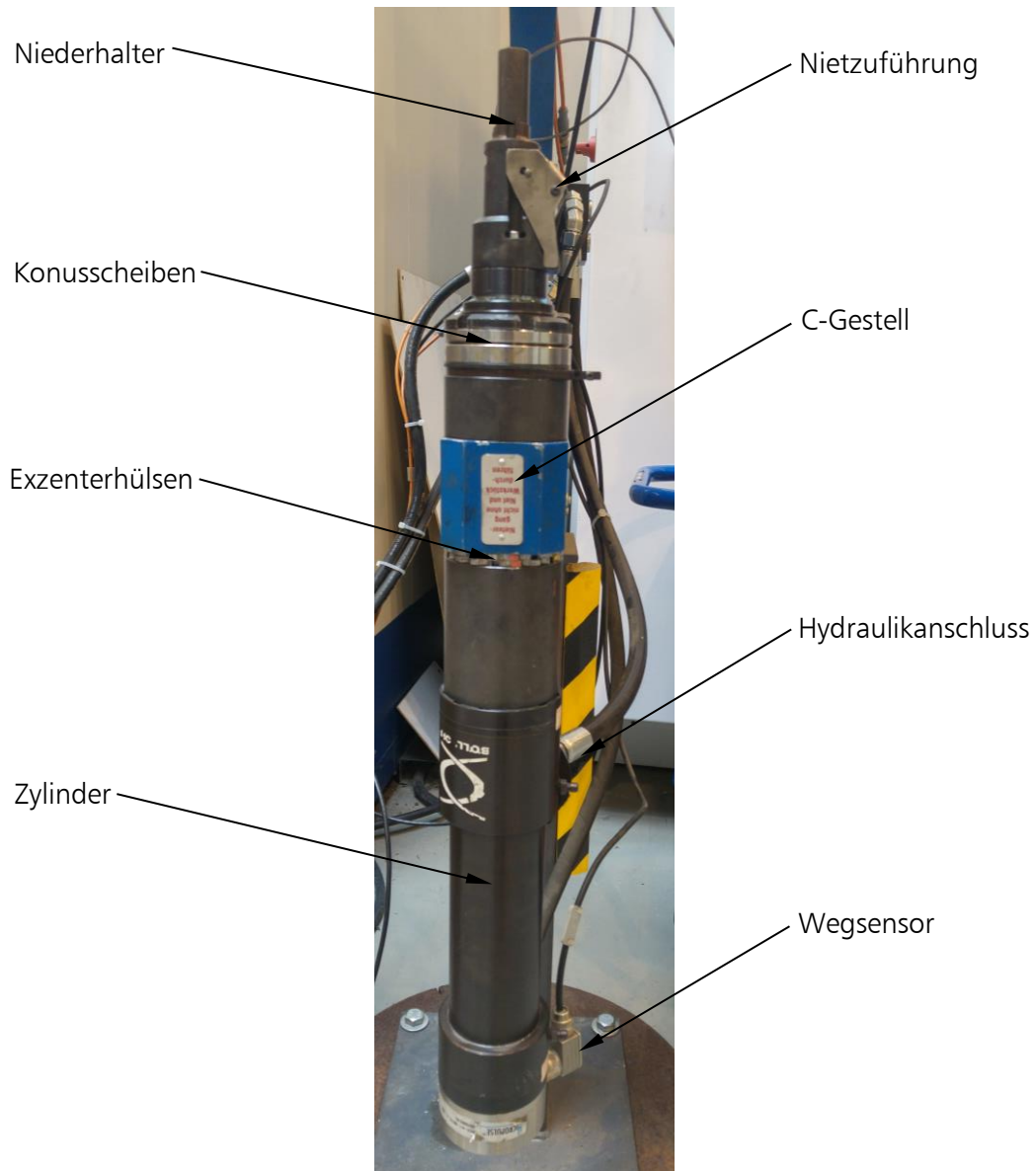


Abbildung 28 Aufbau Hydraulikzylinder

Liegt der Wert für den Zylinderweg im definierten Fenster, wird die Freigabe für das Nieten erteilt und der Stempel drückt den Niet in die zu fügenden Bleche. Die Nietzuführung kann einzeln durch manuelles Einlegen des Nietes in den Niederhalter oder wie in Abbildung 29 gezeigt mittels eines Magazinbandes, auf dem mehrere hundert Niete eingebettet sind erfolgen.

Im Falle des Nietens mit Magazinband wird das Band nach jedem gesetzten Niet automatisch von einem Mechanismus um eine Stelle weiterbewegt und der Nietprozess kann von vorne beginnen. Wenn ein anderer Niet verwendet werden soll, kommt ein Spezialwerkzeug zum Einsatz, mit dem man den Vorschubmechanismus lösen und das Band aus der Nietzuführung herausziehen kann.

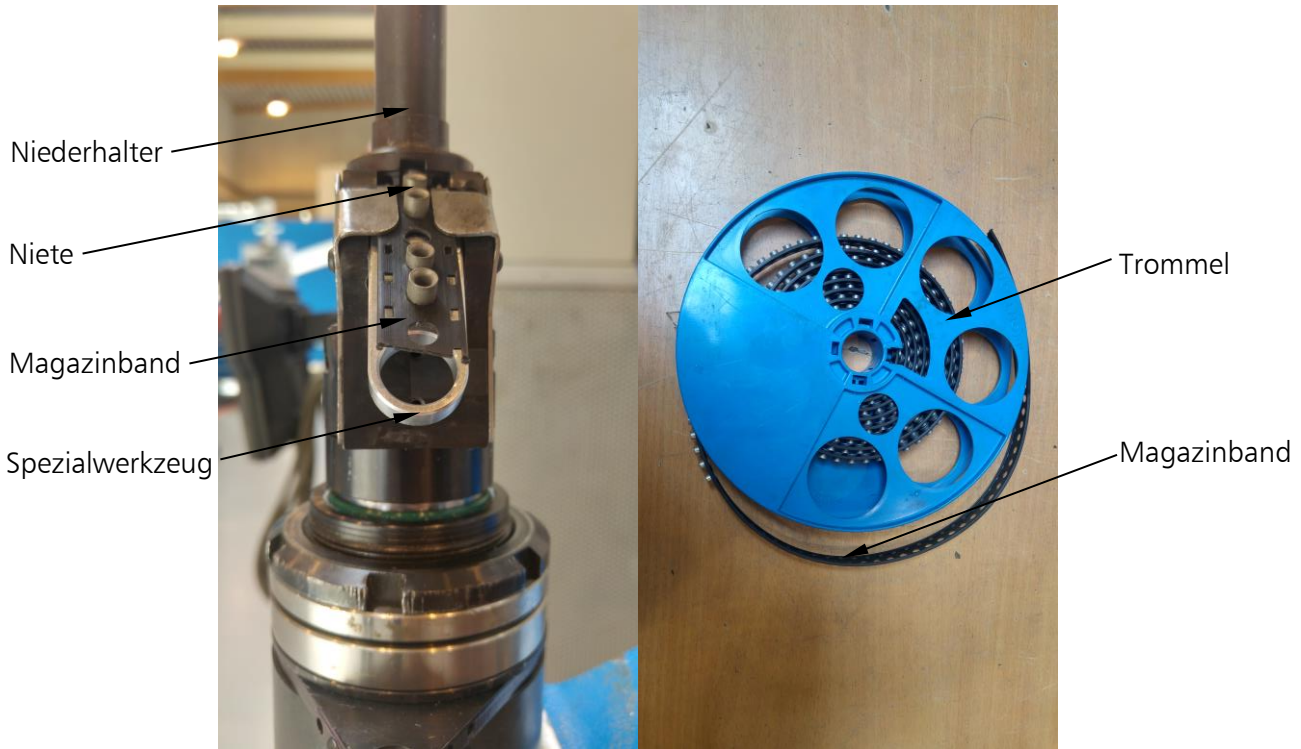


Abbildung 29 Nietzuführung und Bandmagazin

Im Niederhalter integriert ist eine dreiteilige Hülse, die an den verwendeten Nietdurchmesser angepasst ist. Diese Hülse sorgt für eine genaue Führung des Niets im Niederhalter, ist aber durch die Dreiteilige Ausführung trotzdem im Durchmesser begrenzt flexibel, da die Niete nicht zu sehr an der Hülse reiben oder sich verklemmen dürfen.

Aufgrund von Sicherheitsmaßnahmen sind an der Oberseite der Nietzange zwei Griffe angebracht. Jeder Griff besitzt zwei Tasten, wovon jeweils eine Taste zum Ausfahren und eine zum Einfahren des Hydraulikzylinders dienen. Die Tasten des linken und rechten Griiffs müssen gleichzeitig gedrückt werden, damit der Zylinder die Erlaubnis zum Verfahren erhält.

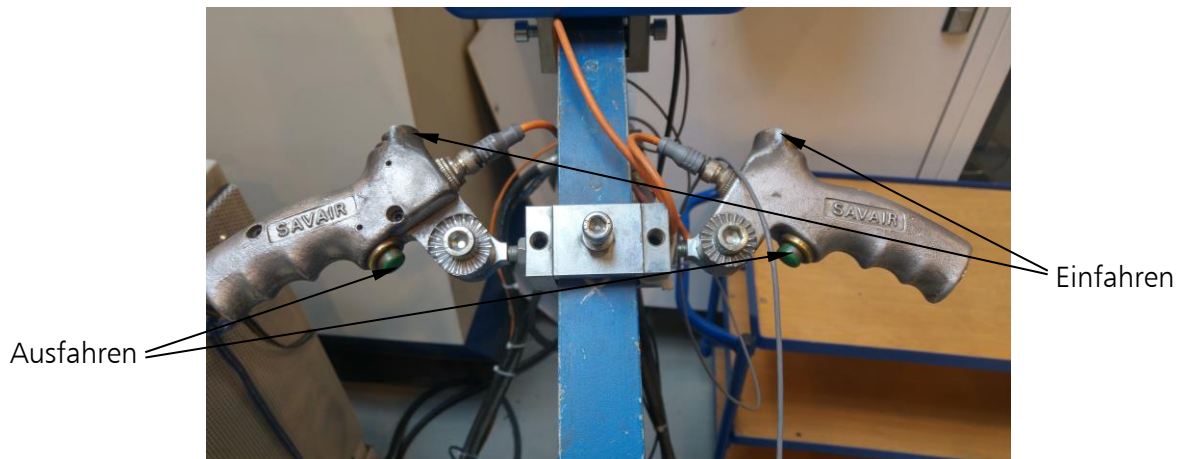


Abbildung 30 Betätigung

4.2 Nietsteuerung

Gesteuert wird die Anlage durch eine Simatic SPS, die die Informationen der Sensoren verarbeitet und den Nietprozess steuert. Die Information über den Kolbenweg kommt vom Wegsensor am Hydraulikzylinder. Der Druck wird mittels Drucksensor am Hydraulikaggregat gemessen und mit dem vorgegebenen Sollwert verglichen und in eine Setzkraft umgerechnet.

In der Steuereinheit wird kontrolliert, ob der Kolben die richtige Position angefahren hat und ob der Nietsetzdruck im vorgegebenen Fenster liegt. Je nach Ergebnis der Abfragen wird genietet oder ein Fehler ausgegeben. Schließlich wird das Nietergebnis in einem Speicher abgelegt. Das Steuerpult erlaubt es, auf die wichtigsten Parameter der Verbindungen Einfluss zu nehmen. Diese sind der Nietsetzdruck und der Verfah-Weg des Hydraulikzylinders. Des Weiteren kann durch Vorgeben von Prozessfenstern bei Weg und Kraft sichergestellt werden, dass die Verbindung den nötigen Anforderungen entspricht. Es ist auch möglich, automatisierte Programme ablaufen zu lassen und somit eine ganze Folge von Setzprozessen durchzuführen. Diese Funktion ist zwar für diese Arbeit nicht relevant, aber sehr wichtig für die Serienproduktion.

Normalerweise werden für eine bestimmte Verbindung die optimalen Parameter in Versuchen bestimmt und nicht mehr variiert. Aus diesem Grund hat es für die statistische Untersuchung keinen Sinn die Parameter in der Steuerung zu variieren. Die Ausnahme bildet hierbei der Setzdruck, der variiert werden soll, um den Einfluss des Druckes auf die Matrizenfüllung abzubilden. Die anderen Variablen werden von außen gesteuert, um der Realität möglichst nahe zu kommen. Hierfür werden zum Beispiel die Exzenterhülsen gegeneinander verdreht, um einen Einstellfehler zu simulieren.

5 Setzen von Nietverbindungen

Für alle Proben werden die gleichen Niete beziehungsweise die gleiche Matrize verwendet. Die Niete haben einen Durchmesser von ca. 5,30 mm und eine Länge von ca. 4,00 mm. Die Matrize wird ebenso wie die Niete vorgegeben und hat eine Kegelmulde. Die genauen Abmessungen und Materialien von Matrize und Niet sind unbekannt, da diese vom Hersteller geschützt sind.

Die Prüfung der Nietverbindungen erfolgt einerseits mechanisch mittels KS2 Proben, welche für die zerstörende Prüfung eingesetzt werden und andererseits optisch mittels Flachproben, die unter dem Mikroskop vermessen und auf Unregelmäßigkeiten überprüft werden. Aus den verschiedenen Variationen der Parameter ergibt sich eine Mindestanzahl an Prüfteilen die sich aus der für die Versuchsmatrix erforderlichen Anzahl an Proben für die Kopfzug- und Scherzug-Prüfung, der Anzahl an Schliffproben und der Anzahl an Versuchen für die Sensibilitätsanalyse zusammensetzt. Zusätzlich kommen ungültige Verbindungen hinzu, die aus verschiedenen Gründen wie Störungen oder falsches Einlegen der Proben nicht für die Auswertung herangezogen werden dürfen. Um die Anzahl der Fehlversuche zu minimieren, ist auf eine korrekte Vorbereitung der Nietanlage sowie eine genaue Positionierung der Bauteile und eine korrekte Einstellung der Parameter zu achten.

5.1 Setzen von Nietverbindungen für Schliffproben

Für die Herstellung der Schliffproben werden jeweils Niete mit unterschiedlichem Setzdruck in Bleche mit verschiedenen Vordehnungen eingebracht. Diese Proben werden unter dem Mikroskop vermessen und dienen als Grundlage für die Sensibilitätsanalyse des Setzdruckes und der Exzentrizität.

Zur Beurteilung der Maschineneinstellung werden mehrere Proben mit maximalem Setzdruck gefügt und Schliffbilder in verschiedenen Ebenen angefertigt. Die Untersuchung dieser Proben dient zur Beurteilung der Koaxialität von Stempel und Matrize und als Basis für die Einstellung der Lage des Hydraulikzylinders im C-Gestell.

Es können aufgrund des elastischen Nachgebens der Nietzange während des Setzprozesses bzw. falscher Positionierung des Hydraulikzylinders im C-Gestell Abweichungen der Matrizen- und Stempel-Achsen auftreten. Diese können sich als Exzentrizität von Niet und Schließkopf und/oder als Winkelversatz der Achsen äußern. Da diese Fehler in der Produktion ein großes Thema und teilweise unvermeidbar sind, wird die Exzentrizität als dritter Parameter für die DoE gewählt. Hierfür wird der Hydraulikzylinder absichtlich falsch im C-Gestell positioniert und somit ein Versatz generiert. Um den Versatz in realistischen Grenzen zu halten, werden definierte Grenzwerte, welche für verschiedene Anwendungen zulässig sind für eine dreistufige Variation gewählt.

5.2 Setzen von Nietverbindungen für KS2 Proben

Die Herstellung gültiger KS2 Proben ist eines der zentralen Themen dieser Arbeit und entsprechend den Anforderungen seitens der Probengeometrie muss beim Setzen der Niete Einiges bedacht werden. Für die DoE ist auf die richtige Parametereinstellung für jede Probe zu achten. Es werden nur Probenhälften gefügt, welche die gleiche Vordehnung aufweisen. Die Parameter Setzdruck und Exzentrizität werden wie in der Versuchsmatrix definiert variiert und der Versuchsplan wird sukzessive abgearbeitet. Die nachfolgende Prüfung in der Zugprüfmaschine macht eine genaue Positionierung von Oberblech zu Unterblech notwendig, da die Probengeometrien eine reine Zug- bzw. Scher-Belastung gewährleisten müssen. Dies hat zur Folge, dass die Proben symmetrisch um die Nietachse sein müssen. Um diese Symmetrie zu erreichen, hat die Positionierung der U-Profile über die Schenkelinnenflächen zu erfolgen.

Bei der Konstruktion der Aufnahmen zur Probenpositionierung ist auf ein einfaches und schnelles Einlegen der Proben bei gleichzeitig hoher Positionierungsgenauigkeit zu achten. Neben der Kongruenz der Schenkelinnenflächen ist aufgrund der ungleichen Probenbreite darauf zu achten, dass die U-Profile mit der gleichen Seite an der lateralen Definitionsfläche anschlagen, mit der sie in der Bohrvorrichtung an der Bestimmungsfläche anschlagen. So wird sichergestellt, dass die Bohrungen keinen lateralen Versatz zueinander aufweisen und die Probe ohne Probleme auf die Aufnahme der Prüfmaschine montiert werden kann.

Die Positionierungsflächen für das matrizeitige U-Profil werden in den Grundkörper der Kraftmessvorrichtung eingearbeitet. Das Profil wird vor dem Nieten auf einen Absatz geschoben und schlägt an definierter Stelle an der Positionierungsfläche des stempelseitigen Blechs an. Der Absatz und die Anschlagfläche sind so konzipiert, dass die Matrize bei einer idealen Probe mit 50,00 mm Länge und 36,00 mm Schenkelinnenabstand genau in der Mitte des Blechs ist. Der Absatz weist ein leichtes Übermaß auf, damit das Oberblech beim Einlegen auf dem Absatz steckt und während des Anfahrens des Stempels nicht herunterfallen kann.

Die stempelseitige Probenhälfte wird über eine Aufnahme, die auf dem Grundkörper angeschraubt ist positioniert. Diese muss bei der Befestigung genau eingemessen werden, um die Parallelität des Absatzes am Grundkörpers und der Schenkelaußenfläche der Aufnahme zu gewährleisten. Die Flächen der beiden Teile dürfen auch keinen Versatz zueinander aufweisen, da ansonsten die Gefahr besteht, dass die Proben beim Einspannen nach links oder rechts kippen. Die Ausgangssituation vor dem Beginn des Setzprozesses ist in Abbildung 31 dargestellt.

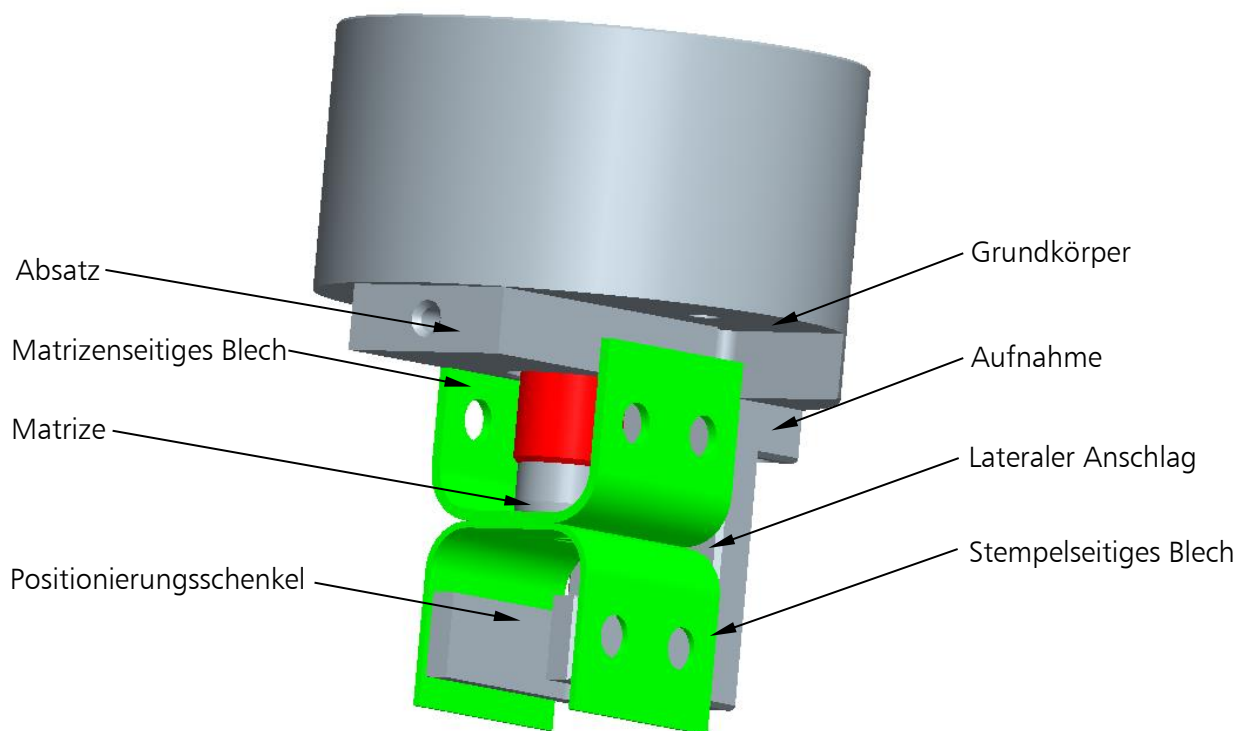


Abbildung 31 Positionierung der zu fügenden Probenhälften

Durch die massive Kraftereinwirkung während des Nietvorgangs kommt es bei der Überschreitung der Streckgrenze zur plastischen Verformung der Bleche. Diese Verformungen bewirken ein Überbiegen des stempelseitigen Blechs und ein Zurückbiegen des matrizen seitigen Blechs. Die Aufnahme des stempelseitigen Blechs behindert diese Winkeländerung und erzwingt somit ein Fließen im Radiusbereich, weshalb sich dieser Effekt deutlich stärker auf das matrizen seitige Blech auswirkt. Je höher die Vordehnung der Bleche ist, desto stärker tritt der Effekt auf. Grund hierfür ist die höhere Festigkeit der Bleche, welche aufgrund der Kaltverfestigung beim Vordehnen entstanden ist. Es wird für die plastische Verformung also eine höhere Kraft benötigt, welche in einer höheren Spannung resultiert und somit für eine höhere elastische Rückfederung sorgt. Eine Verminderung der Winkeländerung des matrizen seitigen Blechs kann durch Klemmen der Schenkel des matrizen seitigen Blechs zwischen zwei Leisten erreicht werden. Die Leisten zwingen das Blech zum Fließen im Radiusbereich und die Rückfederung fällt geringer aus. Die bleibende Rückfederung bei Ober- und Unter-Blech kann durch diese Maßnahmen so gering gehalten werden, dass die Proben trotz der Verformungen auf die Probenaufnahme gesteckt werden können, ohne eine plastische Verformung zu erzwingen.

6 Probenherstellung

6.1 KS2 Proben

Die Proben, welche für den Kopfzug- und Scherzug-Versuch zum Einsatz kommen, werden aus Aluminiumblechstreifen einer 6000er Legierung hergestellt, die zu einem U-Profil gebogen werden. Anschließend werden zwei Bohrungen gefertigt, um die Proben später an der Prüfmaschine aufnehmen zu können. Die stirnseitig zusammengenieteten Probenhälften werden mittels spezieller, an den Lastfall angepassten Aufnahmen in eine Zugprüfmaschine eingespannt und geprüft. Um möglichst genaue Resultate zu generieren und Streuungseffekte zu minimieren, müssen die Proben sehr genau gefertigt werden und einfach zu reproduzieren sein.

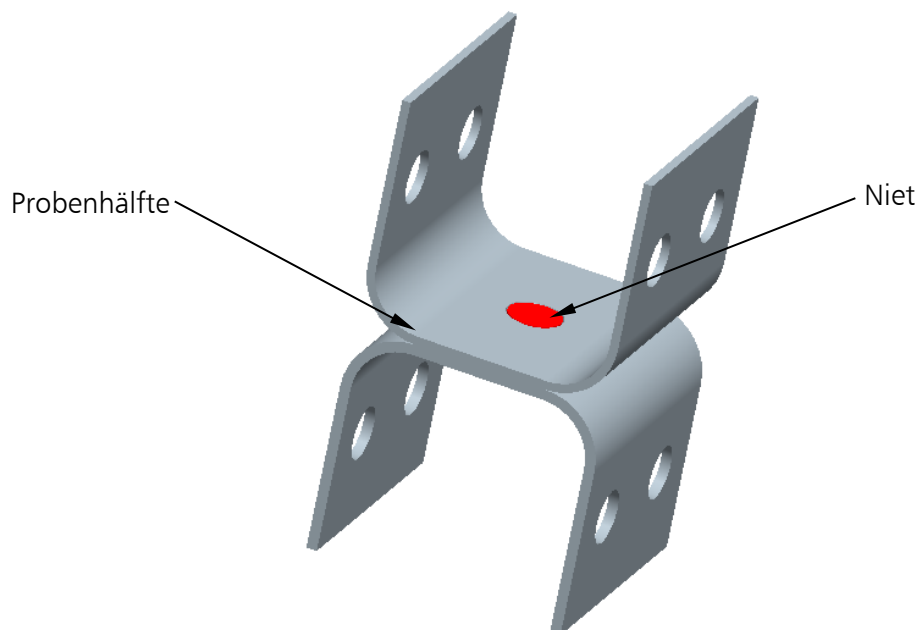


Abbildung 32 KS2 Probe

Das Oberblech der Probe weist eine Blechstärke von 1,3 mm auf während das Unterblech 2,0 mm stark ist. Je nachdem ob und wie die Bleche vorgedehnt wurden, stellt sich eine Abweichung von der Ausgangsblechstärke ein. Auch die Breite der Blechstreifen nimmt durch das Vordehnen aufgrund des Fließprozesses im Material ab. Auch bei der Herstellung der Blechstreifen muss genau auf die Vorgaben der Zeichnung geachtet werden, da ansonsten Probleme beim Einlegen der Blechstreifen in die Werkzeuge entstehen können.

Die Werkzeuge müssen so konstruiert werden, dass die erforderlichen Toleranzen bei einer Stückzahl von mehreren hundert Proben eingehalten werden können. Gleichzeitig sollen sie aber auch bei Abweichungen der Probengeometrie (Blechstärke, Probenbreite) gleichbleibende Anschlussmaße herstellen.

6.1.1 Herstellung der Blechstreifen

Als Ausgangsprodukt für die Probenhälften kommen Aluminiumblechtafeln mit den Abmessungen von ca. 530 mm x 470 mm zum Einsatz. Die Anzahl der benötigten Blechtafeln wird aus der Probenanzahl für die DoE, die Schliffbilder, die Sensibilitätsanalyse, dem Verschnitt und einem Sicherheitsbeiwert berechnet. Des Weiteren muss im Vorfeld bedacht werden, dass der Einspannbereich der Proben, welche vorgedehnt werden müssen nicht für die Versuche genutzt werden kann.

Mit Hilfe einer Schlagschere werden zuerst 50 mm breite Streifen aus den Blechtafeln geschnitten. Die Blechstreifen müssen nach dem Zuschnitt vermessen werden, um die Geometriedaten für die Vordehnung in der Zugprüfmaschine zu erhalten.

Für die statistische Versuchsplanung ist die Vordehnung als dreistufig variabler Parameter definiert, wobei Proben mit 0%, 4% und 8% Vordehnung hergestellt wurden. Die vorzustreckenden Proben wurden beim Projektpartner mittels quasistatischem Zugversuch den geforderten Vordehnungen unterzogen. Es muss beachtet werden, dass aufgrund der elastischen Dehnung von 0,3% bei Aluminium für eine Vordehnung von 4% eine tatsächliche Vordehnung von 4,3% erfolgen muss. Dasselbe gilt für die Vordehnung von 8%. Das gesamte Prüfprotokoll für die Vordehnung der einzelnen Blechstreifen ist im Anhang nachzulesen.

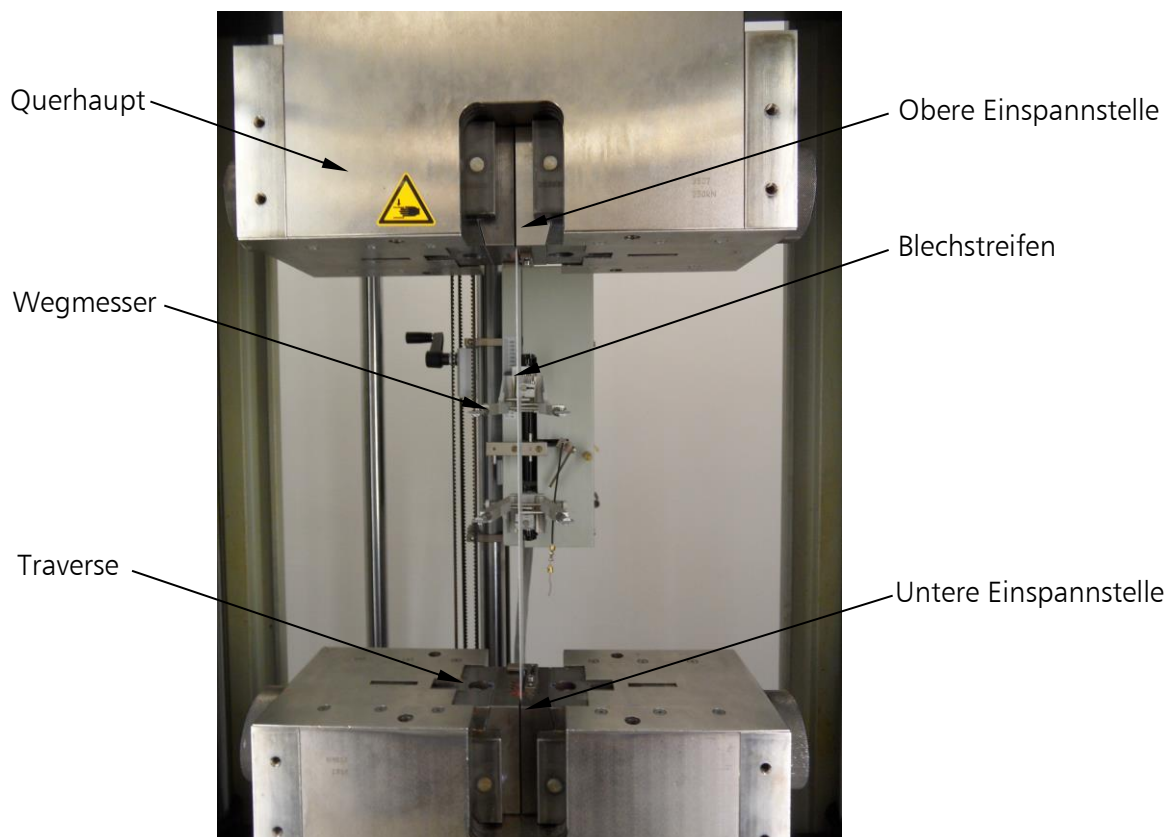


Abbildung 33 Vordehnen der Blechstreifen in der Zugprüfmaschine

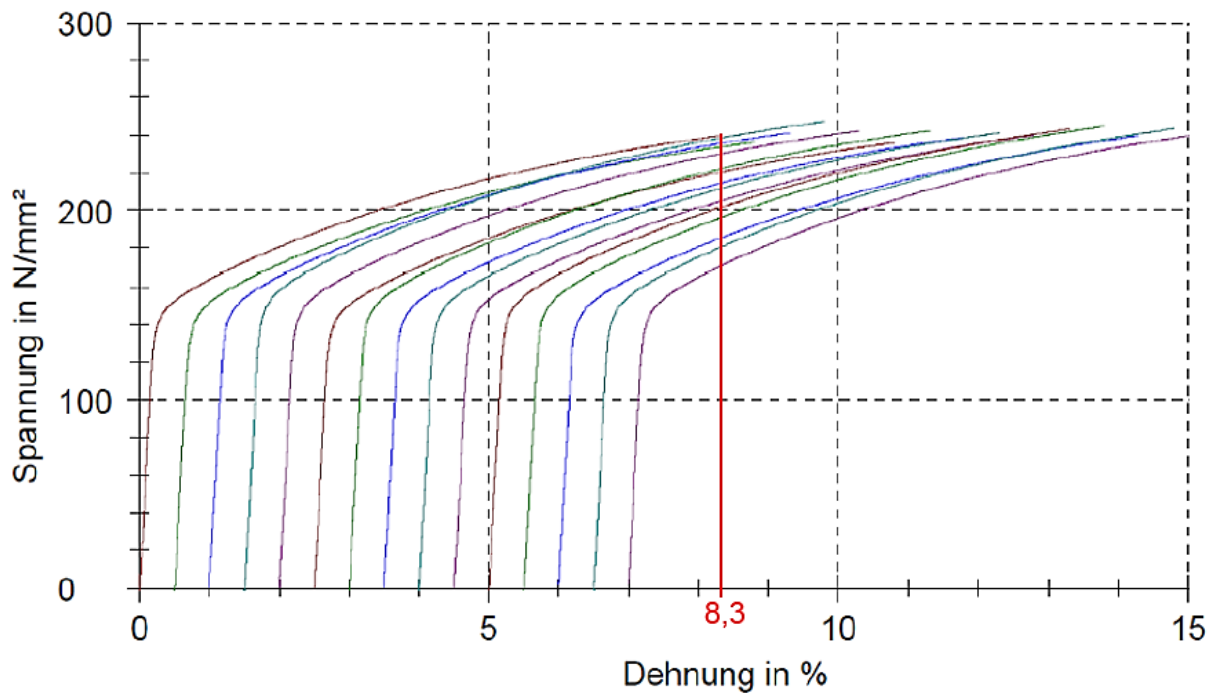


Diagramm 1 Vordehnung von 1,3 mm Blech auf 8%

In Diagramm 1 ist exemplarisch die Vordehnung der 1,3 mm Bleche auf 8% dargestellt. Es werden hierbei 15 Proben in einem Diagramm dargestellt, wobei der Nullpunkt bei jeder neuen Probe um 0,5% Dehnung nach rechts verschoben wurde, da so der Unterschied zwischen den einzelnen Kurven besser sichtbar ist. Um den geforderten quasistatischen Zustand zu gewährleisten, muss die Prüfgeschwindigkeit so gewählt werden, dass sie keinen Einfluss auf das Endergebnis hat. In diesem Fall betrug die Prüfgeschwindigkeit 10 mm/min. Auch die Einspannung der Proben unterliegt gewissen Anforderungen. Ist die Einspannlänge zu gering, kann die Probe nicht richtig geklemmt werden und in den Backen rutschen, was sich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bemerkbar machen würde. Der gesamte Prozess läuft weggesteuert ab. Mittels einem, auf der Probe anliegenden Wegmessgerät wird die tatsächliche Dehnung mitgemessen. Wird der voreingestellte Wert erreicht, schaltet die Maschine automatisch ab und die Kraft wird langsam abgebaut. Nach dem Ausspannen der Proben kann man im direkten Vergleich mit der 0 % Probe deutlich die Verlängerung sehen.

