

Werkstoffgerechtes Konstruieren und Gestalten mit metallischen Werkstoffen

Der Fakultät Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen
Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften habilitatus
(Dr.- Ing. habil.) vorgelegte Habilitationsschrift

von

Dr.-Ing. Sylvio Simon

geboren am 15.01.1966 in Cottbus

Datum des Habilitationsantrages: 03.02.2005

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Hufenbach

Prof. Dr.-Ing. Arnold Kühhorn

Prof. Dr.-Ing. Bernd Viehweger

Fakultätsratsbeschluss: vom 17.01.2007

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus. Für die mir gewährte Unterstützung möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls und des Forschungszentrums, besonders beim Lehrstuhlinhaber und Geschäftsführer der Panta Rhei gGmbH, Herrn Professor Bernd Viehweger bedanken. Mein Dank gilt auch den Mitgliedern des Habilitationsausschusses.

Auch meiner Familie, meinen Freunden und Bekannten, die während der Fertigstellung dieser Arbeit zahlreiche Entbehungen auf sich nehmen mussten, danke ich für ihr Verständnis.

Inhaltsverzeichnis

0	Vorwort.....	4
1	Einleitung	5
2	Stand der Technik und Forschung	7
2.1	Gestalten und Leichtbau	7
2.2	Gestalten und Werkstoffe	14
3	Systematisierung der Halbzeuge und Tailored Products.....	32
3.1	Profilierte Halbzeuge.....	33
3.2	Ebene Halbzeuge.....	37
3.3	Hybrid Blanks - Geschweißte Tailored Blanks aus Aluminium und Stahl.....	55
3.4	Strukturierte Feibleche als Halbzeuge	65
4	Eigene Untersuchungen zur Weiterentwicklung von optimierten Halbzeugen ..	67
4.1	Profile.....	67
4.2	Durch Walzen gefügte Tailored Blanks aus Aluminium und Stahl.....	81
4.3	Umformverhalten strukturierte Feibleche	106
4.4	Untersuchungen zum Fügen strukturierter Feibleche	141
5	Zusammenfassung und Ausblick	171
6	Literatur.....	176
7	Anlagen.....	191

0 Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner fast 12 jährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung der BTU Cottbus. Der Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung beschäftigt sich in der Lehre mit den Gebieten Konstruktion, Fertigungstechnik, Werkzeugmaschinen und Leichtbau. Auf forschungsseitigem Gebiet sind die Schwerpunkte Blechumformung mit Stahl-, Aluminium- und Magnesiumblechen, strukturierte Feinbleche, Aluminium- Stahl – Verbünde, Sandwichelemente und Streckbiegen von Profilen wesentliche Bestandteile der Leichtbaukompetenz des Lehrstuhls.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die für die werkstoffgerechte moderne Konstruktion und Gestaltung mit metallischen Werkstoffen vorliegenden Halbzeuge und Technologien zu systematisieren und weiterzuentwickeln. Dabei liegt der Fokus der Darstellung auf modernen Leichtbauanwendungen. Die betrachteten Werkstoffe stehen dabei nicht in einem Konkurrenzverhältnis, sondern ergänzen sich und die zu findenden Lösungen gegenseitig.

Die Schwerpunkte meiner Forschungstätigkeit werden zur Weiterentwicklung der Halbzeuge und Technologien für das werkstoffgerechte Konstruieren und für Leichtbauanwendungen genutzt. Sie sollen das Spektrum von Lösungsmöglichkeiten für konstruktive Problemstellungen erweitern.

Wesentliche Erkenntnisse aus diesen Forschungsvorhaben wurden bereits in die von mir gehaltenen Lehrveranstaltungen auf konstruktivem und gestaltungstechnischem Gebiet sowie in den Lehrveranstaltungen zur Leichtbaukonstruktion integriert.

1 Einleitung

Werkstoffgerecht zu Konstruieren ist eine Forderung an den Konstrukteur, wenn er sich der optimalen Lösung weitestgehend annähern möchte. Die fortlaufende Weiterentwicklung der Werkstoffe, die Verfügbarkeit neuer Fertigungsverfahren und Anpassung der Berechnungs- und Simulationstechniken erfordern eine stetige Fortschreibung der Regeln für das werkstoffgerechte Konstruieren. Werkstoffsparende Konstruktionen als Ergebnis des werkstoffgerechten Konstruierens gehören zu den Arten des Leichtbaus.

Leichtbau ist eine Konstruktionstechnik, die unter integrativer Nutzung aller konstruktiven, werkstoff- und fertigungstechnischen Mittel bei einer Gesamtstruktur und bei deren Elementen die Masse reduziert und die Gebrauchsgüte erhöht [1]. Die Umsetzung der Leichtbauprinzipien bei der Entwicklung neuer Produkte setzt neben der kreativen Idee insbesondere übergreifende Kenntnis der großen Vielfalt moderner Konstruktions- und Funktionswerkstoffe mit dem ihnen eigenen Leichtbaupotenzial voraus [2].

Weiterentwickelte Werkstoffe und neue Halbzeuge z.B. in Form von strukturierten Feiblechen ermöglichen dem Konstrukteur neue Lösungsmöglichkeiten. Für ihre Verwendung müssen Kennwerte und Verfahren untersucht und ausgewertet werden. Die Ermittlung einiger solcher Kennwerte und die Untersuchung geeigneter Fertigungsverfahren für neue Werkstoffe und Halbzeuge ist Bestandteil dieser Arbeit.

Die Klassifizierung von Halbzeugen nach verschiedenen Gesichtspunkten, die Erarbeitung von Gestaltungsregeln für die Fertigung einiger Halbzeuge und die Weiterentwicklung von Konstruktions- und Gestaltungsregeln für ausgewählte Halbzeuge werden dargestellt. Damit entsteht eine Übersicht für neue, überwiegend flächige Halbzeuge, die dem Konstrukteur die Auswahl für eine spezielle Lösung erleichtern.

Der Stand der Technik beschäftigt sich überwiegend am Beispiel des Leichtbaus mit den Gestaltungsregeln. Die für Leichtbauanwendungen oft gebräuchlichen metallischen Werkstoffe werden unter dem Gesichtspunkt der möglichen Anwendungen charakterisiert. Als typischer Vertreter neuer Halbzeuge werden die Tailored Products systematisiert und ihre Fertigung und Anwendung beschrieben sowie strukturierte Feibleche als Halbzeuge integriert.

Die eigenen Forschungstätigkeiten werden mit der Weiterentwicklung von Hybriden Tailored Blanks auf der Basis eines Walzverfahrens in Anlehnung an das Kaltpressschweißen, den Untersuchungen zu ausgewählten Umform- und Fügeverfahren von strukturierten Feiblechen aus Stahl- und Aluminiumwerkstoffen

und den Möglichkeiten der Herstellung leichter Stahlrohre und den Anwendungen der leichten Stahlrohre als Profile dargestellt.

Die gewalzten Hybrid Blanks weisen gegenüber den bisherigen überwiegend lasergeschweißten Hybrid Blanks die Vorteile der Blechebenheit und des Ausschlusses interkristalliner Zonen auf. Damit sind Anwendungen auch im Außenhautbereich von Fahrzeugen denkbar.

Bereits begonnene Untersuchungen zu strukturierten Feiblechen wurden fortgesetzt und eine Modellvorstellung für das Verhalten strukturierter Feibleche unter Zugbeanspruchung erarbeitet. Untersuchungen zum Fügeverhalten der strukturierten Feibleche bei typischen Blechfügeverfahren ermöglichen Aussagen zur fügegerechten Gestaltung von Bauteilen aus strukturierten Feiblechen.

Eine neue Art von leichten Profilen wird durch die Weiterentwicklung der leichten Strahlrohre vorgestellt. Gegenüber gewalzten Trägern sind sie in der Wandstärke deutlich reduziert. Eine direkte Vergleichbarkeit mit Tailored Tubes ist jedoch nicht gegeben.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Gestalten und Leichtbau

Gestaltungsrichtlinien

Kesselring formulierte fünf übergeordnete Gestaltungsprinzipien, die an Aktualität nichts verloren haben[3]:

- das Prinzip von den minimalen Herstellkosten,
- das Prinzip vom minimalen Raumbedarf,
- das Prinzip vom minimalen Gewicht,
- das Prinzip von den minimalen Verlusten und,
- das Prinzip von der günstigsten Handhabung.

Diese Prinzipien sind durch weitere Gestaltungsregeln konsequent weiterentwickelt worden. Die Konstruktionslehre im Allgemeinen kennt verschiedene Stadien der Produktentwicklung. Ausgehend vom Produktentwicklungsprozess kommt der Konstrukteur nach der Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung zum Methodischen Konzipieren und Entwerfen. *Pahl/Beitz* [4] beschreiben innerhalb des Methodischen Entwerfens verschiedene Grundregeln der Gestaltung. Sie stellen zwingende Anweisungen dar, leiten sich von der generellen Zielsetzung und von der Leitlinie beim Gestalten ab und gelten stets. Aus den Grundregeln der Gestaltung werden verschiedene Gestaltungsrichtlinien formuliert, die im internationalen Bereich auch als „Design for X“ bezeichnet werden [4]. Diese Regeln beschreiben verschiedene Gestaltungsbereiche und sind stets vom Werkstoff abhängig.

Solche Bereiche und Regelungen sind: ausdehnungsgerecht, korrosionsgerecht, verschleißgerecht. Ordnet man diese Regeln bestimmten Werkstoffen oder Halbzeugen zu, so entstehen werkstoffspezifische Regeln. *Hoенow/Meißner* sprechen dann vom: guss- oder urformgerechten Gestalten, blechgerechten Gestalten u.s.w. oder allgemein vom „**werkstoffgerechten Gestalten**“ [5].

Innerhalb des fertigungsgerechten Gestaltens muss der Konstrukteur eine fertigungsgerechte Baustruktur seines Produktes unter Beachtung der Fertigungsmöglichkeiten festlegen. *Wiedemann* weist darauf hin, dass die aus fertigungstechnischer Sicht angestrebte Differentialbauweise, die die Auflösung eines Einzelteils in mehrere fertigungstechnisch günstige Werkstücke versteht, nichts mit der Differentialbauweise des Leichtbaus zu tun hat, bei der man von einer beanspruchungsoptimalen Aufgliederung der Baustruktur ausgeht [6].

Die beanspruchungsgerechte Gestaltung wird von *Hoerow/Meißner* auch als kraftgerechte Gestaltung bezeichnet [5], deren bekanntester Vertreter der „Träger gleicher Festigkeit“ ist [7]. „Träger gleicher Festigkeit“ bedeutet, dass am Bauteil sich möglichst nur soviel Material befindet, das in jedem Beanspruchungsquerschnitt die gleichen, noch ertragbaren Spannungen herrschen. Insofern ist das werkstoffgerechte Konstruieren und beanspruchungsgerechte Gestalten ein wesentlicher Beitrag zum Leichtbau.

Leichtbau als Gestaltungsrichtlinie

Zur allgemeinen Definition des Leichtbaus werden in der Literatur verschiedene Formulierungen verwendet. So weist *Leyer* darauf hin, dass Leichtbau dadurch gekennzeichnet ist, wie auf eine **äußerst zurückhaltende Art mit der Verteilung von Werkstoff im Bauteil** umgegangen wird [8]. Dem gegenüber formuliert *Wiedemann*, dass Leichtbau zunächst die Absicht ist, aus funktionalen oder ökonomischen Gründen das *Gewicht zu reduzieren* oder zu minimieren, ohne dabei die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern. [6].

Damit ist das Ziel des Leichtbaus eindeutig umschrieben. Es geht um die Einsparung von Gewicht an der ausgeführten Konstruktion. Je nach Einsatzbedingungen muss der Grad der Gewichtsreduzierung angepasst sein. Ist es beim Kraftfahrzeugbau vor allem der reduzierte Energieverbrauch, der sich im Fahrzeugbetrieb niederschlägt, so ist der technische und wirtschaftliche Aufwand für den extremen Leichtbau in der Luft- und Raumfahrt gerechtfertigt bzw. sogar aus funktionalen Gründen zwingend notwendig [9]. *Hufenbach* betont die Notwendigkeit des effizienten Leichtbaus [10] und weißt weiter darauf hin, dass in einem ganzheitlichen Konzept neben einer reinen Massereduzierung auch weitere Aspekte wie optimale Materialeinstellung, Materialmix bis hin zum Recycling zu beachten sind [11]. *Huber* versteht unter dem leichtbaugerechten Konstruieren unter anderem das werkstoffgerechte Gestalten mit dem Ziel des minimalen Materialeinsatzes [12]. Über Möglichkeiten, nicht nur im Kraftfahrzeugbau leicht und sicher zu gestalten, darauf weißt *Viehweger* hin. Hier bieten vor allem hybride Strukturen deutliche Vorteile [13].

Die fertigungsgerechte optimale Werkstoff- und Halbzeugwahl ist wegen der gegenseitigen Beeinflussung von Merkmalen der Funktion, des Wirkprinzips, der Auslegung u.s.w. problematisch. Die Nutzung von FE – Programmen für die umfassende Gestaltung ist dabei nicht nur für metallische Werkstoffe möglich. *Kühhorn* beschreibt diese programmunterstützte Auslegung am Beispiel eines Modellflügels [14]. Nach *Leyens* bietet sich durch die Weiterentwicklung von Titan

und Titanlegierungen dem Konstrukteur die Möglichkeit mit einem vielseitig nutzbaren metallischem Leichtbauwerkstoff zu gestalten [15].

Systematisierung des Leichtbaus

Wiedemann differenziert den Leichtbau in drei zielorientierte Klassen:

- Spar – Leichtbau
- Öko – Leichtbau
- Zweck – Leichtbau

Der **Sparleichtbau** ist die direkte Kosteneinsparung an Material und Herstellung. Der reduzierte Materialaufwand wird durch eine funktionsgerechte Strukturgestaltung und der reduzierte Herstellungsaufwand durch Materialalternativen mit höherem spezifischem Volumen erreicht.

Unter dem **Ökoleichtbau** ist die indirekte Kosteneinsparung an Energie zu verstehen. Das verringerte Gesamtgewicht reduziert die Betriebskosten durch Energieeinsparung im Betrieb. Trotz des höheren Fertigungsaufwandes entsteht eine günstigere Gesamtbilanz.

Die Gewichtsreduzierung als Funktionsbedingung ist das markante Merkmal des **Zweckleichtbaus**. Neue Systemfunktionen können durch Massereduzierung realisiert werden, wobei Kostenkriterien in den Hintergrund treten.

Alle Leichtbaumaßnahmen besitzen das Ziel, den Quotienten aus der geforderten Eigenschaft und dem Gewicht zu maximieren. Je nach Anwendungsfall ist dabei die Eigenschaft unterschiedlich definiert, wie zum Beispiel Festigkeit oder Steifigkeit.

Zur Realisierung dieser Zielfunktion kommen verschiedene Technologien zur Anwendung, die separat oder in Kombination genutzt werden. Sie lassen sich generell in zwei Hauptgruppen einordnen:

- Stoffleichtbau
- Formleichtbau

Beinhaltet der **Stoffleichtbau** die Substitution konventioneller, spezifisch schwerer Werkstoffe durch höherfeste bzw. leichtere Werkstoffe, so umfasst der **Formleichtbau** eine ganze Gruppe möglicher konstruktiver Optimierungen, die das Bauteiltragvermögen bei möglichst geringen Materialeinsatz erhöhen. Die bekannten Bauweisen: Differential-, Integral- und Verbundbauweise werden durch Strukturbleche, Hohlstrukturen, Metallverbünde, Mischbauweisen und Sandwichs erweitert [16], [17], [18].

Klein beschreibt die Differentiation eines Bauteils als einen Aufbau aus verschiedenen, jeweils optimierten und zum Ganzen gefügten Komponenten, wobei bei der Integration die Komponenten des Bauteiles zu einem möglichst einteiligen Ganzen zusammengefasst werden. Sandwich- und Faserverbundkonstruktionen gehören zur Verbundbauweise. Als integrierende Bauweise bezeichnet man die Zusammenfassung einzelner Komponenten zur Teilintegration, wobei sich die spezifischen Vorteile von Differential- und Integralbauweise kombinieren lassen [19].

Je nach dem wirtschaftlichen Nutzen, den der Leichtbau mit sich bringt, kann er mehr oder minder nachhaltig betrieben werden. Nach *Hertel* lassen sich folgende Stufen des Leichtbaus unterscheiden:

1. Der so genannte „**Grenzleichtbau**“. Hierbei handelt es sich um eine ideale Konstruktion, die mit minimalem Masseaufwand unter Ausschöpfung aller technischen Möglichkeiten entsteht. Der praktischen Verwirklichung dieses „Grenzleichtbaus“ sind aus wirtschaftlichen Überlegungen Grenzen gesetzt.
2. **Der klassische Leichtbau.** Er schöpft gleichfalls alle technischen Möglichkeiten aus, lässt aber die gesamtwirtschaftlichen Gegebenheiten nicht außer Acht. Er sucht die technisch reale Leichtbaulösung. Diese ist stark abhängig vom derzeitigen Stand der Technik. Die Domäne des klassischen Leichtbaues ist der Flugzeugbau.
3. **Der allgemeine Leichtbau.** Er nutzt gleichfalls die Vorteile des Leichtbaus, stellt aber die wirtschaftlichen Belange stärker in den Vordergrund. Der allgemeine Leichtbau verzichtet zum Teil bewusst auf Leichtbaumöglichkeiten, wenn sich der Aufwand wirtschaftlich nicht rechtfertigen lässt. Den allgemeinen Leichtbau wendet man beispielsweise im Fahrzeugbau an.
4. **Die werkstoffsparende Konstruktion.** Hierbei wird der Leichtbau nur mehr am Rande betrieben. Was man durch umsichtige Gestaltung der Konstruktion einsparen kann, wird beachtet. Bekannt sind dazu die Regeln zur guss-, blech-, und aluminiumgerechten Konstruktion. [20]

Dem Grenzleichtbau kommt eine wegweisende Bedeutung zu. Er ist der Maßstab für die Beurteilung des Standes des Leichtbaues. Auch er ist keine Konstante, sondern vom jeweiligen Stand der Technik abhängig. Die Frage nach dem minimalen Gewichtsaufwand für einen Druckstab kann man nach dem Stand der Technik eindeutig beantworten, doch mit einem neuen, leistungsfähigeren Werkstoff und den entsprechenden Fügetechniken [21] wird sie in Zukunft anders ausfallen. In vielen technisch wichtigen Fällen liefert das Studium des Grenzleichtbaues wertvolle Hinweise.

Welche Methode des Leichtbaus im Sinne der werkstoffgerechten Konstruktion angewendet werden soll, ist auch eine Frage der Kosten. Hier gibt die *VDI Richtlinie 2225* eine Hilfestellung. So wird das Problem der geeigneten Werkstoff- und Halbzeugauswahl häufig durch die gebrauchte Kalkulationsmethode nach den Gewichtskosten verschleiert. Oft glaubt der Konstrukteur, mit Hilfe einer Gewichtssenkung auch eine Kostensenkung zu erreichen. In vielen Fällen überschreitet er aber dabei das Kostenminimum, wie die folgende Abbildung 1 belegt [22].

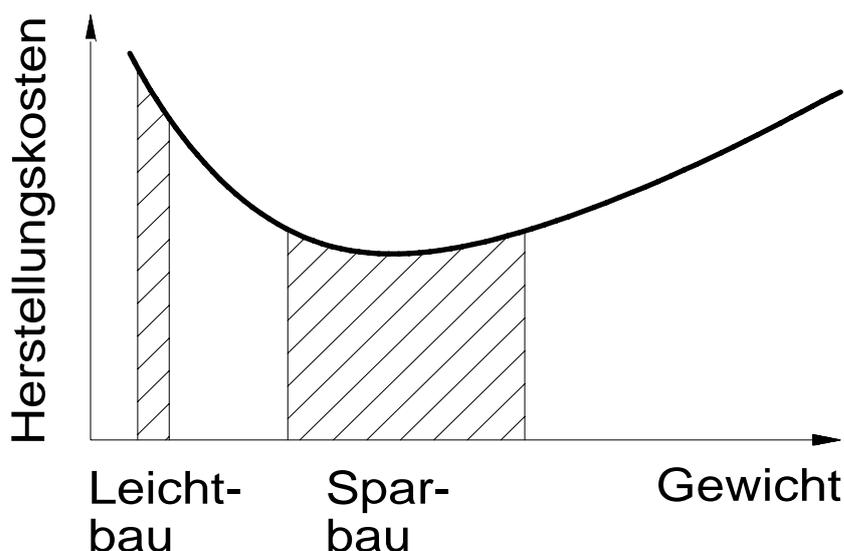


Abbildung 1: Kostenbereiche für den Leichtbau und den Sparbau [22]

Forschungsrichtung werkstoffgerechtes Konstruieren – Leichtbaulösungen

Bleche konstanter Dicke, genormte Stahl- und NE-Profile sowie Strangpressprofile können alle Forderungen nach einer materialsparenden Konstruktion (Leichtbau) nicht erfüllen. Sie müssen mit Lösungen kombiniert werden, die gedanklich für eine Einzelfertigung möglich sind, sich jedoch in einer Serienfertigung bisher so nie einsetzen lassen. Daher beschäftigen sich weltweit eine Vielzahl von Forschungseinrichtungen mit der Thematik Leichtbau und seinen Komponenten. Materialien, Konstruktionen, Füge- und Fertigungstechniken – das sind nur einige Stichworte, mit denen man diese Arbeiten umschreiben kann. Die Verknüpfung der Ergebnisse wiederum bringt neue Möglichkeiten im Leichtbau. So gestattet die industrielle Nutzung des Laserschweißens überhaupt erst eine Vielzahl von Lösungen im Leichtbau. Stellvertretend seien hier nur die Tailored Blanks erwähnt, ohne die kein modernes Fahrzeug mehr auskommt.

Die ständige Weiterentwicklung der Werkstoffe erfordert auch eine ständige Weiterentwicklung der dazugehörigen Gestaltungs- und Konstruktionsregeln. Diese Regeln sollten möglichst für viele Bereiche der Fertigungstechnik formuliert werden. Hierbei wird der Ingenieur aber durch umfangreiche Simulationsprogramme unterstützt. Beispielhaft sei hier nur erwähnt, dass für das Tiefziehen strukturierter Feinbleche andere Stempelradien als bei Glattblechen verwendet werden müssen.

Vergleicht man die internationale Forschungslandschaft, dann fällt auf, dass bedeutende Forschungseinrichtungen im westeuropäischen Raum zu finden sind. Im Rahmen der Arbeit sollen daher exemplarisch nur zwei Zentren erwähnt werden.

Neue Werkstoffe und Materialien werden zum Beispiel im Kompetenzzentrum Neue Materialien Nordbayern GmbH entwickelt. Hier sind vor allem multifunktionale Werkstoffe zu finden. Die verwendeten Werkstoffe sind: Struktur- und Funktionswerkstoffe, Verbundstoffe und Werkstoffverbunde, Keramik, Glaskeramik, Glas, metallische Werkstoffe, Polymerwerkstoffe und Werkstoffe der Elektroindustrie. Mit diesen Werkstoffen werden zum Beispiel Komplettlösungen für den Leichtbau erarbeitet.

Speziell im Formleichtbau wird mit wandstärkenoptimierten Blechstrukturen, im Stoffleichtbau mit faserverstärkten Kunststoffen und Polymerschäumen, im Verbundleichtbau mit Composites und im adaptiven Leichtbau in der Composites-Fertigung geforscht. Im Bereich Polymere liegt der Kompetenzaufbau bei Spritzgießen, Extrusion, Spritzgießkompoundieren mit Fasern und Füllstoffen, Harzinjektion und der Herstellung von Sandwichstrukturen mit einer Kernlage aus Partikelschaum. Diese Aktivitäten erfolgen am Standort Bayreuth.

Aus Sicht der konstruktiven Gestaltung sind endkonturnahe Leichtbauformteile aus Metallen und Kunststoffen, wie sie am Standort Fürth entwickelt werden, aber auch Verbundwerkstoffe und Hybridstrukturen sowie Entwicklung innovativer Prozesstechniken auf der Basis von Druck- und Spritzguss von Bedeutung.

Werkstoffgerechtes Konstruieren fordert Lösungen für alle neuen Werkstoffentwicklungen. Die beanspruchungsgerechte Gestaltung von Leichtbaustrukturen im konstruktiven Leichtbau, dem Ultraleichtbau und dem adaptiven Leichtbau mit Polymeren, Metallen, Keramiken und Hybridwerkstoffen sind Forschungsgebiete des Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik an der TU Dresden. Hier werden unter anderem Auslegungs- und Optimierungskriterien für Bauteile in Leichtbauweise, wobei die Mischbauweise einen Schwerpunkt bildet, erforscht. Berechnungen und Simulationen, die heute einen wesentlichen Anteil an der werkstoffgerechten Gestaltung von Bauteilen besitzen, werden mit Hilfe eigens entwickelter Software auf analytischer Basis durchgeführt. Aber auch Simulationen

von Leichtbaustrukturen sowie bei komplexen Strukturen mittels kommerzieller FEM-Programmpakete unter statischer und dynamischer (Crash) Belastung werden im ILK Dresden durchgeführt.

Die Kette der erforschten Werkstoffe reicht dabei von Hochleistungskunststoffen über Elastomere, Faserverbundwerkstoffe, NE-Metalle, „Smart Materials“, Ingenieurkeramiken, Biomaterialien bis hin zu Recyclaten. Beispielhaft für die werkstoffgerechte Gestaltung ist die Entwicklung innovativer Werkstoffkonzepte mit hohem Leichtbaupotenzial (zum Beispiel textilverstärkte Verbundwerkstoffe, Hybridverbunde, Metall-Matrix-Composites) untersetzt mit entsprechenden Konstruktions- und Auslegungsstrategien [23].

Materialrecycling und Wiederverwertung - Produkt Lifecycle

Die Anwendung des werkstoffgerechten Konstruierens und Gestaltens **nur** unter dem Gesichtspunkt des intelligenten Leichtbaus mit Verbundwerkstoffen, um z.B. möglichst viel Gewicht an einem Fahrzeug zu sparen, kann zu einem Zielkonflikt führen. So soll auf der einen Seite der CO₂-Ausstoß nachhaltig gesenkt werden und der Kraftstoffverbrauch reduziert werden; auf der anderen Seite sind Vorgaben beim Altauto-Recycling zu erfüllen. Verwertungsquoten von 85 % ab 2006 und 95 % ab 2015 benötigen Recyclingtechnologien, die die Verwendung und damit die stoffliche Trennung von Verbundlösungen ermöglichen. Viele Verbundlösungen können nur sehr aufwendig bzw. zurzeit überhaupt nicht sortenrein getrennt werden [24].

Insofern sind werkstoffsortenreine Leichtbaulösungen [25], wie die ULSAB-Karosserie-Lösung oder andere, leicht identifizier- und trennbare konstruktive Lösungen bedeutungsvoll. Das Stahl-Space-Frame als konstruktive Lösung für Fahrzeugkarosserien bietet hier einen sinnvollen Ansatz.

Das werkstoffgerechte Konstruieren und Gestalten mit metallischen Werkstoffen besitzt ein hohes Leichtbaupotential, welches durch die ständige Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren stets wächst. Das klassische Problem der geeigneten Werkstoff- und Halbzeugauswahl aus Leichtbau- und Kostensicht erfordert vom Konstrukteur besondere Aufmerksamkeit. Diesbezüglich sind die Entwicklungen bei neuen Werkstoffen und bei höherwertigen, veredelten Halbzeugen ein wichtiges Spar- und Gewichtseinsparpotential für neue Produkte. Im Folgenden sollen nun einige Werkstoffentwicklungen der metallischen Werkstoffe, die für Leichtbauanwendungen besondere Bedeutungen haben, und einige höherwertige, angepasste Halbzeuge vorgestellt werden.

2.2 Gestalten und Werkstoffe

Metallische und nichtmetallische Werkstoffe sind immer dann besonders für Leichtbauanwendungen geeignet, wenn es ein entsprechendes Festigkeits–Dichte-Verhältnis gibt. Darüber hinaus sind für die Werkstoffauswahl aber auch folgende Faktoren von Bedeutung:

- Verfügbarkeit und Kosten des Werkstoffes,
- Bearbeitbarkeit und Fügbarkeit,
- Korrosionsbeständigkeit,
- Recyclingfähigkeit.

Zwar haben metallische Werkstoffe auf Grund ihrer historischen Bedeutung und ihrer vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten einen hohen, technologischen Vorsprung bei der Verwendung im Leichtbau, aber die nichtmetallischen Werkstoffe ergänzen und vervollständigen das Angebot der Leichtbauwerkstoffe. Die Weiterentwicklung der klassischen Werkstoffe wie Stahl und Aluminium in Form von neuen Legierungen ermöglicht neue Leichtbaulösungen.

Stahlwerkstoffe

Ameling erinnert daran, dass Stahl ein universeller und traditioneller Werkstoff ist. Er ist der Massenwerkstoff bei den metallischen Werkstoffen. In Deutschland gibt es gegenwärtig mehr als 2000 Stahlsorten. Etwa die Hälfte ist in den letzten fünf Jahren erneuert worden, um noch besser die Anforderungen des Marktes zu treffen. Die Zahl der unlegierten und legierten Edelstähle hat deutlich zugenommen, um mit entsprechenden Eigenschaften bzw. Legierungsmitteln die Kundenwünsche erfüllen zu können [26].

Nach *Adam* ist Stahl auch im Fahrzeugbau der meist verwendete Werkstoff. Gerade der Fahrzeugbau hat die Entwicklung neuer Stahlsorten und neuer Technologien für die Stahlverarbeitung beschleunigt. So wurde mit dem Entwicklungsprojekt „ULSAB“ (Ultra Light Steel Autobody) eine Stahllösung dem Aluminium-Space-Frame des Audi A8 entgegengestellt [27]. *Schmidt/Fritsch* beschreiben das Ziel dieses Projektes, das Leichtbaupotenzial moderner Stahlwerkstoffe und Fertigungsverfahren darzustellen. Hochfeste Stähle, innenhochdruckgeformte Teile und lasergeschweißte Profile trugen im Wesentlichen dazu bei, das Strukturrohgewicht einer Mittelklasse-PKW-Karosserie um ca. 25 % zu senken [28], [29], [30].

Hamm fragt, ob der Werkstoff Stahl jedoch der Massenwerkstoff der Rohkarosserie bleiben wird. Das kann noch nicht beantwortet werden. Die bisher dominierende Rolle der Stahlwerkstoffe erklärt sich aus der guten Erfüllung der wesentlichen Anforderungen, wie Umform-, Füg- und Lackierbarkeit, die sich auf einem hohen Niveau befinden [31].

Bleck u.a. berichten, dass für die Realisierung neuer konstruktiver Lösungen zunehmend neue Stahlsorten entwickelt wurden, die den Wünschen der Konstrukteure Rechnung tragen und mittels FEM simuliert werden können [32], [33], [34]. *Osburg u.a.* verweisen auf die Möglichkeiten der Festigkeitssteigerung konventioneller Stählen durch folgende Maßnahmen [35]:

- Mischkristallhärtung (HX-, PHZ-Stähle),
- Kornverfeinerung und Ausscheidungshärtung (MHZ-Stähle),
- Diffusion von Kohlenstoff unter Wärmeeinwirkung (BH-Stähle),
- Einlagerung von harten Phasen aus Ferrit (DP-Stähle),
- Martensitumwandlung beim Umformen (TRIP-Stähle),
- Feinstausscheidungen (CP-Stähle),
- Martensiteinlagerung (MS-Stähle).

Klein beschreibt den Werkstoff Stahl mit folgenden Merkmalen. Auf Grund seiner hohen Verfügbarkeit und guten Verarbeitbarkeit ist er ein kostengünstiger Konstruktionswerkstoff, der durch Legieren, Härten und Verfestigung gut modifizierbar ist. Dadurch besitzt Stahl gute Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften. Die hohe Dichte erweist sich als Nachteil, der hohe E-Modul dagegen als Vorteil. Durch gerichtete Krafteinleitungspfade und integrierte Versteifungen kann eine hohe Biege- und Torsionssteifigkeit sowie Energieabsorption in Stahlkarosserien erreicht werden [36]. *Bäuerle* berichtet von neuen Stahlsorten mit reduzierter Dichte, die sich in der Markteinführung befinden [37].

Nach *Drewes* stellt der Hauptanteil der eingesetzten Feinblechsorten immer noch die weichen Tiefziehstähle DC 01 bis DC 04 dar [38]. Hinzu kommen noch die Gürtel DC 05 und DC 06, die zum einen einen verbesserten DC 04 und zum anderen eine vakuumentkohlte Sondertiefziehgüte (IF-Stahl) darstellen. Die Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen führten zu Stählen mit verbesserten Eigenschaften. *Dahl* erläutert die angewendeten Mechanismen der Festigkeitssteigerung. Sie beruhen im Wesentlichen auf der Versetzungsbehinderung durch Hindernisse [39].

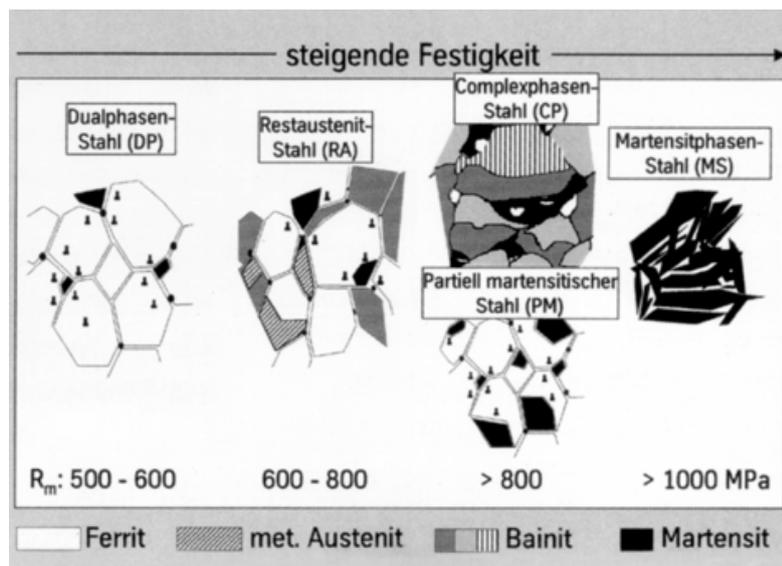


Abbildung 2: Wirkmechanismen der Festigkeitssteigerung bei Stahlwerkstoffen

Entsprechend den Werkstoffkonzepten höherfester Stähle lassen sich ihre Einsatzgebiete, hier beispielhaft im Fahrzeugbau dargestellt, nach *Thyssen* wie folgt unterteilen:

Höherfeste IF-Stähle (HX) für sehr schwierige Ziehteile mit Streck- und Tiefziehbeanspruchung (z.B. Türinnenbleche, Seitenteile, Kotflügel),

Höherfeste Streckziehbleche (HSZ) für Bauteile, bei denen das Blech während der Umformung im Bereich des Stempelkontaktes möglichst nur aus der Dicke fließen soll, also bei flach gekrümmten Streckziehteilen (Türen, Hauben und Dächer),

Bake-Hardening-Stähle (BHZ) und **phosphorlegierte Stähle** (PHZ) für schwierige Tiefzieherteile (Türen, Hauben, Dächer),

Mikrolegierte höherfeste Stähle (MHZ) für struktur- und crashrelevante Teile,

Dualphasen-Stähle (DP) für Räder und schwierige Strukturteile (Längs- und Querträger), ebenso für streckgezogene Außerteile mit besonders hoher Beulfestigkeit (Türen, Dächer, Kofferdeckel),

Restaustenitstähle (RA) oder auch TRIP- Stähle für Strukturteile mit besonders hohem Energieaufnahmevermögen (Säulen, Längs- und Querträger),

Complexphasen-Stähle (CP) und **Martensitphasen-Stähle** (MS) für Teile mit ausgeprägter Crashrelevanz (Säulen, Seitenaufprallträger, Stoßfänger). [40]

TRIP (Transformation Induced Plasticity) bedeutet ein Gewinn an Umformbarkeit durch verformungsinduzierte Umwandlung von Restaustenit (RA) in Martensit [41]. Neue Legierungen mit hohen Mangananteilen ähneln den TRIP- Stählen [42].

Klein verweist darauf, dass die Auswahl der einzusetzenden Feinblechsorte für ein bestimmtes Festigkeitsniveau mit besonderem Blick auf die hauptsächlich zu erwartenden Umformbeanspruchungen getroffen werden soll [36]. Durch die Umformung tritt eine Verfestigung des Materials auf.

Complexphasenstähle

Complexphasenstähle weisen eine extrem feine Mikrostruktur auf, die in der komplexen Wirkung mit den aufeinander abgestimmten Gefügeanteilen von Ferrit, Bainit, Martensit und Ausscheidungshärtung neben Festigkeit und Verschleißfestigkeit eine gute Kaltumform- und Schweißbarkeit ergibt. Diese Eigenschaften entstehen nur aufgrund der ausgewählten chemischen Zusammensetzung und des gewählten Walzverfahrens. Daher erreicht dieser hochfeste Warmbandstahl durch den thermomechanisch gewalzten Zustand Mindestfestigkeiten von 800 – 950 MPa.

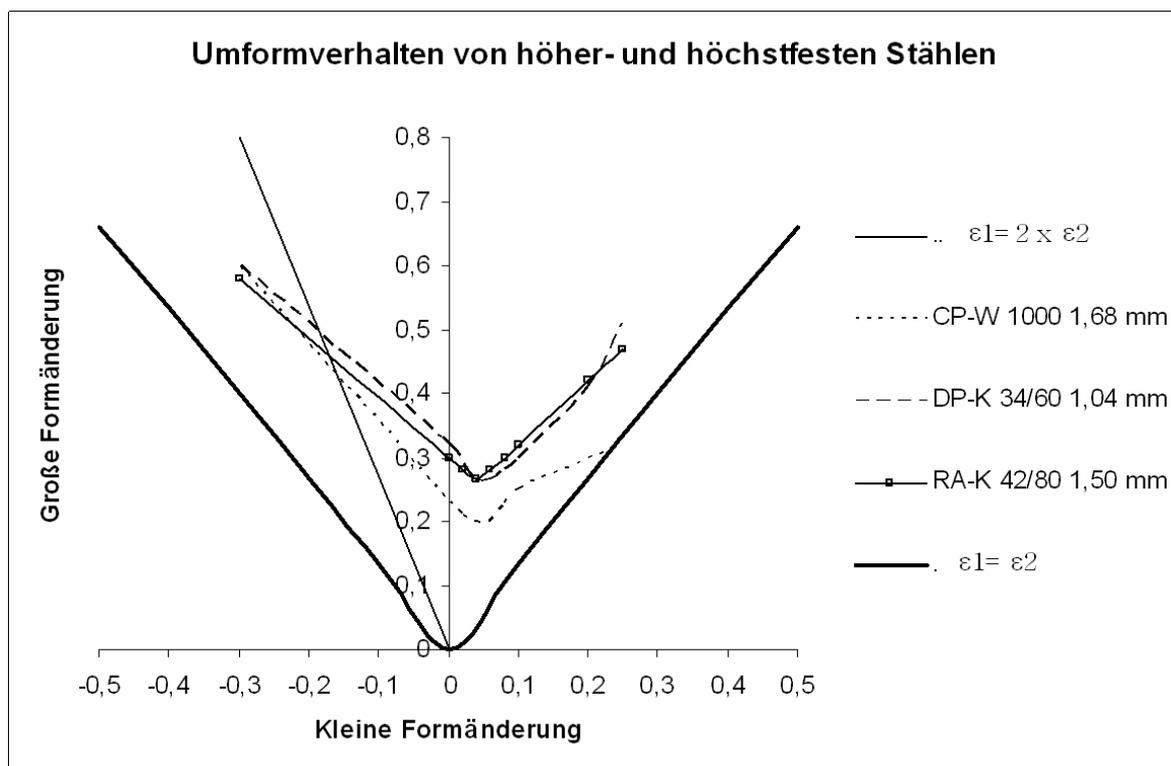


Abbildung 3: Umformverhalten von höher- und höchstfesten Stählen [43]

In der Wärmebehandlung ist ein Spannungsarmglühen bei 530 – 580 °C mit einer Haltedauer von mindestens 20 Minuten möglich. Das sich anschließende Abkühlen erfolgt an ruhender Luft. Eine Wärmenachbehandlung von 600 – 700 °C kann zur Streckgrenzensteigerung um bis zu 100 MPa genutzt werden. Zweckmäßigerweise werden die Bleche im Salzbad bei ca. 680 °C 0,7 min/ mm Blechdicke gehalten [43].

Complexphasenstähle sind besonders für die gewichtssparende Herstellung von kaltumgeformten Bauteilen vorgesehen. Im Fahrzeugbau sind es Teile wie Türaufprallträger, Stoßfänger, Fahrwerksteile, Karosserieverstärkungen usw. Auch diese Stähle können mit einer Bake-Hardening-Behandlung bei 170 °C und einer Haltezeit von 20 min weiter verfestigt werden. Es werden dabei Festigkeitswerte größer als 40 MPa, im Mittel 70 MPa erreicht.

Für Warmumformungen und Warmrichten sind diese Stähle wegen der möglichen Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften nicht zu empfehlen. Bereits geringe Verformungen führen zu starken Verfestigungen. Beim Kaltzuschneiden oder Autogenbrennen treten Aufhärtungen an Schnitt- und Brennkanten ein, die gegebenenfalls spannungsarm zu glühen oder abzutragen sind. Die Stähle sind mit allen üblichen Verfahren schweißbar.

Bake-Hardening Stähle

Bake-Hardening Stähle besitzen im Anlieferungszustand eine niedrige Streckgrenze und damit ein ausgezeichnetes Umformvermögen. Sie erhalten erst durch die Wärmebehandlung beim Lackeinbrennen der Rohkarosserie eine zusätzliche Festigkeitssteigerung, das so genannte Bake-Hardening. Bei genormten Mindeststreckgrenzen zwischen 180 – 340 MPa tritt durch den Bake-Hardening-Effekt eine Steigerung um 40 MPa auf. Ein Bake-Hardening Stahl ist in der Beulfestigkeit dem Karosseriestahl St 14 überlegen. Geringe Vorverformungen bewirken dabei eine viel größere Kaltverfestigung.

Insbesondere BH-Stähle eignen sich auf Grund ihrer hohen Endfestigkeit für Karosserieaußenhautteile. Sie werden aber auch bewusst zur Verstärkung von dynamisch beanspruchten Innenteilen in der Crashstruktur eingesetzt. Wie auch alle anderen höherfesten Stahlsorten zeigen auch die BH-Stähle eine dynamische Verfestigung. Durch den Einsatz der BH-Stähle kann eine potenzielle Dicken- und Gewichtsreduzierung vorgenommen werden. Nach *Drewes* lässt sich diese quantitativ mit dem Substitutionsgesetz beschreiben. [44].

w = weich, h = hart, n = Beanspruchungsexponent

$$\frac{R_{e_w}}{R_{e_h}} = \left[\frac{d_h}{d_w} \right]^n$$

Formel: 1: Substitutionsgesetz

Der Beanspruchungsexponent ist im Wesentlichen abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit. Für beulrelevante Teile kann $n = 1.5$, für crashrelevante Teile $n = 3.5$ gewählt werden. Die potenzielle Gewichtseinsparung ist dabei größer als der Mehraufwand für die Materialkosten.

Dualphasenstähle

Dualphasenstähle besitzen eine gute Umformbarkeit bei hohen Festigkeiten und eine ausgeprägte Streckzieheignung durch eine starke Verfestigung. Ihr isotropes Werkstoffverhalten ermöglicht bei rotationssymmetrischen Teilen eine zipfelfreie Herstellung. Sie besitzen eine verbesserte Beulfestigkeit und sind gut dynamisch beanspruchbar. Nach einer Vorverformung besitzen sie ein hohes Bake-Hardening-Potenzial.

Umformtechnisch sind scharfe Ziehsicken zu vermeiden, da der Werkstoff in der Sicke schon stark verfestigt. Auf Grund der hohen Festigkeit fließt der Dualphasenstahl stärker nach. Daher sollte der Werkstofffluss unter dem Niederhalter möglichst mit der Niederhalterkraft gesteuert werden.

RA-Stähle

Bei Restaustenitstählen kommt es während der Umformung zu einer Umwandlung des Restaustenits zu Martensit. Dabei werden hohe Dehnungen auch bei hohen Festigkeiten erzielt. Diese Stähle sind sowohl zum Streckziehen als auch zum Tiefziehen geeignet. Starke Verfestigungen auch bei großen Formänderungen, isotrope Umformeigenschaften und ein hohes Bake-Hardening-Potenzial, besonders nach Vorverformung, kennzeichnen das Werkstoffverhalten. Das hohe Energieabsorptionsvermögen bleibt auch bei dynamischer Beanspruchung erhalten.

Die Stähle eignen sich für umformtechnisch anspruchsvolle Bauteile mit hohen Streckzieh- und Tiefziehanteilen, insbesondere für komplexe festigkeitsrelevante Strukturelemente im Karosserieinnen- und -außenteilbereich. Gegenüber DP-Stählen besitzen RA-Stähle eine gute Umformbarkeit bei angehobener Festigkeit.

IF-Stähle, höherfeste IF-Stähle

IF-Stähle besitzen einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 0,005 %. Das wird durch eine Vakuumbehandlung erreicht. Der verbleibende Kohlenstoff wird durch die Zugabe der Mikrolegierungselemente Titan und / oder Niob stabil gebunden, so dass praktisch kein gelöster Kohlenstoff in den Gitterlücken des Kristallgitters vorliegt. Daher stammt der Begriff „IF“ (interstitiell free).

Engl berichtet über einen Festigkeitszuwachs der bei einer Legierung mit Vanadium aufgrund der geringen thermodynamischen Stabilität des Vanadiums durch einen Bake-Hardening-Effekt erzielt werden kann. Konventionelle IF-Stähle sind sehr weiche, gut umformbare Stähle. Als Mechanismus der Festigkeitssteigerung eignet sich hier besonders eine Mischkristallhärtung. Die Streckgrenzen betragen bis zu 260 MPa, die Zugfestigkeiten bis zu 450 MPa [45].

TRIP / TWIP Leichtbaustähle

Aktuelle Forschungsergebnisse zu den TRIP/TWIP –Stählen liefert *Gräbel*. Bei den TRIP / TWIP Leichtbaustähle auf der Basis Fe-Mn-Al-Si ist es durch intelligente Ausnutzung von Materialeffekten gelungen, leichtere Stähle zu entwickeln, die gleichzeitig fester und verformbarer als herkömmliche Stähle sind. Durch die höhere Festigkeit können zudem Bauteile bei gleichbleibender Stabilität - und damit Sicherheit - mit weniger Material gefertigt werden. Die erhöhte Verformbarkeit gestattet darüber hinaus eine einfachere Herstellung komplex geformter Bauteile. Typischerweise sind aber festere Stähle spröder, ihre Verformbarkeit (Duktilität) sinkt in dem Maße, wie sich ihre Festigkeit erhöht.

Die nun entwickelten festeren Stähle, die gleichzeitig eine hohe Duktilität aufweisen, sind hochlegierte Mangan-Stähle mit Zusatz von Aluminium und Silizium. Dabei nutzt man den so genannten TRIP- (Transformation Induced Plasticity) Effekt, der zu festeren und stärker verformbaren Mangan-legierten Stählen führt. Den Stählen mit hohen Legierungsanteilen von Mangan wurden weitere leichte Legierungselemente (Aluminium, Silizium) hinzugefügt, um so insgesamt die Dichte der resultierenden Legierung zu senken. Durch Zugabe des leichten Aluminiums verschwand der TRIP-Effekt; Simulationsrechnungen zeigten, dass durch die Zugabe von Silizium in gleicher Menge diese negative Auswirkung des Aluminiums kompensiert werden kann. Je nach Menge der zugegebenen Legierungselemente können somit gewünschte Eigenschaften des Stahls erreicht werden. In Abhängigkeit des Mangangehalts bei gleichbleibender Aluminium- und Siliziumkonzentration kann die Legierung so eingestellt werden, dass der TRIP-Effekt verschwindet. Gleichzeitig setzt aber der so genannte TWIP- (Twinning Induced Plasticity) Effekt ein, durch den die Duktilität der Legierung (Dehnung bis zum Bruch von 95 %) nochmals deutlich erhöht werden kann. Je nach Zusammensetzung der Legierung - durch Variation des Mangan-Anteils - erhält man so Leichtbaustähle, die eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Duktilität aufweisen: Die TRIP-Stähle sind sehr fest bei erhöhter Duktilität, die TWIP-Stähle stark verformbar bei erhöhter Festigkeit. Gleichzeitig ist die Dichte beider Stahlsorten etwa 10 % geringer als bei konventionellen Stählen. [46]

Aluminiumwerkstoffe

Ostermann beschreibt das Aluminium und seine Anwendungen. Es ist nach Sauerstoff und Silizium das dritthäufigste Element der Erde. Kein anderes Leichtbaumaterial kann man so dünn auswalzen wie Aluminium, bis auf 18 g / m^2 . Es ist dann etwa 10-mal dünner als ein menschliches Haar. Aluminium bildet an Sauerstoff augenblicklich eine fest haftende, dichte Oxidschicht, die das Aluminium vor einer weiteren Reaktion mit Sauerstoff schützt. Mit seiner Dichte von $2,7 \text{ g / cm}^3$ ist es etwa nur ein Drittel so schwer wie Stahl. Auch der E-Modul mit ca. 70000 MPa beträgt nur ein Drittel vom E-Modul des Stahls.

Witterungsbeständigkeit, eine hohe Zähigkeit sowie eine hohe Festigkeit, das sind typische Eigenschaften von Aluminiumlegierungen. So wiegen Haken und Ösen von Sicherheitseinrichtungen für Bergsteiger und Monteure aus geschmiedetem Aluminium oft nur ca. 50 g und dürfen mit etwa 300 kg belastet werden [47].

1990 wurde mit dem Honda NSX das erste Vollaluminium – Serienauto auf den Markt gebracht [48]. Dabei wird Aluminium schon lange im Fahrzeug- und Karosseriebau verwendet. Mit durchschnittlich 65 kg Aluminium, das entspricht etwa 5 % vom Fahrzeuggewicht, ist zurzeit ein durchschnittlicher PKW ausgerüstet [49]. Insbesondere die Aluminiumschäume mit zellulärer Struktur und gutem Dämpfungs- und Energieabsorptionsvermögen eröffnen neue Anwendungen im Fahrzeugbau.

Möglichkeiten der Festigkeitssteigerung

Eine Festigkeitssteigerung kann bei Aluminiumlegierungen durch Lösungsglühen mit anschließender Warmauslagerung durch Ausscheidungshärtung erzielt werden. Grundlegend kann man unter Ausscheidungshärten alle Maßnahmen der Wärmebehandlung verstehen, die unter Ausnutzung der Temperaturabhängigkeit des Lösungsvermögens der Mischkristalle zu einer Festigkeitssteigerung führen. Das Lösungsglühen erfolgt je nach Legierung bei Temperaturen von 480 - 550 °C. Es wird eine Temperatur gewählt, bei der eine ausreichende Menge von den Legierungselementen im Mischkristall gelöst ist, so, dass der Aushärtungseffekt nach dem Abschrecken und der Auslagerung eintritt.