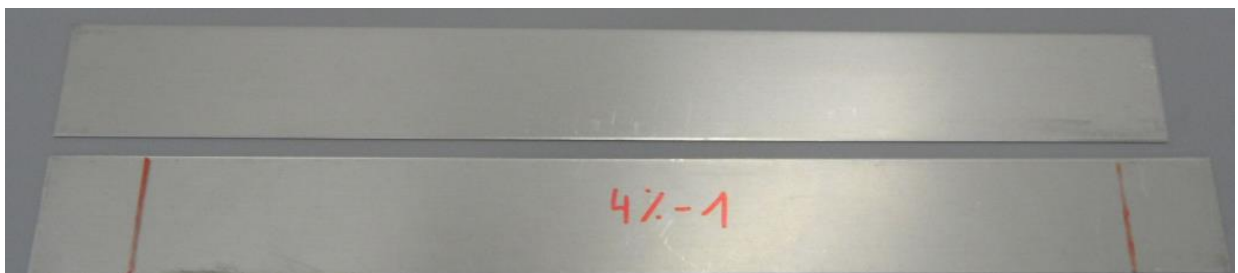


Abbildung 34 Vergleich 0% Vordehnung zu 4% Vordehnung

Um nun die Blechstreifen mit den für das Biegen der U-Proben notwendigen Maßen zu erhalten, werden die vorgefertigten Blechstreifen mittels Schlagschere abgelängt. Aufgrund der Abmessungen der Blechstreifen vor dem Vordehnen können pro Streifen vier Proben hergestellt werden. Bei den vorgedehnten Blechen kann der Einspannbereich nicht genutzt werden, da dort ein unbestimmter Zustand herrscht und die Zähne der Spannbacken Abdrücke im Blech erzeugt haben. Durch die plastische Verformung der Blechstreifen und die daraus folgende Verlängerung beim Vordehnen können trotz des Abfalls, der durch die Einspannung entsteht vier Proben hergestellt werden. In Abbildung 34 ist die Verlängerung der Probe zwischen den Einspannstellen deutlich zu sehen. Die Einspannbereiche sind hierbei durch die roten Linien gekennzeichnet und gehen für die Probenfertigung verloren.

Wichtig für das nachfolgende Biegen ist, dass die Proben die geforderten Abmessungen einhalten, gratfrei sind und die Kanten parallel bzw. rechtwinklig zueinander sind. Nur so kann garantiert werden, dass die Proben richtig in die Werkzeuge eingelegt werden können und die Probenhälften den Zeichnungsangaben entsprechen. Es wurden deshalb alle Proben nach dem Zuschnitt vermessen und mit einer Nummer versehen. Die durchgehende Bauteilnummerierung garantiert hierbei eine lückenlose Verfolgbarkeit der Bauteile in der Fertigung. So können fehlerhafte Teile leichter gefunden bzw. nachträglich Rückschlüsse, weshalb ein Fehler eingetreten sein könnte gezogen werden.

6.1.2 Biegewerkzeug

Das Biegewerkzeug stellt hohe Anforderungen an die Konstruktion und Fertigung, da sowohl hohe Genauigkeiten gefordert sind, als auch die Fertigung von Proben mit variablen Blechstärken und Werkstoffen möglich sein muss. Beim Biegen von Aluminiumblechen ist vor Allem auf die erhebliche Rückfederung Acht zu geben. Es muss daher, um den geforderten Biegewinkel zu erreichen, eine Freistellung am Stempel zum Überbiegen des Blechs vorhanden sein. Aufgrund der geringen Steifigkeit von Aluminium, muss die Blechunterseite während des Biegevorgangs gestützt werden. Nur so kann eine ebene Stirnseite des Blechs erhalten werden, welche für den Nietprozess unerlässlich ist. Bei der Ausarbeitung von Konstruktionsvarianten wird im Speziellen auf zwei Lösungen eingegangen. Beide Konstruktionen basieren auf demselben Stempel, haben aber unterschiedliche Konzepte für das Unterwerkzeug.

Schwenkbackenwerkzeug:

Eine Variante des Unterwerkzeugs ist ein Werkzeug mit Schwenkbackensystem. Die Backen führen das Blech und sind für das Überbiegen zuständig. Zum Erhalt der ebenen Blechunterseite kommt ein federvorgespannter Gegenhalter zum Einsatz. Der Vorteil dieses Systems liegt in der hohen erreichbaren Genauigkeit der Fertigteile, da das Blech eine genaue Führung durch die Schwenkbacken erfährt. Nachteilig sind die hohen Kosten und der hohe konstruktive und fertigungstechnische Aufwand. Auch das Packaging kann aufgrund der kleinen Probenabmessungen zum Problem werden. Des Weiteren könnte das relativ weiche Aluminium durch die gehärteten Schwenkbacken und den Gegenhalter aus Stahl Abdrücke im Blech bekommen. Da die Nachteile klar überwiegen scheidet diese Konstruktionsvariante aus.

Biegen im Elastomer:

Die zweite Konstruktionsvariante ist das Umformen des Blechs mittels einem speziell für den Einsatz optimierten Elastomerblock (Fibro). Die Elastomerblöcke stehen in verschiedenen Formen, Abmessungen und Shore-Härten zur Verfügung und sind auf die jeweilige Biegeoperation abgestimmt. Um die geforderte ebene Blechunterseite zu bekommen, muss ein 3-5mm dickes Stahlblech unter das Aluminiumblech gelegt werden. Dieses verhindert ein Ausbauchen des Blechs und garantiert die Ebenheit der Stirnfläche. Der Vorteil dieser Variante liegt im einfachen Aufbau des Werkzeugs und in den geringen Kosten. Nachteilig ist, dass man verschiedene Blöcke testen muss, um die geeignete Konfiguration für die jeweilige Aufgabe zu finden. Dies ist mit Zeit und Materialaufwand verbunden. Nichtsdestotrotz ist diese Variante aufgrund der überwiegenden Vorteile realisiert worden. In den nachfolgenden Versuchen wird gezeigt, wie die geforderte Genauigkeit der Biegeteile erreicht werden konnte.

6.1.3 Konstruktion des Biegewerkzeugs

Für die Konstruktion des Grundkörpers müssen die zu erfüllenden Anforderungen für den Einsatz des Elastomers, als auch die Positionierungsgenauigkeit des Blechs beim Einlegen berücksichtigt werden. Die Positionierung der Blechstreifen erfolgt mittels vier Stiften, die als Anschlag dienen. So soll gewährleistet werden, dass das Blech mittig im Werkzeug liegt und die Kanten parallel zum Werkzeug ausgerichtet sind. Der letzte Punkt ist besonders wichtig, da bei nicht paralleler Ausrichtung des Blechs ein Einlegen in die Bohrvorrichtung unmöglich wird und das Bauteil unbrauchbar wäre. Da das Blech am Beginn des Biegeprozesses am Grundkörper anliegt, wurden die Kanten der Tasche umlaufend mit einem Radius versehen. Dies verhindert Abdrücke durch das Scheren des Blechs über die scharfe Kante der Tasche. Um den Werkzeugverschleiß beim Biegen zu minimieren, wurde sowohl Grundkörper als auch Stempel aus 1.2311 gefertigt. Dieser Vergütungsstahl weist eine hohe Härte bei gleichzeitig guter Zerspanbarkeit auf und ist gut für die Anwendung mit Aluminium geeignet.

Bedingt durch die Fräsergeometrie entstehen Radien in der Tasche des Grundkörpers. Aus diesem Grund muss der Elastomerblock an den Kanten abgefast werden. Auch für die Unterlegleiste muss eine Ausnehmung im Elastomer geschaffen werden, um diese genau platzieren zu können.

Da die Angaben für den Einsatz der Elastomerblöcke nicht allgemein gültig sind, wurde mit zwei Elastomeren mit unterschiedlichen Abmessungen und Shore-Härten experimentiert. Einer der beiden Elastomerblöcke weist dabei eine geringere Breite als der andere auf, weshalb zwei Leisten als Beilage gefertigt werden mussten. Diese Leisten sind abgefast, um voll an den Flächen der Tasche anzuliegen. Die Eindringtiefe in das Elastomer wird bei den Versuchen so lange variiert, bis der geforderte Biegewinkel von 90° erreicht ist.

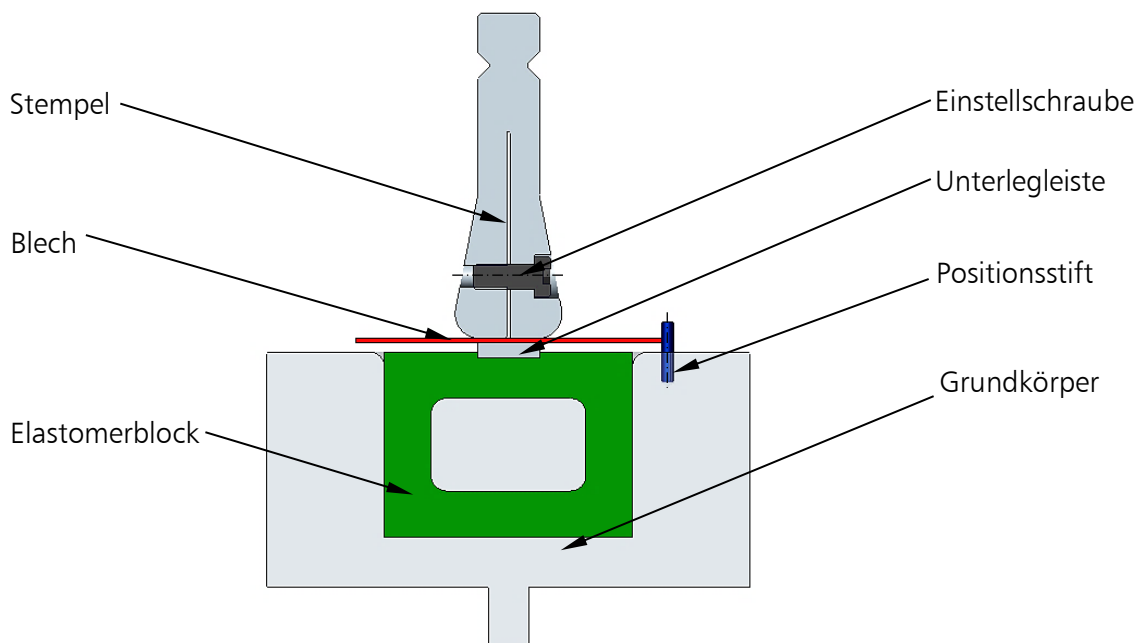


Abbildung 35 U-Biegen im Elastomerblock

In den Vorversuchen wurde mit einem starren Stempel, der die Sollkontur der Bleche abbildet experimentiert, was zu einer Abweichung des Schenkelabstands von 1,00 mm bis zu 2,00 mm vom Sollmaß (36,00 mm) führte. Der Stempel musste aufgrund des unterschiedlichen Rückfederungsverhaltens der verschiedenen Bleche in seiner Breite flexibel ausgeführt werden.

Die unterschiedliche Rückfederung ist sowohl auf den Blechstärkenunterschied, als auch auf die unterschiedlichen Vordehnungen, mit denen die Blechstreifen beaufschlagt wurden zurückzuführen. Die Ausgangsbreite des Stempels wurde deshalb mit 34,50 mm um 1,50 mm kleiner gewählt als der Sollschenkelabstand, um die Toleranzen auch bei der ungünstigsten Blechkonfiguration einhalten zu können. Die flexible Anpassung der Stempelbreite ist durch eine Nut in die Stempelmittelechse, die 1,00 mm breit und 67,00 mm tief ist möglich. Mittels drei Innensechskantschrauben kann der Spalt wegen der nun möglichen elastischen Verformung des Stempels verengt und dadurch die Stempelbreite verringert werden. Des Weiteren sind zwei Madenschrauben zum elastischen Aufweiten des Stempels vorgesehen. Die Einstellschrauben machen es nun möglich die Stempelbreite um mehr als 1,00 mm zu variieren und somit den gleichen Schenkelinnenabstand bei jeder Blechkonfiguration zu erreichen.

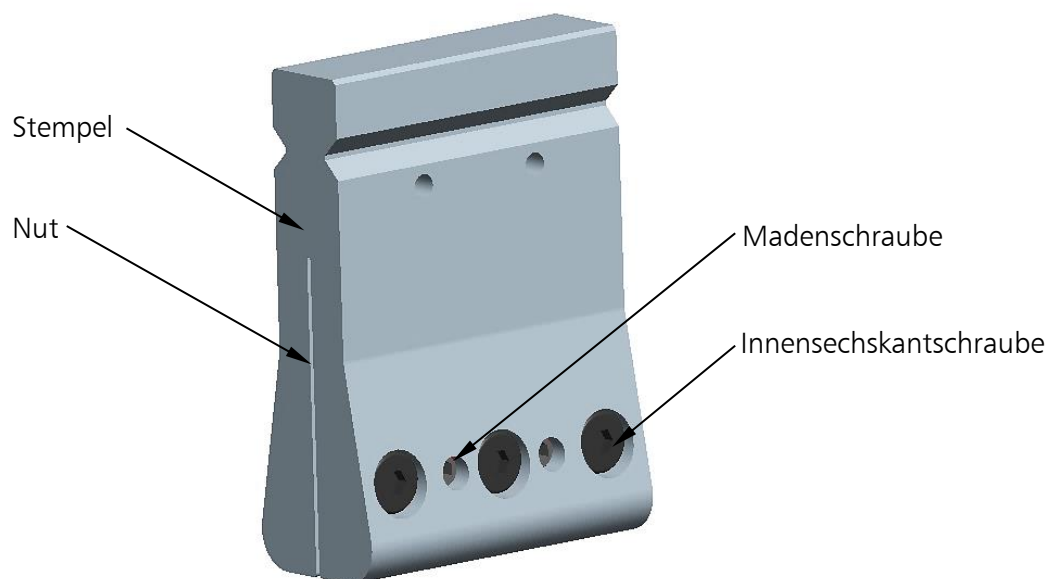


Abbildung 36 Stempel

6.1.4 Biegen der Proben

Die Vorversuche mit dem zunächst noch starren Stempel und dem größeren und härteren Elastomerblock haben gezeigt, dass dieses Elastomer geeignet ist, um den geforderten Biegewinkel zu erreichen. Der starre Stempel genügt allerdings nicht den Anforderungen. Die geforderten Maße können mit diesem nicht eingehalten werden, da die Rückfederung bereits in den Radien derart stark ausgeprägt ist, dass auch ein Überbiegen der Schenkel keinen Erfolg bringt. Aufgrund der Ergebnisse aus den Vorversuchen musste der Stempel wie in Abbildung 36 dargestellt nachbearbeitet werden.

6.1.5 Bohrvorrichtung

Die Herstellung der Bohrungen in den Schenkeln der Probenhälften ist eine große Herausforderung für die Fertigung. Hier spielen zwei Mechanismen eine bedeutende Rolle. Erstens ist aufgrund des Materials und der Blechstärke keine Führung des Bohrers im Werkstück gegeben und zweitens erfährt das Blech durch die Spiralform des Bohrers einen Vorschub in Richtung des Bohrfutters, was zum Aufbiegen des Blechs führt. Es wurde in der Probenkonstruktion festgelegt, dass um konzentrische Bohrungen zu erhalten, diese in einem Schritt hergestellt werden müssen. Diese Vorgabe soll sicherstellen, dass die Schulterpassschrauben, welche in der zerstörenden Prüfung eingesetzt werden, die Proben spielfrei an den Versuchsaufbau anbinden.

Die Bohrvorrichtung muss gewährleisten, dass große Stückzahlen in relativ geringen Taktzeiten und mit hohen Genauigkeiten hergestellt werden können. Um möglichst schnell und effizient zu sein, darf das Spannen nicht lang dauern und die Anzahl an Bauteilen sollte so gering wie möglich gehalten werden. Für die Versuche, die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden sind diese Forderungen sekundär. Sie müssen allerdings in die Konstruktion miteinbezogen werden, da der Projektpartner größere Stückzahlen herstellen wird.

Die Fertigung einer passgenauen Bohrung mit geringer Rundheitstoleranz ist im Speziellen bei dünnen Aluminiumblechen problematisch, da sich Aluminium am Werkzeug anlagert und die Führung des Bohrers im Werkstück nicht gegeben ist. Eine Möglichkeit das Führungsproblem zu umgehen besteht darin, das Loch mit einem Fingerfräser herzustellen. Dieser benötigt keine Führung durch das Werkstück, jedoch treten bei dessen Anwendung andere Probleme auf. Es ist nicht vorteilhaft für die Vorrichtung und den Fräser, da sich dessen Nebenschneiden bei Kontakt mit der Vorrichtung schnell abnutzen und die Vorrichtung beschädigen würden. Dies würde wiederum zu einer ungenauen Führung des Werkzeugs führen und die geforderten Toleranzen könnten nicht eingehalten werden. Es muss also eine Lösung gefunden werden, die eine genaue Führung des Bohrers ermöglicht und zugleich das Aufbiegen des Bleches beim Bohren verhindert.

6.1.6 Konstruktion der Bohrvorrichtung

Für Machbarkeitsversuche wurde ein Versuchswerkzeug gebaut, in welchem Bohrbuchsen für die genaue Führung des Bohrers eingesetzt und das Blech zwischen den Buchsen geklemmt wird. (siehe Abbildung 37) Bei den ersten Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Toleranzen mit Hilfe der Bohrbuchsen und Klemmen des Blechs eingehalten werden können. Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann nun die Konstruktion des Bohrwerkzeugs beginnen.

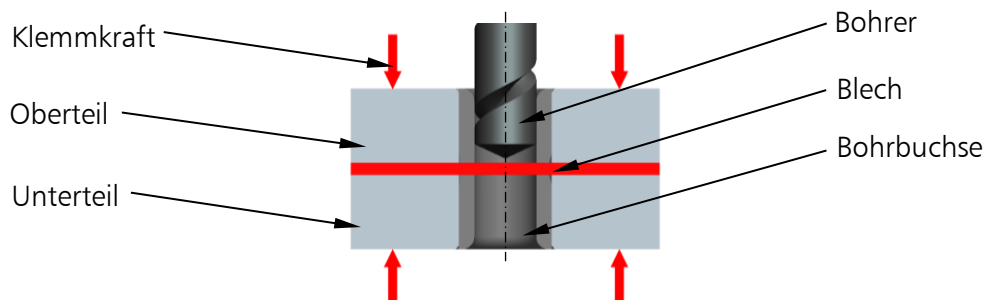


Abbildung 37 Probewerkzeug

Für das Werkzeug werden die gleichen Bohrbuchsen (11) bzw. Bohrbuchsen mit Bund (1) verwendet, welche sich schon im Probewerkzeug als geeignet erwiesen haben. Um ausreichend Stützwirkung zu gewährleisten, wird die Probenhälfte (4) zum Bohren auf einen Innenkörper (6) gesteckt. Der Innenkörper besitzt Langlöcher, welche zur Freistellung des Bohrers dienen. Es wird deutlich, dass die Genauigkeit der Bohrungen maßgeblich von dem, im vorherigen Schritt erzeugten Biegeteil abhängt. Das Blech muss an der Stirnseite vollflächig am unteren Grundkörper (9) anliegen (Abbildung 38 links). Die Kanten der Probenhälfte werden zur Positionierung an einer Schulter auf dem Innenkörper angeschlagen (Abbildung 38 rechts). Der Innenkörper mit aufgestecktem U-Profil wird in die Vorrichtung gesteckt und mittels Schrauben (3) geklemmt. Um das Wechseln der Proben zu erleichtern, sind oberer und unterer Grundkörper (2) durch Federn (8) vorgespannt. Die Positionierung der Grundkörper zueinander erfolgt mittels im oberen Grundkörper durch Innensechskantschrauben (5) gesicherte Führungssäulen (7), welche in wartungsfreien Führungsbuchsen (10) im unteren Grundkörper geführt sind. Die Position der Bohrbuchsen zueinander muss möglichst konzentrisch sein, um den hohen Genauigkeitsanforderungen zu entsprechen. Aus diesem Grund sind sowohl die Positionen der Führungen, als auch die Bohrungen für die Bohrbuchsen mit sehr engen Passungen toleriert. Des Weiteren wurden die Bohrungen für die Bohrbuchsen in einem gemeinsamen Arbeitsgang hergestellt, um deren Konzentrität zu gewährleisten. Für beide Grundkörper sowie für den Innenkörper wurde aus Kostengründen derselbe Werkstoff, wie für das Biegewerkzeug verwendet.

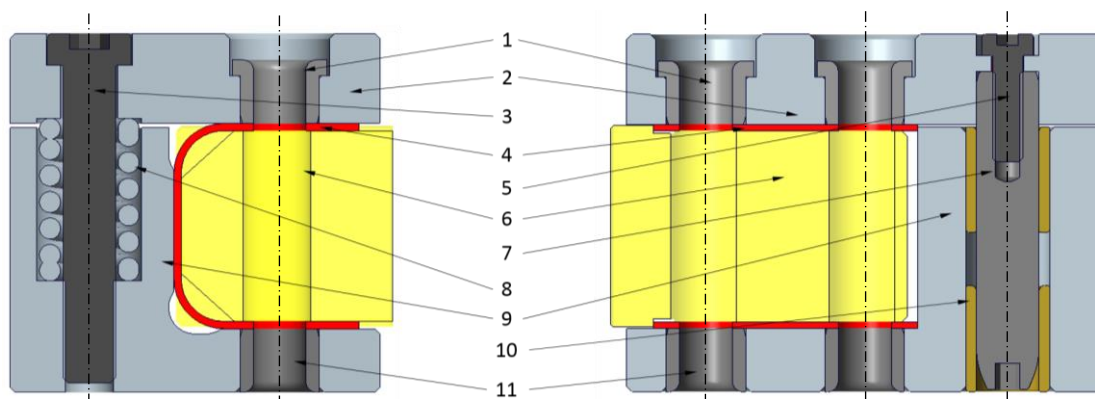


Abbildung 38 Bohrvorrichtung

6.1.7 Bohren der Proben

Nach den ersten Versuchen mit einem handelsüblichen Vollhartmetallbohrer trat das Problem auf, dass der Bohrer aufgrund des gleichmäßigen Durchmessers nach dem Durchbohren des ersten Schenkels dessen Bohrung mit steigender Bohrungstiefe kontinuierlich ausrieb. Das Ausreiben kommt zustande, weil der Bohrer nach dem Durchbohren nicht nur in der Bohrbuchse, sondern auch im Blech selbst geführt wird. Da das Aluminiumblech aber eine weitaus geringere Verschleißfestigkeit als die Bohrbuchsen aufweist, verschleißt das Material in der Bohrung rapide und die Toleranzen können nicht eingehalten werden.

Um das Ausreiben der Bohrung zu verhindern, kommt ein speziell angefertigter Bohrer zum Einsatz. Dieser weist an der Spitze einen etwas kleineren Durchmesser von 9,2 mm auf. Das Vorbohren und der sehr große Spitzenwinkel von 150° sollen helfen die Rundheit der Bohrung zu optimieren und den Grat am Bohrungsausgang zu reduzieren. Der Absatz für das Aufbohren endet nach ca. 3 mm und es erfolgt der Sprung auf den Enddurchmesser von 9,99 mm. Auch hier ist ein Winkel von 150° vorgesehen, um den Übergang so sanft wie möglich durchzuführen. Nach 3 mm endet dieser Bereich und es folgt eine Durchmesserreduzierung auf 9,7 mm. Diese dient als Freistellung und soll die Führung des Bohrers in der Buchse und im Blech unterbrechen. Erst kurz bevor der Bohrer in den zweiten Schenkel eintaucht erhöht sich dessen Durchmesser wieder auf 9,99 mm und er wird wieder in der Bohrbuchse geführt. Die Bohrbuchse im unteren Grundkörper dient bei dieser Bohroperation dazu ein Aufbiegen des Blechs zu vermeiden. Der gesamte Verlauf des Bohrvorgangs ist in Abbildung 39 abgebildet.

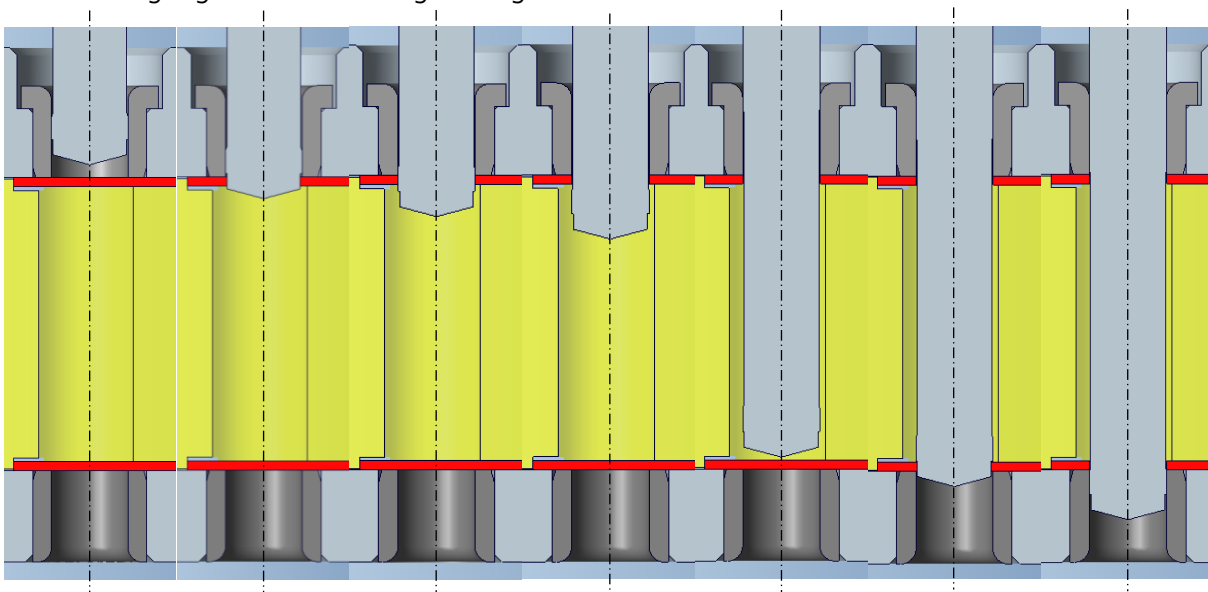


Abbildung 39 Verlauf des Bohrvorgangs

6.2 Schliffproben

Für die Herstellung von Flachproben zur Untersuchung unter dem Mikroskop müssen zuerst Probenbleche zugeschnitten werden. Die Proben dürfen dabei nicht zu klein ausfallen, da ansonsten ein Aufbiegen der Bleche durch den Nietvorgang begünstigt und das Ergebnis somit verfälscht würde. Des Weiteren müssen beide Bleche vor dem Nieten gründlich von Farb- und Schmutz-Rückständen befreit sowie der, durch das Zuschneiden entstandene Grat entfernt werden. Um die, für das Mikroskopieren erforderliche Oberfläche zu erzeugen, werden die Proben zuerst mit einem Trennjäger kurz vor der Mittelebene durchgeschnitten und anschließend mit Schleifsteinen nachbearbeitet. Bei der Probenvorbereitung mit dem Trennjäger müssen plane Blechkanten geschaffen werden, um eine parallele Ausrichtung der Schliffoberfläche zur Mikroskop-Optik gewährleisten zu können. Da der Niet rotationssymmetrisch ist, muss der Schnitt vor der Mittelebene des Nietes erfolgen. Die durch die Matrize entstandene Mulde muss hierbei trotzdem vollständig abgebildet werden. Nach dem Grobzuschnitt erfolgt ein Aufbereiten der Oberfläche mittels Schleifsteinen mit verschiedenen Körnungen. Hierbei werden die groben Riefen, die durch die Trennscheibe entstanden sind geglättet und die Trennebenen der einzelnen Bleche werden ersichtlich. Anschließend erfolgt eine Reinigung, die Schleifrückstände entfernt und die Proben konserviert. Die Proben müssen vor dem Vermessen entfettet und danach wieder konserviert werden, um ein oxidieren der Oberfläche zu verhindern.

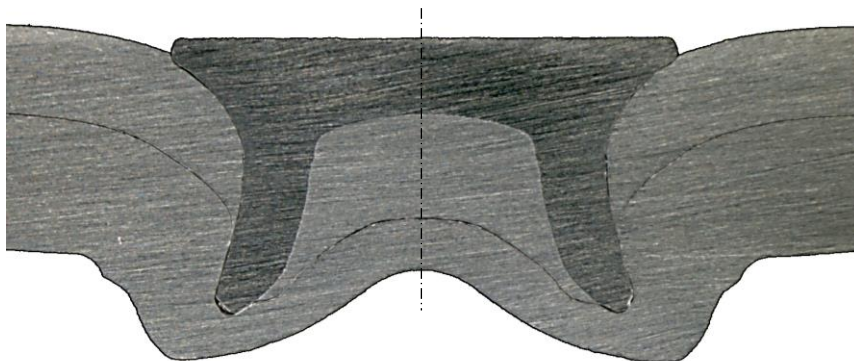


Abbildung 40 Schliffbild einer Halbhohlstanznietverbindung

Die Schliffproben dienen in erster Linie dazu, die charakteristischen Maße der Verbindung zu erfassen und die Koaxialität von Matrize und Niet zu überwachen. Sollten die Achsen von Niet und Matrize zu stark voneinander abweichen, muss die Nietzange über die Exzenterhülsen neu eingestellt werden. Da der Niet nur über den Kopf im Niederhalter geführt wird, kann es durch Kippvorgänge oder Inhomogenitäten im Material zu einem Versatz oder einer Schräglage des Nietes kommen. Die Achsen werden daher immer einen geringen Versatz aufweisen, welcher aber mit geeigneten Maschineneinstellungen minimiert werden kann.

6.2.1 Analyse der Rotationssymmetrie

Durch Elastizitäten im System kommt es beim Setzvorgang zu einer Aufweitung der Nietzange. Diese kann je nach Zangenbauart und Setzdruck mehrere Millimeter betragen und somit das Nietergebnis beeinflussen. Als Bewertungskriterium für die, durch die Elastizitäten hervorgerufenen Fehler wurde die Rotationssymmetrie der Nietverbindung gewählt. Zur Beurteilung der Rotationssymmetrie wurden drei Niete mit maximalem Setzdruck in nicht vorgestreckte Bleche eingebracht und die Schlitze unter dem Mikroskop analysiert. Für die Analyse dieser Proben wurden wie in Abbildung 41 ersichtlich vier Ebenen am Niet definiert, welche jeweils um 45° versetzt sind. Für die Bewertung wurden die ersten drei Ebenen von 0° bis 90° herangezogen und je eine Probe in einer Ebene mikroskopiert.

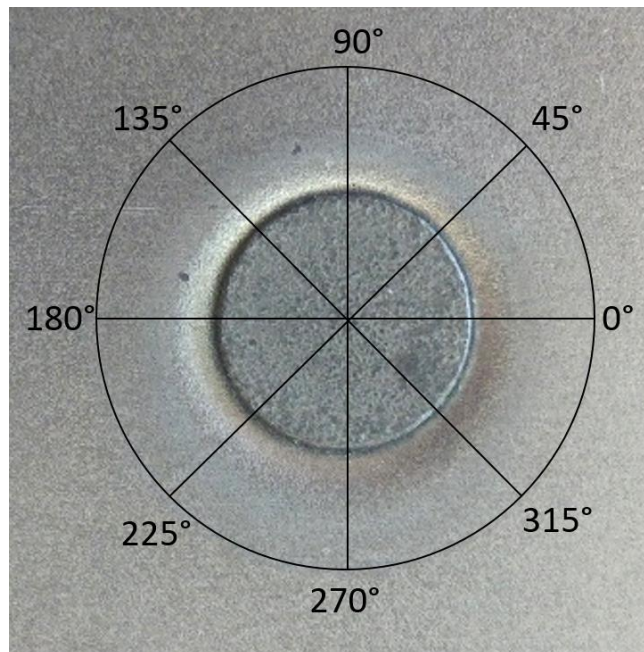


Abbildung 41 Definition der Ebenen einer Nietverbindung

Wie in Abbildung 42 bis Abbildung 44 ersichtlich ist, kann unter dem Mikroskop keine Achsfehlstellung des Niets gegenüber des Schließkopfs festgestellt werden. Die gleichmäßige Ausbildung des Hinterschnitts links und rechts lässt ebenfalls auf eine gute Übereinstimmung von Niet- und Stempel-Achse schließen. Die Abweichungen der Messergebnisse zwischen den einzelnen Proben lassen sich auf die Blechstärkenunterschiede und die Streuung des Prozesses zurückführen. Des Weiteren kann man schlussfolgern, dass die Nietzange ausreichend steif für die zum Einsatz kommenden Fügmaterialien ist und die Ausrichtung des Hydraulikzylinders aufgrund der guten Übereinstimmung von Nietachse und Schließkopfachse den Genauigkeitsanforderungen entspricht.

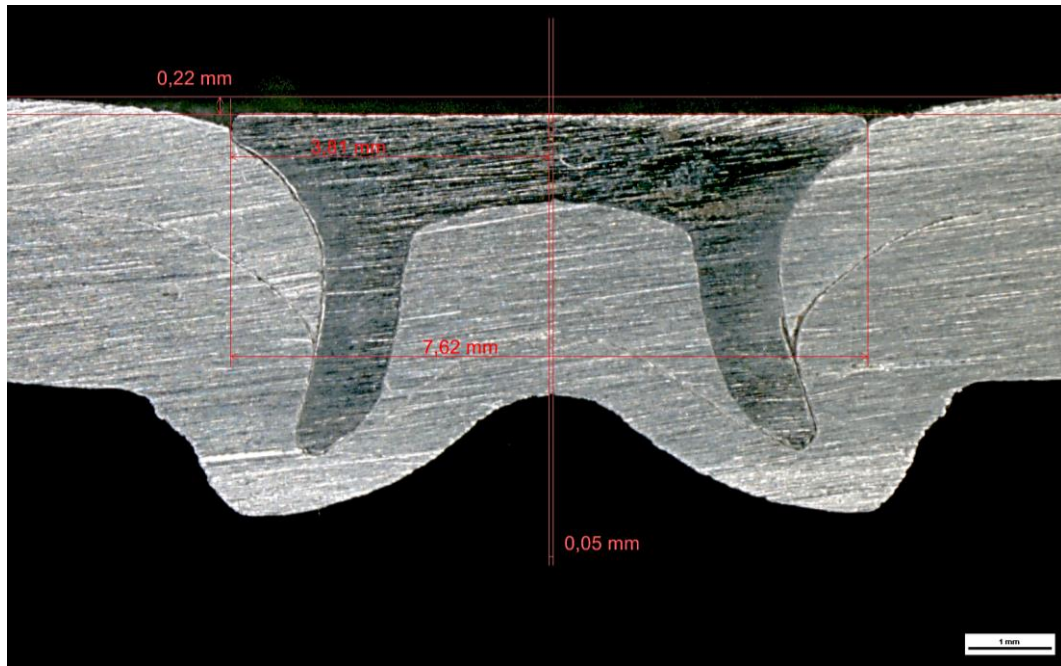


Abbildung 42 Schliffbild in 0°-180°-Ebene

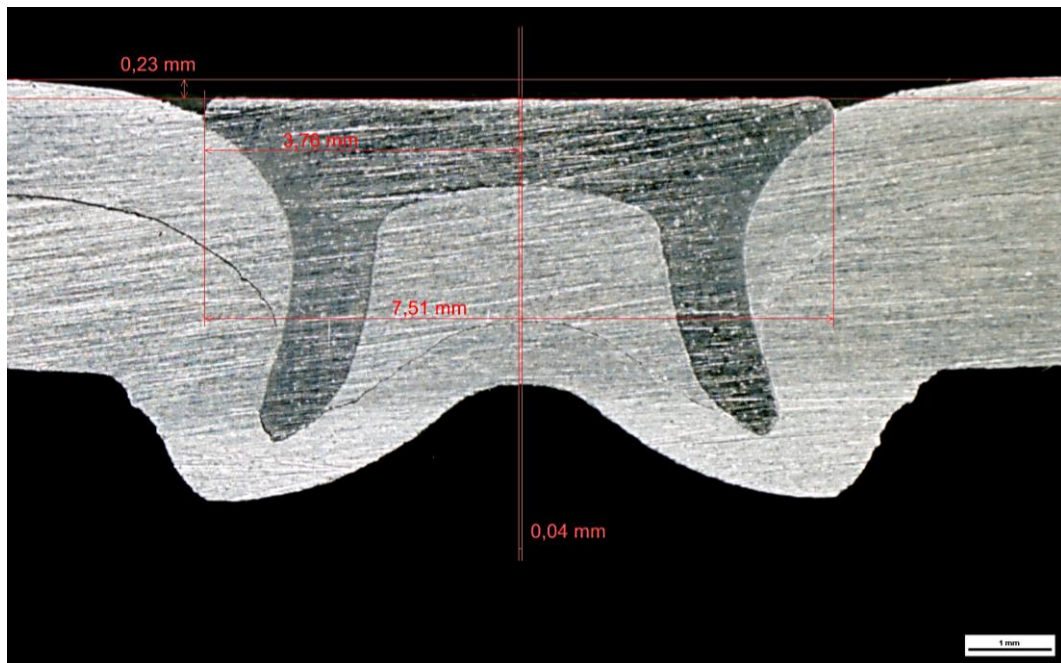


Abbildung 43 Schliffbild in 45°-225°-Ebene

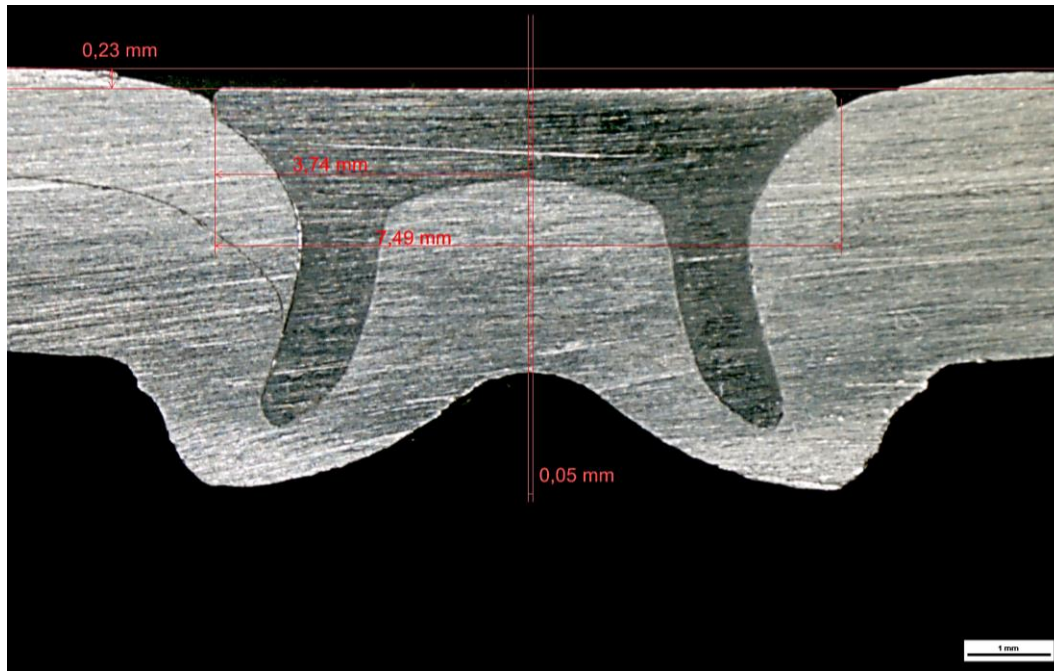


Abbildung 44 Schliffbild in 90°-270°-Ebene

6.2.2 Sensibilitätsanalyse des Setzdruckes

Der Setzdruck als Variationsparameter spielt in der statistischen Versuchsplanung für die erzielbaren mechanischen Eigenschaften der Verbindung eine entscheidende Rolle. Um diesen Parameter innerhalb sinnvoller Grenzen zu variieren wurde vor den eigentlichen Versuchen eine Sensibilitätsanalyse durchgeführt. Hierbei wurden die unterschiedlichen Bleche unter Anwendung verschiedener Setzdrücke gefügt und das Ergebnis mittels Mikroskop bewertet. Bei der Untersuchung wurden sowohl die Maße der Verbindung, als auch der Einfluss der Vordehnung erfasst. Da der Setzdruck auf zwei Stufen variiert werden soll und die freigegebene Verbindung mit 230 bar gefügt wird, werden dieser Wert und ein niedrigerer Wert zu Untersuchung herangezogen. Der Einfluss des Setzdruckes auf das Nietergebnis wurde zwischen 140 und 250 bar untersucht, um den unteren Grenzwert für die DoE zu finden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 45 dargestellt.

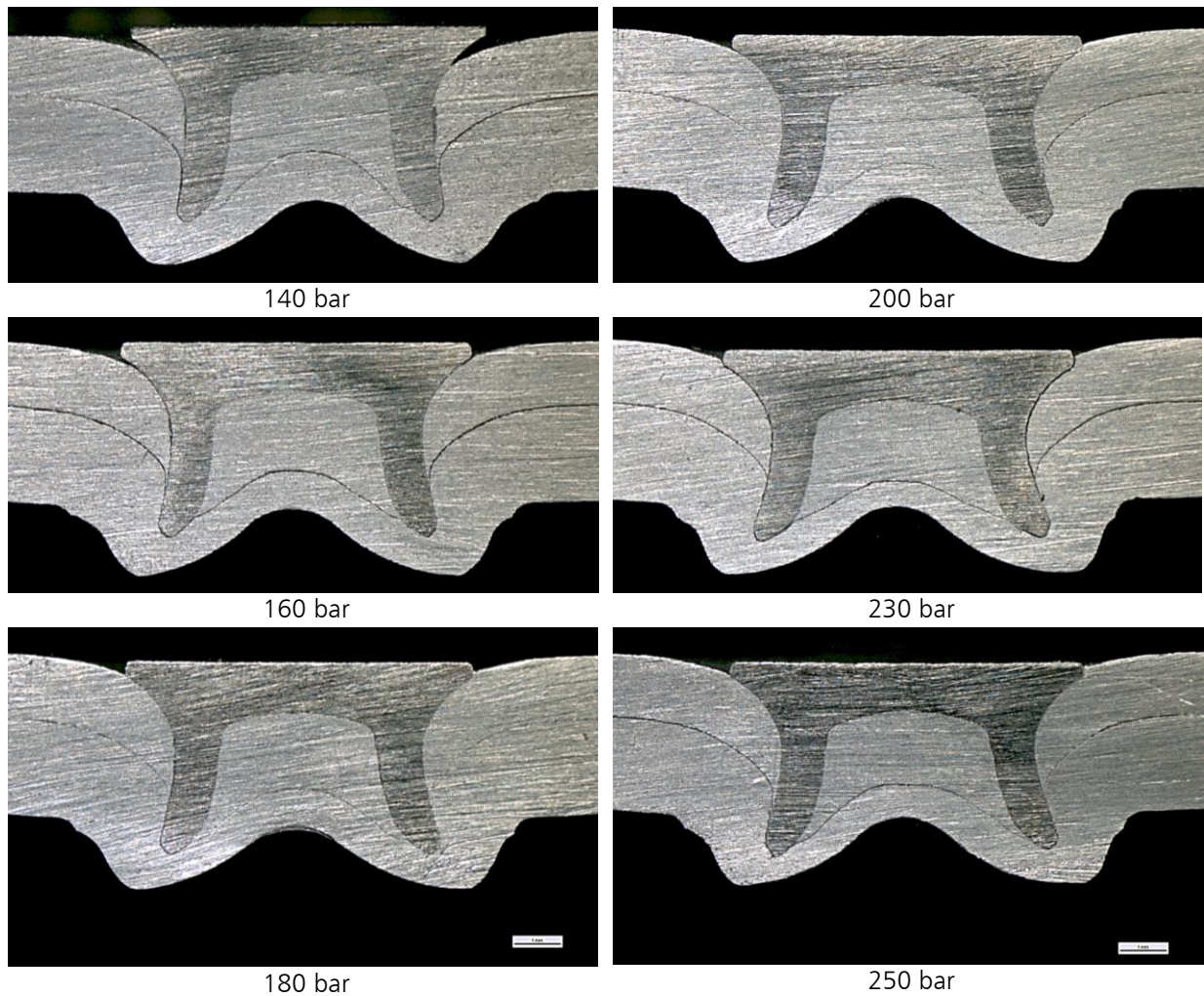


Abbildung 45 Vergleich der Nietergebnisse von 140 bis 250 bar Setzdruck

Die Proben, welche mit 140 bzw. 160 bar gefügt wurden können im Vorhinein ausgeschlossen werden, da die Nietkopfendlage deutlich zu hoch ist und so ein inakzeptabler Spalt zwischen Nietkopf und Oberblech entsteht. Auch der geringe Hinterschnitt dieser Verbindungen lässt erahnen, dass die mechanischen Eigenschaften den Anforderungen nicht entsprechen würden. Bei der mit 180 bar gefügten Probe hat der Nietkopf bereits vollen Kontakt mit dem stempelseitigen Blech und die Nietkopfendlage ist annähernd Null. Bei näherer Betrachtung des Nietfußes fällt allerdings auf, dass dieser nicht weit in das Unterblech ragt und der Hinterschnitt im Vergleich zur 200 bar Probe erwartungsgemäß geringer ausfällt. Dies ist auf eine schlechte Füllung der Matrize, bedingt durch eine zu geringe Setzkraft zurückzuführen. Die nächste Probe, welche mit 200 bar Setzdruck gefügt wurde weist aus rein optischer Sicht alle Merkmale auf, welche für eine qualitativ hochwertige Nietverbindung gefordert werden. Der Nietkopf weist einen Unterstand gegenüber dem oberen Blech auf, der Hinterschnitt ist gut ausgebildet und der Niet hat an jeder Stelle vollen Kontakt zu den Blechen. Um die Unterschiede zwischen 180 bar, 200 bar und 230 bar deutlicher sichtbar zu machen, wurden die Proben zusätzlich mittels Mikroskop vermessen.

Die Ergebnisse in Abbildung 46 bis Abbildung 48 zeigen die Unterschiede in Nietkopfendlage und Hinterschnitt, welche aufgrund des Setzkraftunterschieds zu erwarten waren. Für die statistische Versuchsplanung wird aufgrund der Erkenntnisse aus den Mikroskopien 180 bar als Untergrenze definiert, um einen ausreichenden Unterschied zu den 230 bar zu haben und deutliche Ergebnisse zu generieren.

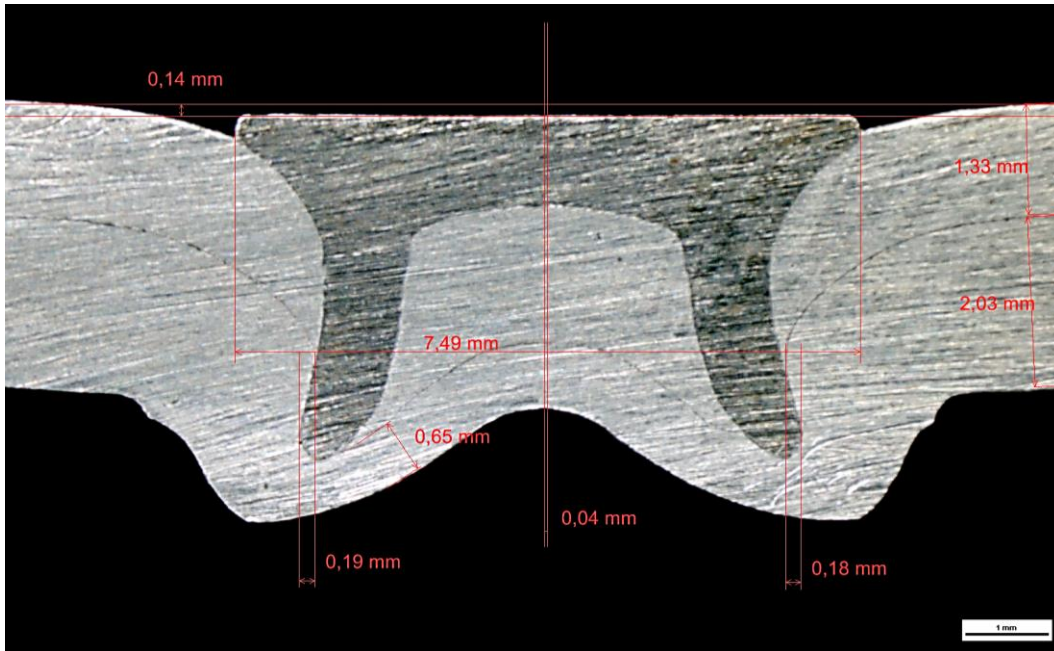


Abbildung 46 Nietergebnis bei 180 bar und 0% Vordehnung

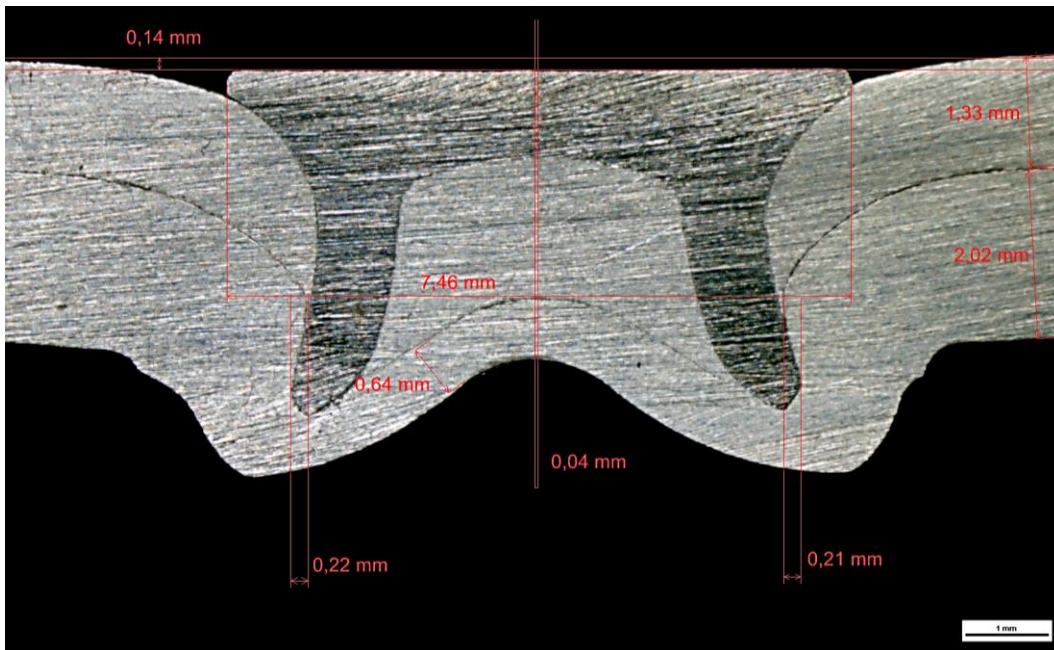


Abbildung 47 Nietergebnis bei 200 bar Setzdruck und 0% Vordehnung

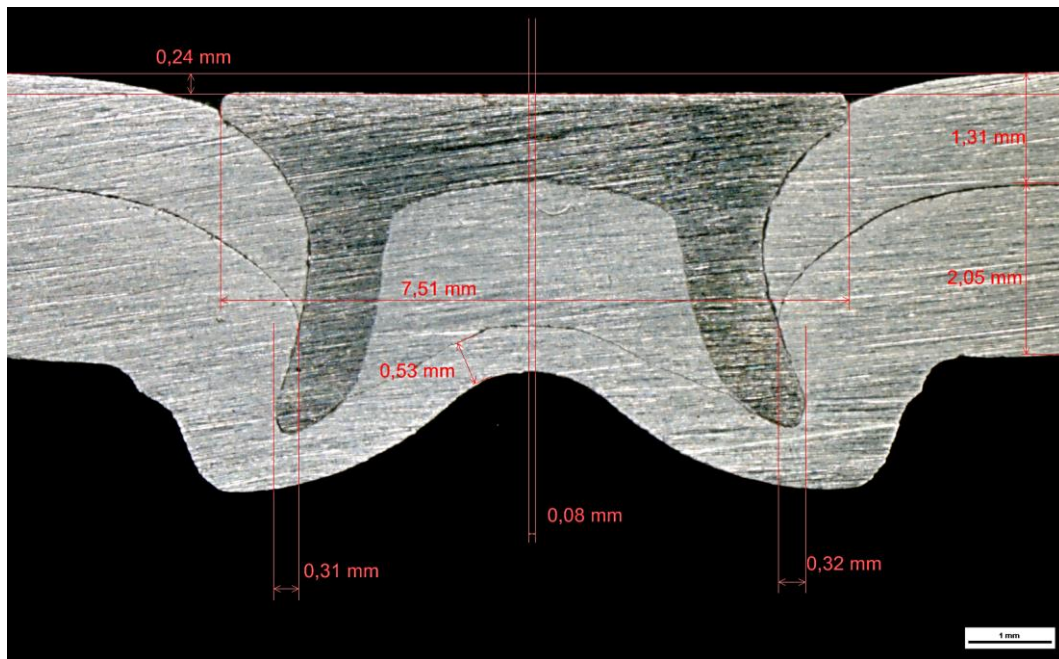


Abbildung 48 Nietergebnis bei 230 bar und 0% Vordehnung

6.2.3 Sensibilitätsanalyse der Exzentrizität

Die Exzentrizität spielt eine große Rolle für die Ausbildung der Nietverbindung und somit auch für die erzielbaren mechanischen Kennwerte. Sie stellt die maximale Abweichung von Nietmittelachse und Schließkopfmittelachse dar. Die korrekte Einstellung des Hydraulikzylinders wird oftmals einmalig vorgenommen und danach selten oder gar nicht wieder kontrolliert.

Es kann im Laufe des Fertigungsprozesses durch die hohen Beanspruchungen der Werkzeuge und durch Elastizitäten im System zu Achsfehlstellungen kommen, die das Nietergebnis negativ beeinflussen. Je nach Anwendungsgebiet und Qualitätsanspruch der Auftraggeber sind unterschiedliche Werte für die erlaubte Exzentrizität zwischen Niet und Schließkopf zulässig. Die Auswirkungen der Exzentrizität auf das Nietergebnis wird für 230 bar Setzdruck und 0% Vordehnung exemplarisch in den folgenden Abbildungen aufgezeigt.

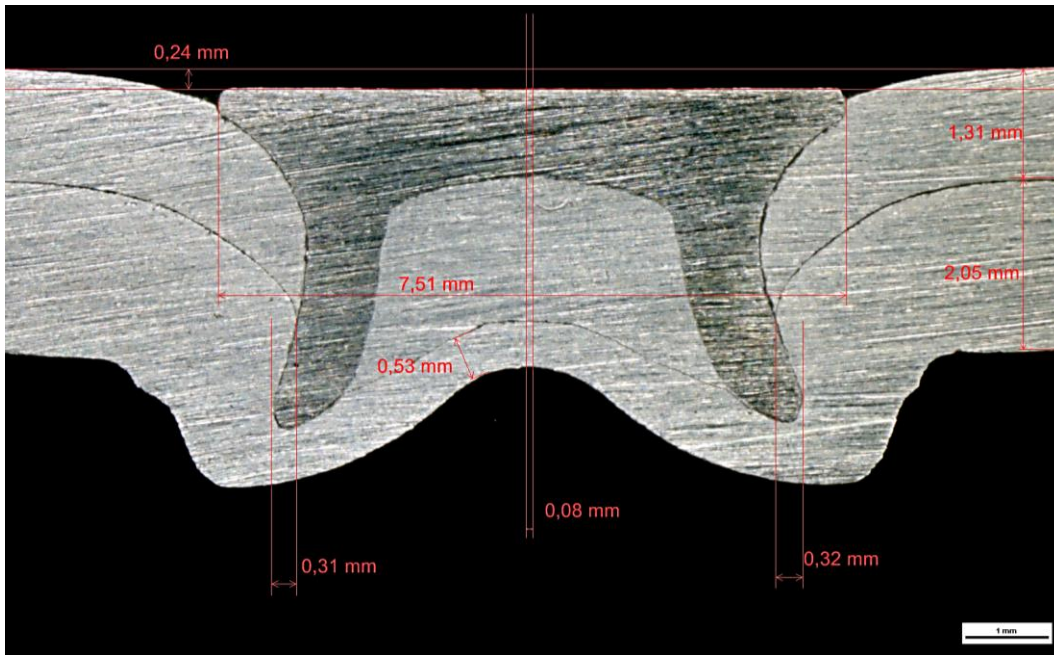


Abbildung 49 Nietergebnis für bestmögliche Maschineneinstellung

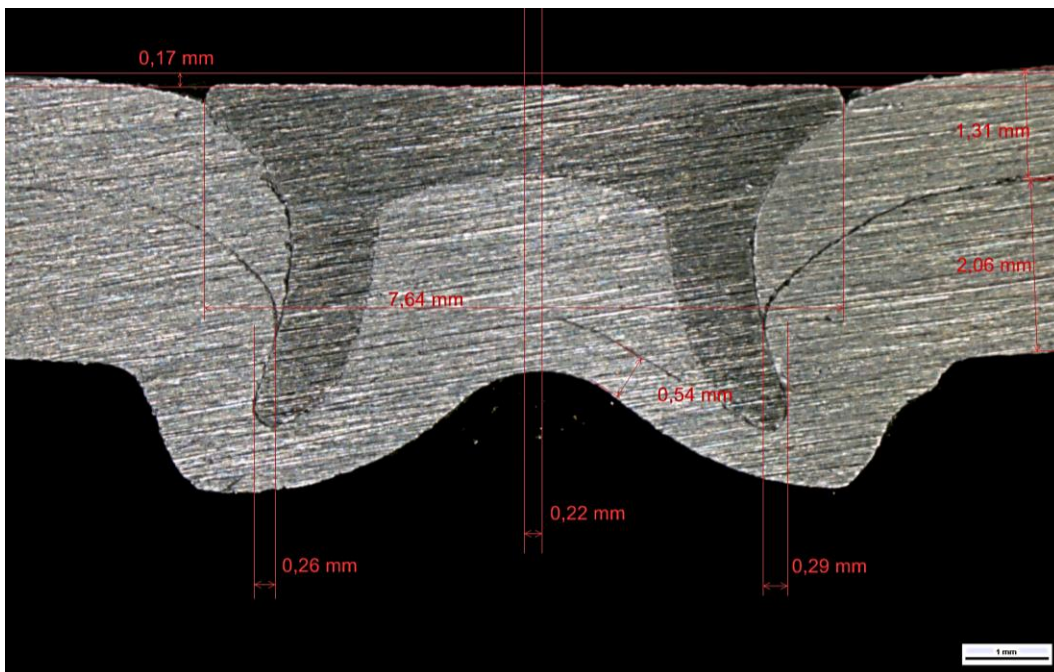


Abbildung 50 Nietergebnis für 0,2 mm Exzentrizität

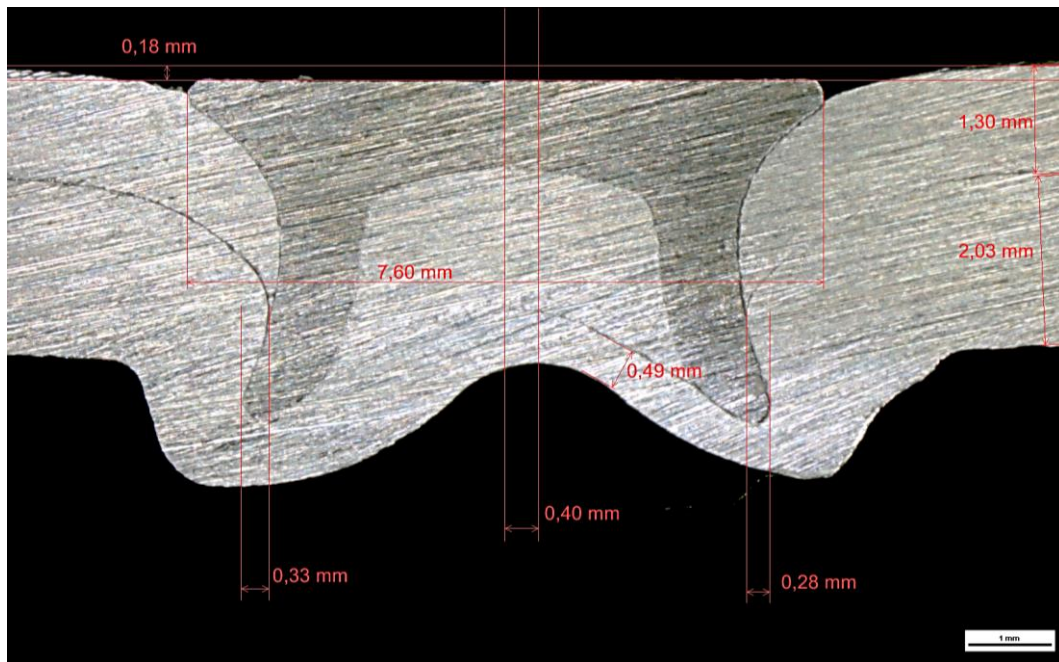


Abbildung 51 Nietergebnis für 0,4 mm Exzentrizität

In Abbildung 49 bis Abbildung 51 ist die deutlich veränderte Ausprägung des Schließkopfes und die Abweichung der charakteristischen Maße dargestellt. Im Speziellen fallen der veränderte Hinterschnitt und die deutlich geringere Restbodenstärke auf. Durch eine zu große Ausdünnung des unteren Blechs können Risse entstehen, die die Dichtheit der Verbindung gefährden und Ausgangspunkt für Korrosion sein können. Die asymmetrische Ausbildung des Niets kann des Weiteren zu richtungsabhängigem Versagensverhalten der Verbindung und zu Rissen im Nietfuß führen.

Um den Einfluss der Exzentrizität auf das Nietergebnis aufzuzeigen, wird diese im Zuge der DoE zwischen dem geringsten einstellbaren Wert (ca. 0,04 bis 0,08 mm), 0,2 mm und 0,4 mm variiert. Die Ergebnisse aus den Kopfzug- und Scherzug-Prüfungen sollen Aufschluss darüber geben, welchen quantitativen Einfluss der Achsversatz auf die Kopfzug- und Scherzug-Festigkeit der Verbindung hat, um somit auf den maximal zulässigen Wert der Exzentrizität schließen zu können.

7 Kraft-Weg-Messung

Die Kenntnis über den Kraft-Weg-Verlauf während des Nietprozesses spielt eine große Rolle für die mechanischen Eigenschaften von Nietverbindungen und die statistische Streuung des Prozesses. Heute kommen bei modernen Nietanlagen Prozessüberwachungssysteme zum Einsatz, die die Kraft und den Weg während des Fügeprozesses aufzeichnen und bei Abweichungen eine nötige Korrektur der Prozessparameter oder eine Wartung der Maschine fordern. Die Messwerte werden auch zum Aufbau und Abgleich von Modellen für Simulationen benötigt. Da die, für die vorliegende Arbeit verwendete Nietanlage über kein Prozessüberwachungssystem verfügt, muss ein Messsystem entwickelt werden, welches die Kraft während des Nietvorgangs möglichst exakt aufzeichnen kann. Der Stempelweg kann über den am Hydraulikzylinder eingebauten Wegsensor ausgelesen werden. Für die Konstruktion der Kraftmessvorrichtung kommen größtenteils Normalien zum Einsatz, welche teilweise für diese Anwendung modifiziert werden. Durch die Verwendung der Normalien werden die Kosten der Konstruktion niedrig gehalten und hochwertige und viel erprobte Bauteile eingesetzt.