Drewes berichtet auch bei Aluminiumlegierungen von einem Bake-Hardening-Effekt. Die Festigkeitssteigerung ist jedoch nicht mit der von BH-Stählen vergleichbar. Bei nichtaushärtbaren Aluminiumlegierungen wie der Al-Legierung 5182, führt eine Wärmebehandlung sogar zu einem Abfall der Streckgrenze. (siehe folgende Diagramme)

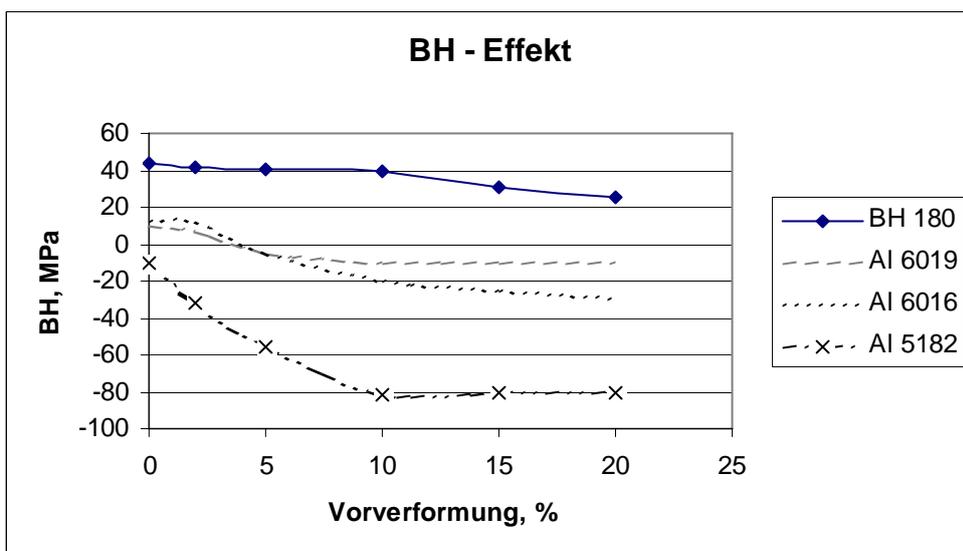
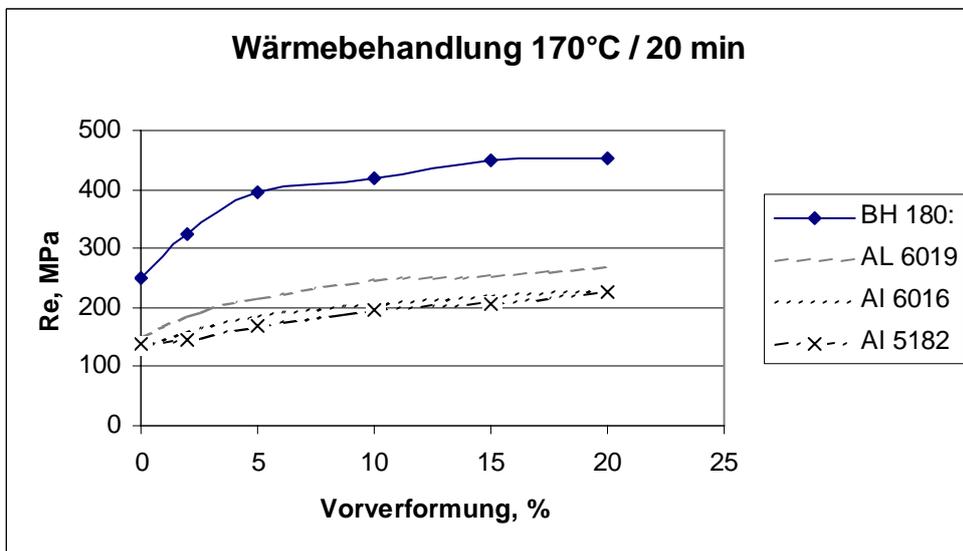
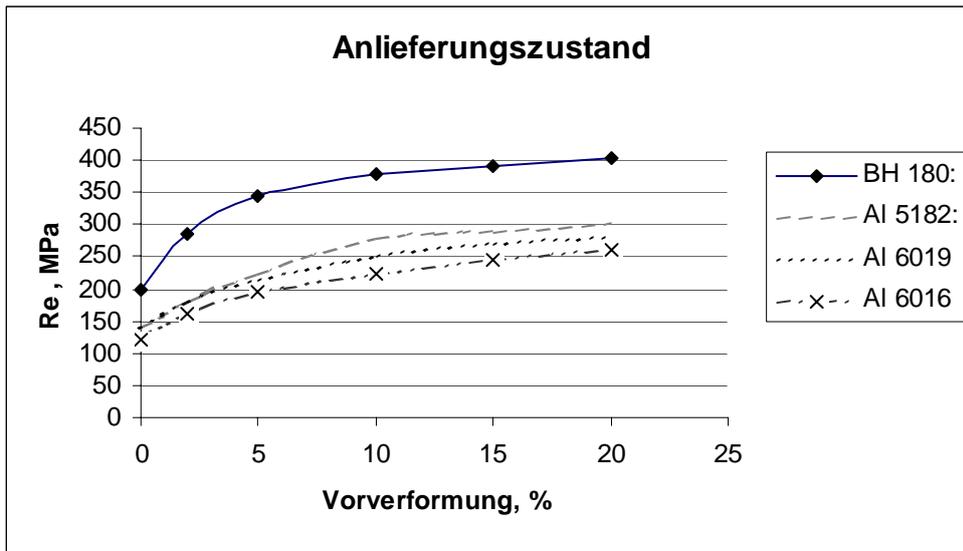


Abbildung 4: Auswirkungen einer automobilspezifischen BH-Behandlung auf Streckgrenze und BH-Effekt bei 3 AL-Legierungen im Vergleich zu einem BH-Stahl [44]

Aluminium hat auch als Karosseriewerkstoff deutlich an Interesse gewonnen. Bei vorgegebenen Dehnungen zeigt es sich dem Stahl überlegen, da es durch den geringeren E-Modul eine dreimal so große Dehnung erfahren kann. Dies ist hinsichtlich der Beulfestigkeit von Karosserieaußenteilen ein wichtiges Kriterium. Zum anderen besitzen vor allem die Legierungen AA 5182 und AA 6016 im Vergleich zum St 14 eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit.

Umformverhalten

Dinkel hat das Umformverhalten von Aluminiumkarosserieblechen untersucht. Im Umformverhalten unterscheiden sie sich jedoch erheblich von den Tiefziehstählen. Bei nahezu ähnlich hohen Gleichmaßdehnwerten ist der Bereich der Einschnürung bei Aluminium wesentlich kleiner. Auch der Anisotropiewert r_m ist bei Stahlwerkstoffen größer. Dem gegenüber besitzen Aluminiumbleche eine hohe Kaltverfestigungstendenz.

Nach *Dinkel* ist entscheidend für einen Produkterfolg die ausreichende Berücksichtigung der Eigenschaften und Grenzen von Aluminium-Blechwerkstoffen durch Konstruktion und Umformtechnik. Dazu zählen:

- Im Vergleich zu Stahl sind die ziehtechnisch erreichbaren Ergebnisse begrenzt,
- es sind meist mehr Ziehoperationen nötig als bei Stahl,
- weichere Konturengestaltung bei der Konstruktion und weichere Ziehradien,
- höchste Oberflächengüte der Umformwerkzeuge,
- relativer Ziehspalt größer als bei Stahl,
- möglichst geringerer Niederhalterdruck, gerade soviel, um Faltenbildung im Flansch zu vermeiden,
- Einprägungen und Sicken müssen dem geringen Formänderungsvermögen von Aluminium angepasst werden.

Insbesondere bei Karosserieinnenteilen kann die gut umformbare Legierung AlMg4,5Mn0,4 auch bei schwierigen Umformvorgängen eingesetzt werden. Sie besitzt eine hohe Bauteilfestigkeit und –steifigkeit und ein gutes Crashverhalten, weist aber eine schlechte Oberflächengüte durch das Auftreten von Fließfiguren auf [50].

Die schlechtere Umformbarkeit von Blechwerkstoffen aus Aluminium gegenüber Stahl macht es nach *Siegert* notwendig, die prozess- und halbzeugseitig verfügbaren Potenziale beim Einsatz dieses Leichtbauwerkstoffes für Lösungen mit hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberflächengüte, wie zum Beispiel im

Karosseriebau auszuschöpfen [51]. Diese liegen zum einen in einer bedarfsgerechten Auswahl geeigneter Legierungen und zum anderen in der Optimierung des tribologischen Systems der Blechumformung.

Die Verluste durch äußere Reibung spielen im Tiefziehprozess bei Aluminium eine bedeutende Rolle hinsichtlich der Herstellbarkeit komplexer Bauteile und bedürfen einer gezielten Beeinflussung. Die in jüngerer Zeit zunehmende Verfügbarkeit vorbeschichteter Aluminiumblechwerkstoffe, aber auch ein breiteres Spektrum an umformfördernden Feinblechoberflächen, bieten die hierfür notwendigen Voraussetzungen. Dabei stellt sich die Frage nach der Größe des möglichen Einflusses von Legierung und Oberflächensystem auf die Umformbarkeit [50].

Einfluss der Aluminiumlegierung auf das Umformverhalten

Der Einfluss ausgewählter Aluminiumlegierungen auf das Umformverhalten wird von *Dinkel* wie folgt beschrieben. Er bei der werkstoffgerechten Gestaltung entsprechender Bauteile zu berücksichtigen ist. Bei der kupferhaltigen Si-Legierung des Typs 6xxx (AA6111) liegt die Festigkeit in einem dem Tiefziehstahl St 14 vergleichbaren Bereich. Die Umformeigenschaften dieses Werkstoffes sind insbesondere beim Streckziehen und bei Rechteckgeometrien deutlich schlechter. Während das hohe Kraftübertragungsvermögen in der Zarge das Verhalten im Tiefzug günstig beeinflusst, kommt es vermehrt zu sprödem Werkstoffversagen. Die Legierung AlMg_{0,4}Si_{1,2} mit geringerer Festigkeit besitzt ein in den verschiedenen Beanspruchungsbereichen günstigeres Umformverhalten.

Die Legierung AlMg_{4,5}Mn_{0,4} hat im einachsigen Zug eine gegenüber der Legierung AlMg_{0,4}Si_{1,2} geringere Dehnfähigkeit und zeigt eine hohe Verfestigungsrate. Die Umformeigenschaften sind sowohl im Tiefzug als auch im überlagerten Tief- und Streckzug besser als bei den Si-Legierungen. Die Aluminiumwerkstoffe zeigen am Bauteil eine gegenüber Tiefziehstahl ungleichmäßigere Dickenformänderung. Die Aufdickungen unter Zug-Druck-Spannung sind größer als bei Stahl. Geringere Abstreckung führt zu kleineren effektiv tragenden Flächen unter dem Niederhalter als bei Stahl, die Neigung zur Faltenbildung im Flansch ist zwar abhängig von der Festigkeit der Werkstoffe, aber insgesamt höher als bei Stahl [50].

Anders als bei Stahl und dem Werkstoff AlMg_{4,5}Mn_{0,4} ergibt sich für die Si-Legierungen ein gegenläufiger Zusammenhang der Verteilung von Dehnwerten und senkrechter Anisotropie. Das Verhalten im Tief- und Streckzug zeigt eine gute Korrelation mit dem Streckgrenzenverhältnis und der senkrechten Anisotropie, während die Bruchdehnung als Größe zur Beschreibung der Tiefziehbarkeit weniger Aussagekraft besitzt. Es wird bestätigt, dass die Korngröße für die Aufrauung der Aluminiumwerkstoffe bei der Verformung bestimmend ist. Außerdem zeigte sich,

dass sich grobkörnige Werkstoffe bei gebundener Umformung weniger stark einglätten.

Die Eigenschaft einer Blechoberfläche, über die zunehmende Blechverformung hinweg und unter sich ändernder Flächenpressung für ein gleichmäßiges Reibverhalten zu sorgen, ist wesentlich für ein günstiges Umformverhalten. Das lässt sich sowohl für blanke als auch für vorbeschichtete Bleche feststellen. Die absolute Höhe des Reibniveaus spielt dabei eine untergeordnete Rolle [50].

Einfluss von Oberflächenfeinstrukturen

Durch Oberflächenfeinstrukturen höherer Rauheit lassen sich nach *Dinkel* die Umformeigenschaften von Aluminium günstig beeinflussen:

Das Umform- und Reibverhalten von EDT-Strukturen (Elektro-Discharge-Texturing) mit Rauheiten $R_a > 1 \mu\text{m}$ ist weniger abhängig von der Viskosität des Schmierstoffes. Diese Oberflächen rauhen bei der Umformung weniger stark auf und ermöglichen durch gleichmäßig hohes Einglättungsvermögen eine bessere Schmierstoffwirkung. Die Gefahr von Adhäsion ist durch kürzere Mikrogleitwege auf kleineren Oberflächenplateaus geringer.

Es gibt einen Zusammenhang zwischen Ölaufnahmevermögen einer EDT-Mikrostruktur und der Zunahme des Volumens bei freier Umformung. Rauere Mikrooberflächen ermöglichen trotz höherer Reibbeiwerte im Ausgangszustand größere Ziehtiefen beim Einsatz niedrigviskoser Ziehöle. Die Zunahme der Gleitreibung über der Verformung ist jedoch geringer als bei glatten Oberflächen.

Mit hochviskosem Öl zeigen Strukturen mit Rauheiten $R_a < 1 \mu\text{m}$ bei polierter Werkzeugoberfläche geringfügig bessere Umformwerte. Die Zunahme der Reibung über der Verformung ist hier geringer als bei rauer Oberfläche [50].

Konversionsbehandlung

Dinkel berichtet weiterhin, dass die Konversionsbehandlung von Aluminiumblechen auf Basis Cr(VI) oder Ti/Zr zu keiner wesentlichen Veränderung der Oberflächenfeinstruktur führt und die Tiefziehbarkeit der Werkstoffe nur geringfügig beeinflusst. Die Aufrauung bei freier Umformung ist geringfügig höher als bei blanken Blechen; unter der Wirkung der Werkzeugoberfläche ist kein Unterschied festzustellen.

Bei dünnflüssigem Schmierstoff lässt sich mit polierten Werkzeugoberflächen die Tiefziehbarkeit geringfügig verbessern, mit höherviskosem Öl wird dieser Vorteil geringer. Die harten Konversionsschichten führen gegenüber blanken Blechen zu höherem Abrieb. Bei Verwendung von Serienwerkzeugen (GG25) mit rauer

Gussoberfläche ergibt sich kein Unterschied bei der Umformung im Vergleich zu blanken Blechen [50].

Vorbeschichtete Blechwerkstoffe

Dinkel stellte heraus, dass durch die Vorbeschichtung der Blechwerkstoffe (Coil-coating) die Mikrostruktur der blanken Bleche abgedeckt wird. Es entstehen neuartige, vom gewohnten Bild abweichende Strukturen mit isotropem Charakter. Die Vorbeschichtung mit zinkstaubhaltigem Epoxidprimer (*Bonazinc*) besitzt eine raue, stark zerklüftete Struktur mit hohem Ölaufnahmevermögen.

Die Tiefziehbarkeit mit *Bonazinc* ist stark abhängig von der Schmierstoffviskosität. Bei höherer Viskosität sind gegenüber blankem Blech größere Ziehtiefen zu erreichen. Mit dünnem Ziehöl sind die Umformwerte beim Tiefzug in polierten Werkzeugen schlechter als ohne Beschichtung. Die raue Oberflächenstruktur verändert sich bei freier Umformung vergleichsweise wenig.

Kennzeichnend für das Reibverhalten von *Bonazinc* sind hohe, über Umformung und Druck gleich bleibende Reibwerte. *Bonazinc* zeigt eine hohe, mit der Beanspruchung zunehmende Abriebneigung. Insbesondere bei rauer Werkzeugoberfläche hat der Abrieb eine zusätzliche Schmierwirkung. Bei ungleicher Blechaufdickung führt verstärkter Abrieb zu einer größeren Blechkontaktfläche unter dem Niederhalter [50].

Organische Vorbeschichtungen

Untersuchungen zu organische Vorbeschichtungen, die ohne metallische Bestandteile vergleichsweise glatte Oberflächen ermöglichten, ergaben nach *Dinkels* Untersuchungen eine zuverlässige Trennung von Aluminiumblech und Werkzeugoberfläche bei der Umformung und bieten ein hohes Potenzial zur Verbesserung des Umformverhaltens. Glatte Primerbeschichtungen und die dickeren isolierenden KTL-Ersatz-Beschichtungen zeigen bei ähnlichen Oberflächenstrukturen ein vergleichbares Verhalten mit deutlichen Vorteilen der dickeren Beschichtung. Die organischen Beschichtungen ermöglichen selbst beim Einsatz geringer Schmierölmengen zwischen 0,25 und 0,75 g/m² gegenüber blanken Werkstoffen um bis zu 15 % höhere Ziehverhältnisse.

Organische Vorbeschichtungen bieten ein weitaus größeres Umformpotenzial als blanke EDT-Mikrostrukturen optimierter Rauheit, sie ermöglichen Ziehtiefen nahe denen bei Verwendung von Ziehfolie. Das Umform- und Reibverhalten wird bei organisch vorbeschichteten Blechen weniger von der Viskosität des Schmierstoffes beeinflusst. Mit dünnflüssigem Ziehöl sind vergleichsweise hohe Ziehtiefen möglich.

Die Reibkraftanteile beim Tiefziehen vorbeschichteter Bleche sind entsprechend geringer als bei blanken Blechen [50].

Die Rauheitszunahme der anfänglich glatten Oberflächen bei der Umformung wird durch die Veränderung der Aluminiumgrundstruktur mitbestimmt. Bei hoher relativer Zunahme bleibt die Rauheit der Beschichtung unterhalb der des blanken Blechs. Gegenüber blanken Werkstoffen nimmt die Reibung mit der Verformung nicht zu. Der Reibbeiwert verhält sich stabil und ist unbeeinflusst von der wirkenden Flächenpressung.

Elastisches Verhalten einer Beschichtung verringert hohe lokale Flächenpressung und führt zu gleichmäßigerem Tragen des Niederhalters. Kaltverschweißung und Materialübertrag von Aluminium und Werkzeug werden durch die Beschichtung zuverlässig unterbunden. Die Beschichtungen erweisen sich als mechanisch extrem belastbar. Abrasion trat nur bei beschädigter Werkzeugoberfläche auf. Die verringerte Reibung glatter Beschichtungen an der Stempelfläche führt zu gleichmäßigerer Abstreckung von Karosserieteilen [50].

Magnesiumwerkstoffe

Bedeutung und Eigenschaften

Magnesium erlangte als Werkstoff für leichte Konstruktionen schon vor über 80 Jahren maßgebliche Bedeutung. Beispielhaft hierfür ist die Bahnrennmaschine des Rennfahrers Fritz von Opel aus dem Jahre 1922 mit Magnesiumkolben und Magnesiumkurbelgehäuse. Dieses Motorrad von Opel wurde in konsequenter Leichtbauweise ausgeführt und mit etlichen technischen Raffinessen ausgerüstet. Stofflicher und konstruktiver Leichtbau ergaben ein Gesamtgewicht von 69 kg. Die Überlegenheit gegenüber der hubraumstärkeren und entsprechend schwereren Konkurrenz wurde erst durch das Leichtbaukonzept des Motors erreicht. [53]

Dank des zunehmenden Magnesiumeinsatzes vor allem auch im Fahrzeugbau entstehen neue Konstruktions- und Gestaltungskonzepte für Leichtbauanwendungen. *Friedrich/Schumann* beschreiben die Forschungsstrategien für ein zweites 'Magnesium - Zeitalter' im Fahrzeugbau [52]. Die Verwendung von Magnesium führt bei Aluminiumbauteilen zu einer durchschnittlichen Gewichtsreduktion von 26 %. Zurzeit liegt der durchschnittliche Magnesiumanteil pro Auto in Europa bei etwa 3 kg. Neuartige Magnesium-Aluminium-Verbundstruktur werden beispielsweise in Form von Heckklappen hergestellt [53], [54].

Kainer hat den Stand der Magnesiumforschung und -anwendungen ausführlich beschrieben [55], [56], [57]. Magnesium zählt zu den Leichtmetallen. Mit seiner Dichte von 1,74 g / cm³ ist es fast ein Drittel leichter als Aluminium und etwa nur ein Viertel so schwer wie Stahl. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der technischen Magnesiumlegierungen entsprechen im Wesentlichen denen des reinen Magnesiums und werden durch die Legierungselemente nicht qualitativ verändert. Magnesium besitzt eine auf das spezifische Gewicht bezogene hohe spezifische Festigkeit und eine hohe Verfestigungsfähigkeit, die durch den Gitteraufbau und dessen eigentümlichen Verformungsmechanismus bedingt ist.

Legierung / Zustand	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	0,2% Stauchgrenze [MPa]
Vollprofile				
AZ31B-F	193	262	14	103
AZ61A-F	228	317	17	131
AZ80A-T5	276	379	7	241
HM31A-T5	269	303	10	172
ZK60A-T5	303	365	11	248
Hohlprofile und Rohre				
AZ31B-F	165	248	16	83
AZ61A-F	165	283	14	110
ZK60A-T5	276	345	11	200
Bleche und Bänder				
AZ31B-H24	221	290	15	179
AZ31B-O	152	255	21	110
HK31A-H24	207	262	9	159
HK31A-O	200	228	23	97
HM21A-T8	193	248	11	45

Tabelle 1: Kennwerte von Magnesium [36]

Umformverhalten und Bauteilgestaltung

Die unterhalb einer Temperatur von 225 °C bestehende singuläre Translationsebene der hexagonal dichtesten Kugelpackung des kristallisierten Magnesiums erlaubt nur geringe bleibende Verformungen. Die Kaltverformungsmöglichkeiten des polykristallinen Magnesiums betragen maximal 15 %. *Bach u.a.* zeigen in neueren Untersuchungen fertigungsbedingte Scherbänder auf [58]. Oberhalb von 225 °C kommen weitere Gleitebenen dazu und erlauben weitergehende bildsame Formgebungen [59]. *Lehnert u.a.* weisen auf das Problem der Wärmedehnung hin, das bei der Gestaltung der Bauteile beachtet werden muss. Die Wärmedehnung ist größer als die von Aluminium, die Wärmeleitung jedoch geringer. Magnesium muss vor Korrosion geschützt werden und bildet keine fest haftenden Oxidschichten wie Aluminium [60]. *Viehweger u.a.* berichten über die Möglichkeit der Magnesiumblechumformung unter Anwendung des hydromechanischen Tiefziehens und der Hochdruckumformung [61]. An der Entwicklung neuer Fertigungsverfahren für Magnesiumbleche wird intensiv gearbeitet [62].

Klein weist auf das für die Gestaltung von Bauteilen wichtige Dauerschwingverhalten des Magnesiums hin. Das Dauerschwingverhalten von Magnesiumlegierung besitzt eine geringere statische Ausgangsfestigkeit als bei Al-Legierungen, aber eine für Nichteisenmetalle hohe Dauerfestigkeit. Es kommt insgesamt nur zu einem geringen Festigkeitsabfall über der Lastspielzahl.

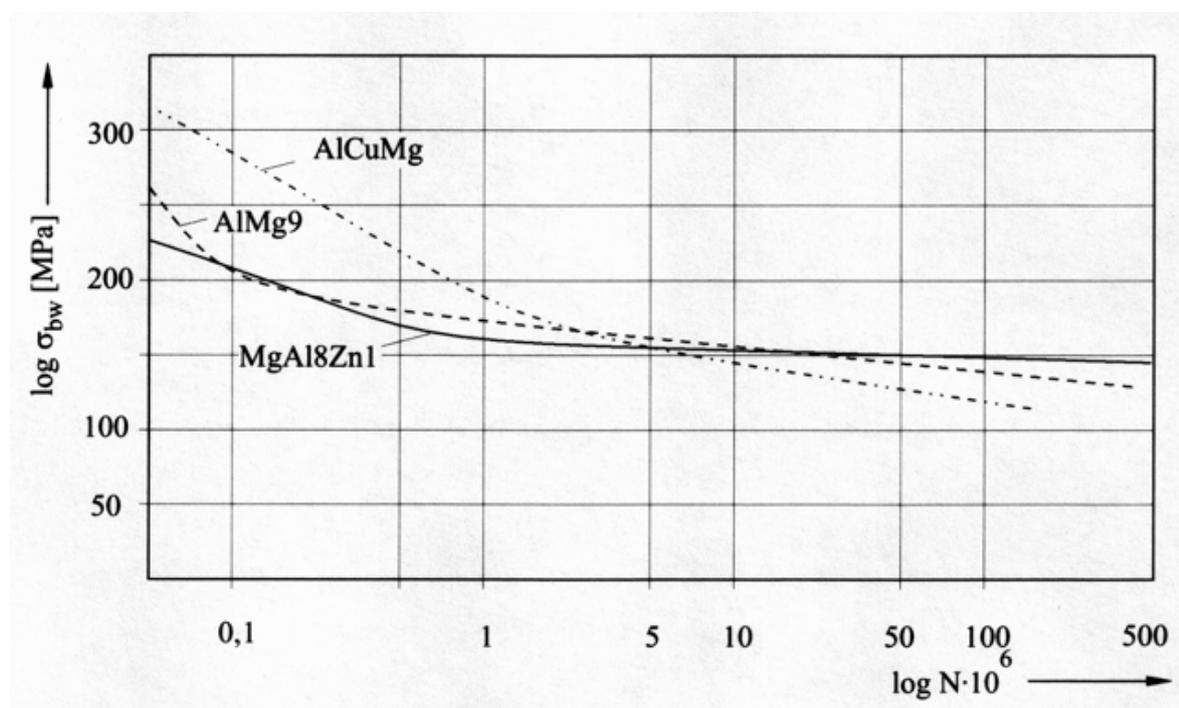


Abbildung 5: Dauerschwingverhalten von Mg- und Al-Legierungen [36]

Vergleich von Stahl, Aluminium und Magnesium

Da die Werkstoffauswahl die Konstruktion und die Kosten des Produktes maßgeblich bestimmen, muss eine sorgfältige Abwägung möglichst aller Entscheidungsfaktoren durchgeführt werden. Vor allem im Fahrzeugbau ist das Ziel der Verbrauchreduzierung dominant, da für die Neuzulassung von Fahrzeugen oft schon der Gesamtflottenverbrauch und damit auch der höhere Verbrauch der Altfahrzeuge bedeutend sind.

Die folgende Abbildung ermöglicht die Vorauswahl der Werkstoffe nach der Festigkeit in Abhängigkeit der Bruchdehnung (Umformbarkeit).

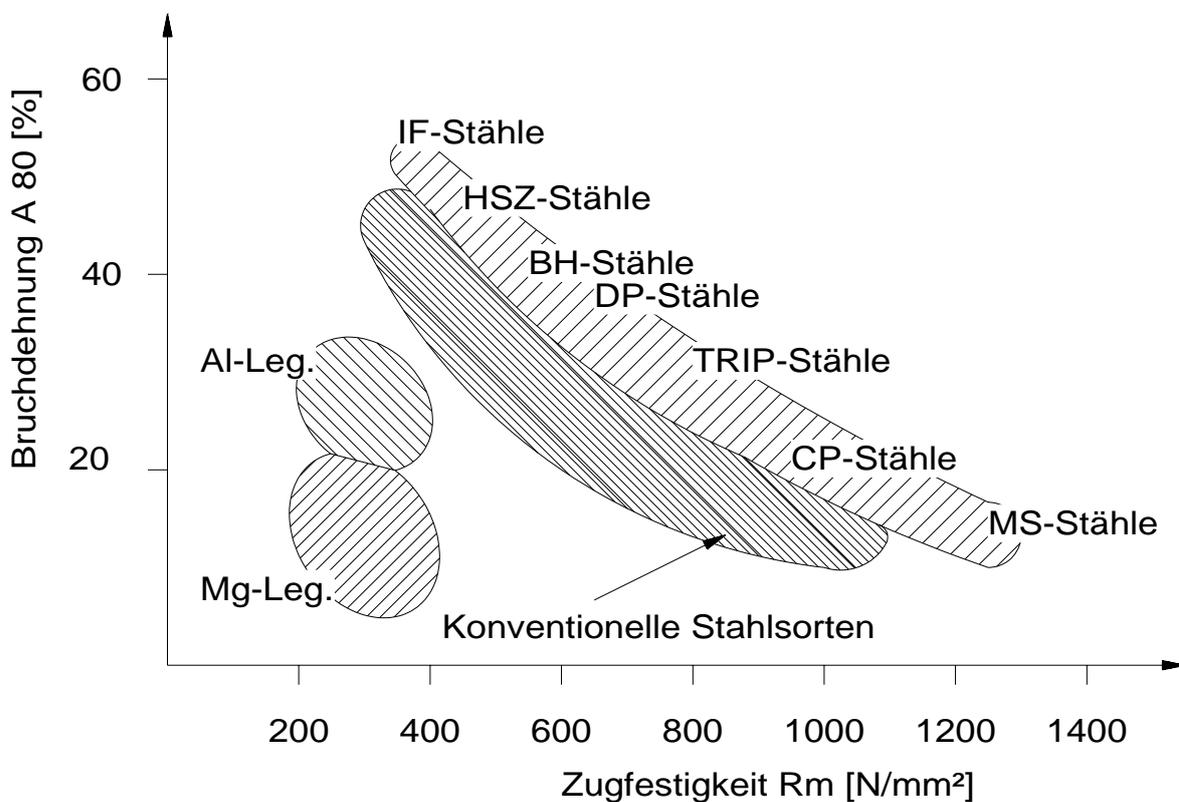


Abbildung 6: Festigkeiten verschiedener Werkstoffe

Neben den typischen physikalischen Eigenschaften, wie der Dichte, interessiert den Konstrukteur vor allem das Festigkeits- und Verfestigungsverhalten der Werkstoffe. Eine Möglichkeit der Beurteilung bietet der Zugversuch, aus dem die statischen

Festigkeitskennwerte ermittelt werden können [63]. Exemplarisch sind hier nachfolgend einige Werkstoffe aufgetragen.