7.1 Konstruktion der Kraftmessvorrichtung

Für die Kraftmessung kommt eine Kraftmessdose (3), welche die maximalen Fügekräfte von 55 kN aufnehmen kann zum Einsatz. Diese wird über einen Stift (5), welcher die Matrize (10) trägt und in einem Kugelkäfig (8) gelagert ist belastet. Damit die Krafteinleitung möglichst zentrisch erfolgt, muss bei der Konstruktion großen Wert auf geeignete Form- und Lage-Toleranzen gelegt werden.

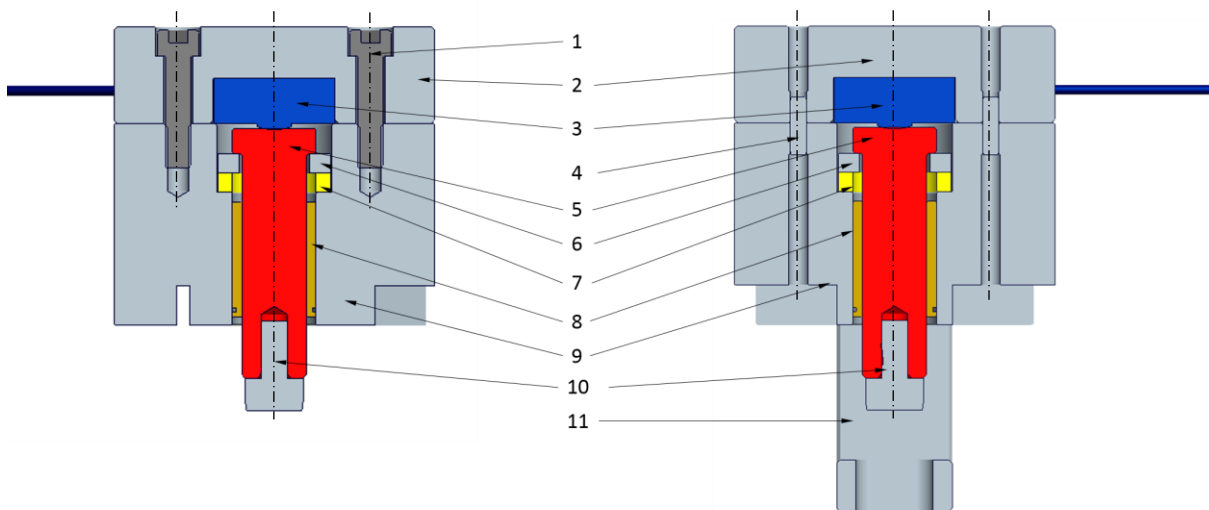


Abbildung 52 Aufbau der Kraftmessvorrichtung

Der Stift, der die Matrize aufnimmt, besteht aus 1.2343 Warmarbeitsstahl mit nitrierter Oberfläche. Die Nitrierschicht dient dazu die Verschleißfestigkeit aufgrund der hohen Flächenpressung durch die Kugeln des Kugelkäfigs zu erhöhen. Da der Stift vom Hersteller für andere Aufgaben konzipiert wurde, müssen vor seinem Einsatz einige Modifikationen vorgenommen werden. Er wird sowohl gekürzt, als auch stirnseitig eine Bohrung zur Aufnahme der Matrize gefertigt. Um die Matrize gegen ein mögliches Herausfallen aus dem Stift zu sichern, ist am Umfang eine Gewindebohrung für den Einsatz einer Madenschraube vorgesehen.

Der Kugelkäfig führt den Stift im Grundkörper (9) und sorgt dafür, dass die Reibung zwischen Stift und Grundkörper minimiert wird und der Stift zentrisch auf die Kraftmessdose drückt.

Eine Dämpfungsscheibe (7) aus einem speziellen Elastomer spannt den Bolzen vor und sorgt zu jedem Zeitpunkt für das Anliegen an der Kraftmessdose. Die Lebensdauer der Dämpfungsscheibe wird durch den Einsatz einer Beilagscheibe (6), welche auf der schmalen Schulter des Bolzens sitzt und ganz an der Dämpfungsscheibe anliegt erhöht. Somit wird die Dämpfungsscheibe auf der kompletten Stirnfläche belastet und das Material geschont.

Der Grundkörper, in dem sowohl Stift, Kugelkäfig und Dämpfungsscheibe eingebaut sind, ist aus 1.2311 Werkzeugstahl gefertigt. Dieser Werkstoff wird aufgrund der hohen Flächenpressung der Kugeln auf der Lauffläche und aus Kostengründen gewählt. Der Bauteil muss somit nicht extra gehärtet werden. Es werden hohe Genauigkeiten in Bezug auf Parallelität der Stirnflächen und Rechtwinkeligkeit der Achsen zu den Stirnflächen gefordert, um die Kräfte möglichst zentral in den Stift einzuleiten und einen lateralen Versatz der Matrize zum Stempel auszuschließen. Die Positionierung des Grundkörpers gegenüber der Druckplatte (2) erfolgt über zwei Passstifte (4), deren Bohrungen wegen der hohen Genauigkeitsanforderungen gerieben werden müssen.

Die Bohrung für den Kugelkäfig wird, um die geforderten Rauigkeitswerte und Toleranzen einhalten zu können mittels Erodieren hergestellt. Die Druckplatte wird über vier Zylinderschrauben (1) mit dem Grundkörper verbunden. Damit die Position des Niets relativ zu den Probenhälften den Erfordernissen entspricht, ist an der Austrittsseite des Stiftes ein Absatz auf dem Grundkörper vorgesehen. Dieser Absatz dient aber nur zur Positionierung des oberen Blechprofils, weshalb ein weiterer Positionierungskörper (11) für das Unterblech vorgesehen werden muss. Die Anforderungen an den Werkstoff des Positionierungskörpers sind gering und deshalb kann dieser aus kostengünstigerem Baustahl gefertigt werden. Wichtig bei diesem Teil ist, dass die Flanken des Absatzes am Grundkörper und die Flanken des Positionierungskörpers genau übereinstimmen. Nur so kann der fertige Prüfling später ohne Versatz an der Prüfmaschine aufgenommen werden.

Die Druckplatte wird ebenso wie der Grundkörper aus 1.2311 gefertigt und hat drei Aufgaben. Sie dient zur Aufnahme der Kraftmessdose, zum Befestigen der Kraftmessvorrichtung an der Nietzange und zur genauen Positionierung des Stiftes gegenüber der Kraftmessdose. Auch bei ihr spielen die Form- und Lage-Toleranzen der Bohrungen und der Stirnfläche zur Verbindung an den Grundkörper beziehungsweise an die Nietzange eine wichtige Rolle.

7.2 Aufzeichnung der Messdaten

Die von der Kraftmessdose und dem Wegmesssensor kommenden Signale werden in der Messhardware aufbereitet und am PC ausgewertet. Hierfür kommen Hard- und Soft-Ware von DEWESoft zum Einsatz. In der Software lassen sich die jeweiligen Eingänge frei konfigurieren und so auf die Ausgangsgrößen der Sensoren einstellen. Der allgemeine Aufbau einer Messkette ist in Abbildung 53 dargestellt.

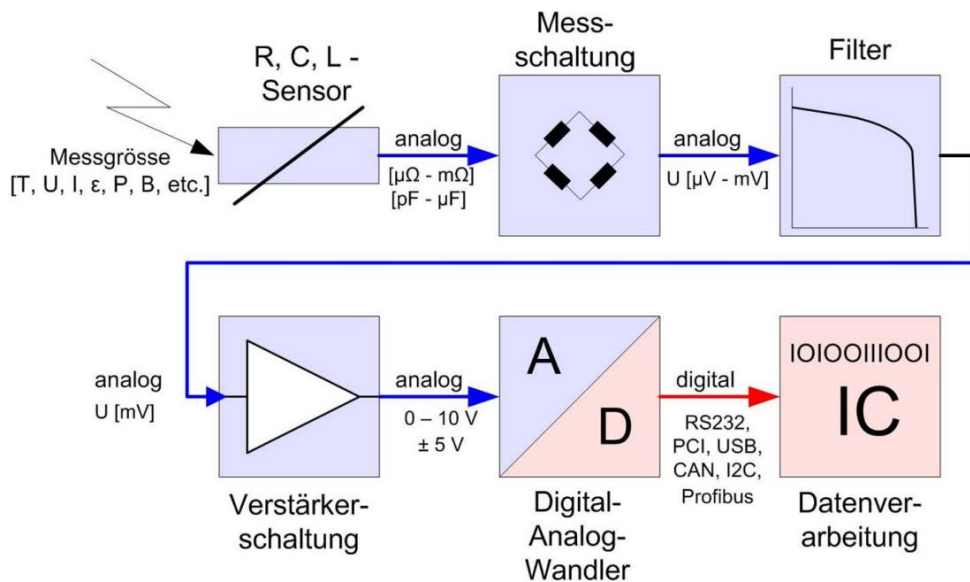


Abbildung 53 Aufbau einer Messkette (Heinrich 2015)

Der Wegsensor liefert ein Spannungssignal, welches je nach Stellung des Hydraulikzylinders einen Wert zwischen 0 und 10 V liefert. Das Signal des Wegsensors wird in der SPS abgegriffen und in den Messverstärker weitergeleitet. In der Software wird ein neuer Eingang angelegt, wo durch hinterlegen einer Geradenfunktion jedem Spannungswert eine Zylinderposition zugewiesen wird. Die Geradenfunktion wird mittels der in der Nietsteuerung angezeigten Werte ermittelt.

Die Kraftmessdose liefert ein Signal in mV/V , welches ebenfalls mittels einer Geradenfunktion die zugehörige Kraft ergibt. Die Gerade kann durch das, bei der Kraftmessdose beiliegende Kalibrierzertifikat beschrieben werden und ist somit eindeutig definiert. Damit eine Verschiebung des Stifts beim Nieten unmöglich ist, wird dieser mit Hilfe der Dämpfungsscheibe permanent gegen die Kraftmessdose gedrückt. Diese Vorspannung besteht auch im unbelasteten Zustand und sorgt für eine möglichst genaue Kraftermittlung. In der Software wird die Vorspannung durch eine Offsetkorrektur berücksichtigt, sodass die angezeigte Kraft die auf die Kraftmessdose wirkt vor dem Nietvorgang Null beträgt.

Mit der Messsoftware wird sowohl das Wegsignal als auch das Kraftsignal in Echtzeit aufgezeichnet. Zusätzlich wird die Kraft-Weg-Kurve aufgenommen, welche später zur Simulation dienen und im Falle von unerwarteten Prüfergebnissen zur Fehlerfindung beitragen soll.

Auch für die statistische Auswertung ist diese Kurve von großer Bedeutung. Proben, welche mit gleichen Parametern gefügt werden sollten die gleichen Kurven aufweisen. Aufgrund der statistischen Abweichung und unkalkulierbarer Einflüsse können die Kurven allerdings leicht voneinander abweichen.

Die erzeugten Kraft-Weg-Diagramme lassen auf die verschiedenen Phasen des Setzvorganges schließen. In Diagramm 2 ist eine typische Kraft-Weg-Kurve abgebildet, welche bei 180 bar Setzdruck, 0 mm Exzentrizität und 0% Vordehnung aufgenommen wurde und die Matrizenkraft über den absoluten Stempelweg darstellt. In Punkt 1 trifft der Niederhalter auf das stempelseitige Blech und spannt das Blechpaket vor. Anschließend fährt der Stempel aus und führt den Niet durch den Niederhalter bis dieser in Punkt 2 auf das Blech trifft. Die Kraft steigt bis der Niet das erste Blech bei annähernd konstanter Kraft durchstanzen kann. In Punkt 3 fällt die Nietkraft abrupt ab, da das erste Blech durch das Durchstanzen keinen Widerstand mehr leisten kann. Da der Niet nach dem Durchstanzen des ersten Blechs sofort wieder Kontakt mit dem matrizenseitigen Blech aufbaut, steigt die Matrizenkraft aber innerhalb weniger hundertstel Millimeter wieder an. Nun folgen das Aufspreizen des Niets und die Ausprägung des Schließkopfes. Diese Phase ist entscheidend für die Ausprägung der charakteristischen Maße der Verbindung (Hinterschnitt, Restbodenstärke) und folglich auch für die erreichbaren mechanischen Kennwerte. Der voreingestellte Setzdruck ist in dieser Phase ausschlaggebend für die maximale Kraft auf die Matrize und den maximalen Weg des Stempels welche in Punkt 4 bzw. kurz danach erreicht werden.

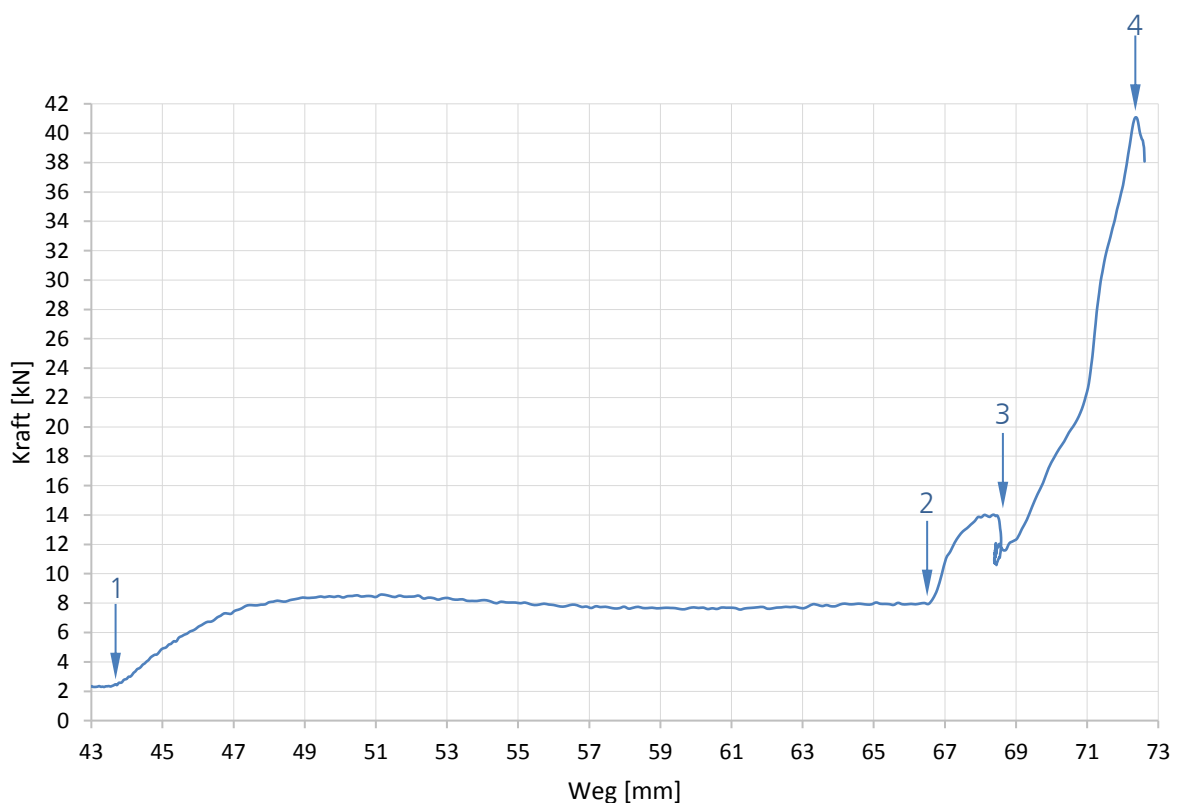


Diagramm 2 Kraft-Weg-Verlauf des Setzprozesses

8 Prüfung der KS2 Proben und Statistische Analyse

Die statistische Untersuchung des Nietprozesses ist im Hinblick auf die Prozessstabilität in der Serienproduktion von enormer Bedeutung. Der Prozess muss mit hinreichender Genauigkeit wiederholbar sein, um konstante Nietergebnisse zu erzielen. Das Streuverhalten und somit die Wiederholbarkeit des Prozesses werden deshalb im Zuge einer statistischen Analyse evaluiert. Des Weiteren wird der Einfluss der Variation definierter Parameter auf die Verbindung und die Wiederholbarkeit ermittelt und mittels statistischer Versuchsplanung beurteilt.

8.1 Modell technischer Prozesse

Technische Systeme sind oft komplex und nicht analytisch beschreibbar. Um Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern finden zu können, gibt es die Möglichkeit, diese in empirischen Versuchen zu variieren und durch Analyse Wechselwirkungen zwischen den Größen zu beschreiben. Abhängig von der Anzahl der Eingangsparameter (Inputs), Störgrößen (kontrollierbar und unkontrollierbar) und Ausgangsparameter (Outputs) kann die Parametervariation sehr aufwendig und die Ergebnisfindung langwierig werden. Es muss also eine Versuchsplanung erarbeitet werden, um den zeitlichen und monetären Aufwand möglichst gering zu halten und trotzdem statistisch abgesicherte Ergebnisse zu generieren.

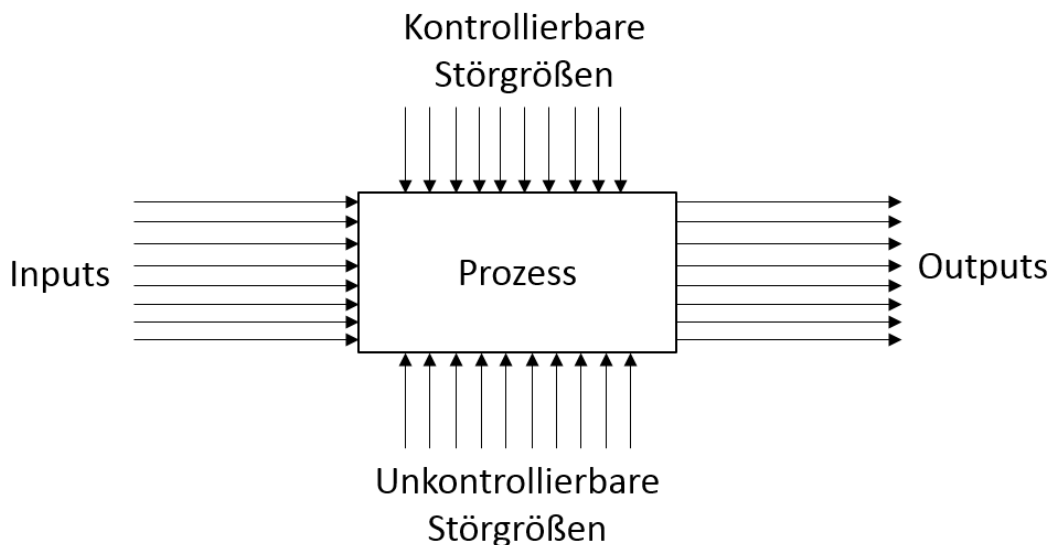


Abbildung 54 Modell eines technischen Prozesses

8.2 Versuchsplanung

Für die Versuchsplanung wird zuerst eruiert, welche beeinflussbaren und unbeeinflussbaren Einflussparameter auf das System wirken. Hierfür ist es sehr wichtig möglichst alle Parameter zu erfassen und auf deren Basis die relevanten Faktoren auszuwählen.

Da die Anzahl der Einflussfaktoren einen großen Einfluss auf die anwendbare Versuchsplanungsmethode und auch die Größe der Versuchsmatrix hat, können zumeist nur die wichtigsten Faktoren für die DoE herangezogen werden. In Abbildung 55 sind einige Einflussparameter, welche das Nietergebnis beeinflussen können aufgelistet.

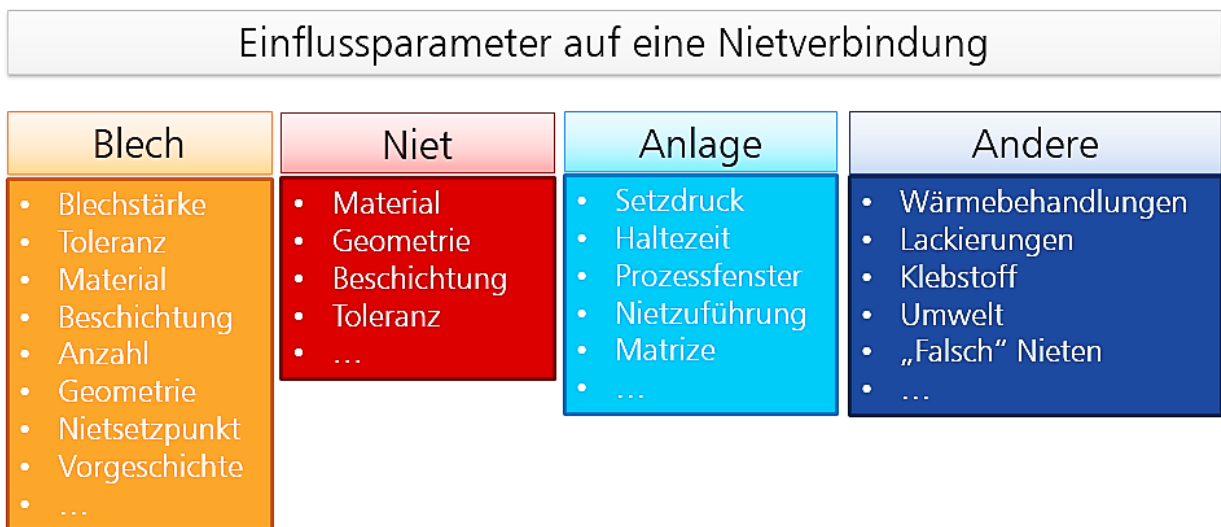


Abbildung 55 Einflussparameter auf eine Nietverbindung

Aus diesem Pool von Einflussparametern wird eine maximale Anzahl an Versuchsparametern definiert, wobei hierbei speziell auf Zeit- und Kosten-Faktoren Rücksicht zu nehmen ist. Welche Parameter schlussendlich für die Untersuchung herangezogen werden, hängt von den erwarteten Ergebnis und Einfluss der einzelnen Parameter ab. Grundsätzlich sollten die Parameter so gewählt werden, dass ein eindeutiger Einfluss auf die Ausgangsparameter angenommen werden kann. Aussagekräftige und reproduzierbare Ergebnisse können nur dann erreicht werden, wenn die gewählten Parameter exakt eingestellt werden können. Es ist also im Vorhinein wichtig die Eingangsparameter zu kennen und zu wissen, wie diese gewollt oder ungewollt beeinflusst werden können.

Konventionelle Methoden der Versuchsplanung:

Die konventionelle Versuchsplanung kommt ohne statistische Methoden zur Größenreduktion der Versuchsmatrix aus und funktioniert je nach Modell indem man spezifische Vorgehensweisen und Abläufe durchführt, welche charakteristisch für die jeweilige Methode sind. Die Wahl des Modells wird maßgeblich vom Ziel der Untersuchung, dem Zeit- und dem Kosten-Aufwand bestimmt. In Abbildung 56 sind einige gängige Methoden der konventionellen Versuchsplanung mit zwei Einflussgrößen dargestellt.

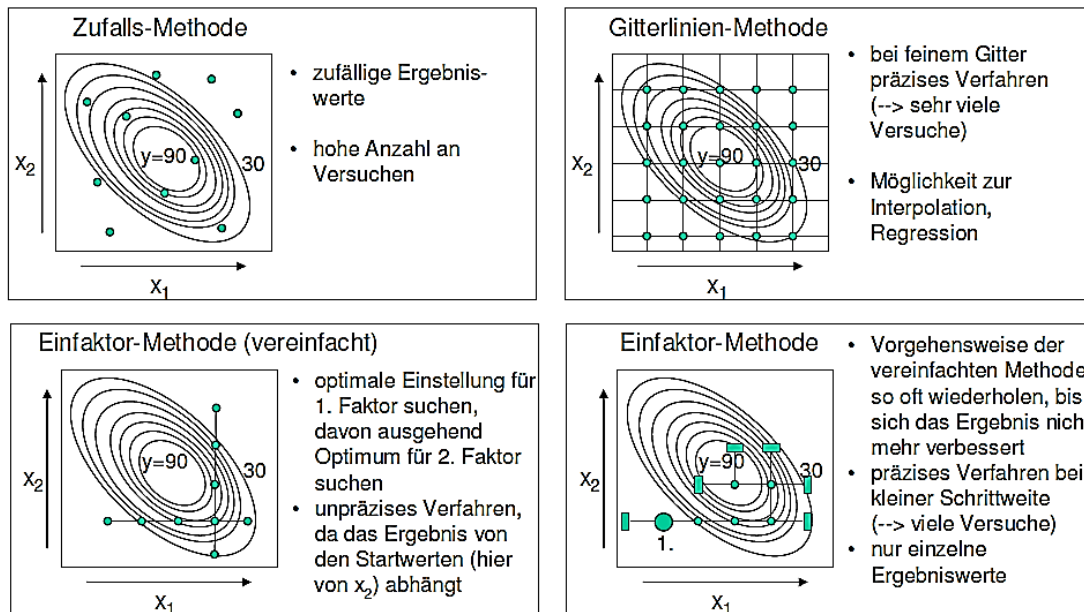


Abbildung 56 Konventionelle Methoden der Versuchsplanung (Adam)

Mit steigender Anzahl der Einflussgrößen müssen die Diagramme um je eine Dimension erweitert werden. Dies wird bei mehr als zwei Inputs allerdings sehr aufwendig, da die Anzahl der nötigen Versuche drastisch zunimmt. Wenn man zum Beispiel 5 Einflussgrößen betrachtet und diese auf 4 Stufen variiert, müssen mit der Gitternetz-methode $4^5=1024$ Versuche durchgeführt werden. Steigt die Anzahl der Einflussgrößen oder Stufen weiter an, sind die Versuche kaum mehr handhabbar.

Es kann aber durchaus sinnvoll sein auf diese einfachen Modelle zurückzugreifen, wenn die Anzahl der Parameter gering oder der Prozess wenig komplex ist und man daher im Vorhinein Aussagen über den Einfluss gewisser Parameter treffen kann. So kann es beim Finden des Optimums eines bekannten Prozessen durchaus sinnvoll sein mit der Gitternetz-Methode oder einer Einfaktor-Methode zu arbeiten. Man geht hierbei bewusst das Risiko ein, Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern nicht zu erfassen.

8.3 Erstellen einer Versuchsmatrix

Die Anzahl der benötigten Proben ist von der Anzahl an Eingangs- und Ausgangs-Parametern abhängig. Diese Größen definieren die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten bei gewählter Versuchsplanungsmethodik. Da der Herstellungsprozess der Proben aber einer statistischen Verteilung unterliegt, ist es notwendig mehrere Wiederholungen mit demselben Parametersatz durchzuführen.

Im Zuge der Masterarbeit beschränkt sich die Parameteranzahl auf drei Parameter, welche zwei bzw. dreistufig variiert werden. Bei dieser verhältnismäßig geringen Parameteranzahl ist es nicht zwingend notwendig auf spezielle Techniken der statistischen Versuchsplanung zurückzugreifen und es kann eine konventionelle Methode der Versuchsplanung zur Anwendung kommen.

Aus diesem Grund wird ein vollfaktorieller Versuchsplan ausgearbeitet, welcher durch dreimalige Wiederholung pro Lastfall statistisch abgesichert ist. Die nötige Anzahl an Proben ergibt sich somit bei zwei Variationsstufen des Setzdruckes, drei Variationsstufen der Vordehnung und drei Variationsstufen der Exzentrizität zu $3 \times 2 \times 3 \times 3 = 54$ Proben je Belastungsfall. Da im Zuge der Untersuchungen sowohl die Kopfzugfestigkeit als auch die Scherzugfestigkeit ermittelt werden sollen, müssen insgesamt 108 Proben hergestellt werden.

Es ergeben sich aufgrund der Parametervariationen die in Tabelle 1 gezeigten Parametersätze für die KS2 Proben, welche jeweils sechs Mal hergestellt werden, um statistisch abgesicherte Werte für die Kopfzugs- und Scherzugs-Festigkeit zu erhalten.

Parametersatz	Exzentrizität [mm]	Vordehnung [%]	Setzdruck [bar]
1	0	0	180
2	0	0	230
3	0	4	180
4	0	4	230
5	0	8	180
6	0	8	230
7	0,2	0	180
8	0,2	0	230
9	0,2	4	180
10	0,2	4	230
11	0,2	8	180
12	0,2	8	230
13	0,4	0	180
14	0,4	0	230
15	0,4	4	180
16	0,4	4	230
17	0,4	8	180
18	0,4	8	230

Tabelle 1 Versuchsmatrix

8.4 Prüfen der KS2 Proben

Das Prüfen der KS2 Proben erfolgt quasistatisch mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min auf einer Zwick Z250 Zugprüfmaschine, welche für diesen Zweck mit einem Zwick LaserXTend Laser-Wegmesssystem ausgerüstet wurde. Dieses Messsystem erfasst die Position der zwei Schenkel der KS2 Probe zueinander durch charakteristische Muster in der Oberfläche, ohne dass spezielle Markierungen notwendig sind. Die Vorteile dieses Systems sind, dass die Abstraten sehr hoch sind und der Weg mit hoher Genauigkeit verfolgt werden kann. Zusätzlich kann durch Verfolgung mehrerer Punkte auch eine Querbewegung erfasst werden. Zur Aufnahme der Proben wurden eigens Probenaufnahmen entwickelt, die eine dem Belastungsfall entsprechende Anbindung der Proben an die Zugprüfmaschine gewährleisten. Des Weiteren muss durch die Aufnahmen ein Schlupfen der Proben und ein Aufweiten der Bohrungen verhindert werden. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde ein Riffelprofil auf die Flanken der Aufnahmen erodiert, welches eine formschlüssige Verbindung zwischen Probe und Aufnahme sicherstellen soll. In jedem Fall sind elastische Verformungen der Aufnahmen zu vermeiden, da diese das Messergebnis verfälschen würden. Es muss also eine hohe Steifigkeit gewährleistet werden. Um eine maximale Steifigkeit zu erreichen, wird auf eine massive Konstruktion und einen durchhärtbaren Werkstoff gesetzt. Die hohe Härte des Werkstoffs ist einerseits zur Verschleißreduzierung der Riffelfläche und andererseits zur Minimierung der Lochleibung und des Verschleißes der Aufnahmebohrung nötig. Nicht zuletzt wird auch die Festigkeit aufgrund der Gefügeänderung während des Härtens erhöht.

8.4.1 Kopfzugprüfung

Die Kopfzugprüfung erfolgt, wie in Abbildung 57 schematisch dargestellt durch quasistatische Zugbelastung in Richtung der Nietachse. Während des Versuchs werden die Zugkraft der Traverse und der Weg der Probenschenkel in Echtzeit aufgezeichnet. Aus den Diagrammen können dann die Kopfzugfestigkeit und das Arbeitsaufnahmevermögen bei Zugbelastung abgeleitet werden.

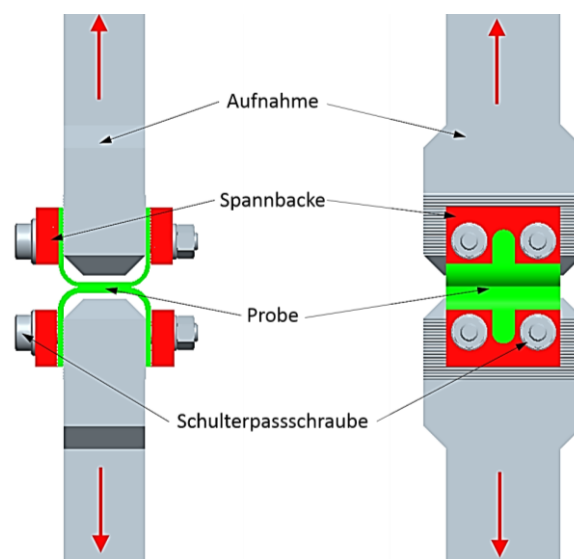


Abbildung 57 Prüfaufbau beim Kopfzugversuch

Die Kopfzugfestigkeit $F_{K_{max}}$ entspricht hierbei der maximal erreichten Zugkraft und ist ein charakteristisches Versagenskriterium der Verbindung. Das Arbeitsaufnahmevermögen W_K kann durch Integration der Kraftkurve über den Weg bis zum Bruch errechnet werden und lässt auf die Versagensart und das Verhalten bei schlagartiger Belastung schließen. Ist das Arbeitsaufnahmevermögen gering, so ist mit einem plötzlichen Versagen der Verbindung bei Überbelastung zu rechnen ohne dass sich dieses im Vorfeld ankündigt. Bei hohem Arbeitsaufnahmevermögen kündigt sich das Versagen der Verbindung durch größere plastische Verformung an und die Wahrscheinlichkeit bei schlagartiger Belastung nicht zu Versagen ist größer. Das Arbeitsaufnahmevermögen von elementaren mechanischen Fügeverbindungen ist im Allgemeinen gering (siehe Kapitel Hybridfügen Abbildung 24), weshalb diese Verfahren oft mit Kleben kombiniert werden.