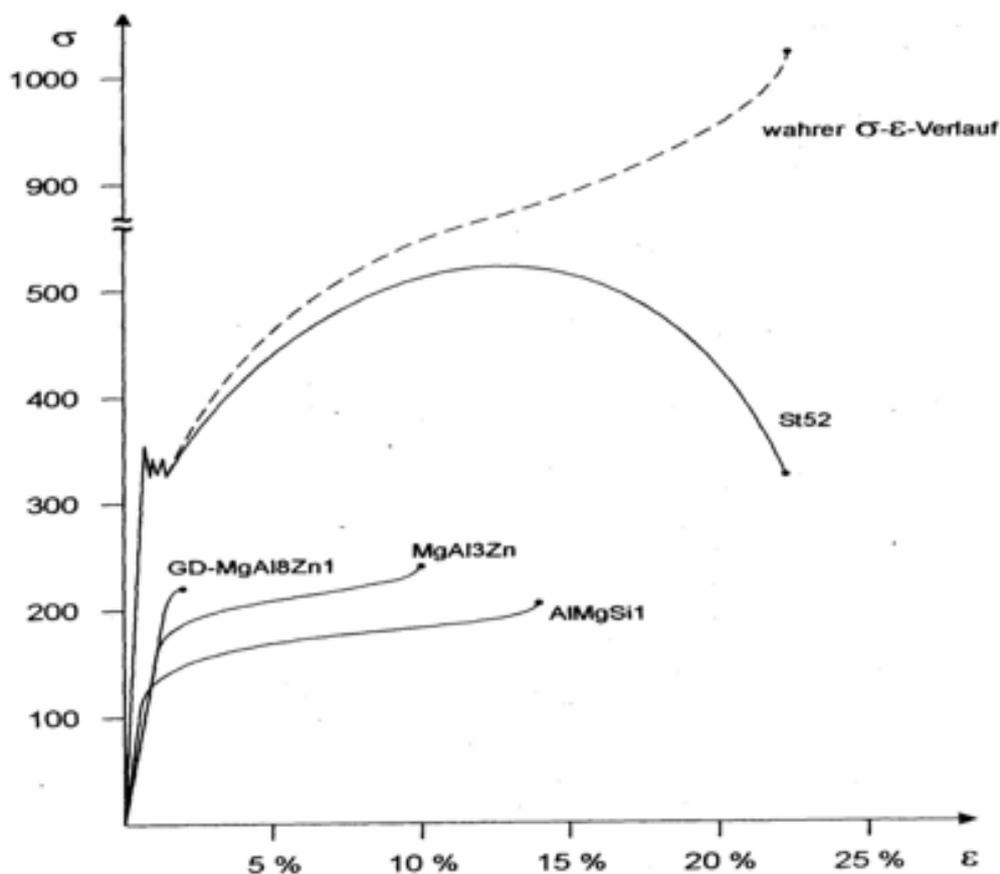


Abbildung 7: Materialverhalten von Stahl, Magnesium und Aluminium im Probenexperiment

ST 52	$R_{eH} = 355 \text{ MPa}$	$R_m = 520 \text{ MPa}$	$A_5 = 22 \%$
AlMgSi1	$R_{p0,2} = 110 \text{ MPa}$	$R_m = 205 \text{ MPa}$	$A_5 = 14 \%$
MgAl13Zn/ AZ31	$R_{p0,2} = 160 \text{ MPa}$	$R_m = 240 \text{ MPa}$	$A_5 = 10 \%$
GD-MgAl8Zn1	$R_{p0,2} = 150 \text{ MPa}$	$R_m = 220 \text{ MPa}$	$A_5 = 2 \%$

Tabelle 2: Festigkeitswerte der dargestellten Werkstoffe

3 Systematisierung der Halbzeuge und Tailored Products

Halbzeuge

Werkstoff- und Halbzeugauswahl beeinflussen erheblich die Produktkosten. Für die weiterführende Untersuchungen bot es sich daher an, die bisher erhältlichen Halbzeuge eine Systematisierung zu unterziehen. Halbzeuge als Ausgangsmaterialien für entsprechende Bauteile haben in den letzten Jahren eine deutliche Weiterentwicklung erfahren. Neben klassischen Halbzeugen aus dem Blech- und Profilbereich sind neue Halbzeuggruppen wie maßgeschneiderte Ausgangsmaterialien (Tailored Products) in Form von Halbzeugplatten, Hybridprodukten und Metallschäumen entstanden, die eine maßgebliche Bedeutung erlangt haben [64], [65], [74], [66]. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Halbzeuge auch weiterentwickelt werden. Eine erste Einteilung der Halbzeuge nach ihrer räumlichen Erscheinung zeigt die folgende Abbildung.

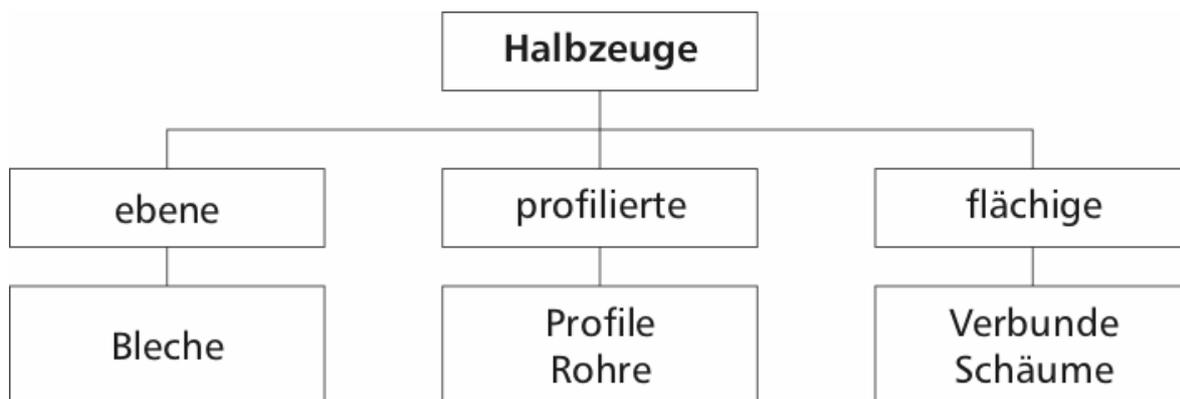


Abbildung 8: Übersicht über Halbzeuggruppen

Mertens beschreibt ausführlich die Gruppe der Tailored Products. Tailored Products - diese maßgeschneiderten Ausgangsmaterialien ermöglichen Variationen von Werkstoffen, Materialstärken, Oberflächenbeschichtungen und örtlichen Verstärkungen sowie Wärmebehandlungen [66], [67], [68], [69], [70], [71]. Sie sind als Bleche und Profile erhältlich. Neben bauteilspezifischen Ausgangsmaterialien ist auch die Fertigung maßgeschneiderte Halbzeuge möglich. In den Materialmix ordnen sich sowohl hybride Bauweisen als auch Sandwichs ein [72], [73].

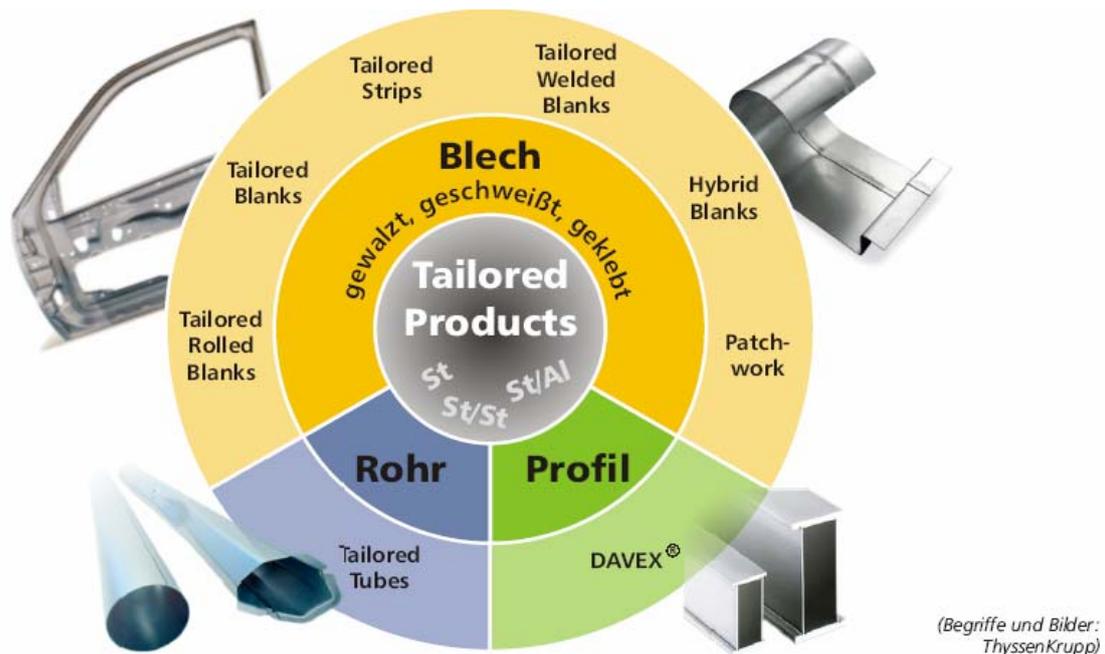


Abbildung 9: Maßgeschneiderte Produkte – Tailored Products

Neben den Profilen werden ebene Halbzeuge in der Konstruktion eingesetzt. Ihre Anwendung ist nicht auf Verkleidungen reduziert, sondern sie übernehmen weitere, auch tragende Funktionen. Ebene Halbzeuge lassen sich gut umformen, trennen und fügen, so dass eine Vielzahl von Produkten aus ihnen entstehen kann. Bisherige ebene Halbzeuge sind durch konstante Materialeigenschaften zumindest in eine Richtung und gleich bleibende Dicke gekennzeichnet.

Das im Maschinenbau bekannte und auch für den Leichtbau typische Beispiel des *Trägers gleicher Festigkeit*, welches bei Achsen und Wellen oft angewendet wird, lässt sich auf Blechkonstruktionen aus einem Stück nur schwer übertragen. Abhilfe schafft hier die Differentialbauweise, die abschnittsweise entsprechend der Beanspruchung geeignete Bleche verwendet. Diese Anpassung muss durch einen erhöhten Fügeaufwand erkauft werden, wurde aber im Karosseriebau über lange Zeit so angewendet.

Zu den ebenen Halbzeugen gehören neben den Tailored Blanks auch Tailored Strips und Tailored Rolled Blanks. Im Folgenden soll der Stand der Halbzeugentwicklung dargestellt werden.

3.1 Profilierte Halbzeuge

Profile sind als Stahl- bzw. als Stahlleichtbauprofile seit vielen Jahrzehnten auch aus dem Maschinenbau oder dem Bauwesen bekannt. Genormte Querschnitte ermöglichen Standardkonstruktionen. Es sind gewalzte oder gezogene Profile. Durch

neue Fertigungsverfahren können optimierte Profilformen erzeugt werden. *Röhrl*e verweist auf Lösungen in Aluminium [74].

Kloth beschrieb schon vor mehr als 70 Jahren, wie mit Hohl- bzw. Leichtbauprofilen im Maschinen- und Fahrzeugbau konstruiert werden kann. Die Landtechnik war ein großer Anwender dieser Leichtbaulösungen.



Abbildung 10: Auszüge aus Kloth, Leichtbaufüßel [75]

Neue Profilformen ermöglichen neue konstruktive Möglichkeiten, die bisher nur sehr aufwendig und damit kostenintensiv herstellbar waren. Dazu gehören zum Beispiel Hohlwellen für Getriebe und Hohlprofile für Leichtbaukonstruktionen. Aus solchen innen- und außenverzahnten Profilen werden z. B. Fensterheber für die Kfz-Industrie gefertigt.

Stranggepresste Profile aus Aluminiumlegierungen

Die Profilformen für stranggepresste Profile aus Aluminiumlegierungen sind sehr vielseitig. Von einfachen, den Stahlprofilen nachempfundenen Formen bis hin zu fahrzeugbauspezifischen Profilen und kundenspezifischen Lösungen ist fast jeder Profilquerschnitt herstellbar. *Kleiner u.a.* beschrieben Strangpressprofile als Bestandteile von Space-Frame-Lösungen, die durch Einlagen verstärkt werden [76], [77].

Optimiert man die in einem Fahrzeug eingesetzten Strangpressprofile hinsichtlich ihrer Belastung, so können die Profile gekrümmt verwendet werden [78]. Das Krümmen kann dabei durch Recken und Streckbiegen von geraden Profilen oder direkt bei der Profilverstellung. *Buntoro u.a.* untersuchten die Möglichkeiten des Biegens an der Strangpresse. [79]. *Arendes und Klaus* erforschten das Runden beim Strangpressen. Insbesondere ermöglicht das Runden beim Strangpressen ein definiert gekrümmtes Bauteil mit nur geringen Eigenspannungen. Gerundete Profile weisen gegenüber den gebogenen Profilen nur geringe Querschnittsdeformationen auf, die angestrebte Sollwandstärke und das Umformvermögen bleiben erhalten [80], [81].

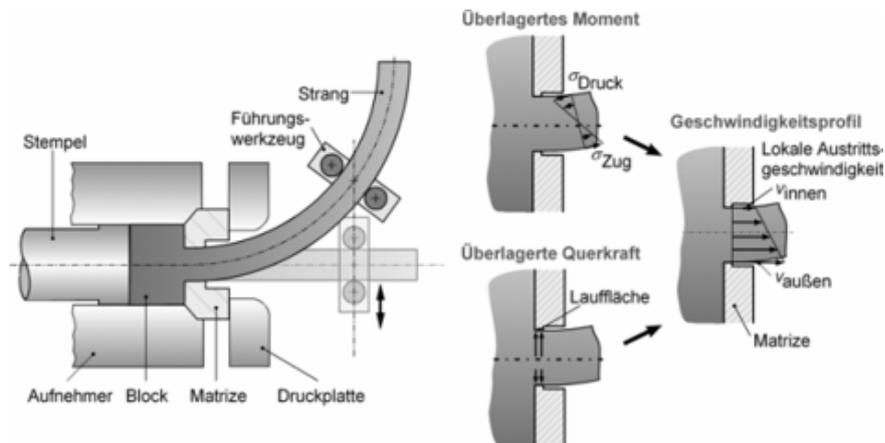


Abbildung 11: Verfahrensprinzip des Rundens beim Strangpressen [80], [82]

Gefügte Profile

Klassische Walzprofile gestatten keine beliebigen Abmaße von Gurt und Profilsteg. Beide Elemente eines Profils stehen in einem festen geometrischen Zusammenhang, der auch die Normung des Profils ermöglicht. Bei stranggepressten Profilen sind diese geometrischen Grenzen deutlich weiter gefasst, ermöglichen jedoch nicht, wie bei klassischen, gebauten Trägern, Aussparungen im Gurtbereich. Auch unterschiedliche Werkstoffe für Gurt und Steg sowie scharfkantige Geometrien sind nicht üblich.

Betrachtet man einen Biegebalken, dann ergibt sich seine Biegesteifigkeit aus dem Produkt von Flächenmoment und E-Modul. Für ein großes Flächenmoment muss viel Fläche mit großem Abstand von der Bezugsachse angeordnet sein. Das klassische I-Profil kommt diesem Wunsch nach. Der Steg dieses Profils wird nur gering beansprucht, er dient vornehmlich als Abstandshalter zwischen den Gurten. Wird der Steg zu stark verjüngt, dann besteht die Gefahr der Knickung.

Mit dem von *Thyssen* entwickelten DAVEX®-Verfahren gibt es eine Technologie zur flexiblen Fertigung von Profilen mit verschiedenartigen geometrischen Größen und Werkstoffen. Durch eine kombinierte form- und kraftschlüssige Fügeverbindung können die aus Flachmaterial hergestellten Profile ohne Schweißen sicher gefügt werden. Die Herstellung der Verbindung erfolgt umformtechnisch in 4 Stufen. Die Art der Fügung unterliegt daher nicht den Verfahrensgrenzen des Schweißens oder Walzprofilierens.

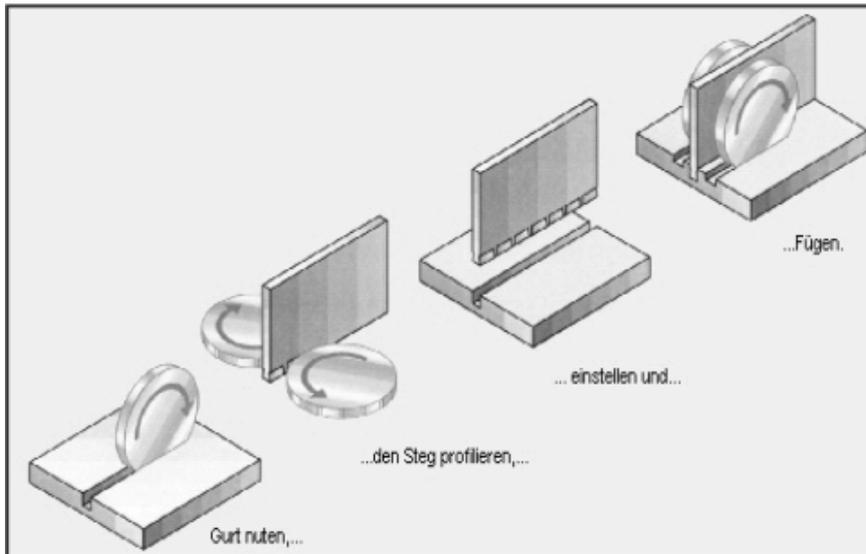


Abbildung 12: Herstellung von DAVEX-Profilen in 4 Schritten [83].

Wichtig für die Herstellung der Profile ist das duktile Gurtmaterial, das zurzeit mindestens 1,5 mm stark sein muss. Es können auch thermisch vorbehandelte oder beschichtete Materialien verwendet werden. Das Stegmaterial ist maximal halb so stark wie das Gurtmaterial. Auch eine Verwendung von Kunststoffen als Stegmaterial ist möglich. DAVEX-Profile können auch verzinkt, gebogen oder verdreht werden [84], [85]. Gegenüber gewalzten Profilen sind auch scharfkantige Geometrien möglich.

Tailored Tubes

Hein u.a. berichten über Tailored Tubes. Leichte, rohrförmige Bauteile lassen sich mit Hilfe des Innenhochdruckumformens (IHU-Verfahren) beanspruchungs- und gestaltungsoptimiert herstellen [86], [87], [88]. Die dazu benötigten Ausgangsmaterialien können bereits maßgeschneiderte Rohre - Tailored Tubes sein. Dabei handelt es sich meist auch um aus Tailored Blanks gefertigte Rohre. Aber auch unterschiedliche Werkstoffkombinationen, wie z.B. reibgeschweißte Rohre aus Stahl und Aluminium, sind möglich.



Abbildung 13: Durch Reibschweißen hergestelltes Verbundrohr aus Stahl und Aluminium

Kneiphoff u.a. haben die Vorteile der Tailored Tubes untersucht. Gegenüber klassischen geschlossenen Profilen in Schalenbauweise bieten die IHU-geformtem

Bauteile eine gesteigerte Torsionssteifigkeit bei geringerer Blechdicke, Bauteil- und Flanschflächenanzahl. Des Weiteren besteht auch hier die Möglichkeit, verschiedene Werkstoffeigenschaften, Blechdicken oder Beschichtungen zu kombinieren und dem Belastungsfall anzupassen. Auch nichtlineare Tailored Blanks können als Ausgangsmaterial eingesetzt werden [89], [90].



(Thyssen)

Abbildung 14: Mögliche Formen von Tailored Tubes

3.2 Ebene Halbzeuge

Geschweißte Tailored Blanks aus Stahl – Tailored Welded Blanks

Thyssen forscht seit 1983 an Tailored Blanks und fertigt seit 1985 erste Tailored Welded Blanks. Tailored Blanks sind „massgeschneiderte“ Platinen aus Blechen mit verschiedenen Eigenschaften. Das Prinzip des Trägers gleicher Festigkeit wird hier in ein Blech übertragen. Die Bleche in verschiedenen Materialstärken können sowohl stumpf als auch überlappend verbunden werden. Auch Tailored Blanks aus verschiedenen Stahlsorten sind herstellbar.

Das Tailored Blank stellt für den Umformprozess, der aus einem ebenen Blech ein räumliches Bauteil fertigt, das Halbzeug dar. Das heißt, das Bauteil selbst besteht am Ende aus einem Ausgangsteil mit z.B. unterschiedlichen Dicken und muss nicht, wie bis dahin üblich, aus einzelnen, separat umgeformten und dann gefügten Elementen zusammengesetzt werden. Ziel der Entwicklung war die Reduzierung des Fügeaufwandes in der Karosseriemontage. Dadurch konnte eine hohe Fertigungsqualität erreicht werden, die erst die heute gängigen Spaltmaße erlaubt. Nebenbei entfielen auch die Spritzer beim Punktschweißen, womit nicht nur die Oberflächenqualität, sondern auch der Arbeitsschutz verbessert wurde.

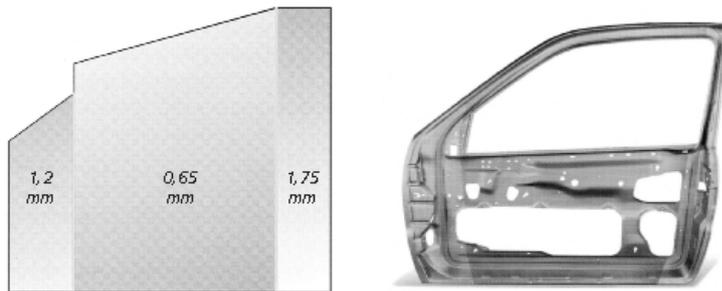


Abbildung 15: Türinnenblech aus Tailored Blanks [66]

Pohl verweist auf die Vorteile, die sich ergeben, wenn verschiedene Stahlsorten für Tailored Blanks verwendet werden. Moderne Umformverfahren und Schmiermittel gestatten auch die Verarbeitung von Tailored Blanks aus Stahlwerkstoffen verschiedener Festigkeiten. Damit kann noch beanspruchungsgerechter bei gleichzeitig dünneren Querschnitten konstruiert und gefertigt werden. Mit der Weiterentwicklung der Roboter- und Schweißtechnik ist auch ein Fügen von nichtlinearen Nähten der Ausgangsmaterialien des Tailored Blanks möglich.

Zu den Vorteilen der Tailored Blanks gehören [91]:

- Reduzierung des Bauteilgewichts,
- Materialersparnis,
- Verringerung der Teileanzahl,
- Verringerung der Werkzeug-, Pressen-, Montage- und Logistikkosten,
- Optimierung der Bauteiltoleranzen,
- Verbesserung der Dauerfestigkeit, des Crashverhaltens und der Struktursteifigkeit.

Fügeverfahren und Gestaltung von Tailored Blanks

Obwohl schon seit 1985 bei Tiefziehstählen bereits angewendet, konnten Tailored Blanks erst mit der Einführung der industriellen Laserschweißtechnik ihren serienmäßigen Einzug in den Karosseriebau halten [91]. *Schulz u. Untermann* berichten über die Erfahrungen bei Laserstrahlschweißen der Tailored Blanks. Das Laserschweißen gestattet schmale, durchgeschweißte Stumpfnähte mit guter Nahtoptik und schmalen Wärmeeinflusszonen. Es ist als industrielles Fügeverfahren qualifiziert [92], [93].

Folgende technische Forderungen werden an die Fügeverfahren für Tailored Blanks gestellt:

- Die Schweiß- oder Fügenaht soll gleichmäßig, schmal und blecheben sein,
- Die Schweißnaht sollte eine Umformbarkeit ähnlich dem Grundmaterial aufweisen, was bei Stahl der Forderung nach geringer Aufhärtung entspricht,
- Die Festigkeit der Verbindung sollte mindestens so groß wie die des Grundwerkstoffs sein.

Neben dem Laserstrahlschweißen, kommen das Quetschnahtschweißen sowie die Verfahren des WIG-, Induktions-, Hochfrequenz-, Non-Vakuum-Elektronenstrahlschweißens oder das Reibrührschweißen für die Fertigung der Tailored Blanks (Tailored Welded Blanks) in Frage.

Nach *Mertens* werden jedoch auf Grund der Herstellungskosten hauptsächlich Laser- und Quetschnahtschweißverfahren angewendet, wobei das Quetschnahtschweißen durch die breite Schweißnaht mit beidseitiger Nahtüberhöhung einen wesentlichen Nachteil besitzt.

Beim Quetschnahtschweißen beträgt die Überlappung ca. das 0,8 – 2,0fache der Blechdicke. Die überlappenden Kanten liegen bündig aufeinander und werden durch Spannen fixiert. Ähnlich wie beim Rollnahtschweißen werden durch den Stromfluss und den ohmschen Widerstand der Bleche die Fügepartner an der Fügestelle beinahe verflüssigt. Unter der wirkenden Kraft erfolgt eine Einebnung der Fügestelle auf etwa das 1,2 fache der Blechdicke [66].

Knabe untersuchte die Umformbarkeit der Tailored Blanks. Tailored Blanks aus Stahl werden in der Regel ohne Schweißzusatzwerkstoff gefügt. Dabei kommt es zu einer Aufhärtung des Schweißgutes und der Wärmeeinflusszone. Querzugversuche führen daher bei ausreichender Fertigungsqualität zum Versagen der Proben im unbeeinflussten Grundwerkstoff des schwächeren Fügepartners. In Längszugversuchen geht das Versagen immer mit einem Spröbruch von der Schweißnaht aus und breitet sich mit einem Scherbruch in den Grundwerkstoff bis zum völligen Bruch der Probe aus [94].

Die Gestaltung von Tailored Blanks umfasst nicht nur die konstruktive Umsetzung der meist mittels FEM ermittelten, optimierten Kennwerte wie Beanspruchung und Verformung sondern auch die fertigungstechnische Gestaltung, welche die theoretisch optimale Gestalt beeinflusst. Zur konstruktive Gestaltung gehören beispielhaft:

- Materialauswahl,
- Materialstärkeauswahl,
- Form- und Steifigkeitsgestaltung,
- Gestaltung von Krafteinleitungsstellen
- Gestaltung von Fügstellen.
- Zur fertigungstechnischen Gestaltung gehören beispielhaft:
- Gestaltung des Zuschnitts und Auswahl des Trennverfahrens,
- Positionierung des Zuschnitts,
- Schweißverfahren und Schweißparameter,
- Konzeption Umformverfahren und Umformwerkzeug, die wiederum die Gestaltung der Platine beeinflussen.

Schultz berichtet, dass trotz der guten Erfahrung mit lasergeschweißten Stahlblechen nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, dass sich in der Fügestelle interkristalline Zonen herausbilden, die eine Umformung erschweren bzw. zum Riss in der Umformzone führen. Die Schweißnaht sollte daher konstruktiv nicht direkt in der Umformzone liegen. Sofern die umformtechnischen Vorversuche mit der ausgewählten Werkstoffqualität erfolgreich abgeschlossen wurden, kann die Umsetzung komplizierter Konturen erfolgen.

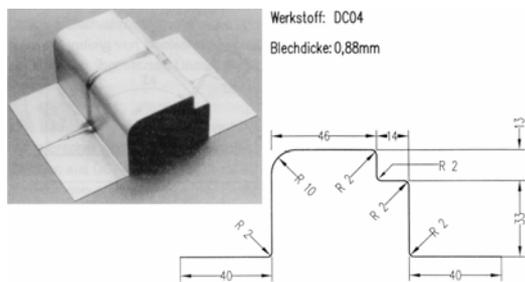


Abbildung 16: Versuchswerkstück mit I-Naht am Stumpfstoß [92]

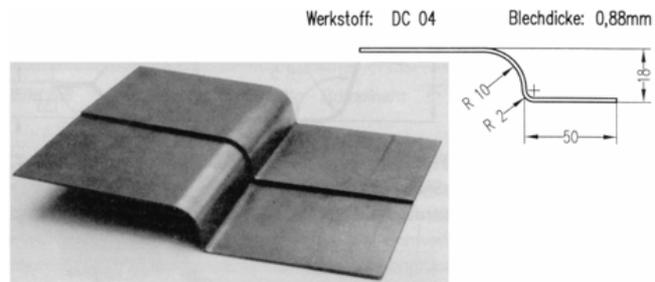


Abbildung 17: Versuchswerkstück mit I – Naht am Überlappstoß [92]

Nichtlineare Schweißnähte an Stahl Tailored Blanks

Possehn erforschte die zur weiteren optimalen Gestaltung der Tailored Blanks angestrebten nichtlinearen Nahtverläufe, die jedoch einen hohen fertigungstechnischen Aufwand nach sich ziehen. Da diese Aussagen sowohl für Stahl- als auch für Aluminiumwerkstoffe gelten, werden sie noch gesondert besprochen.

Mit der Möglichkeit, nicht nur lineare Laserschweißnähte zu fertigen, kann der Bereich, in dem aus Steifigkeitsgründen ein dickeres oder festeres Blech benötigt wird, auf ein erforderliches Minimum begrenzt werden. Auch kann eine Verlagerung der Schweißnaht in einen umformtechnisch weniger kritischen Bereich vorgenommen werden. Das reduziert die Beanspruchung der Schweißnaht während des Umformprozesses und erhöht die Prozesssicherheit im Presswerk.

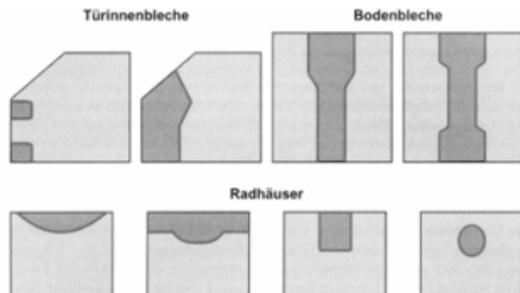


Abbildung 18: Konzepte für Tailored Blanks mit nicht geradlinigem Nahtverlauf [95]

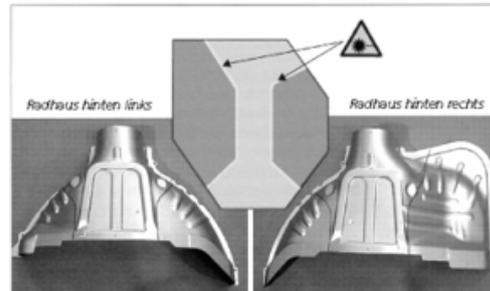


Abbildung 19: Radhaus als Anwendungsmöglichkeit [66]

Die Verlagerung der Schweißnaht beim Umformen muss bereits bei der Umformwerkzeugkonstruktion und -herstellung beachtet werden. Gegebenenfalls muss die Schweißnaht auf der Platine anders angeordnet werden. Als Hilfsmittel erweist sich hier eine Umformsimulation mit Hilfe der FE-Methode. Nahtverschiebungen, Spannungskonzentrationen und Blechdickenveränderungen können sicher erkannt werden [96].

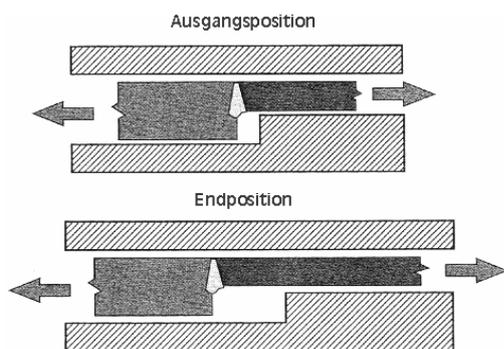


Abbildung 20: Nahtwanderung beim Umformen von Tailored Blanks [66]

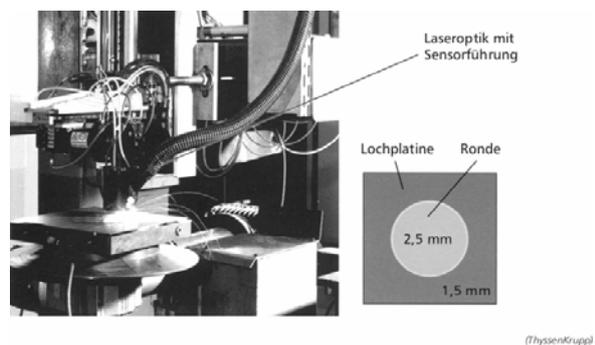


Abbildung 21: Anlage zum Fertigen von Tailored Blanks mit kreisförmigem Nahtverlauf [66]

Otto führte weitere Untersuchungen zu den nichtlinearen Schweißnähten an Tailored Blanks durch. Bei der Herstellung von geschlossenen Schweißnahtverläufen ergibt sich eine zusätzliche Problemstellung aus der Nahtüberlappung und dem Nahtende [97]. Mit einem Näpfchenziehversuch zur Bestimmung des Grenzziehverhältnisses, wie er auch zur Prüfung von konzentrisch verschweißten Ronden konstanter Blechdicke aus

Aluminiumlegierungen und Stahl verwendet wird, lassen sich Aussagen über das Versagen der Schweißnaht ermitteln [108].

Beschichtete Tailored Blanks und Tailored Strips

Verzinktes Bandmaterial hat auch im Karosseriebau Einzug gehalten. Leider steht es nur in beliebigen Größen zur Verfügung. *Schultz* weist darauf hin, dass durch ein effektives Fügeverfahren jedoch große Platinen herstellbar sind. Die Verarbeitung vorbeschichteter oder verzinkter Bleche bereitet auch beim Laserschweißen Probleme. Diese können zurzeit nur durch konstruktive Maßnahmen gelöst werden. Bei verzinktem Material muss das Zink die Schweißzone verlassen, bevor der Schweißprozess abgeschlossen ist. Dies kann zum Beispiel durch den zeitlichen Verlauf der Stromstärke beim Schweißen beeinflusst werden.

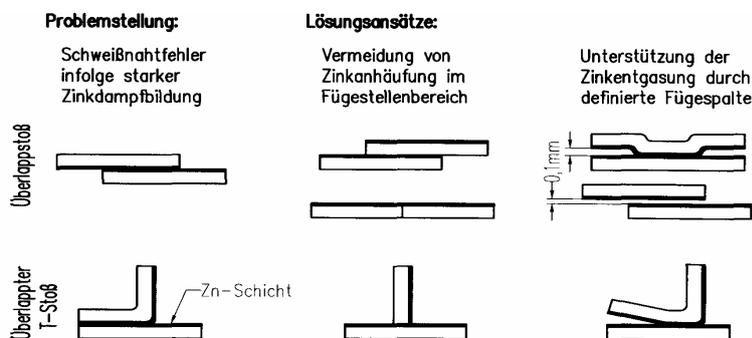


Abbildung 22: konstruktive Maßnahmen zum Laserstrahlschweißen verzinkter Bleche mit I-Naht am Überlappstoß [92]

Insgesamt ermöglicht jedoch die Herstellung von großen, verzinkten Tailored Blanks neue konstruktive und fertigungstechnische Möglichkeiten im Karosseriebau. Auf eine Vollverzinkung fertiger Karosserien kann beim Verarbeiten von verzinktem Material verzichtet werden. Oft ist es jedoch ausreichend, nur gefährdete Bauteile zu verzinken. Das Laserstrahlschweißen als Fügeverfahren in der Karosriefertigung erlaubt das Fügen dieser Bauteile.

Mertens bezeichnet die serienmäßige Halbzeugfertigung aus Tailored Blank Materialien als Tailored Strips. Insbesondere so gefertigtes Bandmaterial für Fahrzeugfelgen ermöglicht eine effektive Herstellung leichter Scheibenräder [66].

Geschweißte Tailored Blanks aus Aluminium

Franz u.a. haben die Erfahrungen aus der Stahl-Tailored-Blanks Herstellung auf Bauteile aus Aluminiumlegierungen übertragen. Das Laserschweißen von Aluminium im Automobilbau und in der Platinenfertigung ist jedoch noch nicht so ausgeprägt wie das Fügen in Stahl. Das liegt vor allem an den noch unbeherrschten aluminiumspezifischen Problemen [98], [99]. Dazu gehören:

das deutlich eingeschränkte Prozessfenster gegenüber Stahlwerkstoffen, die Porosität in der Schweißnaht, die im Wesentlichen auf Wasserstoffbildung zurückzuführen ist,

- die Heißrissbildung mit Aufschmelzungs- und Erstarrungsrissen,
- die Prozessinstabilitäten, die zu Schweißnahtunregelmäßigkeiten führen,
- die Entfestigung der Wärmeeinflusszone, weil Aluminium im Kfz-Gitter vorliegt und kein Abschreckgefüge aufweist, wobei man aushärtbare und naturharte Legierungen dabei unterscheiden muss,
- sowie die Spaltproblematik beim Schweißen der I-Naht am Stumpfstoß, die eine hohe Genauigkeit bei der Fügekantenvorbereitung erfordert.

Furrer berichtet, dass wie für Stahlwerkstoffen es auch für Aluminium konkurrierende Fügeverfahren bei der Herstellung von Tailored Blanks gibt. Bisher sind Untersuchungen zum Laserstrahl-, Elektronenstrahl-, WIG-, und Rührreibschweißen [100], [101] bekannt. Das Quetschnahtschweißen hat sich als ungeeignet herausgestellt, da es in der Praxis nicht reproduzierbar durchgeführt werden kann. Der Grund hierfür ist die hohe Leitfähigkeit der Aluminiumwerkstoffe, die einen konstanten Stromfluss zwischen den zwei Rollenelektroden verhindern [102].

Knipström weist auf das Rührreibschweißen hin. Dieses hat den Vorteil, dass es auf einfachen 3-Achsen-Fräsmaschinen durchgeführt werden kann und aufgrund der geringen Temperaturen kaum Heißrisse oder Poren auftreten. Nachteilig sind jedoch die geringe Vorschubgeschwindigkeit und die Notwendigkeit einer sehr steifen Spannvorrichtung [103].

Das WIG-Schweißen erfordert verglichen mit dem Laserstrahlschweißen einen geringen Aufwand für die Platinenvorbereitung, die Spanntechnik und die Prozessführung. Allerdings ist die Vorschubgeschwindigkeit deutlich geringer und die Wärmeeinbringung in die Platine sehr viel höher als beim Laserstrahlschweißen.

Beim Elektronenstrahlschweißen sind sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten möglich. Allerdings erfordert das Verfahren konventionell einen evakuierten Bearbeitungsraum und eine aufwendige Abschirmung der Röntgenstrahlung, was eine Anwendung für Tailored Blanks unwirtschaftlich macht. Neuere Entwicklungen gehen in Richtung Non-Vakuum-Elektronenstrahlschweißen, welches sich aber noch in den Anfängen befindet [102].

Das in der Fertigung am häufigsten eingesetzte Fügeverfahren für die Herstellung von Tailored Blanks ist auch bei Aluminiumwerkstoffen das Laserstrahlschweißen [104]. Es gestattet eine hohe Vorschubgeschwindigkeit und Nahtqualität. Zu den

Besonderheiten des Aluminiumschweißens hat *Rapp, Schultz u.a.* weitere, für die bei der Aluminium-Tailored-Blanks Fertigung wichtige Schwerpunkte hinzugefügt:

Schweißnahtunregelmäßigkeiten in Form von Schweißrissen können bei der Herstellung von Tailored Blanks aus heißbrisanfälligen Legierungen (z.B. 6xxx) auftreten. Abhilfe bieten hier der Einsatz von 5- AlSi5 als Zusatzwerkstoff und Vorschubgeschwindigkeiten unterhalb 7 m/min [105].

Die Nahtform wird bei Aluminium-Tailored-Blanks wesentlich durch die Legierungszusammensetzung der Fügepartner, durch die Blechdickenkombination und durch den Fügspalt beeinflusst. Bei großen Blechdickensprüngen ist ein scharfkantiger Übergang unerwünscht, da er die Ermüdungseigenschaften der Schweißverbindung negativ beeinflusst. Mittels Zweistrahltechnik, realisiert durch zwei Strahlquellen oder eine geeignete Strahlformung, sind sanftere Übergänge möglich.

Nach *Furrer* kann durch den Einsatz von Zusatzwerkstoff die Nahtform ebenfalls positiv beeinflusst werden und Blechdickensprünge von mehr als 100 % ohne scharfkantige Übergänge geschweißt werden. Außerdem lässt sich so auch bei größeren Fügspalten eine unerwünschte Querschnittsminderung durch Nahtunterwölbung oder Wurzelrückfall vermeiden. Allerdings ist die Menge an Zusatzwerkstoff richtig zu wählen, um im nachfolgenden Umformprozess ein Verkleben der Schweißnaht unter dem Niederhalter und damit Reißen aufgrund zu großer Naht- oder Wurzelüberhöhung zu verhindern [102]. Ein weiterer Parameter, der die Nahtform von Tailored Blanks unterschiedlicher Blechdicke beeinflusst, ist die Anordnung der Fügekanten. Durch eine wurzelseitig ebene Anordnung kann bei Verzicht auf Zusatzwerkstoff eine Schweißnahtunterwölbung verhindert und ein gleichmäßigerer Blechdickenübergang erzielt werden, als mit oberseitig ebener Anordnung.

Den positiven Einfluss auf die Geometrie der Nahtwurzel durch die Verwendung eines Formergases (z. B. Helium) während des Schweißens beschreiben *Schultz u.a.*. Es ist gerade bei Tailored Blanks aufgrund der einfachen Bauteilgeometrie problemlos zu applizieren und führt zu einer gleichmäßigeren Nahtwurzel mit einer geringeren Überhöhung [105].

Die Statische Festigkeit der Schweißverbindung wird in der Literatur am häufigsten durch Kennwerte aus Querzugversuchen beschrieben. Die hieraus ermittelte Zugfestigkeit ist ein Kennwert für die gesamte Schweißverbindung und beschreibt das schwächste Glied in der Kette, die Wärmeeinflusszone (WEZ):

Grundwerkstoff (A) - WEZ (A) - Schweißnaht - WEZ (B) - Grundwerkstoff (B)

Bei aushärtbaren Legierungen verringert die Wärmeeinbringung beim Schweißen die Festigkeit in der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone. Über die Dehnungskonzentration in der Wärmeeinflusszone, die mittels optischer Online-Dehnungsmessung während der Zugprüfung nachgewiesen wurde, erklärt *Schultz* das Versagen der Schweißnaht. Es erfolgt bei hoher Schweißnahtqualität am Übergang zwischen WEZ und Grundwerkstoff des schwächeren Fügepartners parallel zur Schweißnaht [106].

In der Wärmeeinflusszone kann durch eine Wärmebehandlung nach dem Schweißen die Festigkeit des Grundwerkstoffes oder, bei Warmauslagerung, eine noch höhere Festigkeit erzielt werden. Dies gilt aber nicht für die Schweißnaht selbst, wenn durch den Magnesiumabbrand und die Aufmischung mit AlSi-Zusatzwerkstoff keine Ausscheidungshärtung mehr möglich ist. Für das Schweißen nicht aushärtbarer Aluminiumlegierungen des Typs 5xxx im Zustand „weich“ mit und ohne Zusatzwerkstoff ist ein Härteanstieg in der Schweißnaht um bis zu 15 HV 0,1 möglich, was durch die Ausbildung eines Gussgefüges erklärt werden kann. Die Zugfestigkeit einer Schweißverbindung an AA 5182-0 (auch AA 5754, AA 5251 und AA 5454) entspricht der des Grundwerkstoffes, wenn die Schweißnaht eine ausreichende Fertigungsqualität aufweist, d.h. insbesondere keine starke Nahtunterwölbung oder Wurzelrückfall vorliegen. Die Zugprobe versagt dann im Bereich des Grundwerkstoffes des dünneren bzw. schwächeren Fügepartners. Eine Schweißverbindung an kaltverfestigtem AA 5182 H18 hat in etwa die gleiche Zugfestigkeit wie der nicht verfestigte Grundwerkstoff [106].

Doege beschreibt das **Formänderungsvermögen in Nahtlängsrichtung** der Schweißnähte. An aushärtbaren Legierungen weist es eine geringere Streckgrenze und Zugfestigkeit auf als der entsprechende Grundwerkstoff. [107]. Nicht aushärtbare Legierungen im Zustand „weich“ weisen keine Entfestigung im Schweißnahtbereich auf. Deshalb wird der Spannungs-Dehnungs-Verlauf bei artgleichem Zusatzwerkstoff nur unwesentlich durch die Schweißnaht beeinflusst. Nach *Vollertsen* kann es durch die Wahl eines AlSi-Zusatzwerkstoffes dagegen zu einer Versprödung des Schweißgutes mit einer entsprechend geringeren Bruchdehnung kommen [108]. Die Duktilität des Schweißgutes nimmt in Abhängigkeit vom Zusatzwerkstoff ab.

Zur **Tiefziehbarkeit und Streckziehbarkeit** von Aluminium Tailored Blanks beschreibt *Doege*, das beim Tiefziehen von Karosseriebauteilen es immer zu einer Überlagerung von Tiefzieh- und Streckziehanteilen mit entsprechender Abnahme der Blechdicke kommt. Streckziehbeanspruchung tritt beim Näpfchenziehversuch vornehmlich im Bereich unter dem Stempel sowie am Stempelradius auf [107]. Nach *Hofmann* sind typische Prüfverfahren zur Ermittlung der Streckziehbarkeit von Blechwerkstoffen der

Tiefungsversuch mit Stempel, der hydraulische Tiefungsversuch oder Kreuzzugversuch. Ergebnisse zu diesen Versuchen an Aluminium-Tailored-Blanks sind jedoch bisher kaum veröffentlicht [99]. Mit einem Näpfchenziehversuch wurde das Grenzziehverhältnis an geschweißten Aluminium-Tailored-Blanks getestet. Dabei trat keine Verbesserung des Ziehverhältnisses gegenüber den ungeschweißten Grundwerkstoffen auf. Im Vergleich dazu wurde bei der Stahlvariante aus ZStE 340 und St 14 ein höheres Grenzziehverhältnis erreicht.

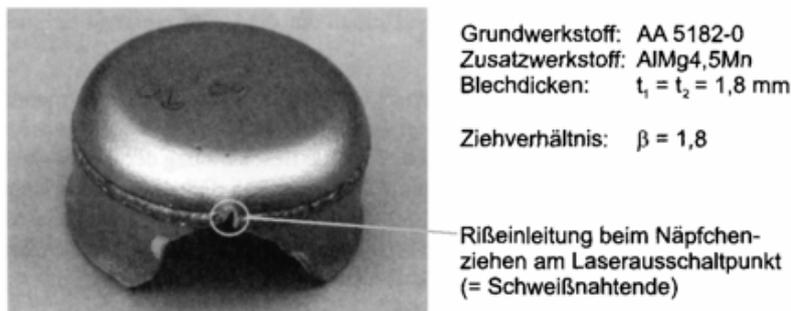


Abbildung 23: Versagen beim Näpfchenziehen von rotationssymmetrischen Tailored Blanks ohne Nahtende-Optimierung [108]

Rapp beschreibt die **Betriebsfestigkeit** von Aluminium-Tailored-Blanks. Diese Dauerfestigkeit ist aufgrund der geometrischen und metallurgischen Kerbwirkung der Fügestelle reduziert gegenüber dem ungeschweißten Grundwerkstoff. Die mechanische Kerbe ergibt sich aus der Schweißnahtform (Nahtüberhöhung, Randkerben u. a.) und falls vorhanden, aus dem Blechdickensprung. Die metallurgische Kerbe ist eine Folge der andersartigen Gefügestruktur im Schweißgut und der Wärmeauswirkungen in der Wärmeeinflusszone. Hinzu kommt die wechselnde Legierungszusammensetzung durch den Legierungsabbrand, den Zusatzwerkstoff und gegebenenfalls die unterschiedlichen Grundwerkstoffe [105].

Bei *Behler* wird die Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_u = 90 \%$ der Zugschwellfestigkeit für laserstrahlgeschweißte Verbindungen an AA 5182-0 mit Blechdickensprung mit $60 - 70 \text{ N/mm}^2$ angegeben, was etwa 50% der Dauerfestigkeit des Grundwerkstoffes entspricht [109]. Einen ähnlich hohen Wert der Zugschwellfestigkeit, aber nur für konstante Blechdicke sowie eine Abnahme für unterschiedliche Blechdicken auf etwa $40 - 50 \text{ N/mm}^2$ stellt [105] fest.

Für AA 6016 T4 ohne Blechdickensprung liegt die Zugschwellfestigkeit bei ca. 60 N/mm^2 , die Biegegewchselfestigkeit etwa bei 94 N/mm^2 (entspricht 84% des Grundwerkstoffes). Weiterreichende Erkenntnisse zur Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen an Aluminiumlegierungen liegen lediglich für konventionelle Schweißverfahren vor [110]. Der Schwerpunkt liegt dabei auf naturharten Legierungen. Die Ergebnisse zu laserstrahlgeschweißten Aluminiumlegierungen sind

dagegen knapp und aufgrund unterschiedlicher Versuchsvoraussetzungen nur schlecht vergleichbar [92].

Gestaltung von Aluminium Tailored Blanks mit nichtgeradlinigen Nähten

Gegenüber geradlinig geschweißten Tailored Blanks bergen, wie schon ausgeführt, nicht geradlinige ein noch höheres Potenzial der Gewichtseinsparung und Steifigkeitsoptimierung. Darüber hinaus können die Platinen durch eine geschickte Anpassung des Schweißnahtverlaufes umformgerechter ausgelegt werden. Allerdings stellen gekrümmte Nahtverläufe höhere Anforderungen an die Fügekantenvorbereitung und die Prozessführung beim Schweißen, erst recht bei Aluminium.

Die **Fügekantenvorbereitung mittels Laserstrahlschneiden** ist bei kleinen Stückzahlen und für die Prototypenherstellung wirtschaftlicher, als Platinenzuschnitt mit teureren Schneidwerkzeugen vorzunehmen. Untersuchungen mit unterschiedlich vorbereiteten Fügekanten belegen, dass eine hohe Schweißnahtqualität sowohl bei scher- als auch bei laserstrahlgeschnittenen Fügekanten möglich ist. Dabei wurden die schergeschnittenen Fügekanten auf einer handelsüblichen Schlagschere und die laserstrahlgeschnittenen bewusst mit geringer Laserleistung und damit starker Bartausbildung hergestellt.

Der Fügespalt betrug jeweils weniger als 0,05 mm. Ein Einfluss der Grat- bzw. Bartlage bzgl. der Strahleintrittseite kann nicht festgestellt werden. Auch eine Ausbildung von Nitritnadeln im Schweißgut aufgrund des N₂-Schneidgases tritt nicht auf. Die Ergebnisse belegen, dass die Schneidverfahren Scher- oder Laserstrahlschneiden die Schweißnahtqualität zunächst nicht beeinflussen und das unabhängig vom Einsatz der Doppelfokustechnik und des Zusatzwerkstoffes [91].

Das Laserstrahlschweißen stellt hohe Anforderungen an die Passgenauigkeit der Fügepartner und damit an die Formgenauigkeit der einzelnen Platinenzuschnitte, wobei es einen Einfluss des Fügespalts auf die Zugfestigkeit der Schweißverbindung gibt. Ohne Zusatzwerkstoff ist ein Fügespalt von höchstens 0,1 mm zulässig. Größere Fügespalte führen zu einer zunehmenden Verringerung des Schweißnahtquerschnittes aufgrund des Materialdefizits in der Fügezone und damit zu einer Reduzierung der Schweißnahtfestigkeit sowie zu einer ungleichmäßigen Nahtqualität, d.h. zu einer Streuung der Zugfestigkeit.

Durch den Einsatz von Zusatzwerkstoff kann bei einer Anpassung der Drahtmenge ein Fügespalt von bis zu 1 mm ohne Einbußen bei der Fertigungsqualität und Festigkeit überbrückt werden. Hierfür ist aber eine Online-Messung des Fügespalts und darauf aufbauend eine Regelung der Drahtzuführmenge erforderlich. Die notwendige Drahtzuführgeschwindigkeit kann wie folgt berechnet werden:

$$v_{Dr} = v_0 + v(d)$$

d = Fügespaltweite

v_0 = geringste Drahtzuführmenge, für ein gleichmäßiges Abtropfen

$$v(d) = d \cdot \frac{4 \cdot v_L \cdot t_1}{D^2 \cdot \pi}$$

v(d) = spaltabhängiger Anteil der Drahtzuführgeschwindigkeit

v_L = Schweißgeschwindigkeit

t_1 = Blechdicke des dünneren Fügepartners

D = Drahtdurchmesser

Formel 2: Berechnung der Drahtzuführgeschwindigkeit.

Beim Laserstrahlschneiden der Platinen kommt es zu Formabweichungen, die kleiner sind als 0,1 mm. Sie entstehen nicht durch Eigenspannungen sondern sind ein Resultat der thermischen Ausdehnung der Platine aufgrund der Wärmeeinbringung beim Laserstrahlschneiden [91]. Die auftretenden Ungenauigkeiten der Blechzuschnitte beeinflussen das Schweißen nicht, solange mit Zusatzwerkstoff geschweißt wird.

Viele Konzepte für nicht geradlinige Tailored Blanks beinhalten abschnittsweise geradlinige Schweißnähte, die unter einem bestimmten Winkel aufeinander treffen. Pohl beschreibt solche **Strategien für V-förmige Nahtverläufe**. Da scharfe Ecken im Nahtverlauf aufgrund von Abbrems- und Beschleunigungsvorgängen der Anlage nicht mit konstanter Geschwindigkeit geschweißt werden können, sind Schweißstrategien für den Übergang zwischen bereichsweise geradlinigen Schweißnähten erforderlich.