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F_{max} N	dL bei F_{max} mm	F_{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
	1	3030	5,5	792	6,6	KS2_Kopfzug_8

Seriengrafik:

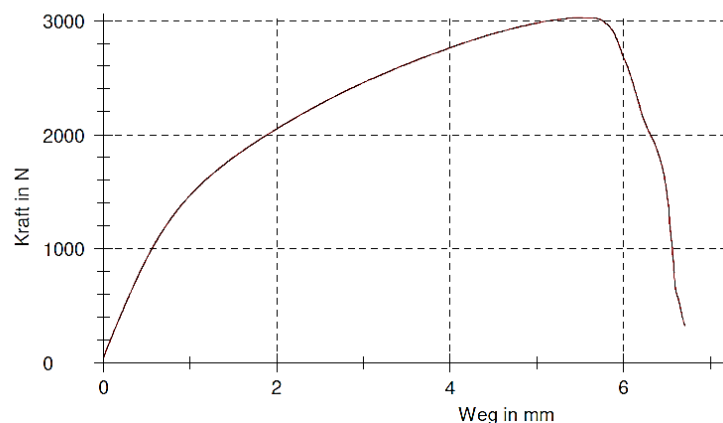


Diagramm 3 Kraft-Weg-Kurve eines Kopfzugversuchs

Versuchsaufbau und Durchführung:

Für den Kopfzugversuch werden zuerst die Proben auf den Aufnahmen befestigt und anschließend als Paket in die Zugprüfmaschine eingebaut. Hierbei ist darauf zu achten, dass beim Montieren der Proben keine zusätzliche Kraft oder zusätzliches Moment auf die Fügestelle einwirkt, da dies zu verfälschten Ergebnissen führen kann. Nachdem die Aufnahmen mit den Proben in der Maschine fixiert sind, wird der Laser auf die Aussparung in den Spannbacken gerichtet und die zu verfolgenden Punkte in der Software ausgewählt. Da beim Kopfzugversuch nur minimale Querbewegungen auftreten, ist es nicht nötig diese zu erfassen und es wird folglich nur der Weg in Zugrichtung erfasst. Damit die Laserabstandsmessung funktioniert, muss der Messbereich abgeschirmt und der Laser scharf gestellt werden. Nach dem Einrichten des Lasers und der Kontrolle aller vorher eingestellten Parameter kann der Versuch gestartet werden.

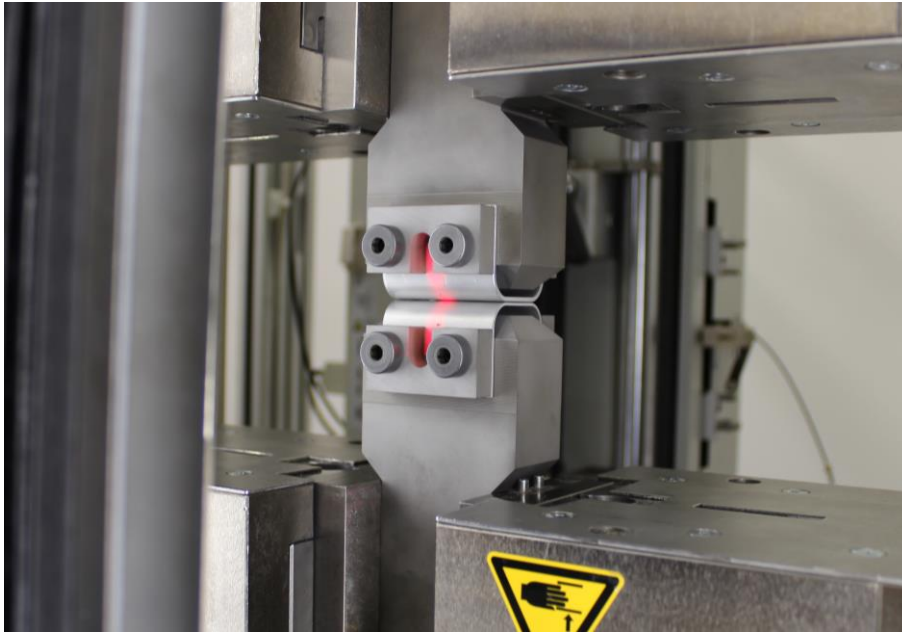


Abbildung 58 Aufbau für den Kopfzugversuch

Ergebnisse:

Die Ergebnisse aus der zerstörenden Prüfung sind Kraft-Weg-Diagramme und Tabellen mit den Maximalwerten für Kraft und Weg. Es werden jeweils drei Kurven in einem Diagramm dargestellt, die von Proben mit denselben Parametern stammen. So kann ein direkter Vergleich erfolgen und eine erste Aussage über die Streuung der Festigkeitswerte getroffen werden. Die Ergebnisse mit den dazugehörigen Diagrammen können dem Anhang entnommen werden. Des Weiteren können verschiedene Versagensformen auftreten. Grundsätzlich kann der Niet entweder aus dem Schließkopf herausgezogen werden, oder aber der Nietkopf wird durch das Oberblech hindurchgezogen.



Abbildung 59 Nietkopf durchgezogen (links), Niet aus Schließkopf gezogen (rechts)

8.4.2 Scherzugprüfung

Die Scherzugprüfung erfolgt ebenso wie die Kopfzugprüfung durch eine quasistatische Belastung in der Zugprüfmaschine. Die Nietachse ist in diesem Fall allerdings rechtwinklig zur Zugrichtung orientiert, weshalb anstatt einer Zug- eine Scher-Belastung auftritt. Der schematische Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 60 dargestellt.

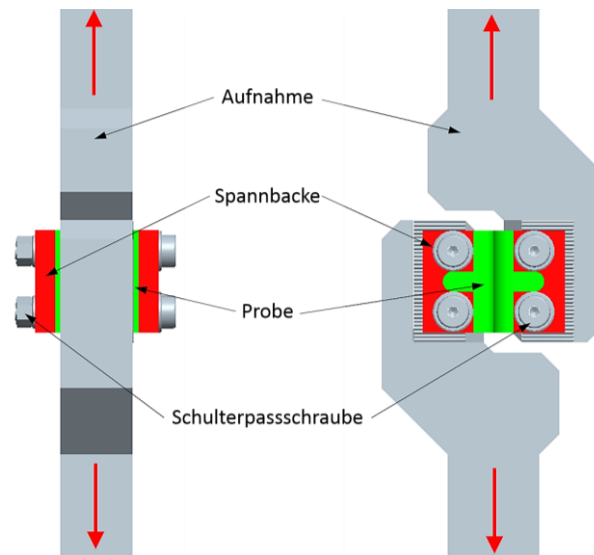


Abbildung 60 Prüfaufbau beim Scherzugversuch

Es werden wieder die Zugkraft der Traverse und der Weg der Probenschenkel während des Prüfvorgangs aufgezeichnet. Das Ergebnis der Prüfung ist die Scherzugfestigkeit F_{Smax} , welche der maximal erreichten Zugkraft entspricht und das Arbeitsaufnahmevermögen bei Scherbelastung W_s . Für das Arbeitsaufnahmevermögen gelten dieselben Aussagen wie bei der Kopfzugprüfung und es gelten folglich auch die gleichen Gesetzmäßigkeiten bezüglich Versagen und schlagartiger Belastung. Dass die Kraft in Diagramm 4 nach dem Erreichen der Maximalkraft nicht auf 0 N abfällt, ist auf das Verkeilen des Niets nach dem Ausreißen zwischen den Probenhälften zurückzuführen. Es darf folglich für die Arbeitsaufnahmefähigkeit nur der Weg bis zum Bruch der Verbindung herangezogen werden.

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
	1	4204	1,6	-	-	KS2_Scherzug_57

Seriengrafik:

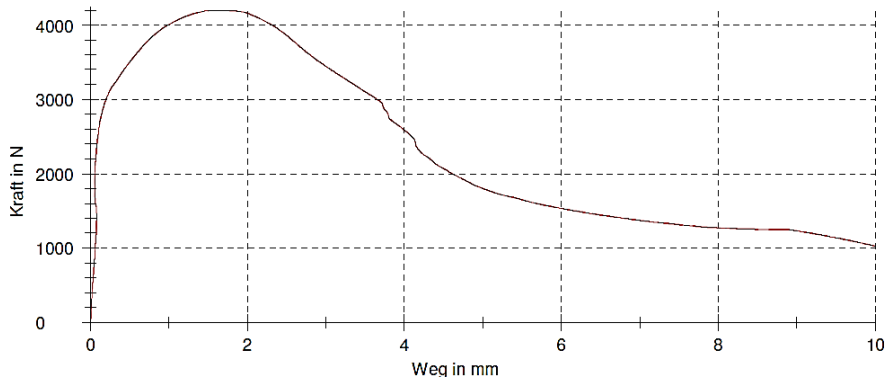


Diagramm 4 Kraft-Weg-Kurve eines Scherzugversuchs

Versuchsaufbau und Durchführung:

Der Aufbau und die Durchführung des Scherzugversuchs erfolgen im Wesentlichen gleich wie im Kopfzugversuch, nur werden diesmal andere Aufnahmen verwendet und die Wegmessung gestaltet sich etwas schwieriger. Da bei der Scherzugprüfung eine Querbewegung, verursacht durch das Aushebeln des Niets auftreten kann, müssen hierbei vier Punkte an den Probenschenkeln und ihr Abstand zueinander gemessen werden. So kann der Weg der Probe genau erfasst und auf die Längs und Querbewegung zurückgerechnet werden.



Abbildung 61 Durchführung der Scherzugprüfung

Ergebnisse:

Aus der Prüfung erhält man gleich wie in der Kopfzugprüfung ein Kraft-Weg-Diagramm und eine Tabelle mit den im Versuch maximal erreichten Werten für Kraft und Weg. Es werden wieder Proben mit den gleichen Parametersatz in einem Diagramm dargestellt, um die Streuung bei gleicher Konfiguration grafisch darzustellen.

Die Versagensform beim Scherzugversuch unterscheidet sich gravierend von der im Kopfzugversuch. Der Niet wird durch die angreifende Kraft ausgehebelt und reißt komplett aus dem Ober- und Unter-Blech heraus, wobei er auch zusätzliche Schäden durch die Kollision von Nietkopf und matrizenartigem Blech verursachen kann (Siehe Markierung in Abbildung 62).

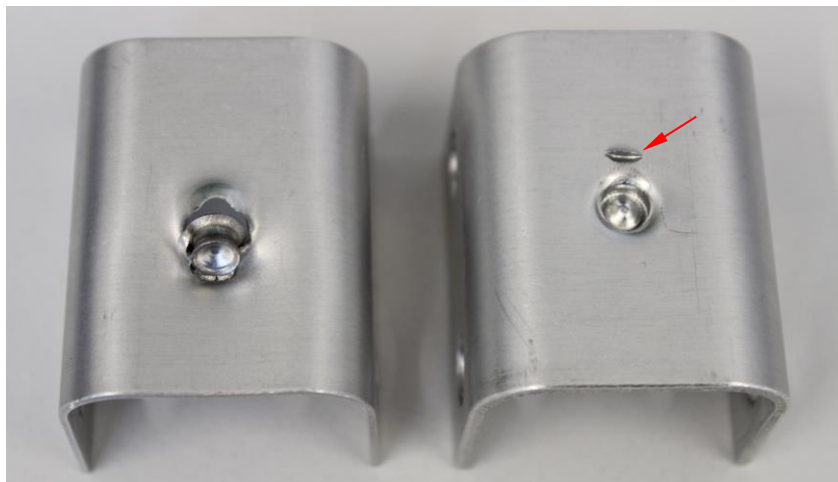


Abbildung 62 Versagensform beim Scherzugversuch

9 Analyse der Ergebnisse

Für die Auswertung von statistischen Versuchsplänen gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Softwarepaketen, welche oft für spezielle Anwendungsbereiche optimiert sind oder durch Zusatzpakete für den jeweiligen Zweck erweitert werden können. Für die Analyse der Ergebnisse aus dem Kopfzug- bzw.- Scherzug-Versuch wurde die Software Minitab 17 gewählt, in welcher die DoE Matrix durch Definition der Eingabeparameter und Variationsstufen direkt generiert und nachfolgend automatisch ausgewertet werden kann. Wichtig für eine korrekte Auswertung der Prüfergebnisse und Generierung von aussagekräftigen Daten zur statistischen Beurteilung ist die Einhaltung der definierten Schritte zur Datenanalyse. Hierfür werden einige wichtige Begriffe erklärt und notwendige Eingabeparameter zur Auswertung definiert.

9.1 Grundlagen der statistischen Auswertung von Versuchsplänen

Streuung:

Um die Auswirkung eines Faktors auf eine spezifische Ausgangsvariable beschreiben zu können, ist es notwendig, dass die Streuung der Ausgangsvariablen deutlich kleiner als der zu messende Effekt ist. Andernfalls kann der Einfluss der Variation des spezifischen Faktors aufgrund der Streuung nicht beurteilt werden. Streut zum Beispiel die Kopfzugfestigkeit um 100 N und der Einfluss der Exzentrizität beträgt 50 N, so könnte der Einfluss der Exzentrizität aufgrund der großen Streuung nicht erfasst werden. (Kleppmann 2013)

Test auf Normalverteilung:

Da die Methoden der statistischen Versuchsplanung nur bei annähernd normalverteilten Daten brauchbare Ergebnisse liefern, ist es notwendig diese auf Normalverteilung zu überprüfen. Es gilt hierbei die Annahme, dass die zufällige Streuung der Daten, welche durch unkontrollierbare Einflüsse entsteht einer Gauß'schen Glockenkurve entspricht. Um auf Normalverteilung zu prüfen, kann bei ausreichend großer Versuchsmatrix das Histogramm (Häufigkeit des auftretenden Wertes über alle Werte) zur Beurteilung herangezogen werden.

Sind im Rahmen der Untersuchung nicht ausreichend viele Daten vorhanden, um die Verteilung mittels Histogramm zu bestimmen, so kann auf mathematische Modelle zurückgegriffen werden, die auch Hypothesentests genannt werden. Bei diesen Tests wird angenommen, dass die Messreihe normalverteilt ist und die Daten analysiert (Nullhypothese). Maßgeblich dafür, ob die Hypothese stimmt oder nicht ist der sogenannte p-Wert. Dieser Wert kann zwischen 0 und 1 liegen und sagt aus, ob die angenommene Hypothese zutrifft oder verworfen werden muss bzw. ob die Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung signifikant sind oder nicht. Grundsätzlich muss der p-Wert kleiner als das Signifikanzniveau α sein, damit die Hypothese als bestätigt angesehen werden kann. Das Signifikanzniveau α beschreibt das Risiko, dass eine Nullhypothese fälschlicherweise verworfen wird und wird üblicherweise mit 5% ($\alpha=0,05$) angenommen. (Minitab 2016)

Haupteffektdiagramm und Wechselwirkungsdiagramm:

Ein Haupteffektdiagramm zeigt den Effekt der Variation eines Parameters auf die Antwortvariable auf. Maßgeblich für den Einfluss des jeweiligen Parameters sind die Steigung der Geraden und die Abweichung um den Mittelwert. Je steiler die Gerade verläuft, desto höher ist der Einfluss des Parameters. Verläuft die Gerade horizontal, wirkt sich die Variation des Parameters nicht auf die Antwortvariable aus. Bei der Überlagerung von Haupteffekten von verschiedenen Parametern auf dieselbe Antwortvariable entsteht ein Wechselwirkungsdiagramm. Wechselwirkungen treten auf, wenn der Effekt eines Parameters von der Variationsstufe eines anderen Parameters abhängig ist. Bei parallel verlaufenden Linien besteht keine Wechselwirkung zwischen zwei Parametern. Je größer die Steigungsdifferenz der Linien wird, desto höher ist die Wechselwirkung zwischen den Parametern. (Minitab 2016)

Regressionsanalyse:

Bei der Regressionsanalyse wird anhand der empirisch ermittelten Daten aus den Versuchen eine Gleichung generiert, die das Verhalten der Antwortvariablen auf die Veränderung der Eingangparameter abbilden soll. Für die lineare Regression wird die normale Schätzmethode der kleinsten Quadrate angewandt, mit der die Gleichung durch Minimieren der Summe der quadrierten Residuen erzeugt wird. (Minitab 2016)

Das Ergebnis dieses Verfahrens ist eine lineare Gleichung, die die Antwortvariable durch Superposition der einzelnen Einflüsse der Eingangparameter multipliziert mit einem Koeffizienten ausdrückt. Diese Gleichung bildet die Realität nicht exakt ab, aber lässt Prognosen über die Antwortvariable bei Variation verschiedener Parameter zu.

Überprüfung des Modells:

Das in der Regressionsanalyse generierte Modell muss in jedem Fall auf seine Aussagekräftigkeit untersucht werden. Hierfür werden zwei Werte zur Beurteilung des mathematischen Modells vorgestellt. Der erste Wert ist das/der sogenannte Bestimmtheitsmaß oder Determinationskoeffizient R^2 . Dieser kann zwischen 0 und 1 liegen, wobei 1 bedeutet, dass das mathematische Modell die Daten einwandfrei beschreibt und 0 bedeutet, dass das Modell die Daten unzureichend beschreibt. Es gilt also ein Maximum für R^2 anzustreben, um ein aussagekräftiges Modell zu erhalten. Der zweite Wert zum Beschreiben eines Modells ist der Korrelationskoeffizient r . Der Korrelationskoeffizient gibt an, in welchem Ausmaß sich zwei Variablen tendenziell gemeinsam ändern. Dieser Wert kann zwischen -1 und +1 liegen, wobei Werte von ± 1 eine perfekte Übereinstimmung bedeuten. Wenn eine Beziehung nicht gegeben oder zufällig ist, liegt r nahe bei 0. (Minitab 2016)

Residuen und Residuendiagramme:

Die Abweichung des empirisch ermittelten Messwertes und des prognostizierten Wertes aus der Regressionsanalyse wird als Residuum bezeichnet. Die Residuen sollten für ein aussagekräftiges Modell so klein wie möglich, unabhängig und normalverteilt sein. Standardisierte Residuen entsprechen dem Wert eines Residuums dividiert durch den Schätzwert von dessen Standardabweichung. Diese dienen vor allem dazu Ausreiser leichter zu erkennen. (Minitab 2016)

Mittels Residuendiagrammen kann man grafisch die erhobenen Daten mit dem erzeugten mathematischen Modell vergleichen. In Minitab werden bei der DoE Auswertung automatisch vier Diagramme generiert, welche das Histogramm der Residuen, das Wahrscheinlichkeitsnetz für Residuen, die Residuen vs. Anpassungen und die Residuen vs. Reihenfolge darstellen. Für jedes dieser Diagramme gibt es Kriterien, die auf die Richtigkeit des Modells bzw. auf mögliche Fehler hindeuten. Im Histogramm wird die Häufigkeitsverteilung der Residuen dargestellt. Hier kann darauf geschlossen werden, ob die Daten schief sind bzw. ob Ausreiser vorhanden sind. Das Wahrscheinlichkeitsnetz liefert Aufschluss darüber, ob die Residuen Normalverteilt sind oder nicht. Bei den Residuen vs. Anpassung wird geprüft, ob die Residuen eine konstante Varianz aufweisen. Im Diagramm Residuen vs. Reihenfolge kann man auf systematische Fehler schließen die das Testergebnis verfälschen. (Minitab 2016)

Optimieren der Ausgangsvariablen:

Wenn das mathematische Modell angepasst wurde und allen angeführten Anforderungen entspricht, kann mit dem geeigneten Softwaretool leicht ein Optimum für eine Antwortvariable berechnet werden. Diese Vorgehensweise nennt man Zielgrößenoptimierung. Sollen mehrere Antwortvariablen optimiert werden, müssen die Bedeutung dieser für das gewünschte Ziel definiert werden. Minitab ermittelt dann unter Berücksichtigung der Gewichtung der Antwortvariablen das Optimum für alle Antwortvariablen.

9.2 Auswertung der Ergebnisse aus den Kopfzugversuchen

Die Auswertung der Kopfzugversuche ergab, dass sowohl die p-Werte der Faktor-Wirkungen, als auch jene der Zweifachwechselwirkungen (bis auf die Wechselwirkung zwischen Exzentrizität und Setzdruck) wegen $p \leq 0,05$ signifikant sind. Es wurde deshalb auf die Vereinfachung des Modells verzichtet und die Regressionsfunktion mit allen Wechselwirkungen als Ergebnis erhalten. Die Ergebnisse der Varianzanalyse und der Regressionsanalyse sind in Abbildung 63 dargestellt. Das mathematische Modell bildet die empirisch ermittelten Daten gut ab, da der R^2 -Wert mit 86,07% deutlich über dem 80% Limit für ein aussagekräftiges Modell liegt.

Varianzanalyse

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Modell	15	962504	64167	15,66	0,000
Blöcke	2	2049	1024	0,25	0,780
Linear	5	835900	167180	40,79	0,000
Exzentrizität [mm]	2	124224	62112	15,16	0,000
Vordehnung [%]	2	472209	236105	57,61	0,000
Setzdruck [bar]	1	239467	239467	58,43	0,000
2-Faktor-Wechselwirkungen	8	124554	15569	3,80	0,002
Exzentrizität [mm]*Vordehnung [%]	4	29171	7293	1,78	0,153
Exzentrizität [mm]*Setzdruck [bar]	2	31707	15853	3,87	0,030
Vordehnung [%]*Setzdruck [bar]	2	63677	31838	7,77	0,001
Fehler	38	155728	4098		
Gesamt	53	1118231			

Zusammenfassung des Modells

S	R-Qd	R-Qd(kor)	R-Qd(prog)
64,0164	86,07%	80,58%	71,88%

Regressionsgleichung

$$\begin{aligned}
 \text{Kopfzugfestigkeit [N]} = & 3151,56 - 67,2 \text{ Exzentrizität [mm]}_0,0 + 25,4 \text{ Exzentrizität [mm]}_0,2 \\
 & + 41,8 \text{ Exzentrizität [mm]}_0,4 - 130,1 \text{ Vordehnung [\%]}_0 \\
 & + 44,6 \text{ Vordehnung [\%]}_4 + 85,6 \text{ Vordehnung [\%]}_8 \\
 & - 66,59 \text{ Setzdruck [bar]}_{180} + 66,59 \text{ Setzdruck [bar]}_{230} \\
 & + 14,6 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Vordehnung [\%]}_0,0 \ 0 \\
 & - 20,3 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Vordehnung [\%]}_0,0 \ 4 \\
 & + 5,7 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Vordehnung [\%]}_0,0 \ 8 \\
 & - 42,7 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Vordehnung [\%]}_0,2 \ 0 \\
 & + 22,3 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Vordehnung [\%]}_0,2 \ 4 \\
 & + 20,3 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Vordehnung [\%]}_0,2 \ 8 \\
 & + 28,1 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Vordehnung [\%]}_0,4 \ 0 \\
 & - 2,1 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Vordehnung [\%]}_0,4 \ 4 \\
 & - 26,1 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Vordehnung [\%]}_0,4 \ 8 \\
 & - 34,2 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Setzdruck [bar]}_0,0 \ 180 \\
 & + 34,2 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Setzdruck [bar]}_0,0 \ 230 \\
 & + 18,3 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Setzdruck [bar]}_0,2 \ 180 \\
 & - 18,3 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Setzdruck [bar]}_0,2 \ 230 \\
 & + 15,9 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Setzdruck [bar]}_0,4 \ 180 \\
 & - 15,9 \text{ Exzentrizität [mm]}* \text{Setzdruck [bar]}_0,4 \ 230 \\
 & - 0,4 \text{ Vordehnung [\%]}* \text{Setzdruck [bar]}_0 \ 180 + 0,4 \text{ Vordehnung [\%]} \\
 & * \text{Setzdruck [bar]}_0 \ 230 - 41,9 \text{ Vordehnung [\%]}* \text{Setzdruck [bar]}_4 \ 180 \\
 & + 41,9 \text{ Vordehnung [\%]}* \text{Setzdruck [bar]}_4 \ 230 + 42,3 \text{ Vordehnung [\%]} \\
 & * \text{Setzdruck [bar]}_8 \ 180 - 42,3 \text{ Vordehnung [\%]}* \text{Setzdruck [bar]}_8 \ 230
 \end{aligned}$$

Abbildung 63 Varianzanalyse und Regressionsgleichung der Kopfzugdaten

Aus den Residuendiagrammen ist ersichtlich, dass die Daten annähernd normalverteilt sind (Wahrscheinlichkeitsnetz für Normalverteilung) und dass es keine reihenfolgebedingten Zusammenhänge (Residuen vs. Reihenfolge) zwischen den verschiedenen Versuchen gibt. Das Diagramm Residuen vs. Anpassung lässt aufgrund der zufälligen Anordnung der Einzelwerte auf eine konstante Varianz der Daten schließen. Das Histogramm lässt vermuten, dass es einige wenige auffällige Residuen gibt, was auch in den anderen Residuendiagrammen durch die Lage der Punkte erkannt werden kann.

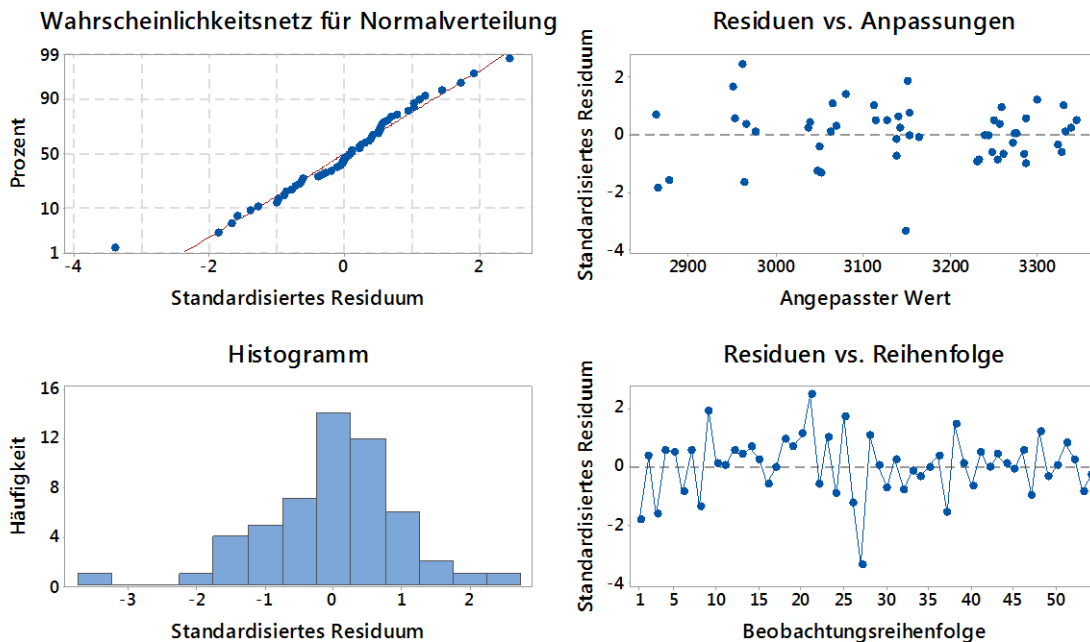


Diagramm 5 Residuendiagramme für die Kopfzugfestigkeit

Im Fehlerbalkendiagramm ist klar ersichtlich, dass bei 180 bar Setzdruck keine sichere Verbindung gewährleistet werden kann. Die Abweichung der Daten pro Parametersatz ist dafür zu groß.

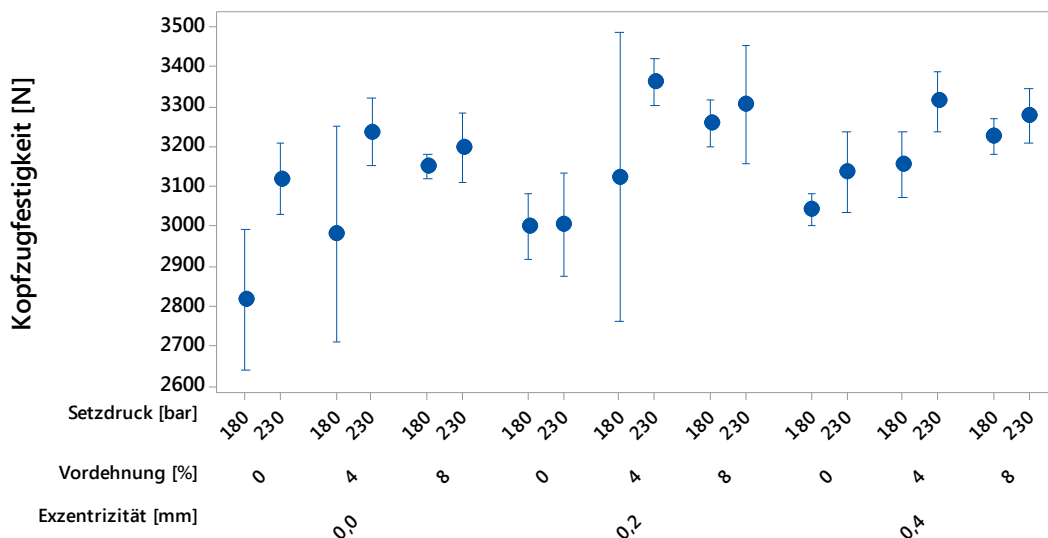


Diagramm 6 Fehlerbalkendiagramm der Kopfzugfestigkeit mit 95% KI für den Mittelwert

Im nachfolgenden Diagramm sind die Zusammenhänge der einzelnen Parameter und der Kopfzugfestigkeit in einem Haupteffektdiagramm dargestellt. Sowohl eine Setzdruckerhöhung als auch eine größere Vordehnung haben einen positiven Effekt auf die Kopfzugfestigkeit. Der positive Effekt der Exzentrizität kann nicht ohne weitere Untersuchungen erklärt werden.

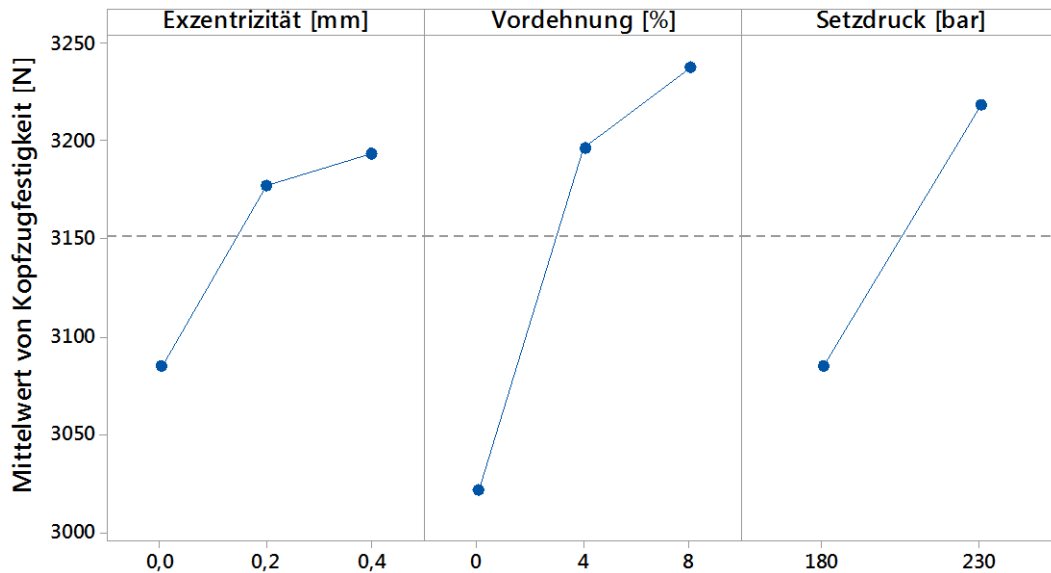


Diagramm 7 Haupteffektdiagramm der Kopfzugfestigkeit

Man kann aus den gezeigten Diagrammen zur Kopfzugfestigkeit folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Daten sind normalverteilt, was die Anforderung für die Zulässigkeit der statistischen Auswertung darstellt.
- Mit steigendem Setzdruck steigt die Kopfzugfestigkeit, solange der Niet durch die höhere Krafteinwirkung nicht beschädigt wird.
- Mit steigender Vordehnung steigt die Kopfzugfestigkeit; dieser Effekt ist allerdings bei kleineren Vordehnungen stärker ausgeprägt. Bei größeren Vordehnung könnte es aufgrund der Kaltverfestigung des Materials zu Schäden am Niet oder dem Restboden kommen
- Die Exzentrizität hat einen positiven Einfluss auf die Kopfzugfestigkeit. Dieser Effekt sollte allerdings nicht absichtlich eingestellt werden, da dies zu richtungsabhängigem Tragverhalten führt und für andere Lastfälle suboptimal ist.
- Die größte Abweichung von Maximal- und Minimal-Wert vom Mittelwert in einem Parametersatz betrug ca. 150 N, was bei ca. 3000 N Kopfzugfestigkeit 5% Schwankungsbreite bedeutet. Diese Schwankungsbreite muss bei der Auslegung der Verbindung berücksichtigt werden, wobei selbstverständlich immer vom kritischeren Fall auszugehen ist.