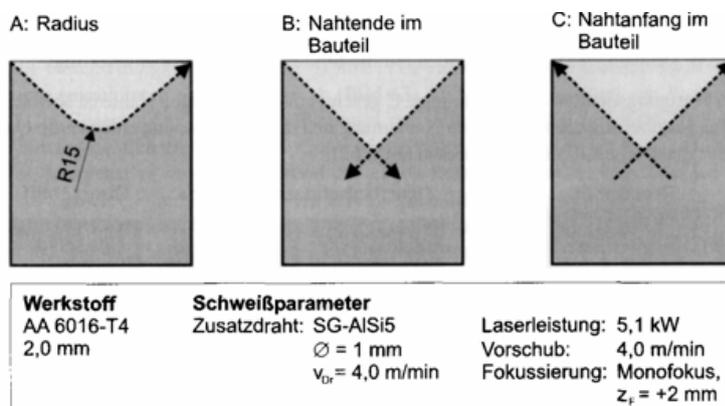


Abbildung 24: Schweißparameter und -strategien für Tailored Blanks mit V-förmigem Nahtverlauf [91]

Abbildung 24 zeigt die Vorgehensweise für Versuchsplatinen aus 2 mm dickem A6016 T4. Der 90°-Winkel wird dabei mit Hilfe der folgenden drei Schweißstrategien realisiert:

Strategie A: Abrunden des Nahtverlaufs mit einem 15 mm Radius

Strategie B: zwei sich kreuzende Schweißnähte mit Nahtende im Inneren der Platine

Strategie C: zwei sich kreuzende Schweißnähte mit Nahtanfang im Inneren der Platine

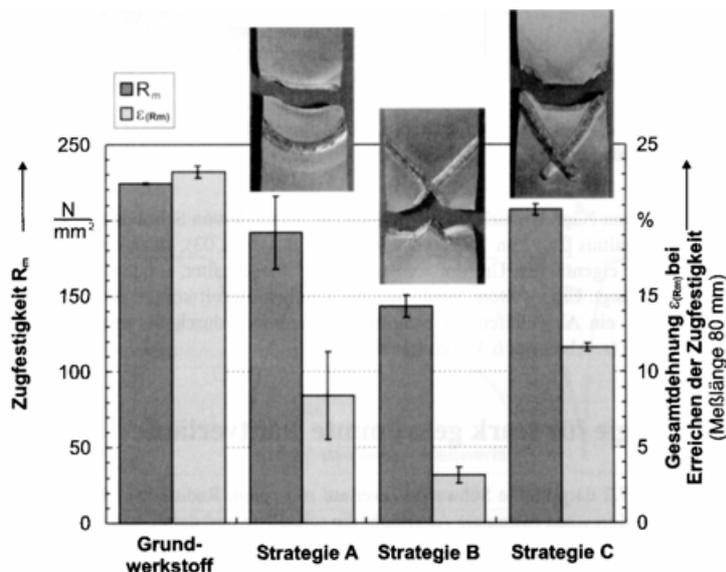


Abbildung 25: Zugfestigkeit von Tailored Blanks mit V - förmigen Nahtverlauf [91]

Abbildung 25 zeigt die Zugfestigkeit des nicht geradlinigen Nahtbereichs sowie den Versagensort der zugehörigen Zugproben. Die mit Strategie A und C geschweißten Proben versagen nach einer deutlichen Einschnürung in der Wärmeeinflusszone aufgrund der Entfestigung durch die Wärmeeinbringung. Die Zugfestigkeit entspricht in etwa der geradliniger Schweißnähte. Die hohe Streuung bei Strategie A resultiert aus den zwei verschiedenen Versagensarten:

Versagen am Außenradius: Der Bruch beginnt am Nahtrand in der Probenmitte und verläuft beidseitig durch die WEZ zum Probenrand hin.

Versagen am Innenradius: Der Bruch beginnt in der WEZ in der Probenmitte und verläuft horizontal weiter zum Probenrand hin. Zugfestigkeit und Dehnung sind dabei höher.

Anders verhält sich der Nahtkreuzungspunkt bei Strategie B = „Nahtenden im Platineninneren“. Er weist starke Endkrater und Endkraterisse auf, die zu einer Schwächung des Probenquerschnittes und damit zu einem frühzeitigen Versagen bei nur geringer Einschnürung der Wärmeeinflusszone führen. Die hohe

Fertigungsqualität der mit Strategie C geschweißten V-förmigen Nähte ist sowohl für den stationären Nahtbereich als auch für den Nahtanfang und die Nahtkreuzung anhand von Quer- und Oberflächenparallelschliffen nachgewiesen [91].

Der bisher dargestellte Schweißnahtverlauf mit einem Radius am Übergang zwischen den geradlinigen Bereichen (Strategie A) erlaubt die schnellste und damit wirtschaftlichste Bearbeitung, da der Schweißprozess nicht unterbrochen wird und damit keine unnötigen Verfahrensbewegungen des Bearbeitungskopfes zur Neupositionierung anfallen.

Allerdings tritt ein anderes Problem bei der Bearbeitung enger Krümmungsradien im Schweißnahtverlauf auf. Hier empfiehlt *Pohl Strategien für stark gekrümmte Nahtverläufe*. Da beim Laserstrahlschweißen von Aluminium zur Steigerung der Prozessstabilität mit Doppelfokus und / oder Zusatzwerkstoff gearbeitet werden sollte, ist eine Umorientierung des Bearbeitungskopfes (hier: C-Achse der Bearbeitungsanlage) für ein gleich bleibendes Bearbeitungsergebnis nötig [91].

Bei exakter Einhaltung der programmierten Bahn sowie der Orientierung des Bearbeitungskopfes nimmt die Geschwindigkeit der Werkzeugspitze an den Übergangstellen zwischen geradlinigen und gekrümmten Nahtbereichen ab. Dies führt zu Löchern am Radiusein- und -auslauf. Im Gegensatz zu Schneidapplikationen und dem Schweißen von Stahl kann bei Aluminiumwerkstoffen eine geringere Geschwindigkeit nicht allein durch eine Laserleistungssteuerung kompensiert werden. Aufgrund des engen Prozessfensters treten bereits bei kleineren Parametervariationen Prozessinstabilitäten (Humping, unvollständige Durchschweißung) auf.

Für die Fertigung gekrümmter Schweißnahtkonturen ist deshalb eine konstante Schweißgeschwindigkeit über die gesamte Nahtlänge wünschenswert. Ursachen für die Geschwindigkeitsabnahmen bei nichtoptimierter Bearbeitung sind die begrenzten dynamischen Eigenschaften der das Werkzeug führenden Maschinen.

Untersuchungen an geradlinigen Schweißnähten zeigen, dass bei Verwendung von Zusatzwerkstoff die Nahtqualität durch einen seitlichen Anstellwinkel des Bearbeitungskopfes nicht negativ beeinflusst wird. Auch die Zugfestigkeit der Schweißverbindung hängt bis zu einem Anstellwinkel von 90° nicht von der Orientierung des Bearbeitungskopfes ab, wenn Zusatzwerkstoff verwendet wird. Das bedeutet, dass die Umorientierung bei engen Konturelementen auch komplett vor oder nach diesem Konturelement erfolgen könnte. Der minimal realisierbare Bahnradius entspricht damit dem Radius ohne Umorientierung des Bearbeitungskopfes [91]. Bei Verwendung des Doppelfokus hängt die Zugfestigkeit deutlich von der Orientierung des Bearbeitungskopfes ab.

Durch die dadurch mögliche Nahtunterwölbung kommt es zu einer Abnahme des Nahtquerschnittes und damit auch der Zugfestigkeit, die ihren geringsten Wert bei einem Anstellwinkel von 90° (Parallelanordnung) hat. Dennoch kann mit einem Anstellwinkel von bis zu 30° vor und nach dem Schweißnahtradius ohne nennenswerte Festigkeitseinschränkung gearbeitet werden [91].

Lokale Verstärkungen bei gleichzeitig größter Material- und Gewichtsersparnis sind oftmals nur durch geschlossene Nahtverläufe zu erreichen. Ein Beispiel hierfür ist die für Stahlwerkstoffe bereits serienmäßig eingesetzte Federbeinaufnahme. Weitere Einsatzmöglichkeiten für Tailored Blanks mit geschlossenem Nahtverlauf sind Türinnenbleche mit Verstärkungen für die Scharnier- und Schlossanbindung [111].

Im Gegensatz zu Stahl ist die Umsetzung geschlossener Schweißnahtverläufe für Aluminiumlegierungen sehr viel schwieriger. Daher bedarf es nach *Pohl* einer **Nahtendeoptimierung bei geschlossenem Nahtverlauf**. Ursache hierfür sind Endkrater und Endkraterisse am Schweißnahtende, die aus der bei Aluminium sehr viel stärkeren Schrumpfung des Schweißgutes resultieren. Endkrater und Endkraterisse reduzieren den effektiven Schweißnahtquerschnitt und führen zu Kerbwirkungen, welche die statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften der Verbindung herabsetzen.

Für die Schweißnahtendeoptimierung haben sich folgende Versuche für sinnvoll erwiesen. Am Nahtende werden die Vorschubgeschwindigkeit, die Laserleistung, die Fokusslage und die Drahtfördergeschwindigkeit rampenförmig erhöht und / oder verringert. Die Länge der Parameterrampe wird im Bereich von 5 mm bis 25 mm geändert. Ziel ist es, durch eine kontinuierliche Verringerung der Streckenenergie und damit des Schmelzvolumens in der Wechselwirkungszone, die thermisch induzierten Eigenspannungen über einen längeren Schweißnahtbereich zu verteilen und damit Spannungsspitzen abzubauen. Dies kann prinzipiell durch eine abnehmende Laserleistung oder durch eine zunehmende Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden [91].

Beim Schweißen ohne Zusatzwerkstoff wird nicht nur die Laserleistung, sondern auch die zunächst positive Fokusslage reduziert, um die notwendige Schwellintensität für den Tiefschweißeffekt auf der Werkstückoberfläche möglichst lange aufrecht zu erhalten. Schweißen mit Zusatzwerkstoff erfordert zusätzlich die Reduzierung der Drahtfördergeschwindigkeit, um ein vollständiges Aufschmelzen bis zum Prozessende zu gewährleisten.

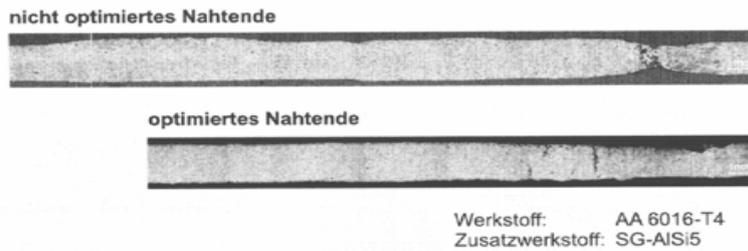


Abbildung 26: Optimiertes und nichtoptimiertes Nahtende

Die Zugfestigkeit erreicht bei Einsatz von Zusatzwerkstoff die statische Festigkeit des stationären Schweißnahtbereiches. Der Versagensort der Zugprobe liegt in der Wärmeeinflusszone (AA 6016) bzw. im Grundwerkstoff (AA5182). Metallographische Untersuchungen an Quer-, Längs- und Oberflächenparallelschliffen zeigen eine Verbesserung bezüglich der Zielgrößen Risslänge und Endkratertiefe. Dennoch kann das Auftreten von Rissen nicht vollständig verhindert werden. Abbildung 26 zeigt Längsschliffe durch das Nahtende an mit Zusatzdraht geschweißten Tailored Blanks aus AA 6016.

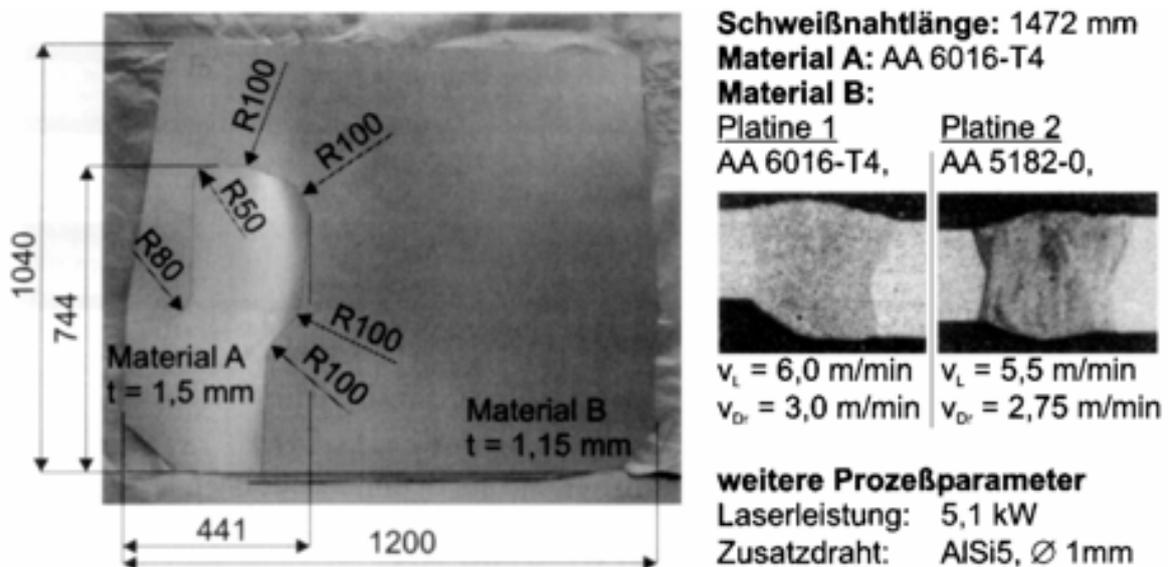


Abbildung 27: Türinnenblech [91]

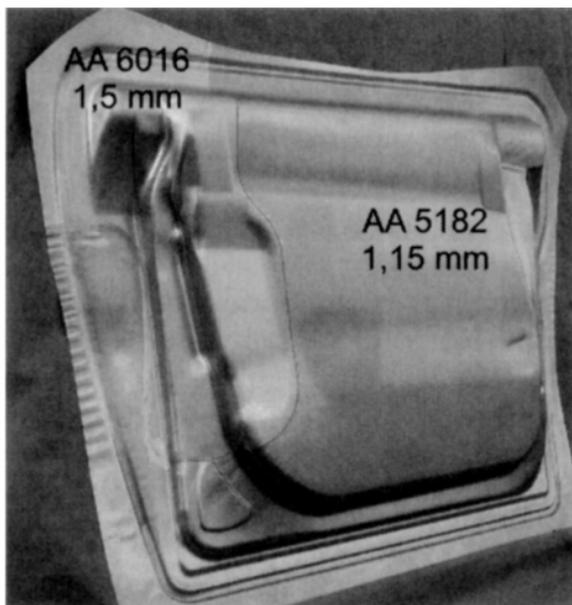
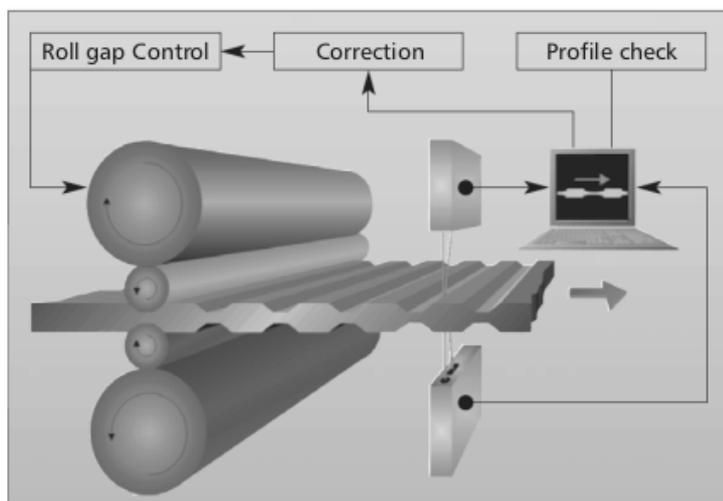


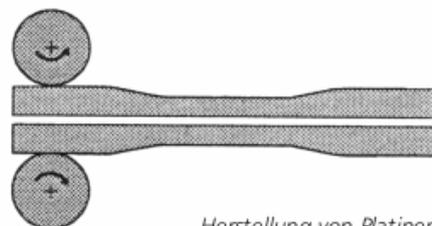
Abbildung 28: Umformergebnis Türinnenblech aus der Mischverbindung AA 5182 und AA 6016 [91]

Tailored Rolled Blanks

Für die beanspruchungsgerechte Konstruktion sind mehrere Zwischenschritte für die Halbzeugfertigung notwendig. *Kopp u.a* berichten, dass man von dem Ziel, auf die Fertigung des Halbzeuges Tailored Blanks zu verzichten, noch sehr weit entfernt ist. Bis dahin lassen sich aber in der optimierten Bauteilkonstruktion vor allem gewalzte Tailored Blanks aus einem Material mit unterschiedlichen Materialstärken sehr gut einsetzen. Solche Tailored Rolled Blanks entsprechen in ihren möglichen Ausführungen sehr dem Träger gleicher Festigkeit [112].



(Mubea)

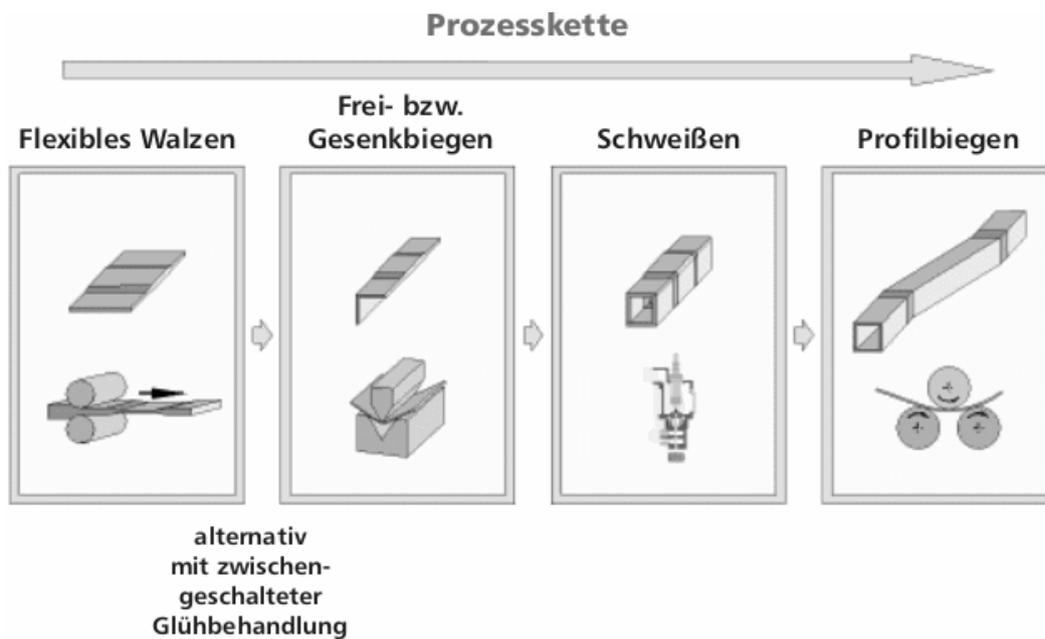


Herstellung von Platinen mit einseitigem Dickensprung

(Hauger)

Abbildung 29: Tailored Rolled Blanks (TRB) – Flexibles Walzen

Durch das Walzen als kontinuierliches Herstellungsverfahren treten auch keine sprunghaften Dickenänderungen und damit im späteren Anwendungsfall auch keine Spannungssprünge ein, die wiederum Ursache für ein Bauteilversagen sein können. Es erfolgt eine allmähliche Querschnittsänderung. Gewichtseinsparungen bis 30 % sind durch intelligente Bauweisen möglich [113]. Das Anwendungsspektrum der durch Walzen mit einem flexiblen Walzspalt erzeugten Tailored Rolled Blanks, gestattet nicht nur im Karosseriebau sondern auch in hochbelasteten Blech- und Trägerkonstruktionen erhebliche Gewichtseinsparungen. Sogar Brückenbauwerke können dadurch leichter gefertigt werden.



(LFU Uni Dortmund, Kleiner)

Abbildung 30: Prozesskette zur Herstellung von Profilen aus Tailored Rolled Blanks

Um den Fertigungsaufwand für Tailored Blanks zu minimieren, ist eine Kombination von Tailored Welded Blank und Tailored Rolled Blank möglich. Dabei kann das geschweißte Tailored Blank mit den Vorteilen des gewalzten Tailored Blank verbunden werden. Die Hauptvorteile liegen in der allmählichen Querschnittsänderung und in der Werkstoffkombination [114].

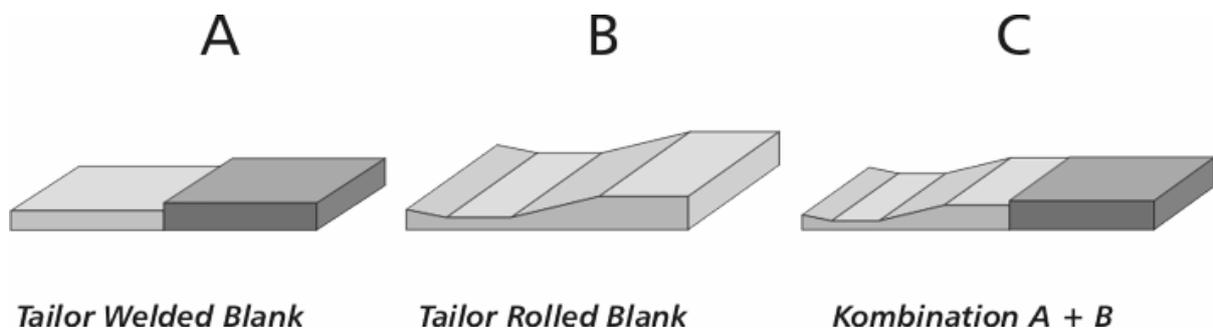


Abbildung 31: Kombination von Flexiblen Walzen und Tailored Welded Blank

Patchwork Blanks

Um örtliche Verstärkungen zu erreichen, müssen nach *Böhm u.a.* nicht immer Tailored Blanks gefertigt werden. Durch Aufsetzen von Verstärkungsteilen sind auch örtliche Verstärkungen realisierbar – Prinzip der Unterlegscheibe. Damit können umlaufende Schweißnähte entfallen bzw. reduziert werden. Je nach Beanspruchung sind auch alternative Fügeverfahren, wie Kleben und Punktschweißen möglich [115], [116].

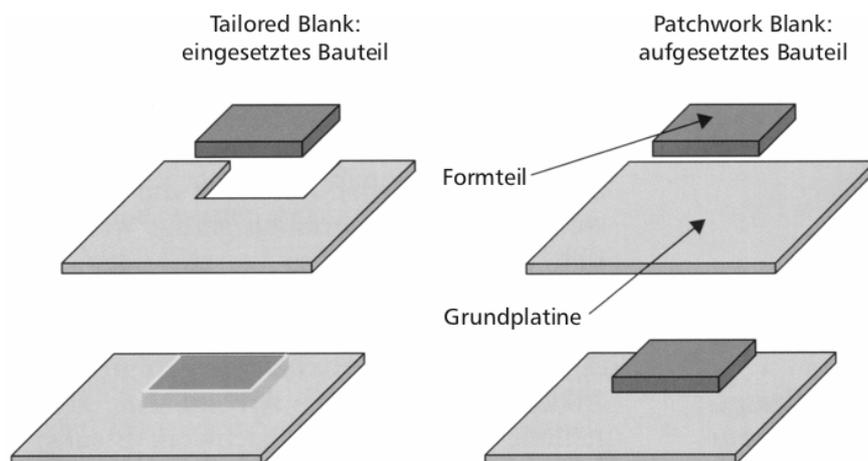


Abbildung 32: Unterschied zwischen Tailored Blank und Patchwork Blank [66]

3.3 Hybrid Blanks - Geschweißte Tailored Blanks aus Aluminium und Stahl

Auslegung und Gestaltung

Eine weitere Entwicklung der Tailored Blanks ergibt sich durch die Verbindung verschiedener Werkstoffe, wie Aluminium und Stahl. Vor allem bei den Karosserieaußenteilen, wie Kotflügeln, Heckklappen und Dächern, ist nicht die Materialfestigkeit das entscheidende Dimensionierungskriterium, sondern das Verformungs- und Schwingverhalten der Bauteile im elastischen Bereich. Hierbei spielt die Materialstärke eine übergeordnete Rolle [117], [118].

Für diese Bauteile mit verringerten Festigkeitsansprüchen, aber notwendiger Materialstärke, eignen sich hervorragend Materialien mit geringer Dichte, wie Aluminium und Magnesium. Stoffschlüssige Fügeverbindungen zwischen Aluminium und Stahl bei Außenhautteilen erweisen sich im PKW-Karosseriebau auch wegen möglicher Reparaturen als kritisch. Daher das Bestreben, Tailored Blanks aus Aluminium und Stahl anzubieten, da bei diesen sowohl die Gewichtsvorteile zum Tragen kommen [144], als auch bewährte Fügeverbindungen zwischen den Stahlwerkstoffen an den Anschlussstellen der Karosserie eingesetzt werden können.

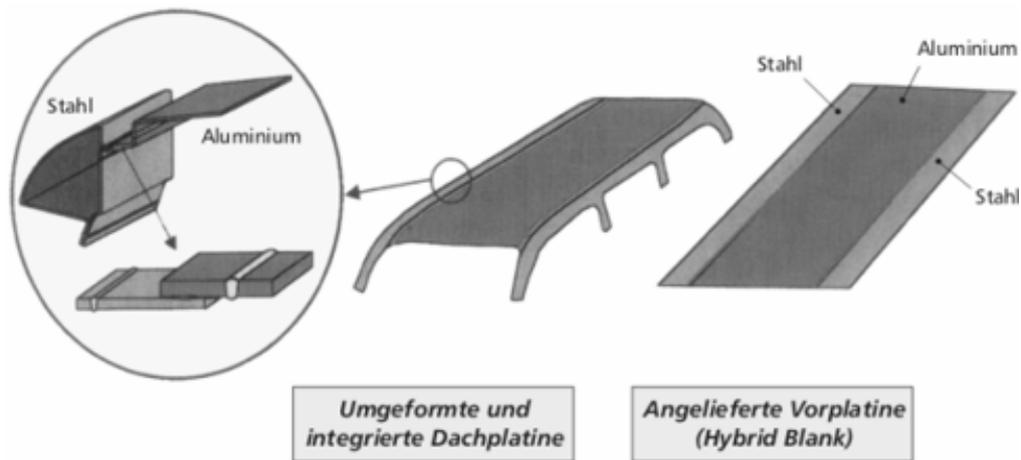


Abbildung 33: Mögliche Verwendung von Aluminium-Stahl-Tailored-Blanks im Dachbereich [119]

Die bisher bekannten, lasergeschweißten Tailored Blanks aus Aluminium und Stahl besitzen eine überlappende Fügeverbindung im Bereich der Laserschweißnaht. Sie sind damit nicht blecheben und daher nur bedingt für Außenhautteile geeignet. Des Weiteren kann sich im Bereich der Fugestelle eine interkristalline Zone bilden, die hart und spröde ist und damit eine Umformung des lasergeschweißten Aluminium – Stahl - Tailored Blanks erschwert. Auch Reibrührschweißen als Verbindungstechnik ist möglich [120].

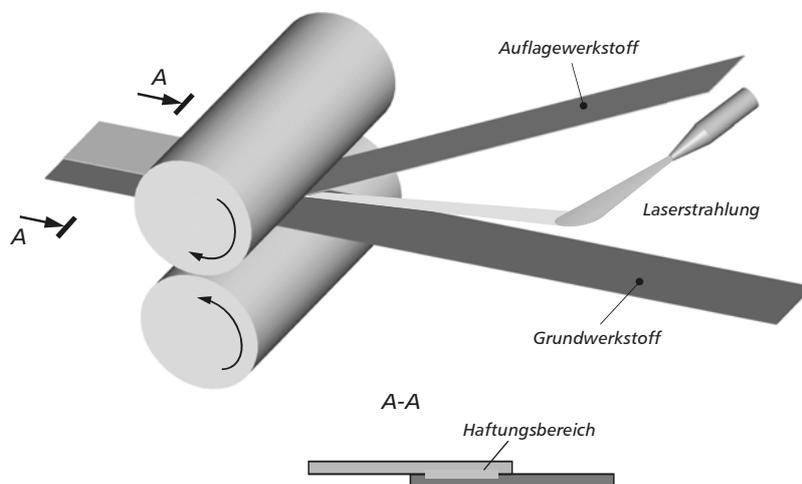
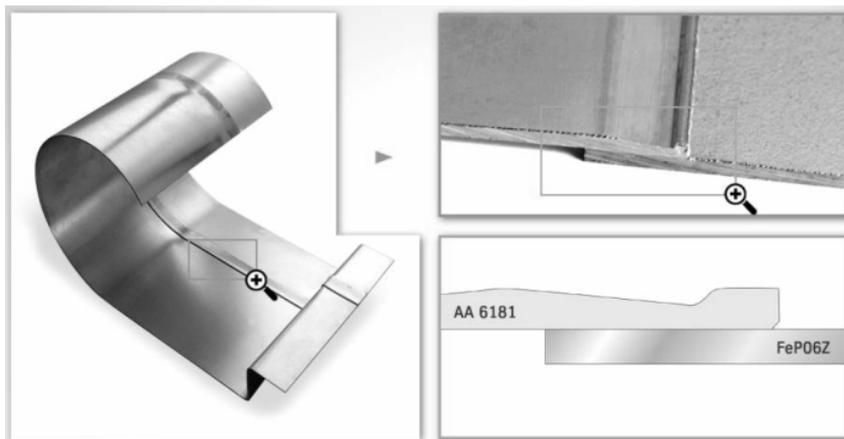


Abbildung 34: Prinzip der Herstellung lasergeschweißter Platinen [66]

Die lasergeschweißten Tailored Blanks weisen eine gute Verbindungsfestigkeit auf [121]. Neben Tailored Blanks mit geradlinigem Schweißnahtverlauf können durch die Entwicklung der Füge-technik auch Tailored Blanks mit nichtgeradlinigem Schweißnahtverlauf hergestellt werden. Der Bereich des aus Steifigkeits- oder Festigkeitsgründen mit dickerem Blech ausgelegten Bauteils kann auf das erforderliche Minimum begrenzt werden [91]. Mittels Wärmebehandlungen können die Nahteigenschaften deutlich verbessert werden [122].



(Thyssen)

Abbildung 35: Hybrid Blanks aus Stahl und Aluminium

Tailored Blanks mit nichtgeradliniger Schweißnaht stellen an den Zuschnitt- und Fügeprozess hohe Anforderungen. Schweißprozess, Bauteilpositionierung und – fixierung sowie Toleranzen der Zuschnitte sind typische Schwachstellen im Fertigungsprozess dieser Tailored Blanks. Andererseits gestattet das nichtlineare Fügen, dass Schweißnähte nicht in Umformzonen oder im Sichtbereich angeordnet werden müssen.

Bei geschlossenen Schweißnahtverläufen ergeben sich zusätzliche Probleme aus Nahtüberlappung und Nahtende. Vor allem die starke Schrumpfung, die bei der Abkühlung der Schweißnähte von Aluminiumlegierungen auftritt, kann zu ausgeprägten Endkratern mit Endkratterrissen führen. Durch die Vormontage einzuschweißender Verstärkungsbereiche mittels „Blech in Blech“ Stanztechnik wird das aus einem dickeren Blech bestehende Verstärkungsteil beliebiger Geometrie in das dünne Blech „hineingestanz“t. Fügespalte, Toleranzen und Zusatzwerkstoffe können so minimiert werden [91].

Qualitätsmängel an lasergeschweißten Tailored Blanks

Das Fügen unterschiedlicher Werkstoffe bedarf trotz modernster Fügeverfahren der sorgfältigen Abstimmung aller Prozessparameter. *Pohl* hat sich damit ausführlich auseinandergesetzt. Die Aufzählung der folgenden möglichen Mängel ist nicht nur auf das Laserstrahlschweißen begrenzt. Die Bewertung orientiert sich am internationalen Standard ISO/FDIS 13919-2. Dieser Standard kann für ein umfassendes Qualitätssystem zur Fertigung zufrieden stellender Schweißverbindungen angewendet werden. Die Bewertungsgruppen beziehen sich auf die Schweißnaht und nicht auf das gesamte Bauteil. Für ein Tailored Blank sind zwei Anforderungen wichtig:

- Anforderungen an die Umformbarkeit der geschweißten Platine,
- Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften des umgeformten Bauteils.

Für die Beurteilung der Unregelmäßigkeiten stehen die folgenden Bewertungsgruppen zur Verfügung:

Kurzzeichen	D	C	B
Bewertungsgruppe	niedrig	mittel	hoch

Tabelle 3: Bewertungsgruppen

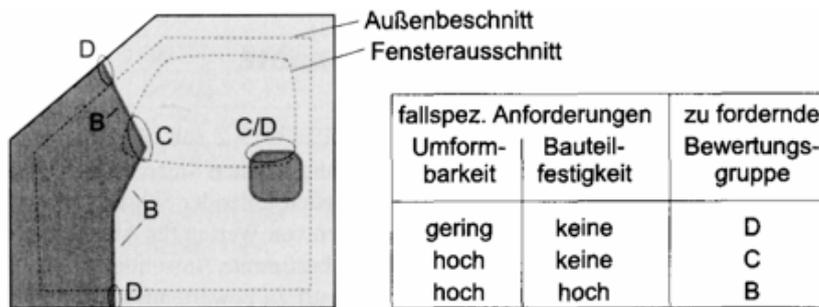


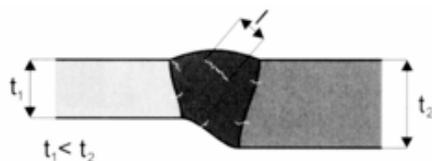
Abbildung 36: Anforderungen an die Schweißnaht in unterschiedlichen Platinenbereichen am Beispiel eines Türinnenblechs [91]

Alle Arten von **Rissen und Endkraterrissen** sind nach ISO/FDIS 13919-2 für keine der Bewertungsgruppen B, C und D zulässig. Eine Ausnahme bilden Mikrorisse mit einer Rißfläche $\leq 1 \text{ mm}^2$ und Endkraterrisse, die bei Bewertungsgruppe D = „niedrig“ und C = „mittel“ örtlich zulässig sind. Für die Herstellung von Tailored Blanks erscheint eine solche Bewertung nicht sinnvoll, da hier bereits die sogenannten Mikrorisse zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Umform- und Gebrauchseigenschaften (z.B. Dauerfestigkeit) führen können. Deshalb werden die Schweißnähte hier auch auf kleinere Risse untersucht und bewertet.

Risse im Bereich des umgeformten und beschnittenen Bauteils werden unabhängig von der Art und Größe als nicht zulässig eingestuft, so dass hier für eine Schweißnaht die Bewertungsgruppe B gefordert werden muss. Für Bereiche, die beim Beschneiden der umgeformten Platine abgetrennt werden, müssen keine Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften der Schweißverbindung gestellt werden. Allerdings sollte für die bei der Umformung der Platine stark beanspruchten Bereiche die Bewertungsgruppe C gefordert werden, die Mikrorisse mit einer Länge von mehr als 0,05 mm ausschließt [91].

In Bereichen, die bei der Umformung weniger stark beansprucht werden und die nach der Umformung abgetrennt werden (z. B. Randbereiche der Platine), genügt eine Einstufung in die Bewertungsgruppe D. Der Grenzwert für die maximale Abmessung eines Risses (25 % der Blechdicke des dünneren Fügepartners t_1)

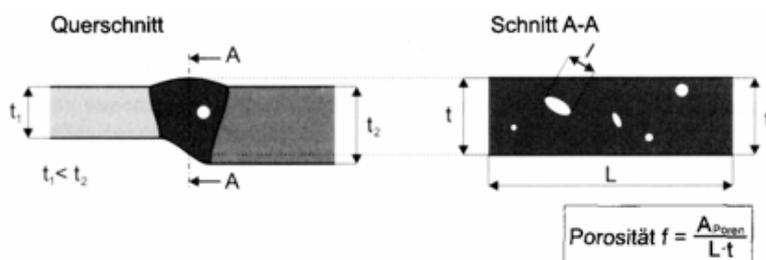
orientiert sich in dieser Bewertungsgruppe an den Grenzwerten für Bindefehler und ungenügende Durchschweißung.



Benennung	Bemerkungen	Grenzwerte für Bewertungsgruppe		
		D (niedrig)	C (mittel)	B (hoch)
Risse	maximale Abmessung l für einen Riß	$\leq 0,25 \cdot t_1$	$\leq 0,05 \cdot t_1$	nicht zulässig

Abbildung 37: Bewertung von Rissen [91]

Neben Rissen sind auch **Porosität und Poren** für die Produktqualität zu beachten. Für die Bestimmung der Grenzwerte bei Einzelporen wird die Blechdicke des dünneren Fügepartners t_1 herangezogen. Bei der Beurteilung der Porosität an Tailored Blanks mit Blechdickensprung anhand von Längsschliffen wird die tatsächlich untersuchte Schlißfläche $A_{\text{Poren}} = t \cdot L$ als Bezugsfläche herangezogen.



Benennung	Bemerkungen	Grenzwerte für Bewertungsgruppe		
		D (niedrig)	C (mittel)	B (hoch)
Poren	maximale Abmessung l für eine Einzelpore	$\leq 0,5 \cdot t_1$	$\leq 0,4 \cdot t_1$	$\leq 0,3 \cdot t_1$
Porosität	maximale Summe f der Projektionsfläche der Poren	$\leq 10 \%$	$\leq 6 \%$	$\leq 3 \%$

Abbildung 38: Bewertung von Poren und Porosität [91]

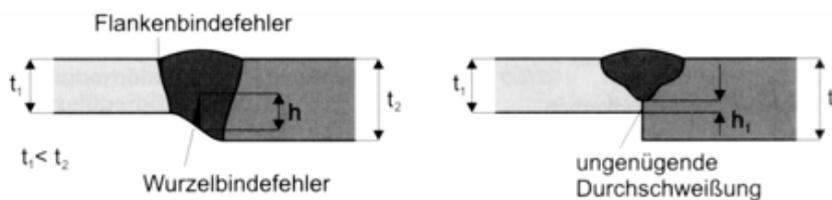
Für **Lunker und Endkraterlunker** gelten nach ISO/FDIS 13919-2 die Grenzwerte für Poren und Porosität. Unter Endkraterlunkern ist die Absenkung am Ende einer Schweißnaht zu verstehen und entspricht damit einer lokalen Nahtunterwölbung. In ISO/FDIS 13919-2 werden deshalb auch die gleichen Grenzwerte für die Bewertungsgruppen angegeben. Für Tailored Blanks sind Endkraterlunker lediglich bei geschlossenen Nahtverläufen von Bedeutung [91].

Nach ISO/FDIS 13919-2 sind lediglich Oxideinschlüsse als **feste Einschlüsse** zulässig. Dabei handelt es sich um Metalloxid, das während der Erstarrung im Schweißgut eingeschlossen wurde. Die in EN 26520 ebenfalls aufgeführten Schlacken-, Flussmittel- und Fremdmalleinschlüsse treten beim Laserstrahlschweißen in der

Regel nicht auf und sind deshalb nicht zulässig. Für Oxideinschlüsse gelten die Grenzwerte für Poren und Porosität [91].

Als Bindefehler wird eine unzureichende Bindung zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff oder innerhalb des Schweißgutes bezeichnet. Beim Laserstrahlschweißen können Flanken- oder Wurzelbindefehler auftreten. Eine ungenügende Durchschweißung liegt vor, wenn das Schweißgut die Wurzel nicht erfasst hat. Nach ISO/FDIS 13919-2 sind Bindefehler lediglich bei Bewertungsgruppe D bis zu einer Abmessung von 25 % der geforderten Schmelzzonentiefe (entspricht bei Tailored Blanks der Blechdicke des dünneren Fügepartners t_1) zulässig.

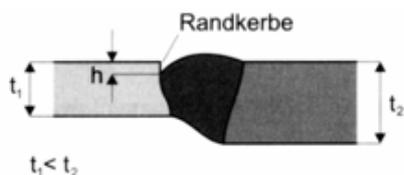
Bindefehler und ungenügende Durchschweißung sollten bei Tailored Blanks lediglich in solchen Schweißnahtbereichen als zulässig eingestuft werden, die während des Umformens nur geringfügig belastet und nach dem Umformen beim Beschneiden vom Bauteil abgetrennt werden.



Benennung	Bemerkungen	Grenzwerte für Bewertungsgruppe		
		D (niedrig)	C (mittel)	B (hoch)
Bindefehler	maximale Höhe h für einen Bindefehler	$\leq 0,25 \cdot t_1$	nicht zulässig	nicht zulässig
ungenügende Durchschweißung	Abweichung h_1 von der Durchschweißung	$\leq 0,25 \cdot t_1$	nicht zulässig	nicht zulässig

Abbildung 39: Bewertung von Bindefehlern und ungenügender Durchschweißung [91]

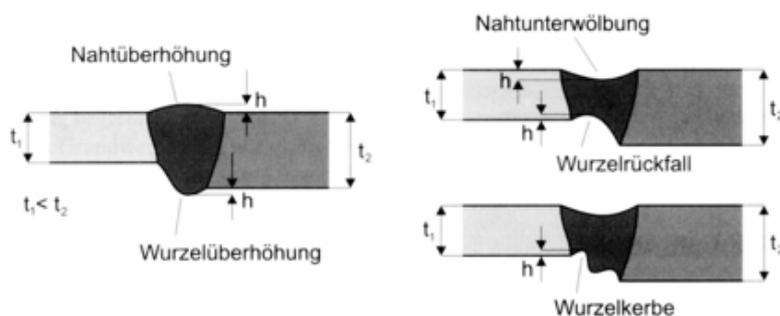
Randkerben sind Vertiefungen am Nahtübergang zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff und können sowohl an der Nahtberraupe als auch an der Nahtwurzel auftreten. Es gibt durchlaufende und unterbrochene Randkerben. Allgemein sind Randkerben unerwünscht, da sie nicht nur den tragenden Querschnitt der Schweißverbindung verringern, sondern auch die Dauerfestigkeit stark beeinträchtigen [123]. Die Grenzwerte für die zulässige Tiefe h einer Randkerbe werden aus ISO/FDIS 13919-2 übernommen und auf die Blechdicke t_1 des dünneren Bleches bezogen. Für die Bewertung von Randkerben werden je Schweißnaht drei Querschliffe vermessen und der Mittelwert aus den jeweils größten Kerbtiefen je Querschliff berechnet.



Benennung	Bemerkungen	Grenzwerte für Bewertungsgruppe		
		D (niedrig)	C (mittel)	B (hoch)
Randkerbe	maximale Höhe h für eine Randkerbe	$\leq 0,15 \cdot t_1$	$\leq 0,1 \cdot t_1$	$\leq 0,05 \cdot t_1$

Abbildung 40: Bewertung von Randkerben [91]

Nahtüberhöhung bzw. Wurzelüberhöhung bedeutet eine übermäßig große Schweißgutmenge an der Schweißnahtoberfläche bzw. -wurzel. Besondere Bedeutung für Tailored Blanks haben diese Unregelmäßigkeiten, da sie beim Umformen der Platinen den lokalen Niederhalterdruck auf die Schweißnaht erhöhen und damit zu unerwünschten Spannungsspitzen im Schweißnahtbereich führen [124]. Deshalb werden die Grenzwerte für die Bewertungsgruppen gegenüber ISO/FDIS 13919-2 deutlich verschärft und an die speziellen Anforderungen an Schweißnähte für Tailored Blanks entsprechend Abbildung 41 angepasst.



Benennung	Bemerkungen	Grenzwerte für Bewertungsgruppe		
		D (niedrig)	C (mittel)	B (hoch)
Nahtüberhöhung, Wurzelüberhöhung	maximale Höhe h	$\leq 0,2 \cdot t_2$	$\leq 0,15 \cdot t_2$	$\leq 0,1 \cdot t_2$
Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall, Wurzelkerbe	maximale Tiefe h	$\leq 0,15 \cdot t_1$	$\leq 0,1 \cdot t_1$	$\leq 0,05 \cdot t_1$

Abbildung 41: Bewertung von Nahtüberhöhung, Wurzelüberhöhung, Nahtunterwölbung und Wurzelrückfall bzw. Wurzelkerbe [91]

Bei der Ermittlung der Größe der Unregelmäßigkeit ist als Bezugskante die des dickeren Bleches und bei der Bestimmung der Grenzwerte für die Bewertungsgruppen die Blechdicke des dickeren Bleches t_2 zu wählen. Nahtunterwölbung ist eine längs durchgehende oder unterbrochene Vertiefung in der Nahtoberfläche infolge fehlender oder ungenügender Einbringung von Zusatzwerkstoff. Wurzelrückfall ist eine flache Vertiefung infolge Schwindung der

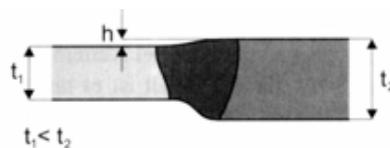
Wurzel einer Stumpfnah. Verläuft diese Vertiefung beidseits der Wurzeldurchschweißung, so spricht man von einer Wurzelkerbe.

Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall und Wurzelkerbe führen zu einer Schwächung des tragenden Querschnittes einer Schweißverbindung, die bei Tiefziehstählen durch die Aufhärtung der Schweißnaht bis zu einem gewissen Grad kompensiert wird. Dagegen kommt es bei Aluminiumplatten beim Umformen zu einer Dehnungslokalisation in der Schweißnaht. Dabei ist es nicht entscheidend, ob der Formfehler von der Schweißnahtoberfläche oder von der Wurzel ausgeht.

Deshalb sollen entgegen ISO/FDIS 13919-2 für die drei genannten Unregelmäßigkeiten die gleichen Grenzwerte gelten. Bei der Ermittlung der Größe der Unregelmäßigkeit ist als Bezugskante die des dünneren Bleches und bei der Bestimmung des Grenzwertes die Blechdicke des dünneren Bleches t_1 zu wählen [91].

Nach EN 26520 ist **Kantenversatz** der „Versatz zwischen zwei geschweißten Werkstücken der Art, dass ihre Oberflächen zwar parallel, aber nicht in der geforderten gleichen Ebene liegen“. Bei Tailored Blanks unterschiedlicher Blechdicke kann höchstens eine der beiden Oberflächen eben sein. Ungünstig auf die Umformeigenschaften wirkt sich ein entlang der Schweißnaht wechselnder Kantenversatz aus. Dies kann dazu führen, dass bestimmte Bereiche im Niederhalter abgeklemmt und beim Nachfließen behindert werden. Die Folge sind Reißen entlang der Schweißnaht.

Allerdings kann es durchaus erwünscht sein, den Blechdickensprung auf Schweißnahtober- und -unterseite zu verteilen, um einen gleichmäßigeren Blechdickenübergang mit geringer Kerbwirkung zu erzielen. Deshalb gelten die angegebenen Grenzwerte für Abweichungen von der korrekten Lage, die nicht zwangsläufig auf einer Blechseite eben sein muss [124].

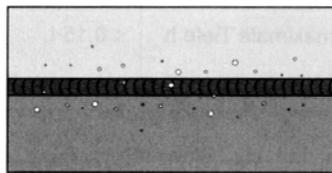


Benennung	Bemerkungen	Grenzwerte für Bewertungsgruppe		
		D (niedrig)	C (mittel)	B (hoch)
Kantenversatz	maximale Abweichung h von der korrekten Lage	$\leq 0,25 \cdot t_1$	$\leq 0,15 \cdot t_1$	$\leq 0,1 \cdot t_1$

Abbildung 42: Bewertung des Kantenversatzes [91]

Schweißspritzer sind „auf der Oberfläche des Werkstückes oder der Naht angeschmolzene Werkstofftropfen, die aus dem Schweißgut oder dem Schweißzusatz stammen“. Bei Tailored Blanks sind Schweißspritzer besonders unerwünscht, da sie beim Umformen zur Beschädigung der Werkstück- und

Werkzeugoberflächen führen können. Eine objektive Festlegung der Grenzwerte für Schweißspritzer ist schwierig, weshalb die Bewertung qualitativ erfolgt.



Benennung	Bemerkungen	Grenzwerte für Bewertungsgruppe		
		D (niedrig)	C (mittel)	B (hoch)
Schweißspritzer	Anzahl der Spritzer Größe der Spritzer	wenige klein	sehr wenige sehr klein	keine -

Abbildung 43: Bewertung von Schweißspritzern [91]

Festigkeit der Schweißverbindung

Die Festigkeit der Schweißverbindung ist wichtig für die Umformung der geschweißten Platine und für die Bauteileigenschaften des umgeformten Bauteils. Die Crashesicherheit ist dabei an erster Stelle zu nennen. Für die Festigkeitsuntersuchungen sind Härtemessungen, Querschugversuche und dynamische Zugschwellversuche ausreichend. Die Härteprüfung durch **Härtemessung** ist eines der am häufigsten eingesetzten Prüfverfahren zur Bestimmung der Festigkeit einer Schweißnaht sowie deren Wärmeeinflusszone. Anhand von Härtereihen kann außerdem die Breite der Wärmeeinflusszone bestimmt werden.

Der empfohlene Abstand der Messeindrücke beträgt bei Aluminiumwerkstoffen 0,6 - 2,0 mm für HV 0,1. Da aber die Schweißnaht und die Wärmeeinflusszone beim Laserstrahlschweißen sehr eng begrenzt sind, wird ein Abstand von 0,2 mm in der Schweißnaht und der WEZ sowie 0,5 mm im Grundwerkstoff gewählt. Dabei ist sichergestellt, dass der Abstand der Messeindrücke mindestens dem Dreifachen ihrer Diagonalenlänge entspricht und dennoch eine ausreichende Auflösung zur Bewertung der Bereiche Schweißnaht, WEZ und Grundwerkstoff gegeben ist.

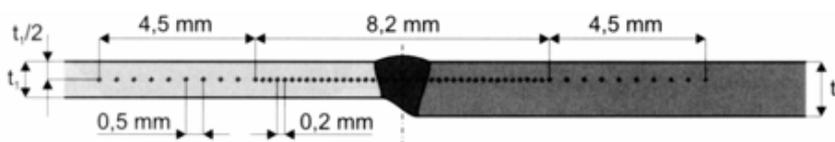


Abbildung 44: Lage der Eindrücke bei der Härtemessung [91]

Zur Bestimmung der statischen Festigkeit an stumpfgeschweißten Verbindungen an Aluminium dient der **Querschugversuch**. Dabei werden die Versuchsproben senkrecht zur Schweißnaht auf Zug beansprucht. Die Durchführung der Zugversuche erfolgt an einer Universalprüfmaschine. Für eine statistische Absicherung werden mindestens fünf Proben je Parametersatz geprüft. Als Probenform wird zur Reduzierung des

Aufwands für alle Versuche die in Abbildung 45 skizzierte Flachzugprobe ohne Kopf zum Einspannen gewählt, die für naturharte Legierungen im Zustand „weich“ eigentlich nicht gültig ist. Durch Streichung der Versuche mit einem Probenversagen an der Einspannstelle kann jedoch eine Verfälschung des Ergebnisses vermieden werden.

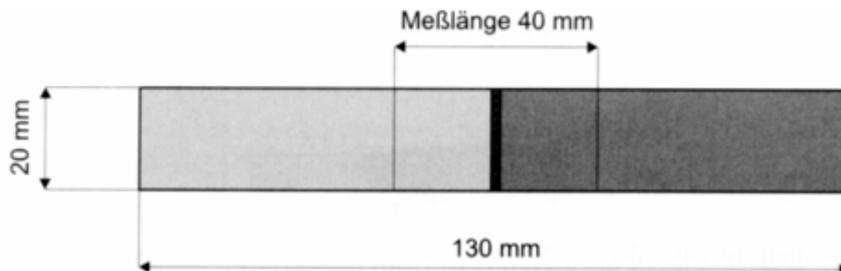


Abbildung 45: Geometrie der Querzugproben [91]

Um die Dehnungswerte vergleichen zu können, wird der Messbereich immer mittig zur Schweißnaht eingestellt, da sich andernfalls die Gesamtdehnung der Probe unterschiedlich auf die beiden Fügepartner aufteilt. Ein wichtiges Ergebnis des Zugversuchs ist der Bruchort der Probe, den man wie Abbildung 46 beschrieben, unterscheiden kann. Proben, die an der Einspannstelle der Zugprüfmaschine versagen, werden nicht berücksichtigt.

Versagensarten

- 1 Scherbruch im unbeeinflussten Grundwerkstoff
- 2 Bruch am Übergang Grundwerkstoff - WEZ parallel zur Schweißnaht
- 3 Bruch am Schweißnahttrand
- 4 Bruch durch die Schweißnahtmitte

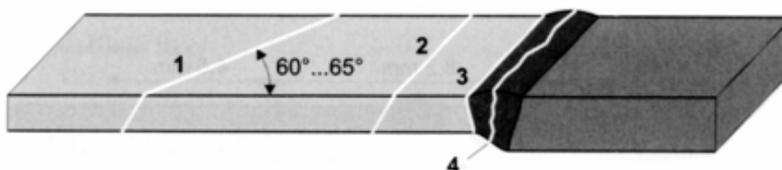


Abbildung 46: Versagensorte beim Querzugversuch [91]

Bei hoch beanspruchten Strukturteilen (z. B. Längsträger), ist das Verhalten der Schweißnähte unter dynamischer Belastung von großer Bedeutung. Deshalb wird mittels Dauerschwingversuch die **dynamische Zugschwellfestigkeit** für Tailored Blanks bestimmt. Die Zugschwellfestigkeit ist die Dauerfestigkeit, die mit einer Unterspannung von Null (oder nahe bei Null) ermittelt wird.

Da die Schweißnähte an Tailored Blanks aus Kostengründen nicht mehr nachgearbeitet werden sollten, wird auch bei den Untersuchungen auf eine Nacharbeit der Versuchsproben verzichtet. Auch ansonsten entsprechen die Proben denen der Querzugversuche [91].

3.4 Strukturierte Feibleche als Halbzeuge

Strukturierte Feibleche bzw. Noppenbleche gewinnen in der industriellen Anwendung eine immer größere Bedeutung. Ob als Wärmeabschirmblech im Bereich der Abgasanlage von Pkws, als Reflektor für Leuchtstofflampen oder als Schontrommel für Waschmaschinen [125]. Vom Einsatz strukturierter und teilstrukturierter Bleche erwartet man im Fahrzeugbau eine Gewichtsreduzierung [126]. Am Markt erhältliche strukturierte Feibleche sind in den Werkstoffen Aluminium und Stahl und vielfältigen Strukturen verfügbar [127], [128], [129]. Auch Wabenstrukturen als Sandwichfüllung sind bekannt [130].

Um die am Markt erhältlichen strukturierten Feibleche systematisieren zu können, ist eine Definition des Begriffes „Strukturiertes Feiblech“ erforderlich. Dies soll im Folgenden versucht werden [131]. **Strukturen** können nach *Neubauer* [132] zusammen mit Sicken, Rippen, Falzen, etc. als sogenannte „Nebenformelemente“ bezeichnet werden.