9.3 Auswertung der Ergebnisse aus den Scherzugversuchen

Auch die Auswertung der Daten aus den Scherzugversuchen ergab, dass sowohl die Faktorwirkungen als auch die Zweifachwechselwirkungen aller Parameter (bis auf die Einfachwirkung der Exzentrizität) signifikant sind. Da die Zweifachwechselwirkungen an denen die Exzentrizität beteiligt ist nicht verworfen werden können, darf die Exzentrizität als Einzelfaktor auch nicht verworfen werden und das mathematische Modell wird für alle Faktoren und Zweifachwechselwirkungen aufgestellt. Die Ergebnisse der Varianzanalyse und der Regressionsanalyse sind in Abbildung 64 dargestellt. Da der R²-Wert bei 84,72% liegt, kann von einer guten Beschreibung des mathematischen Modells ausgegangen werden.

Varianzanalyse

Quelle	DF	Kor SS	Kor MS	F-Wert	p-Wert
Modell	15	3566489	237766	14,05	0,000
Blöcke	2	36870	18435	1,09	0,347
Linear	5	2963864	592773	35,03	0,000
Exzentrizität [mm]	2	15341	7671	0,45	0,639
Vordehnung [%]	2	418287	209144	12,36	0,000
Setzdruck [bar]	1	2530236	2530236	149,52	0,000
2-Faktor-Wechselwirkungen	8	565754	70719	4,18	0,001
Exzentrizität [mm]*Vordehnung [%]	4	376578	94145	5,56	0,001
Exzentrizität [mm]*Setzdruck [bar]	2	136799	68399	4,04	0,026
Vordehnung [%]*Setzdruck [bar]	2	52377	26188	1,55	0,226
Fehler	38	643050	16922		
Gesamt	53	4209539			

Zusammenfassung des Modells

S	R-Qd	R-Qd(kor)	R-Qd(prog)
130,086	84,72%	78,69%	69,15%

Regressionsgleichung

$$\begin{aligned}
 \text{Scherzugfestigkeit [N]} = & 4399,6 - 16,4 \text{ Exzentrizität [mm]}_{0,0} + 23,2 \text{ Exzentrizität [mm]}_{0,2} \\
 & - 6,7 \text{ Exzentrizität [mm]}_{0,4} - 118,2 \text{ Vordehnung [\%]}_0 \\
 & + 25,2 \text{ Vordehnung [\%]}_4 + 92,9 \text{ Vordehnung [\%]}_8 \\
 & - 216,5 \text{ Setzdruck [bar]}_{180} + 216,5 \text{ Setzdruck [bar]}_{230} \\
 & + 126,0 \text{ Exzentrizität [mm]*Vordehnung [\%]}_{0,0 0} \\
 & - 155,6 \text{ Exzentrizität [mm]*Vordehnung [\%]}_{0,0 4} \\
 & + 29,6 \text{ Exzentrizität [mm]*Vordehnung [\%]}_{0,0 8} \\
 & - 53,6 \text{ Exzentrizität [mm]*Vordehnung [\%]}_{0,2 0} \\
 & + 56,7 \text{ Exzentrizität [mm]*Vordehnung [\%]}_{0,2 4} \\
 & - 3,1 \text{ Exzentrizität [mm]*Vordehnung [\%]}_{0,2 8} \\
 & - 72,4 \text{ Exzentrizität [mm]*Vordehnung [\%]}_{0,4 0} \\
 & + 98,9 \text{ Exzentrizität [mm]*Vordehnung [\%]}_{0,4 4} \\
 & - 26,5 \text{ Exzentrizität [mm]*Vordehnung [\%]}_{0,4 8} \\
 & - 50,8 \text{ Exzentrizität [mm]*Setzdruck [bar]}_{0,0 180} \\
 & + 50,8 \text{ Exzentrizität [mm]*Setzdruck [bar]}_{0,0 230} \\
 & - 17,8 \text{ Exzentrizität [mm]*Setzdruck [bar]}_{0,2 180} \\
 & + 17,8 \text{ Exzentrizität [mm]*Setzdruck [bar]}_{0,2 230} \\
 & + 68,6 \text{ Exzentrizität [mm]*Setzdruck [bar]}_{0,4 180} \\
 & - 68,6 \text{ Exzentrizität [mm]*Setzdruck [bar]}_{0,4 230} \\
 & - 3,4 \text{ Vordehnung [\%]*Setzdruck [bar]}_{0 180} + 3,4 \text{ Vordehnung [\%]} \\
 & * \text{Setzdruck [bar]}_{0 230} + 39,7 \text{ Vordehnung [\%]*Setzdruck [bar]}_4 180 \\
 & - 39,7 \text{ Vordehnung [\%]*Setzdruck [bar]}_4 230 - 36,3 \text{ Vordehnung [\%]} \\
 & * \text{Setzdruck [bar]}_8 180 + 36,3 \text{ Vordehnung [\%]*Setzdruck [bar]}_8 230
 \end{aligned}$$

Abbildung 64 Varianzanalyse und Regressionsgleichung der Scherzugdaten

Die Auswertung der Residuendiagramme lässt wie bei den Kopfzugversuchen auf eine annähernde Normalverteilung der Daten schließen. Es besteht auch hier kein Zusammenhang zwischen der Versuchsreihenfolge und auch die Varianz ist über die Einzelversuche konstant.

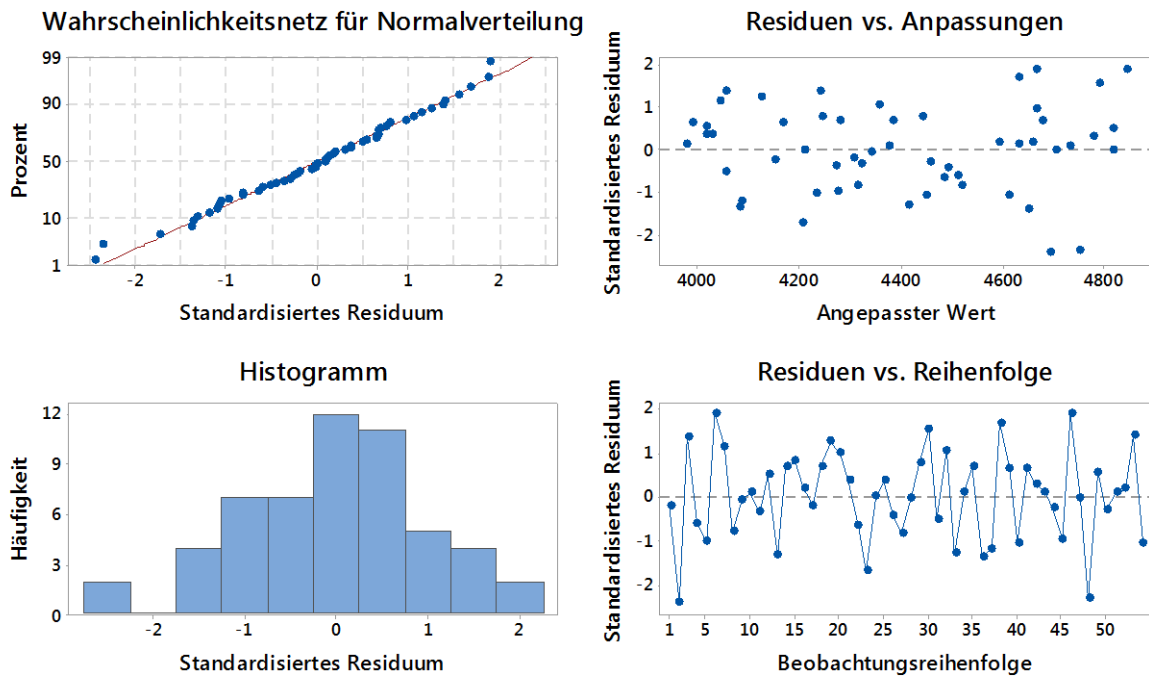


Diagramm 8 Residuendiagramme für die Scherzugfestigkeit

Das Fehlerbalkendiagramm der Scherzugfestigkeiten zeigt keine größere Streuung bei 180 bar, wie es bei der Auswertung der Kopfzugdaten der Fall war. Die Streuungen sind bei diesem Fall im Allgemeinen größer, da das Aushebeln des Niets nicht immer gleich erfolgt und sich die Vordehnung stärker auswirkt. Es treten auch mehr auffällige Residuen auf, was deutlich in den zugehörigen Diagrammen zu sehen ist.

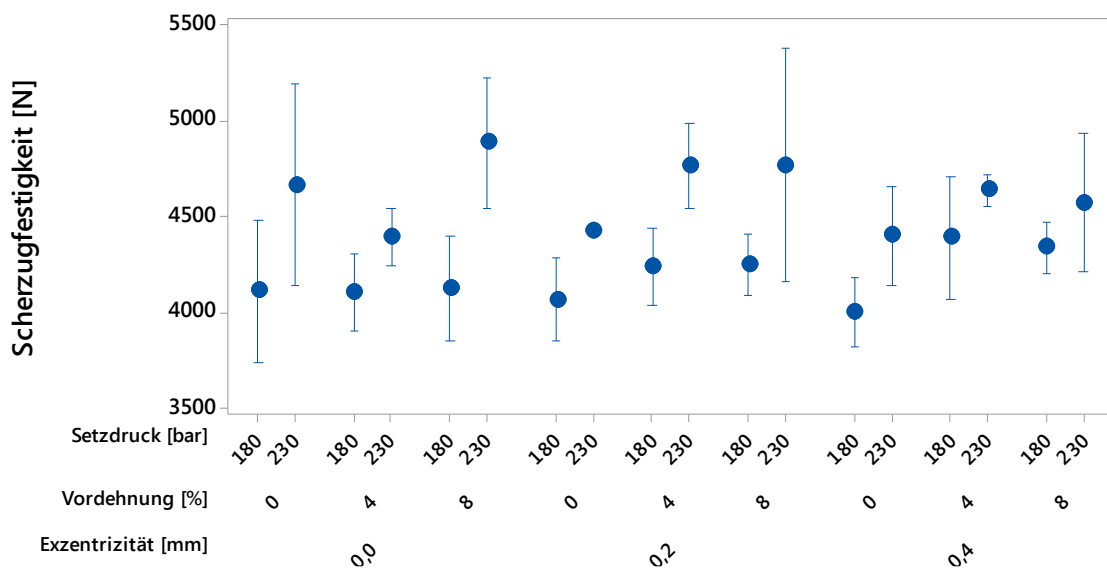


Diagramm 9 Fehlerbalkendiagramm der Scherzugfestigkeit mit 95% KI für den Mittelwert

Das Haupteffektdiagramm der Scherzugfestigkeit zeigt, dass der Einfluss der Exzentrizität deutlich geringer ausfällt und dass eine größere Exzentrizität sogar eine negative Auswirkung auf die Scherzugfestigkeit hat. Im Gegensatz zur Kopfzugfestigkeit wirkt sich die Vordehnung auf die Scherzugfestigkeit geringer aus. Dies ist auf den Lastfall und die Versagensform zurückzuführen.

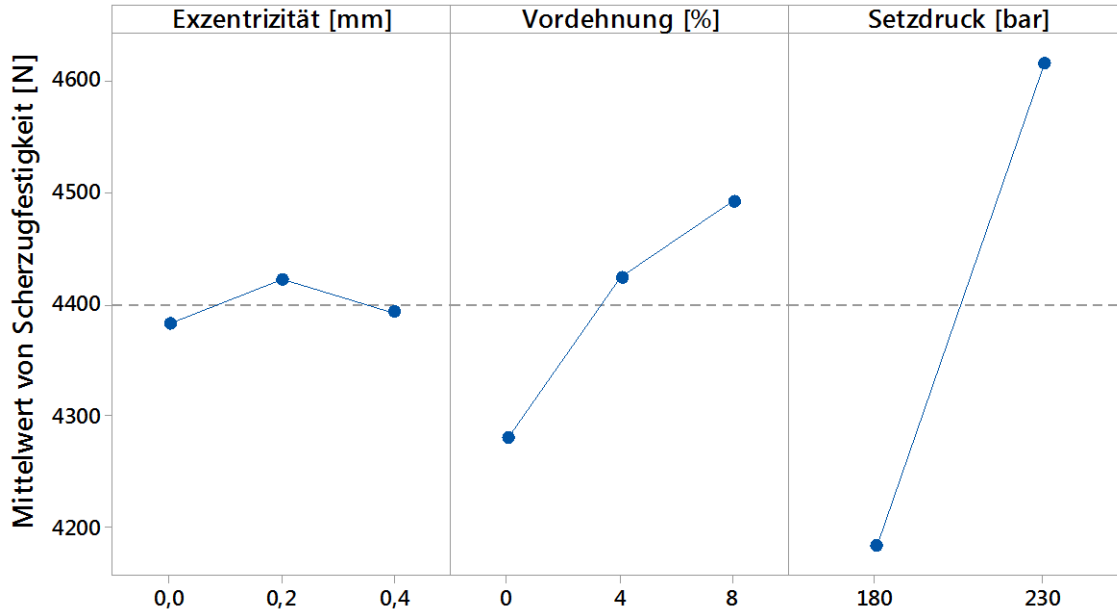


Diagramm 10 Haupteffektdiagramm der Scherzugfestigkeit

Aus den gezeigten Diagrammen zur Scherzugfestigkeit können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die Daten sind normalverteilt, also ist die Anwendbarkeit der statistischen Auswertungsmethodik gegeben.
- Eine Erhöhung des Setzdrucks führt zu einer drastischen Erhöhung der Scherzugfestigkeit.
- Eine höhere Vordehnung resultiert in einer höheren Scherzugfestigkeit, wobei dieser Effekt geringer ausfällt als bei der Analyse der Kopfzugdaten. Auch hierbei soll erwähnt werden, dass dieser Effekt nicht für beliebig hohe Vordehnungen positiv sein muss.
- Die Auswirkung der Exzentrizität auf die Scherzugfestigkeit ist eher gering. Es liegt aber im Gegensatz zu den Ergebnissen aus der Kopfzugauswertung der Schluss nahe, dass der Effekt mit zunehmender Exzentrizität von Niet und Matrize negative Auswirkungen auf das Ergebnis hat.
- Die maximale Abweichung von Maximal- und Minimal-Wert vom Mittelwert liegt bei ca. 220 N, was bei einer durchschnittlichen Kopfzugfestigkeit von ca. 4400 N wieder im Bereich von 5% Schwankungsbreite liegt.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Arbeit - Daten für den Aufbau und die Validierung der Simulation des Setzprozesses und des Prüfprozesses zu generieren - wurde durch den Aufbau des Messsystems an der Nietanlage, die Entwicklung und Fertigung von Biegewerkzeug und Bohrvorrichtung, der Entwicklung und Fertigung von Prüfaufnahmen und der Abarbeitung und Auswertung der statistischen Versuchsplanung zufriedenstellend erreicht. Die Schlibfbilder aus der Sensibilitätsanalyse können für den Vergleich des Setzprozesses in der Simulation herangezogen werden. Des Weiteren kann mit der Kraft-Weg-Messung des Setzprozesses das Modell validiert werden, indem die Kraft in der Simulation an derselben Stelle wie in der Realität gemessen wird. Die Fertigung der KS2 Proben konnte mit den selbstentwickelten Werkzeugen realisiert und die Streuung der Bauteilmaße nach anfänglichen Schwierigkeiten bedingt durch die Einarbeitung bzw. Nacharbeit der Werkzeuge und schwierigen Parameterfindung zusehends verringert werden. Die Prüfung der KS2 Proben mittels der eigens dafür entwickelten Probenaufnahmen konnte aufgrund der guten Maßhaltigkeit der Proben, der genauen Positionierung der Probenhälften vor dem Nieten und der genauen Fertigung der Aufnahmen durch Erodieren erfolgreich abgewickelt werden. Die Auswertung der DoE zeigt die Auswirkungen der einzelnen Faktoren auf die Kopfzugfestigkeit und Scherzugfestigkeit auf. Aus den gefundenen Zusammenhängen konnte mittels Regressionsanalyse jeweils ein mathematisches Modell abgeleitet werden, welches die Festigkeitswerte in Abhängigkeit der Eingangsparameter beschreibt. Die Methodenplanung, die in dieser Arbeit für die Charakterisierung von Stanznietverbindungen erarbeitet wurde, kann als Standardvorgehen für weitere Untersuchungen angewandt werden.

Das Ziel der weiterführenden Arbeit sollte sein, dass jeweils Simulationsmodelle für den Setzprozess und den Prüfprozess aufgebaut werden und diese auf den Grundlagen der empirisch ermittelten Daten aus den Schlibfproben, den Setzkraftverläufen und den KS2 Prüfungen auf ihre Aussagekraft überprüft werden. Auch Einflüsse von Faktoren, die in dieser Arbeit nicht näher beleuchtet werden konnten (Klebstoff, unterschiedliche Materialien, unterschiedliche Niet-Matrize-Kombinationen, etc.), sollten im Zuge weiterführender Versuche untersucht und die Simulationsmodelle validiert werden. Da die Versuche für diese Arbeit ausschließlich quasistatisch erfolgten, wäre in Zukunft eine Prüfung der Proben auf Dauerfestigkeit angebracht, um die Langzeitstabilität der Verbindung zu gewährleisten. Das Ziel Versagenskriterien für die Crashanalyse zu generieren könnte mittels Hochgeschwindigkeitsversuchen erreicht werden, da diese die Belastungsfälle im Crashfall besser abbilden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Multimaterialbauweise anhand eines modernen Fahrzeugs (Audi).....	1
Abbildung 2 Verbindungstechniken im Audi R8 Coupé (Audi).....	2
Abbildung 3 Range Rover Aluminiumkarosserie (Lloyd et al.)	3
Abbildung 4 Fügeverfahren nach DIN 8593	4
Abbildung 5 Audi TT Coupé Füge-technik (Schmid und Seehafer 2014).....	4
Abbildung 6 Punktschweißen einer BMW 3er Karosserie (BMW)	5
Abbildung 7 Klebeverbindung (Warenzeichenverband Edelstahl Rostfrei E.V.)	7
Abbildung 8 Innenhochdruckfügen (TU Clausthal 2010).....	8
Abbildung 9 Niet-Arten (Lange 1993)	9
Abbildung 10 Mechanische Fügeverfahren (TU Dresden)	9
Abbildung 11 Statische Festigkeit mechanischer Fügeverbindungen (Reinstettel 2007)	10
Abbildung 12 Herstellungsprozess einer Halbhohlstanznietverbindung (Eckstein 2009)	11
Abbildung 13 Maße und Bestandteile einer Halbhohlstanznietverbindung	12
Abbildung 14 Anwendungsbeispiele (Böllhoff 2010)	13
Abbildung 15 Einstufige Clinchverbindung ohne Schneidanteil (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)	14
Abbildung 16 Einstufiges Clinchen mit Schneidanteil (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)	14
Abbildung 17 Mehrstufige Clinchverbindung ohne Schneidanteil (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)	15
Abbildung 18 Mehrstufige Clinchverbindung mit Schneidanteil (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)	15
Abbildung 19 Verfahrensvarianten beim Hybridfügen (Fachjournal Adhäsion 2013)	16
Abbildung 20 Vergleich der mechanischen Eigenschaften (Fachjournal Adhäsion 2013)	17
Abbildung 21 Herstellung einer Hybridverbindung (Stahl-Informations-Zentrum)	18
Abbildung 22 Vergleich Hybrid- und Elementar-Fügeverfahren (TU Dresden).....	18
Abbildung 23 Verfahrensablauf beim Clinchkleben (Stahl-Informations-Zentrum).....	19
Abbildung 24 Vergleich Elementarer- mit Hybrid-Verbindungen (Disse et al. 2004)	19
Abbildung 25 Stanznieten mit nachfolgendem Widerstandsschweißprozess (Lou et al. 2014) ..	20
Abbildung 26 DMS Aufbau (Disynet 2016)	22
Abbildung 27 Stanznietanlage.....	26

Abbildung 28 Aufbau Hydraulikzylinder	27
Abbildung 29 Nietzuführung und Bandmagazin	28
Abbildung 30 Betätigung	29
Abbildung 31 Positionierung der zu fügenden Probenhälften	32
Abbildung 32 KS2 Probe	33
Abbildung 33 Vordehnen der Blechstreifen in der Zugprüfmaschine.....	34
Abbildung 34 Vergleich 0% Vordehnung zu 4% Vordehnung.....	35
Abbildung 35 U-Biegen im Elastomerblock.....	38
Abbildung 36 Stempel.....	39
Abbildung 37 Probewerkzeug.....	40
Abbildung 38 Bohrvorrichtung	41
Abbildung 39 Verlauf des Bohrvorgangs	42
Abbildung 40 Schliffbild einer Halbhohlstanznietverbindung	43
Abbildung 41 Definition der Ebenen einer Nietverbindung.....	44
Abbildung 42 Schliffbild in 0°-180°-Ebene	45
Abbildung 43 Schliffbild in 45°-225°-Ebene	45
Abbildung 44 Schliffbild in 90°-270°-Ebene	46
Abbildung 45 Vergleich der Nietergebnisse von 140 bis 250 bar Setzdruck	47
Abbildung 46 Nietergebnis bei 180 bar und 0% Vordehnung	48
Abbildung 47 Nietergebnis bei 200 bar Setzdruck und 0% Vordehnung	48
Abbildung 48 Nietergebnis bei 230 bar und 0% Vordehnung	49
Abbildung 49 Nietergebnis für bestmögliche Maschineneinstellung	50
Abbildung 50 Nietergebnis für 0,2 mm Exzentrizität.....	50
Abbildung 51 Nietergebnis für 0,4 mm Exzentrizität.....	51
Abbildung 52 Aufbau der Kraftmessvorrichtung.....	52
Abbildung 53 Aufbau einer Messkette (Heinrich 2015)	54
Abbildung 54 Modell eines technischen Prozesses	56
Abbildung 55 Einflussparameter auf eine Nietverbindung	57
Abbildung 56 Konventionelle Methoden der Versuchsplanung (Adam)	58
Abbildung 57 Prüfaufbau beim Kopfzugversuch.....	60
Abbildung 58 Aufbau für den Kopfzugversuch.....	62

Abbildung 59 Nietkopf durchgezogen (links), Niet aus Schließkopg gezogen (rechts)	62
Abbildung 60 Prüfaufbau beim Scherzugversuch.....	63
Abbildung 61 Durchführung der Scherzugprüfung.....	64
Abbildung 62 Versagensform beim Scherzugversuch.....	65
Abbildung 63 Varianzanalyse und Regressionsgleichung der Kopfzugdaten	69
Abbildung 64 Varianzanalyse und Regressionsgleichung der Scherzugdaten	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Versuchsmatrix	59
Tabelle 2 1,3 mm Blechstärke; 4% Vordehnung	89
Tabelle 3 1,3 mm Blechstärke; 8% Vordehnung	90
Tabelle 4 2,0 mm Blechstärke; 4% Vordehnung	91
Tabelle 5 2,0 mm Blechstärke; 8% Vordehnung	92
Tabelle 6 Versuchsmatrix zur Durchführung der Kopfzugversuche	95
Tabelle 7 Versuchsmatrix zur Durchführung der Scherzugversuche	103

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1 Vordehnung von 1,3 mm Blech auf 8%.....	35
Diagramm 2 Kraft-Weg-Verlauf des Setzprozesses.....	55
Diagramm 3 Kraft-Weg-Kurve eines Kopfzugversuchs.....	61
Diagramm 4 Kraft-Weg-Kurve eines Scherzugversuchs.....	64
Diagramm 5 Residuendiagramme für die Kopfzugfestigkeit	70
Diagramm 6 Fehlerbalkendiagramm der Kopfzugfestigkeit mit 95% KI für den Mittelwert	70
Diagramm 7 Haupteffektdiagramm der Kopfzugfestigkeit	71
Diagramm 8 Residuendiagramme für die Scherzugfestigkeit	73
Diagramm 9 Fehlerbalkendiagramm der Scherzugfestigkeit mit 95% KI für den Mittelwert	73
Diagramm 10 Haupteffektdiagramm der Scherzugfestigkeit	74
Diagramm 11 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: 1,3 mm Blechstärke; 4% Vordehnung	90
Diagramm 12 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: 1,3 mm Blechstärke; 8% Vordehnung	91
Diagramm 13 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: 2,0 mm Blechstärke; 4% Vordehnung	92
Diagramm 14 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: 2,0 mm Blechstärke; 8% Vordehnung	93
Diagramm 15 Kopfzugkurven der Proben 1, 19 und 37 (links); 2, 20 und 38 (mitte); 3, 21 und 39 (rechts)	96
Diagramm 16 Kopfzugkurven der Proben 4, 22 und 40 (links); 5, 23 und 41 (mitte); 6, 24 und 42 (rechts)	97
Diagramm 17 Kopfzugkurven der Proben 7, 25 und 43 (links); 8, 26 und 44 (mitte); 9, 27 und 45 (rechts)	98
Diagramm 18 Kopfzugkurven der Proben 10, 28 und 46 (links); 11, 29 und 47 (mitte); 12, 30 und 48 (rechts).....	99
Diagramm 19 Kopfzugkurven der Proben 13, 31 und 49 (links); 14, 32 und 50 (mitte); 15, 33 und 51 (rechts).....	100
Diagramm 20 Kopfzugkurven der Proben 16, 34 und 52 (links); 17, 35 und 53 (mitte); 18, 36 und 54 (rechts).....	101
Diagramm 21 Scherzugkurven der Proben 55, 73 und 91 (links (Weg wurde in negativer Richtung gemessen)); 56, 74 und 92 (rechts);	104
Diagramm 22 Scherzugkurven der Proben 57, 75 und 93 (links); 58, 76 und 94 (rechts)	105
Diagramm 23 Scherzugkurven der Proben 59, 77 und 95 (links); 60, 78 und 96 (rechts)	106
Diagramm 24 Scherzugkurven der Proben 61, 79 und 97 (links); 62, 80 und 98 (rechts)	107
Diagramm 25 Scherzugkurven der Proben 63, 81 und 99 (links); 64, 82 und 100 (rechts)	108

Diagramm 26 Scherzugkurven der Proben 65, 83 und 101 (links); 66, 84 und 102 (rechts)....	109
Diagramm 27 Scherzugkurven der Proben 67, 85 und 103 (links); 68, 86 und 104 (rechts)....	110
Diagramm 28 Scherzugkurven der Proben 69, 87 und 105 (links); 70, 88 und 106 (rechts)....	111
Diagramm 29 Scherzugkurven der Proben 71, 89 und 107 (links); 72, 90 und 108 (rechts)....	112

Abkürzungsverzeichnis

FDS	Flow Drill screws
FR	Full Rivet
SR	Semi-tubular Rivet
DoE	Design of Experiments
SW	Spot Welding
MAG	Metal Active Gas Welding
PR	Blind Rivet
DMS	Dehnungsmessstreifen
ABS	Antiblockiersystem
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ASR	Antriebsschlupfregelung
CAX	Computer Aided X
WSE	Weldspot Equivalent
DIN	Deutsche Industrie-Norm
KI	Konfidenzintervall

Anhang A: Prüfprotokoll der Blechvordehnung

Blechstreifen mit einer Breite von 50 mm wurden jeweils um 4% und 8% an einer Universalzugprüfmaschine der Fa. Zwick vorgedehnt. Die elastische Rückfederung wurde mit 0,3% berücksichtigt. Proben, die dieselbe Vordehnung erfahren werden in einem Diagramm dargestellt, wobei nach einer erfolgten Prüfung der neue Nullpunkt für die nächste Prüfung um 0,5% Dehnung nach rechts verschoben wird. So können die Kurven besser unterschieden und verglichen werden.

TL091 - Blechstärke 1,3 mm:

Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen die Ergebnisse der Vordehnungen von 1,3 mm Blechstreifen um 4% und 8%. Die dazugehörigen Spannungs-Dehnungskurven sind in Diagramm 11 und Diagramm 12 dargestellt.

Bezeichnung	a0 [mm]	b0 [mm]	s0 [mm]	L0 [mm]	Dehnung bei Fmax [%]	σ bei Fmax [N/mm ²]
TL091-1,3-4%-1	1,29	50,2	64,8	100	4,3	215,8
TL091-1,3-4%-2	1,30	50,19	65,2	100	4,3	212
TL091-1,3-4%-3	1,28	50,3	64,4	100	4,3	217,3
TL091-1,3-4%-4	1,29	50,29	64,9	100	4,3	215,3
TL091-1,3-4%-5	1,30	50,27	65,4	100	4,3	213,4
TL091-1,3-4%-6	1,32	50,35	66,5	100	4,3	209,2
TL091-1,3-4%-7	1,30	50,18	65,2	100	4,3	213,5
TL091-1,3-4%-8	1,29	50,21	64,8	100	4,3	214,6
TL091-1,3-4%-9	1,30	50,13	65,2	100	4,3	212,7
TL091-1,3-4%-10	1,31	50,11	65,6	100	4,3	211,9
TL091-1,3-4%-11	1,30	50,31	65,4	100	4,3	210,8
TL091-1,3-4%-12	1,28	50,25	64,3	100	4,3	214,9
TL091-1,3-4%-13	1,30	50,21	65,3	100	4,3	213,1
TL091-1,3-4%-14	1,30	50,36	65,5	100	4,3	211,2
TL091-1,3-4%-15	1,28	50,17	64,2	100	4,3	216,6

Tabelle 2 1,3 mm Blechstärke; 4% Vordehnung

Bezeichnung	a0 [mm]	b0 [mm]	s0 [mm]	L0 [mm]	Dehnung bei Fmax [%]	σ bei Fmax [N/mm ²]
TL091-1,3-8%-1	1,30	50,24	65,3	100	8,3	239,5
TL091-1,3-8%-2	1,33	50,13	66,7	100	8,3	236,3
TL091-1,3-8%-3	1,3	50,27	65,4	100	8,3	241,1
TL091-1,3-8%-4	1,27	50,3	63,9	100	8,3	247,4
TL091-1,3-8%-5	1,29	50,27	64,8	100	8,3	242,4
TL091-1,3-8%-6	1,32	50,15	66,2	100	8,3	236
TL091-1,3-8%-7	1,29	50,1	64,6	100	8,3	242,3
TL091-1,3-8%-8	1,31	50,2	65,8	100	8,3	238,8
TL091-1,3-8%-9	1,30	50,24	65,3	100	8,3	241,2
TL091-1,3-8%-10	1,31	50,2	65,8	100	8,3	239,9
TL091-1,3-8%-11	1,30	50,28	65,4	100	8,3	243,2
TL091-1,3-8%-12	1,28	50,31	64,4	100	8,3	244,6
TL091-1,3-8%-13	1,31	50,3	65,9	100	8,3	239,7
TL091-1,3-8%-14	1,29	50,29	64,9	100	8,3	243,4
TL091-1,3-8%-15	1,30	50,29	65,4	100	8,3	241,1

Tabelle 3 1,3 mm Blechstärke; 8% Vordehnung

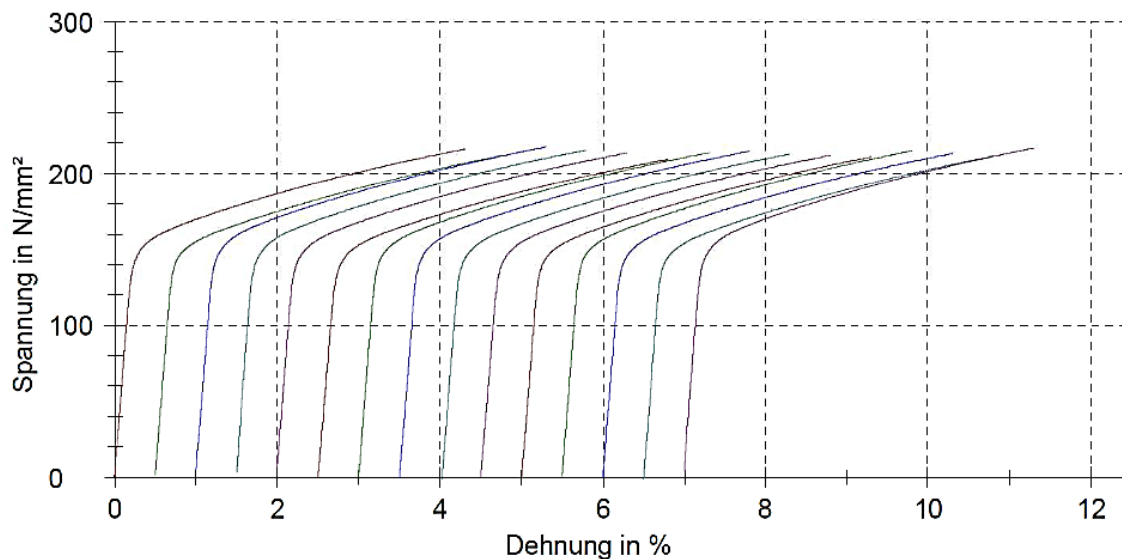


Diagramm 11 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: 1,3 mm Blechstärke; 4% Vordehnung

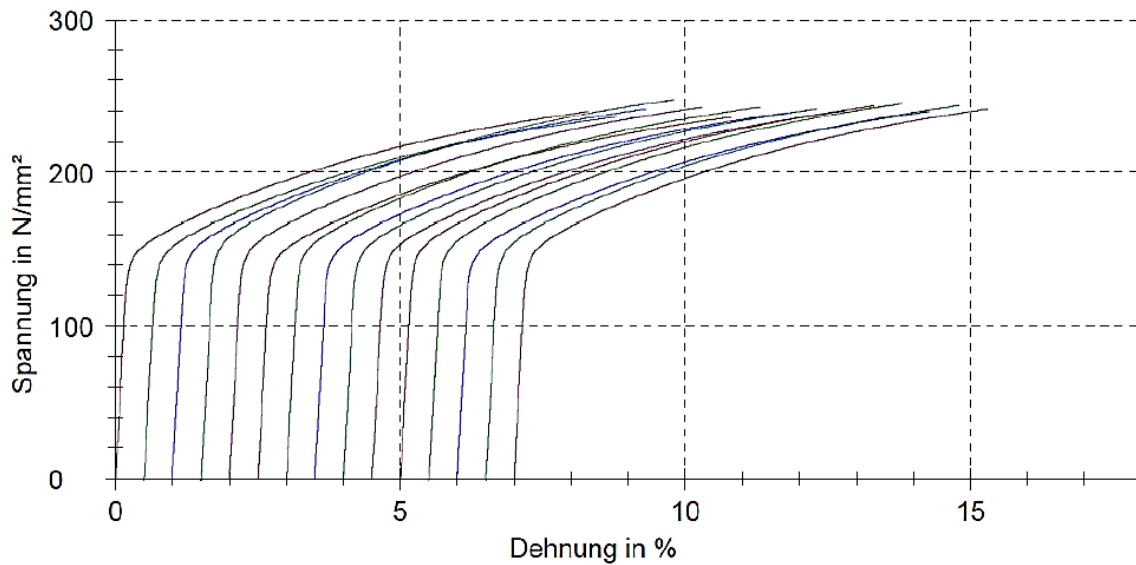


Diagramm 12 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: 1,3 mm Blechstärke; 8% Vordehnung

TL091 - Blechstärke 2,0 mm:

Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen die Ergebnisse der Vordehnungen von 2,0 mm Blechstreifen um 4% und 8%. Die dazugehörigen Spannungs-Dehnungskurven sind in Diagramm 13 und Diagramm 14 dargestellt.

Bezeichnung	a0 [mm]	b0 [mm]	s0 [mm]	L0 [mm]	Dehnung bei Fmax [%]	σ bei Fmax [N/mm ²]
TL091-2,0-4%-1	1,99	50,18	99,9	100	4,3	212,2
TL091-2,0-4%-2	1,98	50,18	99,4	100	4,3	213
TL091-2,0-4%-3	1,98	50	99	100	4,3	214,6
TL091-2,0-4%-4	1,98	50,19	99,4	100	4,3	214,9
TL091-2,0-4%-5	2,00	50,13	100,3	100	4,3	210,5
TL091-2,0-4%-6	1,96	50,21	98,4	100	4,3	214,3
TL091-2,0-4%-7	1,97	50,3	99,1	100	4,3	212,8
TL091-2,0-4%-8	1,99	50,19	99,9	100	4,3	210,2
TL091-2,0-4%-9	1,98	50,2	99,4	100	4,3	212,1
TL091-2,0-4%-10	1,98	50,23	99,5	100	4,3	213,2
TL091-2,0-4%-11	1,99	50,19	99,9	100	4,3	211,9
TL091-2,0-4%-12	1,98	50,2	99,4	100	4,3	212,8
TL091-2,0-4%-13	1,95	50,15	97,8	100	4,3	215,5
TL091-2,0-4%-14	2,00	50,13	100,3	100	4,3	211,3
TL091-2,0-4%-15	2,00	50,21	100,4	100	4,3	211,8

Tabelle 4 2,0 mm Blechstärke; 4% Vordehnung

Bezeichnung	a0 [mm]	b0 [mm]	s0 [mm]	L0 [mm]	Dehnung bei Fmax [%]	σ bei Fmax [N/mm ²]
TL091-2,0-8%-1	1,98	50,16	99,3	100	8,3	242,1
TL091-2,0-8%-2	2,00	50,2	100,4	100	8,3	239,6
TL091-2,0-8%-3	2,00	50,2	100,4	100	8,3	239,3
TL091-2,0-8%-4	2,01	50,14	100,8	100	8,3	238,7
TL091-2,0-8%-5	2,01	50,21	100,9	100	8,3	238,2
TL091-2,0-8%-6	1,96	50,15	98,3	100	8,3	245,5
TL091-2,0-8%-7	2,00	50,2	100,4	100	8,3	239,6
TL091-2,0-8%-8	2,01	50,3	101,1	100	8,3	236,9
TL091-2,0-8%-9	2,01	50,14	100,8	100	8,3	237,6
TL091-2,0-8%-10	2,02	50,13	101,3	100	8,3	236,5
TL091-2,0-8%-11	1,98	50,09	99,2	100	8,3	241,5
TL091-2,0-8%-12	1,97	50,19	98,9	100	8,3	242,3
TL091-2,0-8%-13	1,97	50,23	99	100	8,3	241,9
TL091-2,0-8%-14	1,99	50,19	99,9	100	8,3	239,7
TL091-2,0-8%-15	2,00	50,17	100,3	100	8,3	238,5

Tabelle 5 2,0 mm Blechstärke; 8% Vordehnung

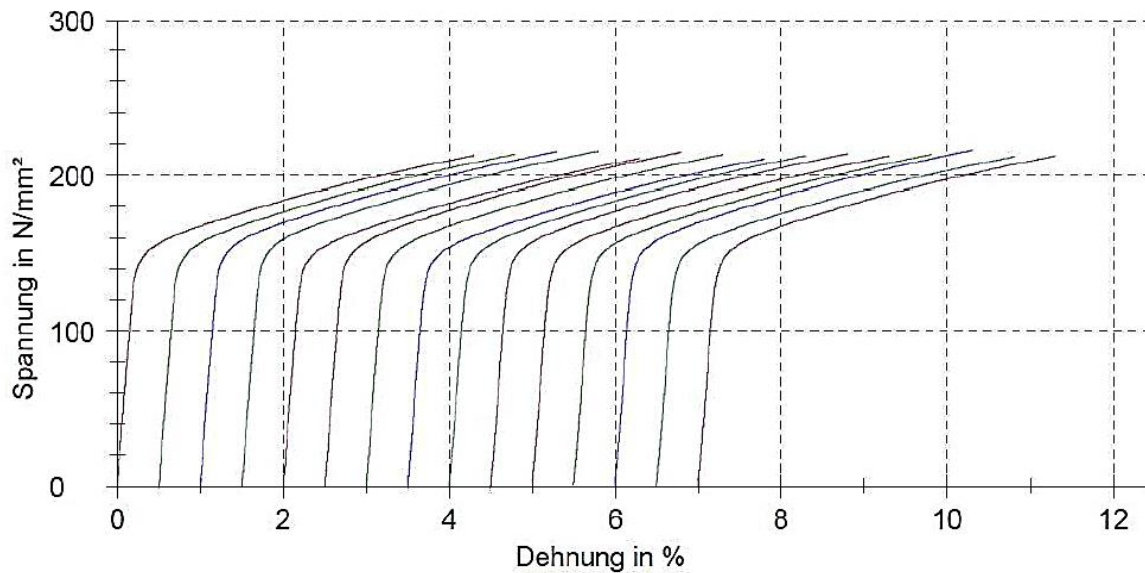


Diagramm 13 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: 2,0 mm Blechstärke; 4% Vordehnung

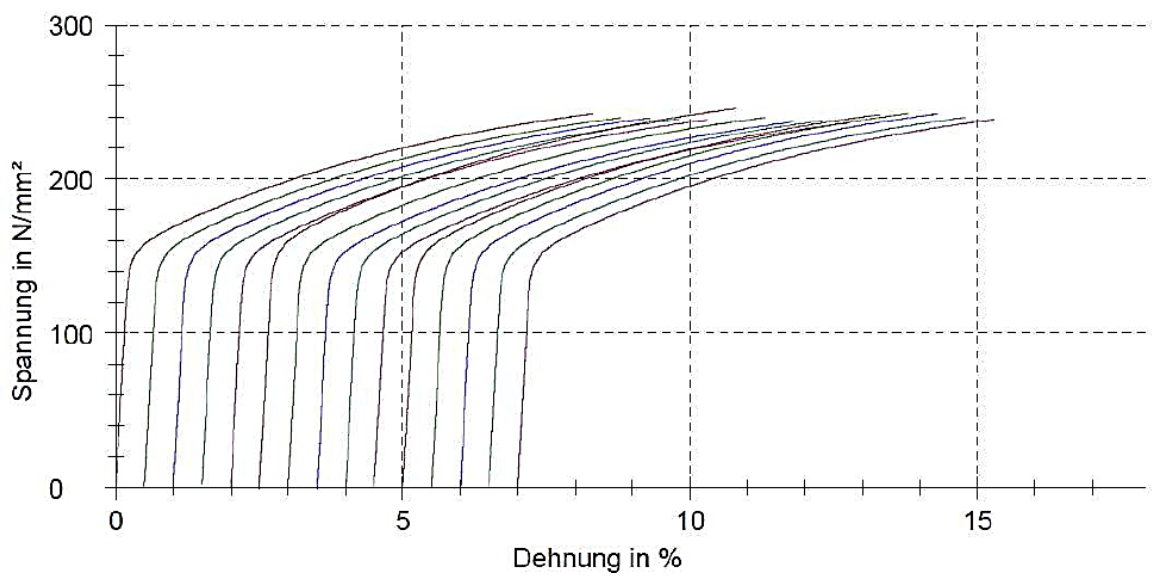


Diagramm 14 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: 2,0 mm Blechstärke; 8% Vordehnung

Anhang B: Prüfprotokoll Kopfzugversuche

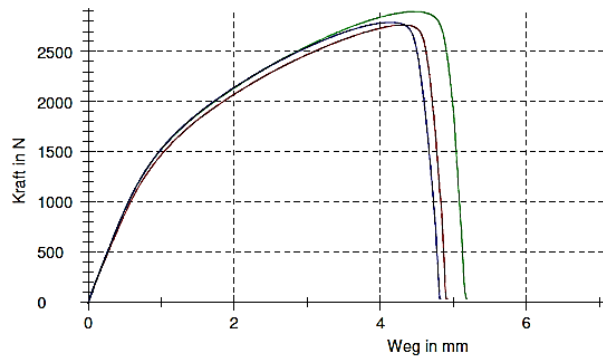
Die Proben wurden alle mit 10 mm/min Ziehgeschwindigkeit geprüft und die Anfangsmesslänge zwischen den Messpunkten betrug 23 mm. Es wurde ausschließlich die Dehnung in Längsrichtung gemessen. Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 6 dargestellt. In den darauffolgenden Diagrammen sind die Kopfzugkurven der Proben dargestellt, wobei Proben mit demselben Parametersatz in einem Diagramm dargestellt sind.

	Setzdruck	Vordehnung	Exzentrizität		Setzdruck	Vordehnung	Exzentrizität		Setzdruck	Vordehnung	Exzentrizität
1	1	1	1	19	1	1	1	37	1	1	1
2	2	1	1	20	2	1	1	38	2	1	1
3	1	2	1	21	1	2	1	39	1	2	1
4	2	2	1	22	2	2	1	40	2	2	1
5	1	3	1	23	1	3	1	41	1	3	1
6	2	3	1	24	2	3	1	42	2	3	1
7	1	1	2	25	1	1	2	43	1	1	2
8	2	1	2	26	2	1	2	44	2	1	2
9	1	2	2	27	1	2	2	45	1	2	2
10	2	2	2	28	2	2	2	46	2	2	2
11	1	3	2	29	1	3	2	47	1	3	2
12	2	3	2	30	2	3	2	48	2	3	2
13	1	1	3	31	1	1	3	49	1	1	3
14	2	1	3	32	2	1	3	50	2	1	3
15	1	2	3	33	1	2	3	51	1	2	3
16	2	2	3	34	2	2	3	52	2	2	3
17	1	3	3	35	1	3	3	53	1	3	3
18	2	3	3	36	2	3	3	54	2	3	3

Tabelle 6 Versuchsmatrix zur Durchführung der Kopfzugversuche

Prüfergebnisse:

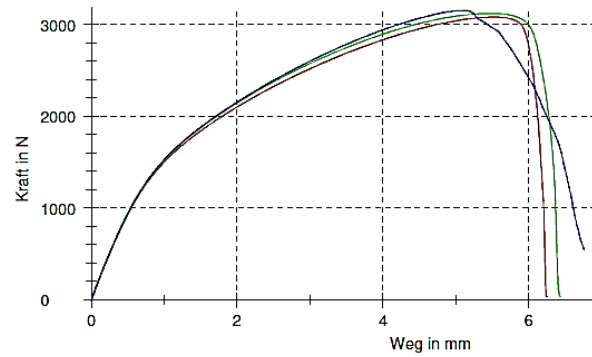
Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
1	1	2764	4,3	974	4,8	KS2_Kopfzug_1
2	2	2898	4,4	933	5,1	KS2_Kopfzug_19
3	3	2790	4,1	804	4,8	KS2_Kopfzug_37

Seriengrafik:**Statistik:**

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	2817	4,3	904	4,9
s	71,32	0,2	88,6	0,2
v [%]	2,53	3,84	9,80	3,62

Prüfergebnisse:

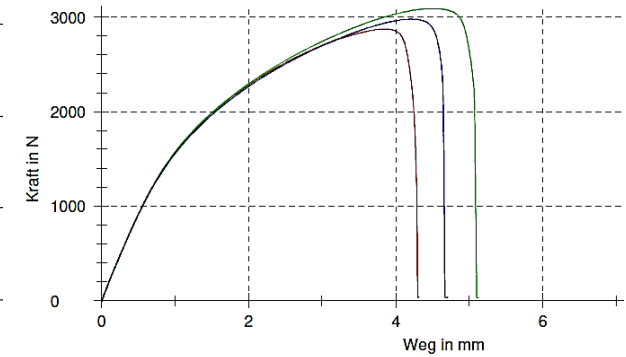
Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
1	1	3083	5,5	1080	6,2	KS2_Kopfzug_2
2	2	3123	5,5	1130	6,4	KS2_Kopfzug_20
3	3	3155	5,1	622	6,7	KS2_Kopfzug_38

Seriengrafik:**Statistik:**

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3120	5,4	945	6,4
s	36,09	0,2	281	0,3
v [%]	1,16	4,21	29,71	4,17

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
1	1	2873	3,8	1490	4,3	KS2_Kopfzug_3
2	2	3091	4,5	1950	5,1	KS2_Kopfzug_21
3	3	2979	4,2	1930	4,6	KS2_Kopfzug_39

Seriengrafik:**Statistik:**

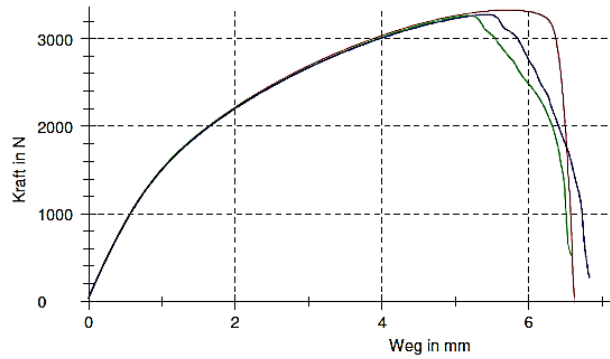
Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	2981	4,2	1790	4,7
s	109,2	0,3	259	0,4
v [%]	3,66	7,66	14,47	8,58

Diagramm 15 Kopfzugkurven der Proben 1, 19 und 37 (links); 2, 20 und 38 (mitte); 3, 21 und 39 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3328	5,7	1180	6,6	KS2_Kopfzug_4
■	2	3264	5,2	1160	6,5	KS2_Kopfzug_22
■	3	3276	5,5	822	6,7	KS2_Kopfzug_40

Seriengrafik:



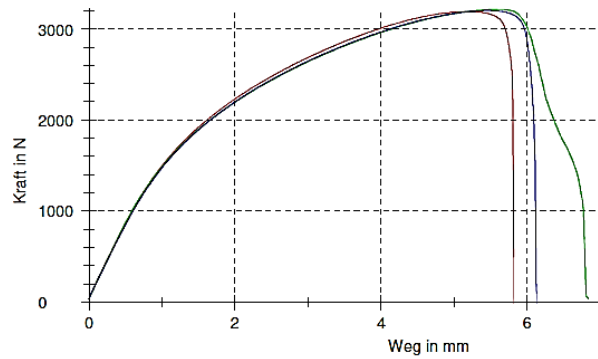
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3289	5,5	1050	6,6
s	33,70	0,3	198	0,1
v [%]	1,02	4,99	18,85	1,91

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3193	5,2	2370	5,8	KS2_Kopfzug_5
■	2	3218	5,5	1010	6,8	KS2_Kopfzug_23
■	3	3205	5,5	1730	6,1	KS2_Kopfzug_41

Seriengrafik:



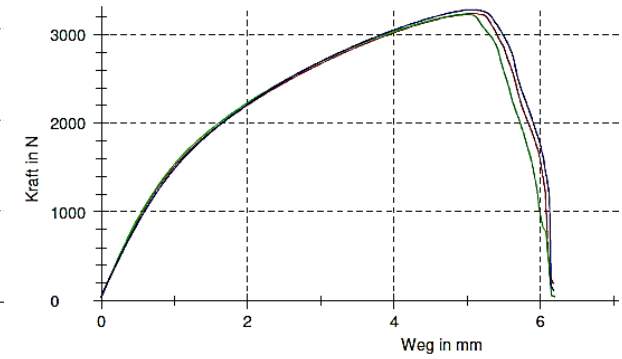
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3205	5,4	1710	6,2
s	12,38	0,2	677	0,5
v [%]	0,39	3,36	39,70	7,96

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3235	5,1	1130	6,1	KS2_Kopfzug_6
■	2	3229	5,0	764	6,1	KS2_Kopfzug_24
■	3	3281	5,1	1160	6,1	KS2_Kopfzug_42

Seriengrafik:



Statistik:

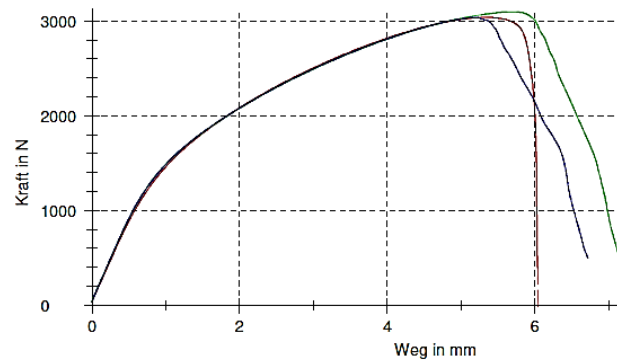
Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3248	5,1	1020	6,1
s	28,20	0,0	221	0,0
v [%]	0,87	0,90	21,72	0,44

Diagramm 16 Kopfzugkurven der Proben 4, 22 und 40 (links); 5, 23 und 41 (mitte); 6, 24 und 42 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
1	3035	5,4	1630	6,0	KS2_Kopfzug_7	
2	3094	5,7	591	7,1	KS2_Kopfzug_25	
3	3037	5,2	577	6,7	KS2_Kopfzug_43	

Seriengrafik:



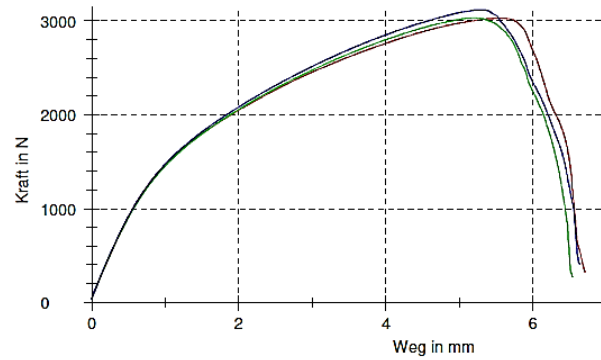
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3055	5,4	931	6,6
s	33,55	0,3	601	0,6
v [%]	1,10	4,81	64,58	8,34

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
1	3028	5,5	792	6,6	KS2_Kopfzug_8	
2	3031	5,2	816	6,5	KS2_Kopfzug_26	
3	3118	5,3	839	6,6	KS2_Kopfzug_44	

Seriengrafik:



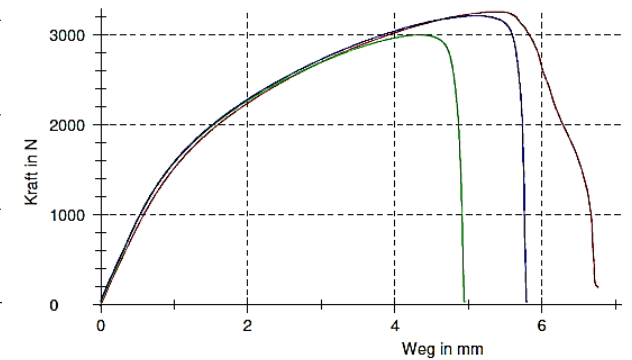
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3059	5,3	815	6,5
s	51,20	0,2	23,5	0,1
v [%]	1,67	3,24	2,88	0,95

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
1	3252	5,4	975	6,7	KS2_Kopfzug_9	
2	2996	4,3	1380	4,9	KS2_Kopfzug_27	
3	3209	5,1	1790	5,7	KS2_Kopfzug_45	

Seriengrafik:



Statistik:

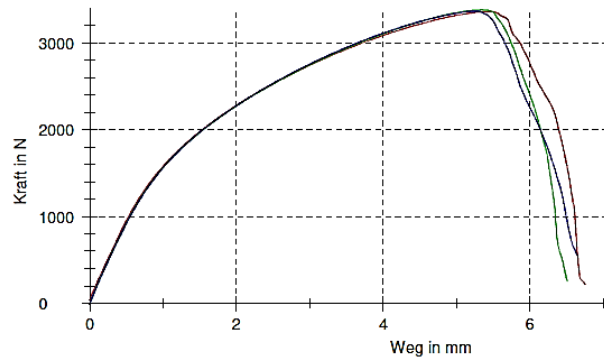
Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3152	4,9	1380	5,8
s	137,3	0,6	408	0,9
v [%]	4,36	11,37	29,54	15,34

Diagramm 17 Kopfzugkurven der Proben 7, 25 und 43 (links); 8, 26 und 44 (mitte); 9, 27 und 45 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3366	5,5	1090	6,6	KS2_Kopfzug_10
■	2	3383	5,3	960	6,4	KS2_Kopfzug_28
■	3	3370	5,3	666	6,6	KS2_Kopfzug_46

Seriengrafik:



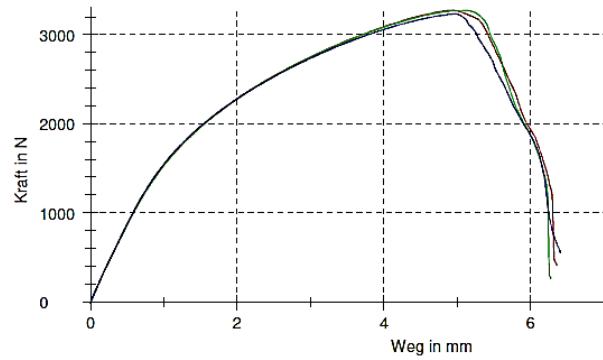
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3373	5,4	904	6,5
s	9,073	0,1	216	0,1
v [%]	0,27	1,74	23,90	2,16

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3273	4,9	1100	6,3	KS2_Kopfzug_11
■	2	3273	5,1	1260	6,2	KS2_Kopfzug_29
■	3	3231	5,0	628	6,4	KS2_Kopfzug_47

Seriengrafik:



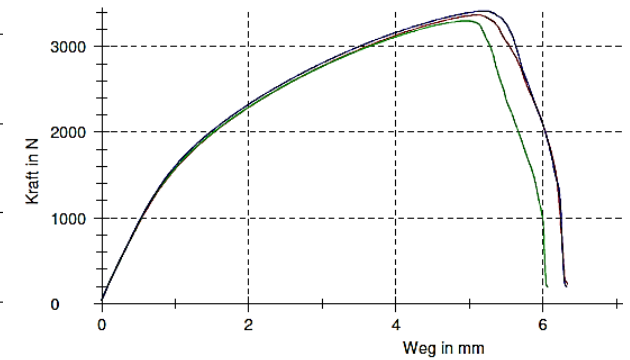
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3259	5,0	994	6,3
s	24,04	0,1	327	0,1
v [%]	0,74	1,77	32,92	1,10

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3368	5,1	760	6,3	KS2_Kopfzug_12
■	2	3297	4,9	835	6,0	KS2_Kopfzug_30
■	3	3414	5,2	1180	6,2	KS2_Kopfzug_48

Seriengrafik:



Statistik:

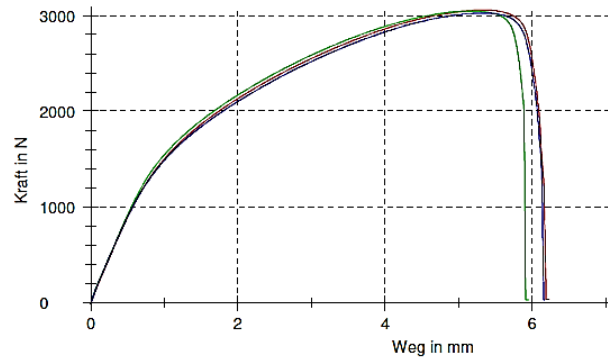
Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	3360	5,1	924	6,2
s	58,56	0,1	223	0,1
v [%]	1,74	2,84	24,09	2,22

Diagramm 18 Kopfzugkurven der Proben 10, 28 und 46 (links); 11, 29 und 47 (mitte); 12, 30 und 48 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
1	1	3058	5,3	1170	6,2	KS2_Kopfzug_13
2	2	3046	5,2	2000	5,9	KS2_Kopfzug_31
3	3	3027	5,3	1200	6,1	KS2_Kopfzug_49

Seriengrafik:



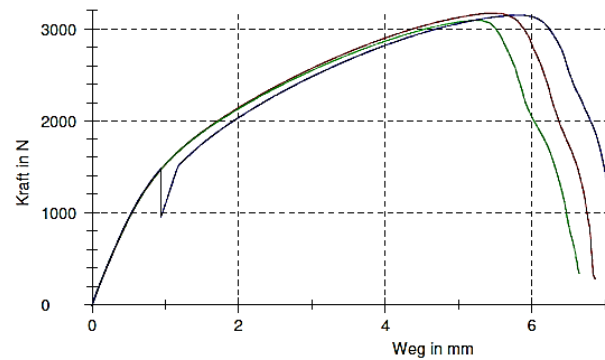
Statistik:

Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	3044	5,3	1460	6,1
s	15,88	0,1	468	0,2
v [%]	0,52	1,57	32,19	2,49

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
1	1	3173	5,5	805	6,8	KS2_Kopfzug_14
2	2	3094	5,3	613	6,6	KS2_Kopfzug_32
3	3	3150	5,9	1090	7,1	KS2_Kopfzug_50 x

Seriengrafik:



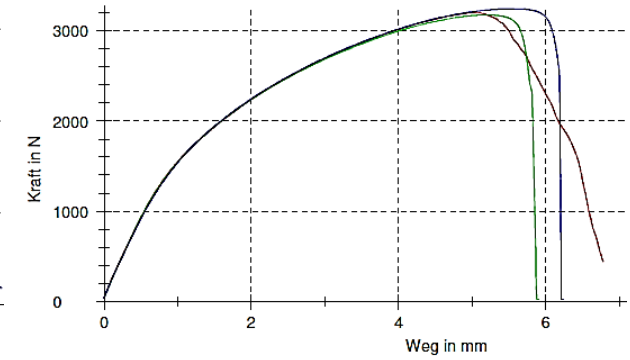
Statistik:

Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	3139	5,5	835	6,8
s	40,81	0,3	238	0,3
v [%]	1,30	5,50	28,54	3,84

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
1	1	3205	5,1	634	6,7	KS2_Kopfzug_15
2	2	3180	5,2	2290	5,8	KS2_Kopfzug_33
3	3	3246	5,6	2060	6,2	KS2_Kopfzug_51

Seriengrafik:



Statistik:

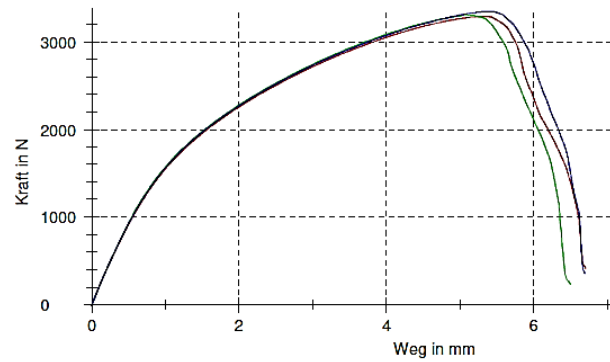
Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	3210	5,3	1660	6,2
s	33,54	0,2	895	0,4
v [%]	1,04	4,72	53,94	7,20

Diagramm 19 Kopfzugkurven der Proben 13, 31 und 49 (links); 14, 32 und 50 (mitte); 15, 33 und 51 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3291	5,3	853	6,6	KS2_Kopfzug_16
■	2	3304	5,1	970	6,4	KS2_Kopfzug_34
■	3	3348	5,4	920	6,6	KS2_Kopfzug_52

Seriengrafik:



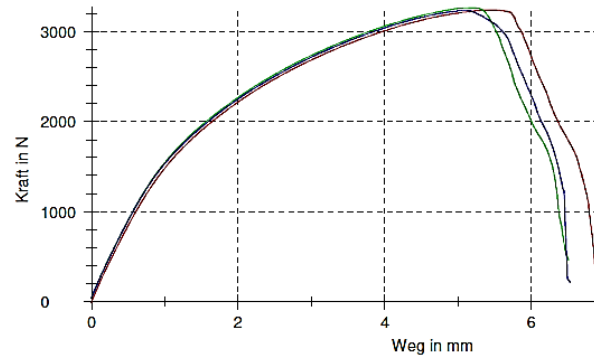
Statistik:

Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	3315	5,3	914	6,5
s	29,84	0,2	58,5	0,2
v [%]	0,90	2,88	6,40	2,39

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3239	5,5	658	6,8	KS2_Kopfzug_17
■	2	3266	5,2	649	6,4	KS2_Kopfzug_35
■	3	3236	5,1	1090	6,5	KS2_Kopfzug_53

Seriengrafik:



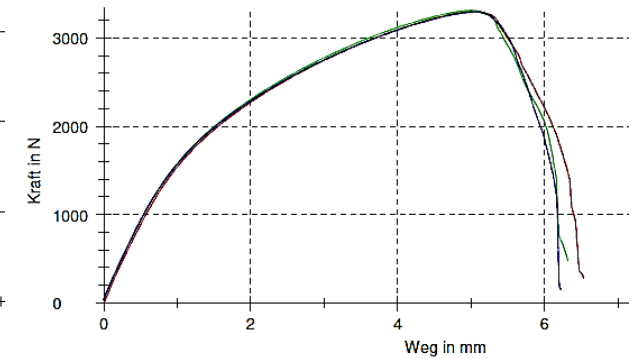
Statistik:

Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	3247	5,3	798	6,6
s	16,51	0,2	250	0,2
v [%]	0,51	3,84	31,37	3,43

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3308	5,0	928	6,4	KS2_Kopfzug_18
■	2	3314	5,0	1230	6,2	KS2_Kopfzug_36
■	3	3294	5,1	976	6,2	KS2_Kopfzug_54

Seriengrafik:



Statistik:

Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	3305	5,1	1050	6,3
s	10,55	0,0	163	0,1
v [%]	0,32	0,98	15,57	2,28

Diagramm 20 Kopfzugkurven der Proben 16, 34 und 52 (links); 17, 35 und 53 (mitte); 18, 36 und 54 (rechts)

Anhang C: Prüfprotokoll Scherzugversuch

Die Proben wurden alle mit 10 mm/min Ziehgeschwindigkeit geprüft und die Anfangsmesslänge zwischen den Messpunkten betrug 1 mm. Es wurde die Dehnung in Längsrichtung und Querrichtung gemessen, wobei nur die Dehnung in Zugrichtung für die Diagramme verwendet wurde. Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 7 dargestellt. In den darauffolgenden Diagrammen sind die Scherzugkurven der Proben dargestellt, wobei Proben mit demselben Parametersatz in einem Diagramm dargestellt sind.

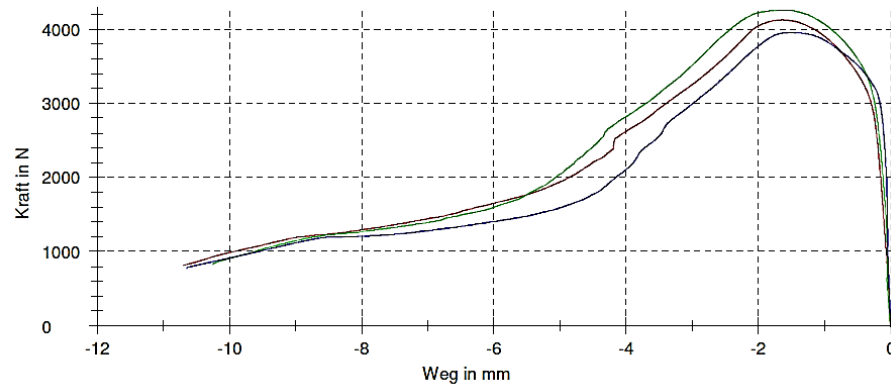
	Setzdruck	Vordehnung	Exzentrizität		Setzdruck	Vordehnung	Exzentrizität		Setzdruck	Vordehnung	Exzentrizität
55	1	1	1	73	1	1	1	91	1	1	1
56	2	1	1	74	2	1	1	92	2	1	1
57	1	2	1	75	1	2	1	93	1	2	1
58	2	2	1	76	2	2	1	94	2	2	1
59	1	3	1	77	1	3	1	95	1	3	1
60	2	3	1	78	2	3	1	96	2	3	1
61	1	1	2	79	1	1	2	97	1	1	2
62	2	1	2	80	2	1	2	98	2	1	2
63	1	2	2	81	1	2	2	99	1	2	2
64	2	2	2	82	2	2	2	100	2	2	2
65	1	3	2	83	1	3	2	101	1	3	2
66	2	3	2	84	2	3	2	102	2	3	2
67	1	1	3	85	1	1	3	103	1	1	3
68	2	1	3	86	2	1	3	104	2	1	3
69	1	2	3	87	1	2	3	105	1	2	3
70	2	2	3	88	2	2	3	106	2	2	3
71	1	3	3	89	1	3	3	107	1	3	3
72	2	3	3	90	2	3	3	108	2	3	3

Tabelle 7 Versuchsmatrix zur Durchführung der Scherzugversuche

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4125	-1,6	844	-10,6	KS2_Scherzug_55
■	2	4258	-1,6	878	-10,1	KS2_Scherzug_73
■	3	3956	-1,5	809	-10,5	KS2_Scherzug_91

Seriengrafik:



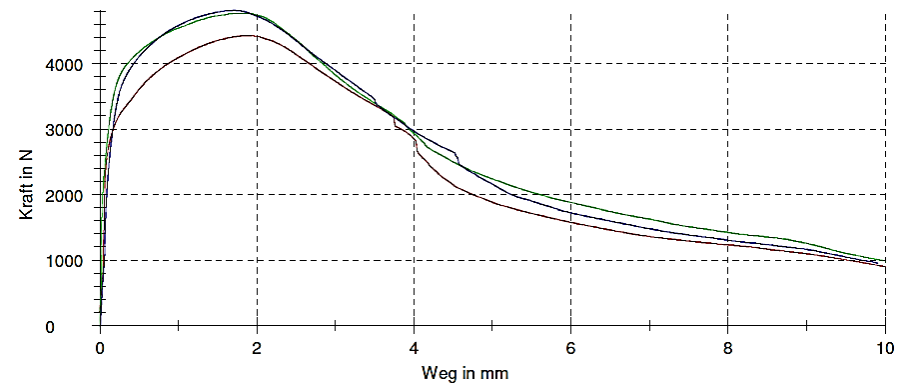
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
x	4113	-1,6	844	-10,4
s	151,7	0,1	34,3	0,2
v [%]	3,69	-4,06	4,07	-2,40

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4426	1,9	-	-	KS2_Scherzug_56
■	2	4770	1,8	-	-	KS2_Scherzug_74
■	3	4811	1,7	961	9,9	KS2_Scherzug_92

Seriengrafik:



Statistik:

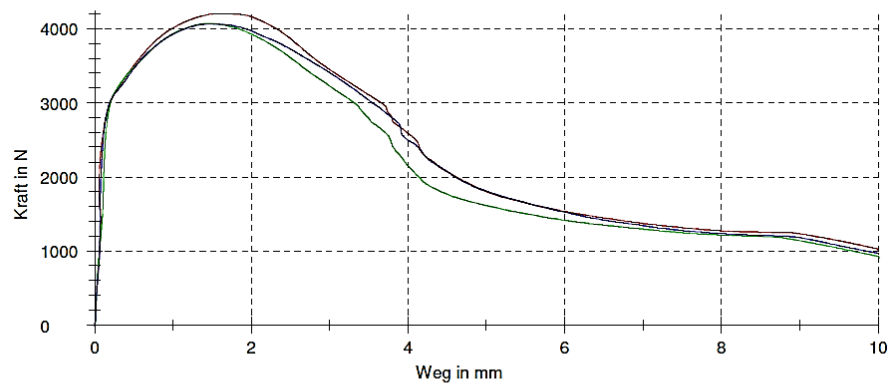
Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
x	4669	1,8	961	9,9
s	211,5	0,1	-	-
v [%]	4,53	4,53	-	-

Diagramm 21 Scherzugkurven der Proben 55, 73 und 91 (links (Weg wurde in negativer Richtung gemessen)); 56, 74 und 92 (rechts);

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4204	1,6	-	-	KS2_Scherzug_57
■	2	4067	1,5	-	-	KS2_Scherzug_75
■	3	4062	1,5	-	-	KS2_Scherzug_93

Seriengrafik:



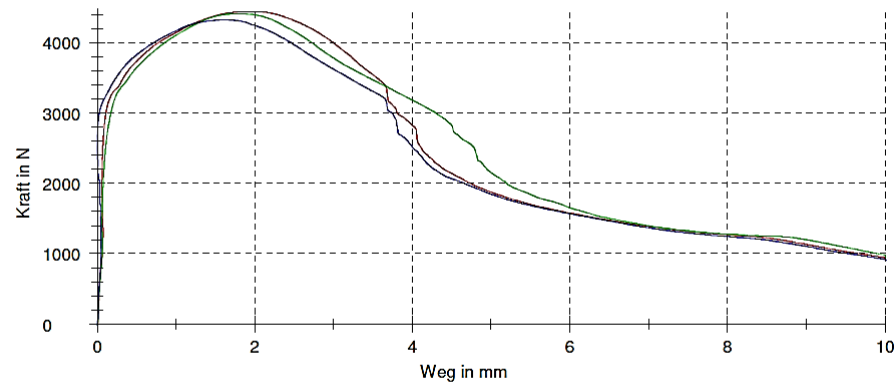
Statistik:

Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
x	4111	1,5	-	-
s	80,60	0,1	-	-
v [%]	1,96	5,94	-	-

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4444	1,9	-	-	KS2_Scherzug_58
■	2	4411	1,8	-	-	KS2_Scherzug_76
■	3	4329	1,6	-	-	KS2_Scherzug_94

Seriengrafik:



Statistik:

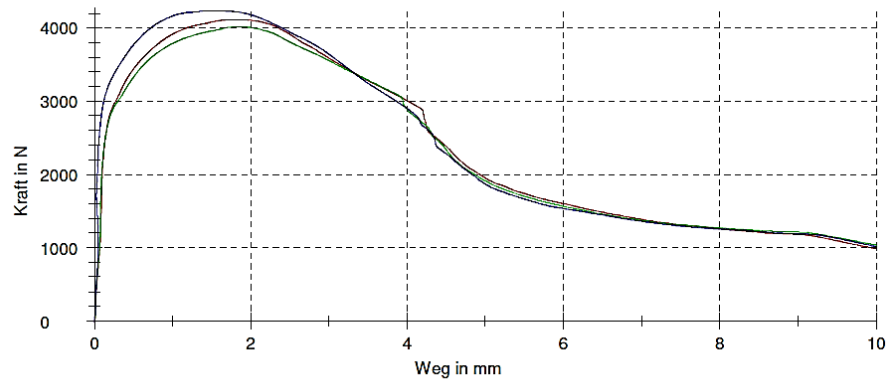
Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
x	4395	1,8	-	-
s	59,20	0,2	-	-
v [%]	1,35	8,98	-	-

Diagramm 22 Scherzugkurven der Proben 57, 75 und 93 (links); 58, 76 und 94 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4117	1,8	-	-	KS2_Scherzug_59
■	2	4017	1,9	-	-	KS2_Scherzug_77
■	3	4237	1,6	-	-	KS2_Scherzug_95

Seriengrafik:



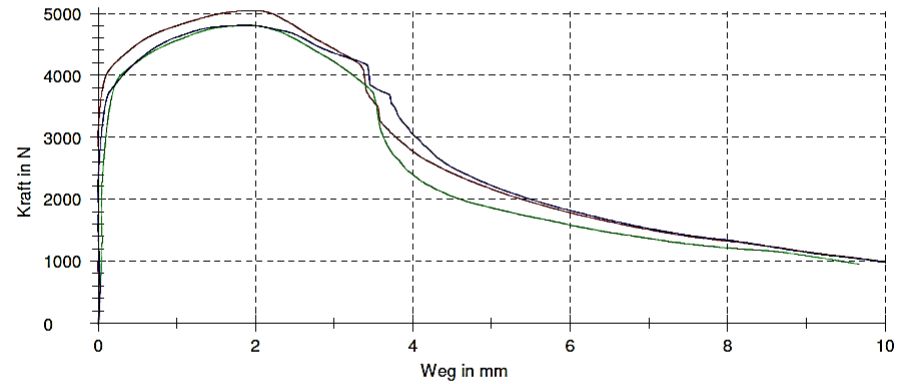
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
x	4124	1,8	-	-
s	110,2	0,2	-	-
v [%]	2,67	9,50	-	-

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	5046	2,0	1010	9,9	KS2_Scherzug_60
■	2	4810	1,9	962	9,6	KS2_Scherzug_78
■	3	4807	1,8	-	-	KS2_Scherzug_96

Seriengrafik:



Statistik:

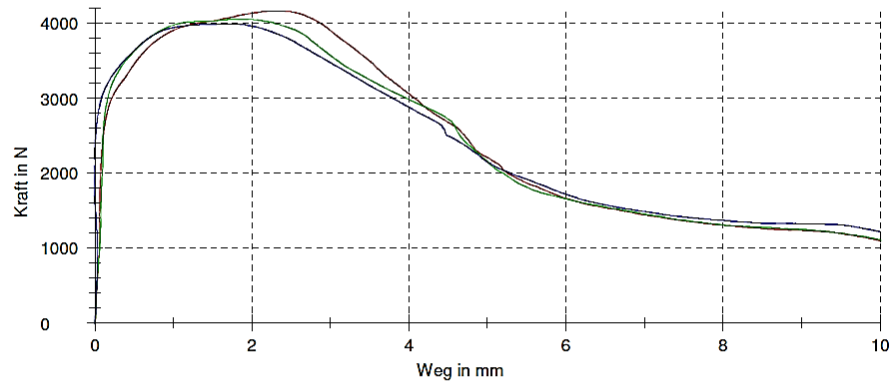
Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
x	4887	1,9	985	9,8
s	137,0	0,1	33,3	0,2
v [%]	2,80	3,90	3,38	1,80

Diagramm 23 Scherzugkurven der Proben 59, 77 und 95 (links); 60, 78 und 96 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4166	2,3	-	-	KS2_Scherzug_61
■	2	4054	1,9	-	-	KS2_Scherzug_79
■	3	3991	1,7	-	-	KS2_Scherzug_97

Seriengrafik:



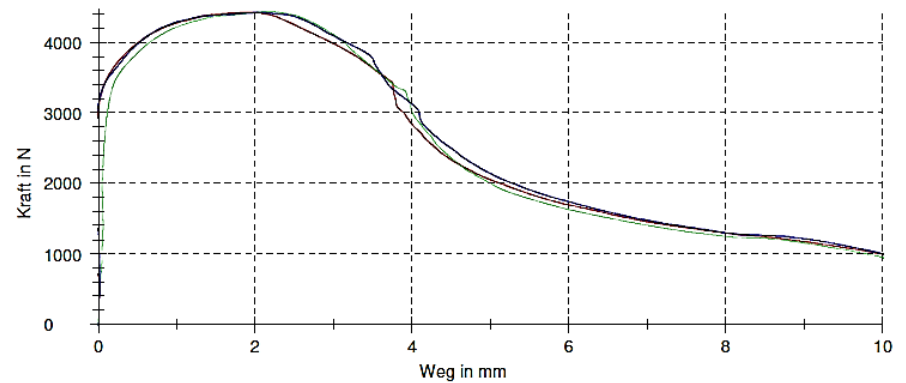
Statistik:

Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	4070	2,0	-	-
s	88,86	0,3	-	-
v [%]	2,18	16,61	-	-

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4428	1,9	-	-	KS2_Scherzug_62
■	2	4442	2,2	-	-	KS2_Scherzug_80
■	3	4425	2,0	-	-	KS2_Scherzug_98

Seriengrafik:



Statistik:

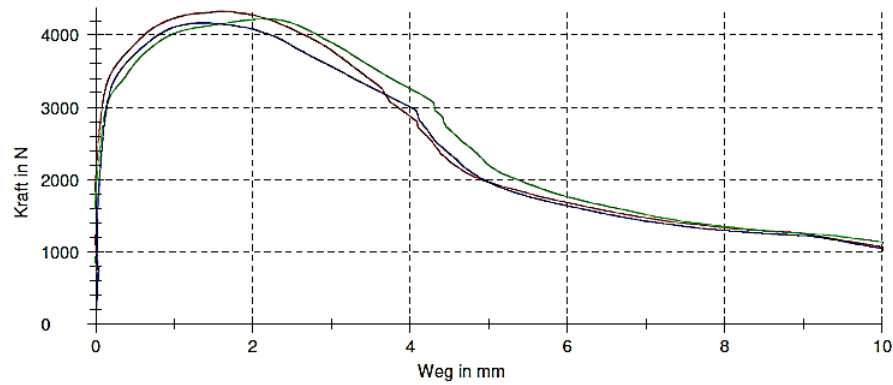
Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	4432	2,0	-	-
s	9,334	0,1	-	-
v [%]	0,21	5,77	-	-

Diagramm 24 Scherzugkurven der Proben 61, 79 und 97 (links); 62, 80 und 98 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4331	1,6	-	-	KS2_Scherzug_63
■	2	4222	2,1	-	-	KS2_Scherzug_81
■	3	4170	1,4	-	-	KS2_Scherzug_99

Seriengrafik:



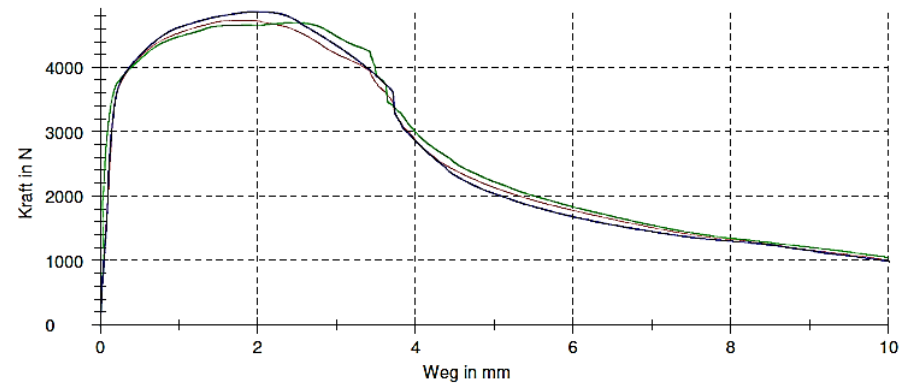
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	4241	1,7	-	-
s	82,47	0,4	-	-
v [%]	1,94	21,89	-	-

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4738	1,8	-	-	KS2_Scherzug_64
■	2	4698	2,5	-	-	KS2_Scherzug_82
■	3	4869	2,0	-	-	KS2_Scherzug_100

Seriengrafik:



Statistik:

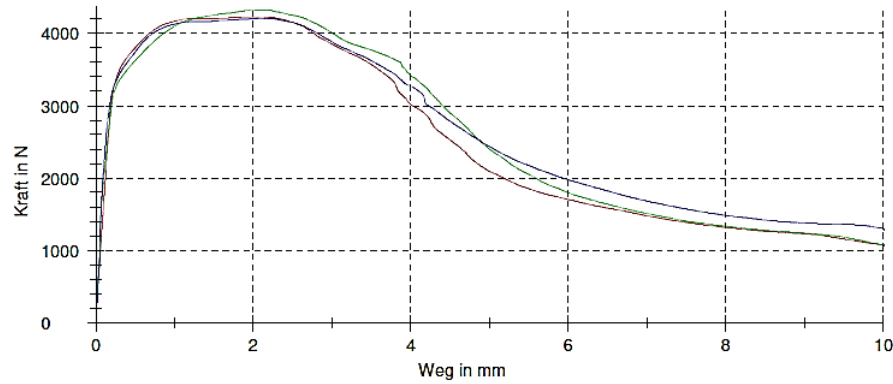
Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	4768	2,1	-	-
s	89,36	0,3	-	-
v [%]	1,87	16,69	-	-

Diagramm 25 Scherzugkurven der Proben 63, 81 und 99 (links); 64, 82 und 100 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4231	2,0	-	-	KS2_Scherzug_65
■	2	4327	2,0	-	-	KS2_Scherzug_83
■	3	4205	2,2	-	-	KS2_Scherzug_101

Seriengrafik:



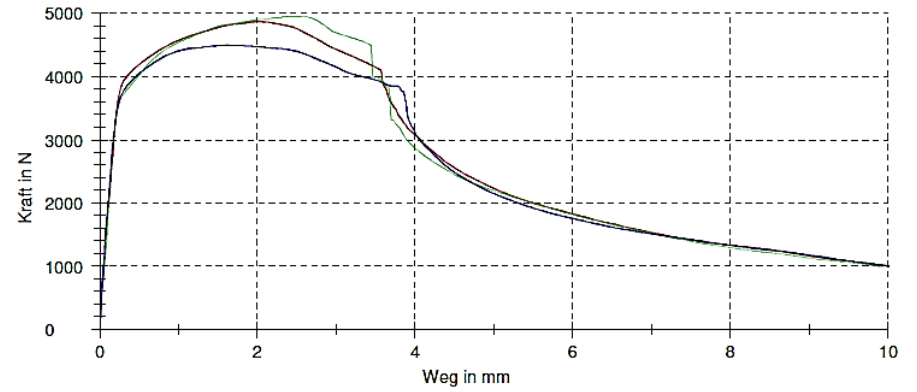
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	4254	2,1	-	-
s	64,06	0,1	-	-
v [%]	1,51	5,24	-	-

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4866	2,0	-	-	KS2_Scherzug_66
■	2	4954	2,5	991	9,9	KS2_Scherzug_84
■	3	4493	1,6	-	-	KS2_Scherzug_102

Seriengrafik:



Statistik:

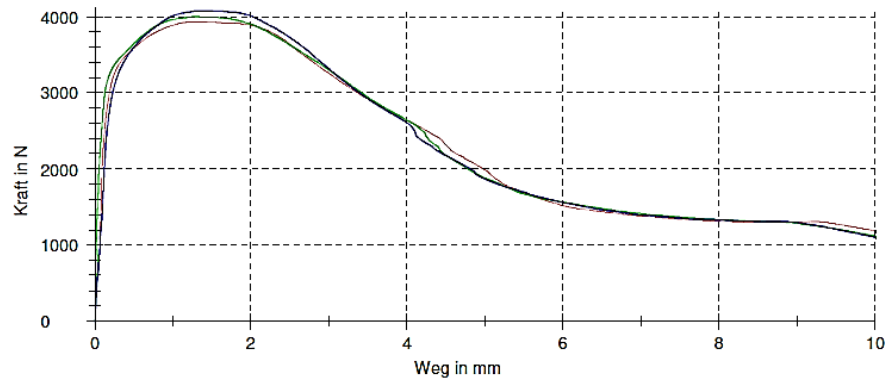
Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	4771	2,1	991	9,9
s	244,7	0,5	-	-
v [%]	5,13	22,71	-	-

Diagramm 26 Scherzugkurven der Proben 65, 83 und 101 (links); 66, 84 und 102 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	3932	1,3	-	-	KS2_Scherzug_67
■	2	3996	1,3	-	-	KS2_Scherzug_85
■	3	4076	1,4	-	-	KS2_Scherzug_103

Seriengrafik:



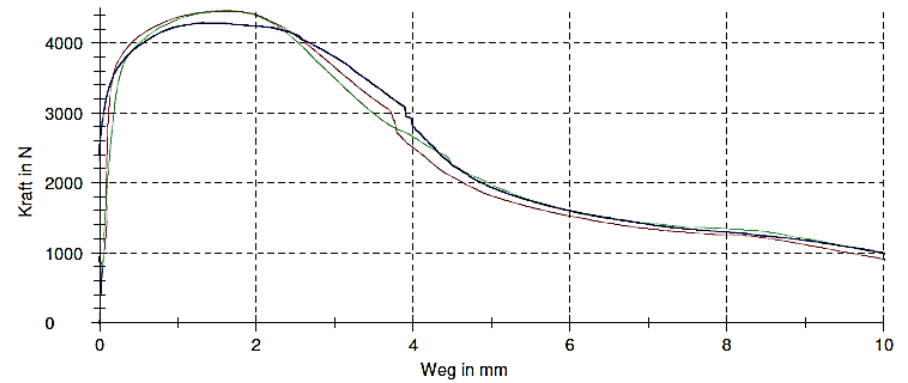
Statistik:

Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	4001	1,3	-	-
s	72,55	0,1	-	-
v [%]	1,81	4,76	-	-

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4455	1,6	-	-	KS2_Scherzug_68
■	2	4470	1,6	-	-	KS2_Scherzug_86
■	3	4285	1,3	-	-	KS2_Scherzug_104

Seriengrafik:



Statistik:

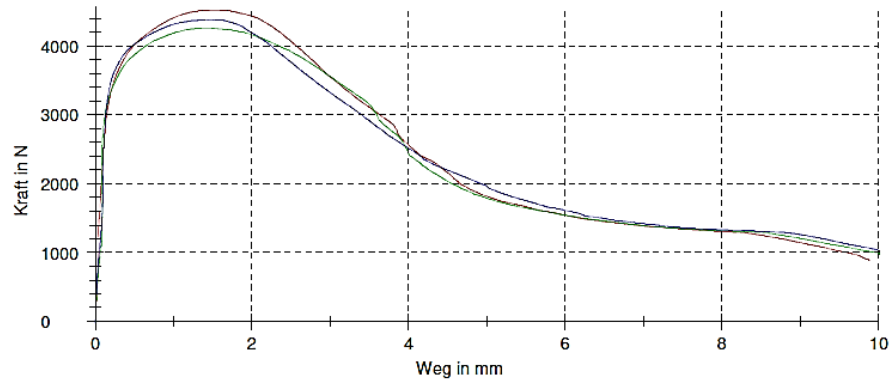
Serie n = 3	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
\bar{x}	4403	1,5	-	-
s	102,6	0,2	-	-
v [%]	2,33	11,50	-	-

Diagramm 27 Scherzugkurven der Proben 67, 85 und 103 (links); 68, 86 und 104 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4525	1,5	905	9,8	KS2_Scherzug_69
■	2	4268	1,4	-	-	KS2_Scherzug_87
■	3	4384	1,4	-	-	KS2_Scherzug_105

Seriengrafik:



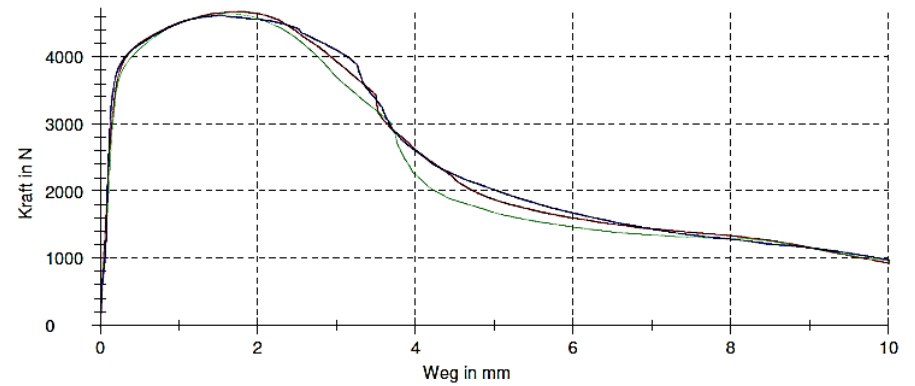
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	4392	1,5	905	9,8
s	129,1	0,1	-	-
v [%]	2,94	3,82	-	-

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4676	1,7	935	10,0	KS2_Scherzug_70
■	2	4640	1,7	-	-	KS2_Scherzug_88
■	3	4609	1,5	-	-	KS2_Scherzug_106

Seriengrafik:



Statistik:

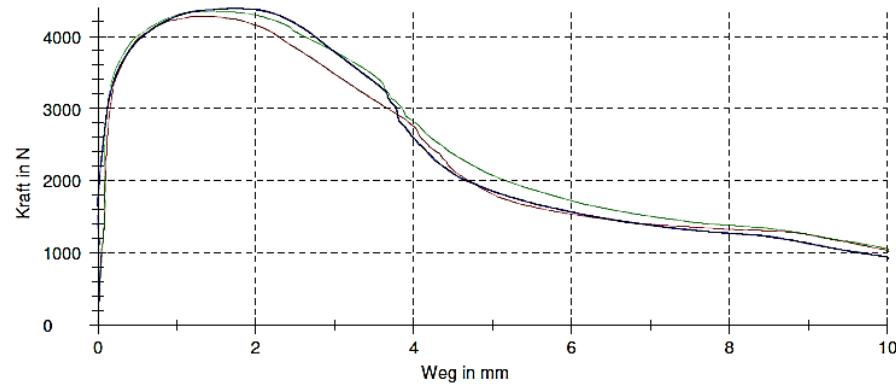
Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	4642	1,7	935	10,0
s	33,19	0,1	-	-
v [%]	0,72	5,93	-	-

Diagramm 28 Scherzugkurven der Proben 69, 87 und 105 (links); 70, 88 und 106 (rechts)

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4282	1,4	-	-	KS2_Scherzug_71
■	2	4350	1,4	-	-	KS2_Scherzug_89
■	3	4392	1,7	-	-	KS2_Scherzug_107

Seriengrafik:



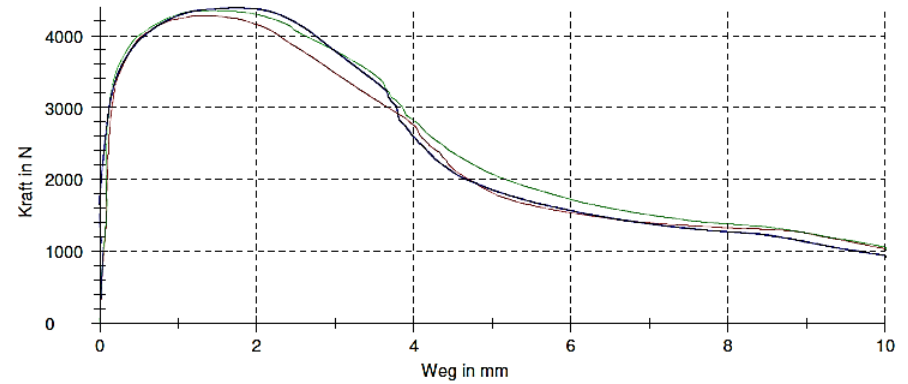
Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	4341	1,5	-	-
s	55,59	0,2	-	-
v [%]	1,28	13,05	-	-

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm	Benennung
■	1	4282	1,4	-	-	KS2_Scherzug_71
■	2	4350	1,4	-	-	KS2_Scherzug_89
■	3	4392	1,7	-	-	KS2_Scherzug_107

Seriengrafik:



Statistik:

Serie	F _{max} N	dL bei F _{max} mm	F _{Bruch} N	dL bei Bruch mm
n = 3				
\bar{x}	4341	1,5	-	-
s	55,59	0,2	-	-
v [%]	1,28	13,05	-	-

Diagramm 29 Scherzugkurven der Proben 71, 89 und 107 (links); 72, 90 und 108 (rechts)

Literaturverzeichnis

Adam, Mario: Statistische Versuchsplanung und Auswertung. FH Düsseldorf, Düsseldorf. Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

Audi: Neuer Audi Space Frame mit hohen Anteilen an Aluminium und CFK. Hg. v. Audi. Online verfügbar unter <http://www.audi-technology-portal.de/de/karosserie/aluminiumkarosserien/neuer-audi-space-frame-mit-hohen-anteilen-an-aluminium-und-cfk>.

Audi: Verbindungstechniken in der Karosserie. Hg. v. Audi. Online verfügbar unter <https://www.audi-mediacyber.com/de/fotos/detail/audi-r8-21589>.

BMW: Neue BMW 3er Reihe geht an den Start. Norbert Reithofer. Online verfügbar unter <http://www.7-forum.com/news/Neue-BMW-3er-Reihe-geht-an-den-Start-4243.html>.

Böllhoff (2010): Rivset. Stanzniettechnik für perfekte Verbindungen.

Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren: Virtuelles Museum der Fügetechnik Mechanische Fügetechnik. Ausführungsformen. Hg. v. Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren. Online verfügbar unter <http://www.dvs-aft.de/M/0/Tew/Mft/Cln/MftClnAus04>.

Disse, Thomas; Maciej, Marko; Meschut, Gerson (2004): Kleben und Hybridfügen von Leichtbaustrukturen für den Automobilbau. Hg. v. Fachjournal Adhäsion.

Disynet (2016): DMS, Dehnungsmessstreifen. Online verfügbar unter <http://www.sensoren.info/#DMS>.

Eckstein, Johannes (2009): Numerische und experimentelle Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Halbhohlstanznieten hochfester Bleche. Universität Stuttgart, Stuttgart. Energie-, Verfahrens- und Biotechnik.

Enzinger, Norbert (2014): Fügetechnik. Skriptum. TU Graz, Graz. IWS.

Fachjournal Adhäsion (2013): Leitfaden für erfolgreiche Verbindungen. Hg. v. Stahl-Informations-Zentrum.

Fibro: Elastomere.

Heinrich, Thomas (2015): Messtechnik. Strukturversuchstechnik-Teil2. Präsentation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich. Center of Structure Technologies. Online verfügbar unter https://www1.ethz.ch/structures/education/bachelor/ingenieurtools/SVT_HS2015/Strukturversuchstechnik_-_2015HS_-_Messtechnik.pdf.

Kleppmann, Wilhelm (2013): Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. 8. Aufl. München: Hanser (Praxisreihe Qualitätswissen).

Lange (1993): Umformtechnik. Band 4: Sonderverfahren, Prozesssimulationen, Werkzeugtechnik, Produktion. 2. Aufl. Berlin: Springer.

Lloyd; Moyce; Black; Rickards: The all new Range Rover - L405. JLR light weight vehicle strategy. EuroCarBody.

Lou, Ming; Li, YongBing; Wang, Yuan; Wang, Bin; Lai, Xinmin (2014): Influence of resistance heating on self-piercing riveted dissimilar joints of AA6061-T6 and galvanized DP590 (214). In: *Journal of Materials Processing Technology* (10), S. 2119–2126.

Mende, Thorsten (2006): Clinchen von beschichteten Feinblechen unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes von Wirkmedien. Dissertation. TU Dresden, Dresden.

Minitab (2016): Statistische Modellierung. Versuchsplanung (DoE). Hg. v. Minitab. Online verfügbar unter <http://support.minitab.com/de-de/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/factorial-designs/residuals-in-analyze-variability/>.

Reinstettel, Marc (2007): Laboruntersuchung zur Prozessstabilität beim Niet-Clinchen. Dissertation. TU Chemnitz, Chemnitz.

Schmid, Daniel; Seehafer, Ghibsy (2014): Audi TT Coupé. EuroCarBody. Bad Nauheim, 21.10.2014.

Stahl-Informations-Zentrum, Informationsstelle Edelstahl Rostfrei: Leitfaden für erfolgreiche Verbindungen, S. 41–46.

TU Clausthal (25.10.2010): TU Clausthal und Maximator GmbH durch Innenhochdruckfügen zusammen gebracht. Nordhausen. Christopher Schätz, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Online verfügbar unter <http://www.openpr.de/news/479290/TU-Clausthal-und-Maximator-GmbH-durch-Innenhochdruckfuegen-zusammen-gebracht.html>.

TU Dresden: Auswahl von Fügeverfahren. Präsentation. TU Dresden, Dresden. Institut für Fertigungstechnik.

Untersweg, Wolfgang (1999): Prüfstand zur Messung mechanischer Größen. Unter Mitarbeit von Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Reinhard Feiel. Institute of Electrical Measurement and Signal Processing. Graz. Online verfügbar unter http://www.emt.tugraz.at/publications/diplomarbeiten/da_untersweg/Diplomarbeit.html.

Warenzeichenverband Edelstahl Rostfrei E.V.: Gute Verbindungen: Edelstahl rostfrei kleben. Hg. v. Blechzulieferer.de. Online verfügbar unter <http://magazin.blechzulieferer.de/2013/09/gute-verbindungen-edelstahl-rostfrei-kleben/>.