Nebenformelemente sind stofflich-geometrische Einheiten, die fast immer einer Fertigungsart zugeordnet werden können. Sie präzisieren die Hauptform. Die Hauptform ist hier das ebene oder gekrümmte Blech. Nebenformelemente können die verschiedenartigen Strukturformen auf Basis wiederkehrender Formelemente, wie Pyramidenstumpf, Kegelstumpf, Kugelkalotte sein. Je nach Anordnung und geometrischer Abmessung der Nebenformelemente ergeben sich ausgeprägte richtungsabhängige Eigenschaften. Die Anordnung der Formelemente kann regelmäßig und/oder unregelmäßig, symmetrisch oder unsymmetrisch zur Blechmitte erfolgen.

Strukturierte Feibleche sind flächige Leichtbaustrukturen, bei denen ebene oder gekrümmte Blechkomponenten durch Nebenformelemente versteift worden sind.

Aus der erarbeiteten Definition strukturierter Feibleche ergibt sich nach *Hoppe* die in Abbildung 47 dargestellte Variante der Zuordnung strukturierter Feibleche in die Leichtbauweisen.

„Strukturierte Feibleche“ sind Flächentragwerke aus dem Bereich des Formleichtbaus, Untergruppe Integralbauweise. Die typischen Strukturen: Walzstruktur, Kugelstruktur und Beulstruktur sind der Gruppe geometrisch strukturierter Feibleche zuzuordnen. Ausgangsmaterial bildet das offene Profil. Strukturierte Feibleche werden mit leichtbaugerechten Fertigungsverfahren hergestellt. Für die Unterteilung der Strukturbleche ist weiterhin die Art der Umformung und die Umformgeschichte von großer Bedeutung. Strukturierte Feibleche sind nacharbeitungsarm oder sogar frei [133], [134].

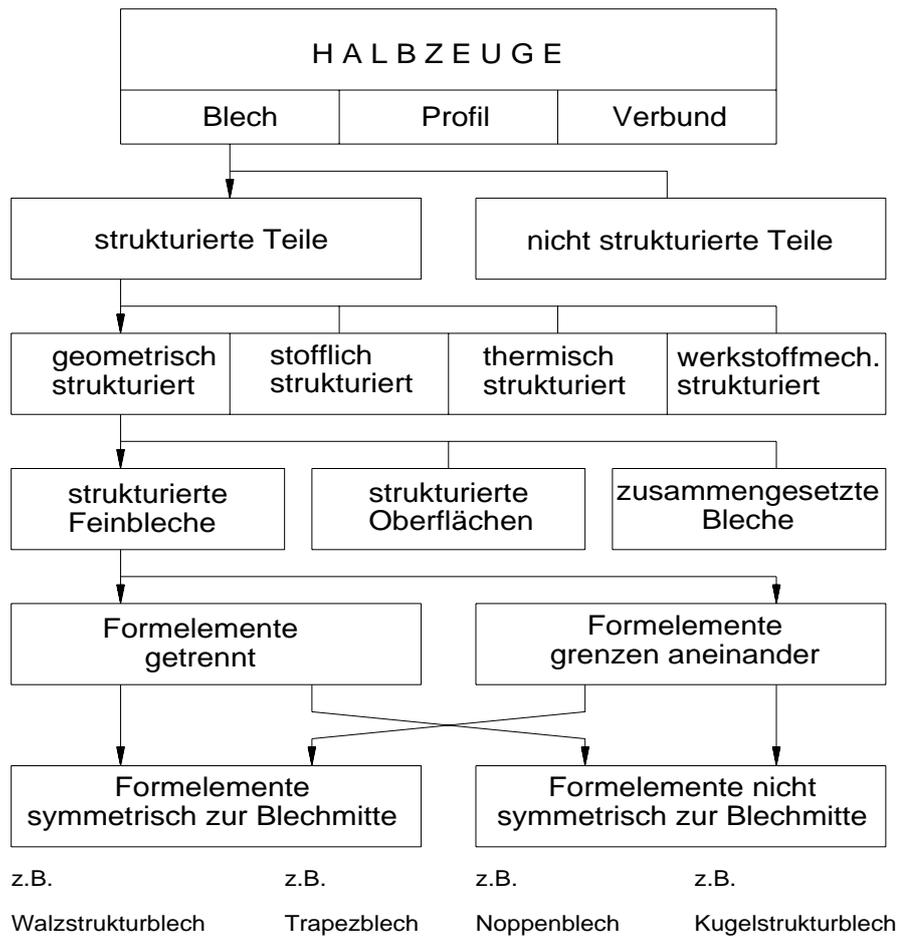


Abbildung 47: Möglichkeit der Zuordnung strukturierter Feibleche in eine ausgewählte Leichtbauweise, in Anlehnung an Hufenbach [135], Neubauer [132], Vollertsen [136]

Besonderes Merkmal dieser „Strukturen“ ist es, einem aus einem Stück geformten Bauteil eine globale Versteifung zu geben, insbesondere in Bezug auf die Erhöhung der Torsionssteifigkeit und/oder Beulstabilität. Diese Versteifung entsteht auf Grund eines Umformprozesses, bei dem die Struktur eingebracht wird. Durch diese Eigenschaft besitzen sie ein erhöhtes Flächenmoment bezogen auf die Blechebene.

Bleche mit Strukturierungen sind schon lange bekannt, wurden jedoch oftmals nur als Schmuckelement eingesetzt. Die Strukturen wurden in die einzelnen Blechtafeln eingeprägt. Auf Grund dieses Prägevorganges war eine Fertigung vom Coil nicht möglich. Erst mit der Entwicklung von kontinuierlichen Prägeverfahren gelang es, eine Massenproduktion von strukturierten Feiblechen zu ermöglichen.

4 Eigene Untersuchungen zur Weiterentwicklung von optimierten Halbzeugen

4.1 Profile

Leichte Stahlrohre als Leichtbauprofile

Mit der Entwicklung der Walzwerkstechnik in der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts begann man auch mit der industriellen Fertigung von Rohren. Dabei wurden gewalzte Blechstreifen durch Trichter oder Walzen zum Rundquerschnitt geformt und stumpf oder überlappt in der Wärme geschweißt (Feuerpreßschweißung). Gegen Ende des Jahrhunderts entstanden verschiedene Verfahren zur Herstellung nahtloser Rohre, deren Erzeugungsmengen rasch anstiegen. Trotz Anwendung anderer Schweißverfahren wurden durch die breite Entwicklung und Verbesserung der Nahtlosverfahren geschweißte Rohre fast völlig vom Markt verdrängt, bis zum Zweiten Weltkrieg dominierte das nahtlose Rohr. In der Folgezeit führten die inzwischen gewonnenen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Schweißtechnik wieder zu einer stürmischen Entwicklung und Ausbreitung der Rohrschweißverfahren. Gegenwärtig werden rund zwei Drittel der Stahlrohrproduktion in der Welt als geschweißte Rohre hergestellt. Davon sind allerdings rund ein Viertel so genannte Großrohre für Transportleitungen in Abmessungsbereichen oberhalb der wirtschaftlichen Herstellbarkeit nahtloser Rohre [137].

Diese Wirtschaftlichkeitsgrenzen bei der Herstellung von Stahlrohren führten dazu, dass Mitte der 90er Jahre die Idee der leichten Stahlrohre neu aufgegriffen wurde. Ausgangspunkt der Betrachtungen war die Tatsache, dass beim Transport von Rohren meist nur Luft mit einer dünnen Stahlhülle befördert wird. Insbesondere für temporäre Aufgaben, wie Wasserleitungen zum Befüllen von ausgekohlten Tagebauen oder zur befristeten Wasserversorgung in Notstandsgebieten, sollten Rohre mit leichten Hüllen geschaffen werden [138], [139].

Aus den Erfahrungen der wirkmedienbasierten Umformverfahren war bekannt, dass sich ein ebener Platinenzuschnitt zu einem rohrförmigen Profil „Aufblasen“ lässt, wenn ein fluides Medium mit einem Druck von bis zu 4 bar durch die Bleche geleitet wird. Die Rohrhülle kann dabei durch Rollnahtschweißen der Längsnähte bei direkter Abwicklung vom Coil gefertigt werden. Aus solchen aufgeblasenen Rohren lassen sich auch Feuerlöschschnecken für die Waldbrandbekämpfung, große Behälter, Pontons oder Möbelstücke herstellen [140]. Im Rahmen der Untersuchungen wurden sowohl

Möglichkeiten einer effektiven Fertigung als auch der Einsatz als Leichtbauprofil untersucht.

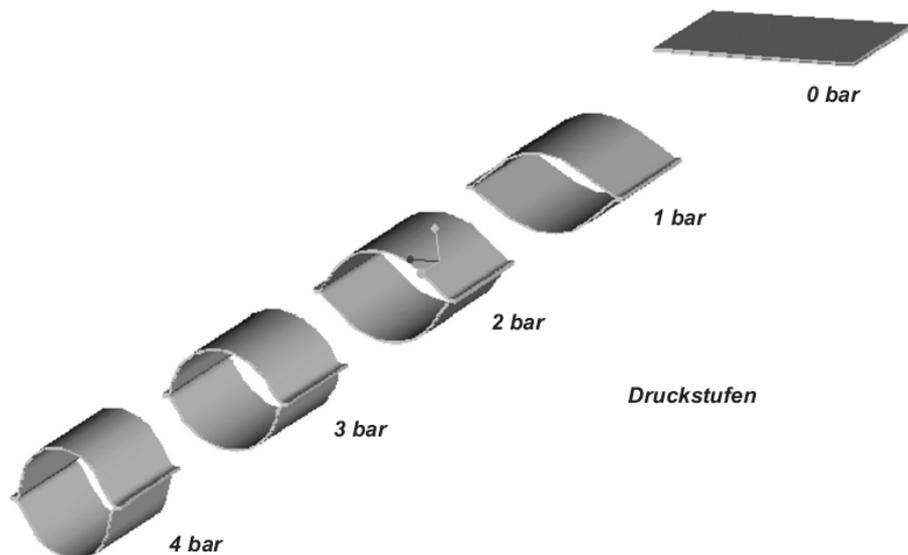


Abbildung 48: Prinzip der Rohrausformung bei leichten Stahlrohren

Untersuchungen zur Doppelrohrfertigung

Im Rahmen der Untersuchungen für ein geeignetes Fügeverfahren für die leichten Stahlrohre war die Möglichkeit des Aufwickelns der verschweißten Platine von maßgeblicher Bedeutung. Über verschiedene Zwischenstufen wurde eine Rohrvariante gefunden, die mit nur einer Naht auskommt.

Bei der Herstellung von Metallschläuchen erfolgt die Schweißverbindung mittels einer Kehlnaht. Die technisch mögliche Nahtdicke führt zur Ausbildung einer erhöhten Schweißbraupe, welche beim Aufrollen des geschweißten Bandes zu Wickelproblemen führt.



Abbildung 49: Schweißverbindung mit Kehlnaht

Bei der **Herstellung** von Metallschläuchen mit **Mehrfachschweißstoß** wird das Stahlband beidseitig um 180° gefaltet (Abbildung 50). Beim Schweißvorgang werden die beiden Enden und das Grundblech miteinander verschweißt (Abbildung 51).



Abbildung 50: Ausgangsform für Mehrfachstoß



Abbildung 51: Schweißverbindung mit Mehrfachstoß

Wegen der unsicheren Erfassung des unteren Bleches von der Oberseite ist diese Stoßart nur bei sorgfältiger Herstellungsmöglichkeit oder in festigkeitsmäßig untergeordneten Fällen anzuwenden. Die erhöhte Schweißbraupe führt ebenfalls zu Wickelproblemen.

Bei den zum Einsatz vorgesehenen Blechstärken für Metallschläuche von kleiner als 1 mm, vorzugsweise zwischen 0,3 und 0,5 mm, sind Lichtbogenschweißverfahren unter Schutzgas deshalb nicht geeignet.

Die übereinander abgerollten Blechbänder werden entweder in 2 Arbeitsgängen mit einem Laserkopf oder mit einer Zweistrahlanlage geschweißt. Zwei Arbeitsgänge sind möglich, da durch den geringen Wärmeeintrag des Laserschweißverfahrens beim Schweißen der 1. Kante kein Wärmeverzug erfolgt.

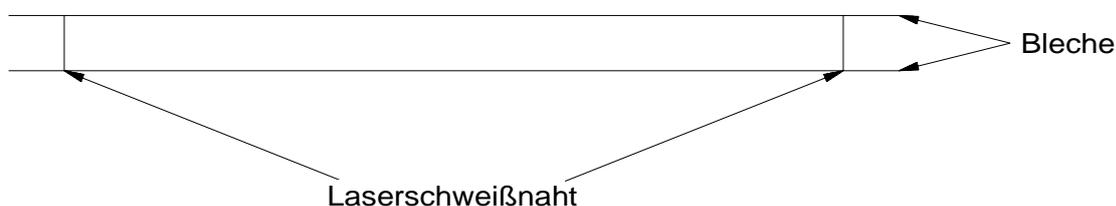


Abbildung 52: Laserschweißen ebener Stahlbänder

Für die **Fertigung** von Metallschläuchen **mit Überlappstoß** wird das Stahlband vor dem Schweißen gefaltet. Es ist möglich mit einer Schweißung alle 3 Blechebenen zu verbinden. Dabei ist sicherzustellen, dass sich kein Luftspalt zwischen den Blechebenen bildet, weil dadurch die Qualität der Schweißnaht negativ beeinflusst

wird. Für einen vollen Anschlussquerschnitt ist die überstehende Blechkante im Rohr nachteilig.

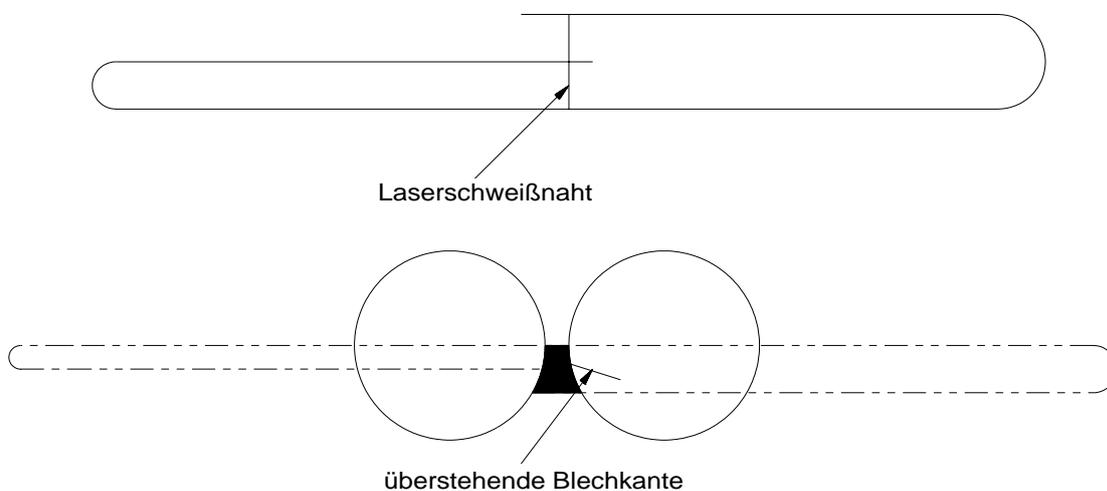


Abbildung 53: Laserschweißen gefalzter Stahlbänder

Für die **Fertigung** von Metallschläuchen **ohne Überlappstoß** wird das Stahlband vor dem Schweißen von beiden Seiten um jeweils 180° gefaltet. Es ist möglich, mit einer Schweißung alle 3 Bleche in den zwei Ebenen zu verbinden. Wichtig ist hierbei die Einhaltung des Spaltmaßes $< 0,15$ mm zwischen den beiden oberen Blechen, da sie sonst vom Laserstrahl nicht erfasst werden. Ebenso darf das Spaltband keine Kantenwelligkeit aufweisen. Durch Andruckrollen ist sicherzustellen, dass die zweite Ebene mit geschweißt wird. Wenn mit einem größeren Spaltmaß am Stoß gearbeitet werden soll, ist eine 2-Strahl-Laserschweißanlage zum Einsatz zu bringen.

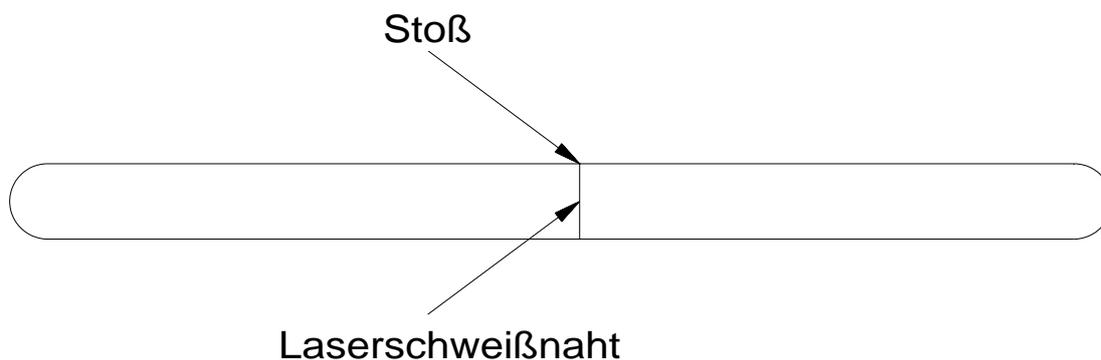


Abbildung 54: Doppelschlauch mit lasergeschweißtem Mehrfachstoß

Beim **Rollnahtschweißen** wird Wechselstrom mit hoher Stromstärke und niedriger Spannung über scheibenförmige Elektroden auf die stumpf zu stoßenden Teile unter

gleichzeitigem Stauchdruck übertragen. Es entsteht eine fortlaufende ununterbrochene Naht. Dies ermöglicht ein Fertigungsverfahren mit 2 ebenen Blechen. Die übereinander abgerollten Blechbänder werden in 2 Arbeitsgängen mit einer Rollnahtschweißanlage verbunden. Dabei entsteht durch den hohen Wärmeeintrag beim Schweißen der ersten Naht ein Verzug und eine Bandwelligkeit. Die zweite Schweißnaht lässt sich nicht mehr in guter Qualität fertigen, es sei denn, beide Rollnahtschweißnähte werden gleichzeitig geschweißt.

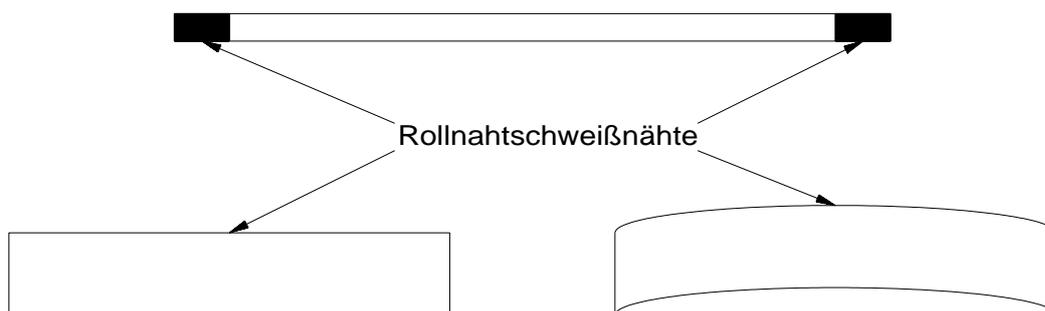


Abbildung 55: Schematische Darstellung des Verzuges

Für die Fertigung von Metallschläuchen mit Überlappstoß wird das Stahlband vor dem Schweißen gefaltet. Es ist möglich mit einer Schweißung alle 3 Blechebenen zu verbinden. Durch den Stauchdruck der Schweißrollen wird sichergestellt, dass sich kein Luftspalt zwischen den Blechebenen bildet, der die Qualität der Schweißnaht negativ beeinflusst. Für einen vollen Anschlussquerschnitt ist die überstehende Blechkante im Rohr nachteilig.

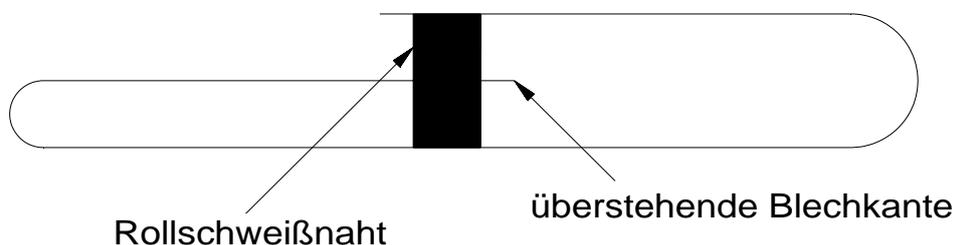
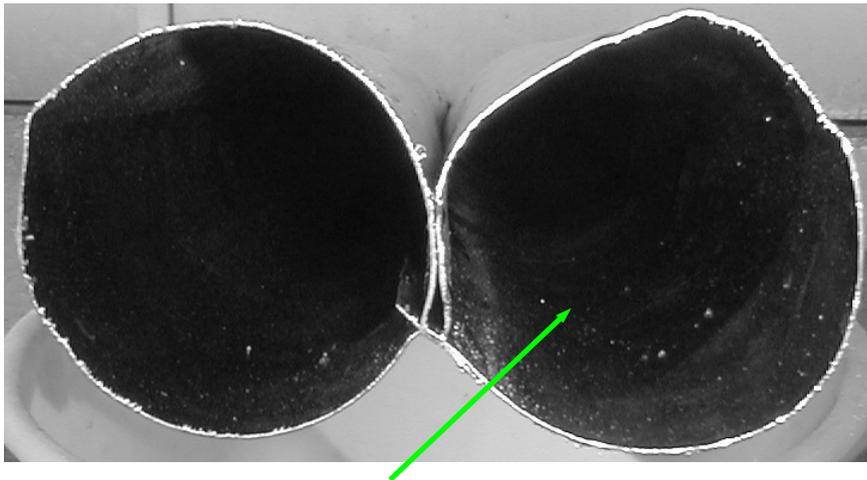


Abbildung 56: Schematische Darstellung der Rollnahtschweißung



überstehende Blechkante

Abbildung 57: Versuchsmuster Rollnahtschweißung mit Überlappstoß

Für die **Fertigung** von Metallschläuchen **ohne Überlappstoß** wird das Stahlband vor dem Schweißen von beiden Seiten um jeweils 180° gefaltet. Es ist möglich mit einer Schweißung alle 3 Bleche in den zwei Ebenen zu verbinden. Die Einhaltung des Spaltmaßes zwischen den beiden oberen Blechen kann mit großer Toleranz erfolgen, da die Rollenbreite der Anwendung angepasst werden kann, ebenso ist die Kantenwelligkeit durch den Anpressdruck der Schweißrollen unproblematisch.

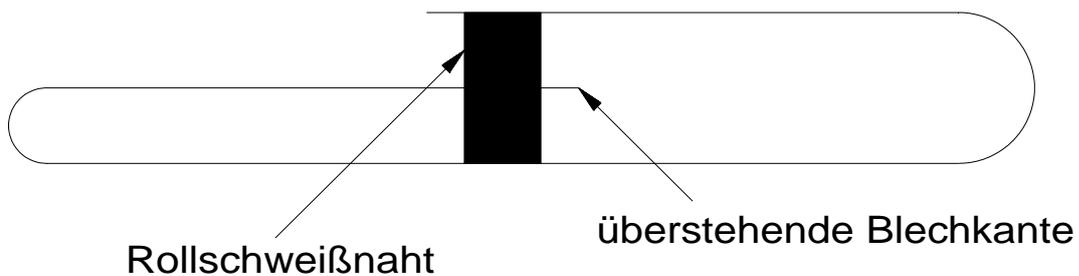


Abbildung 58: Schematische Darstellung der Rollnahtschweißung ohne Überlappstoß

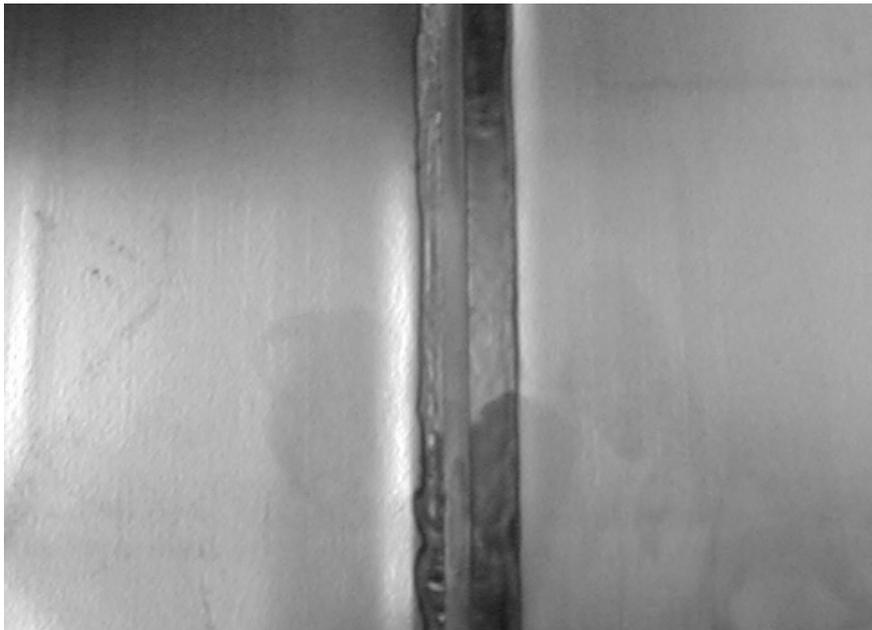


Abbildung 59: Darstellung der Rollnahtschweißung ohne Überlapstoß

Die Simulation wurde mit dem Programm MARC / Mentat durchgeführt. In der Regel erfolgt die Auslegung des dünnwandigen Metallschlauches als Kreiszylinderschale unter Innendruck nach der Membrantheorie.

$$\sigma_{\varphi} = p \cdot r / h \quad \text{Formel 3: Membrantheorie}$$

Der berechnete Wert σ_{φ} (103,25 N/mm²) für ein Doppelrohr \varnothing 40 mm x 0,3 mm nach $\sigma_{\varphi} = p \cdot r / h$ Formel 3 stimmt gut mit der FEM – Berechnung (107,8 N/mm²) überein, damit können die dünnwandigen Schläuche nach obiger Formel ausgelegt werden. Die Maximalwerte (116,5 N/mm²) liegen im Bereich der Kanten.

Das Berechnungsmodell für die Auslegung betrachtet einen mittleren Abschnitt ohne Einfluß der Endausbildung und des ungleichmäßigen Ausformens bei einem Abrollvorgang. Die Berechnung erfolgt mit einem 4 – Knoten – Schalenelement unter Berücksichtigung von großen Verformungen und elastisch – plastischen Materialverhaltens. Die Ausgangsform ist ein flacher Doppelschlauch (Abbildung 60), dessen Wandungen aufeinander liegen. Die äußeren 180 ° Faltungen wurden rechteckig mit einem Element abgebildet. Dadurch entstehen in diesem Bereich höhere plastische Dehnungen wie im realen Fall und die Berechnung liegt für die Auslegung auf der sicheren Seite.

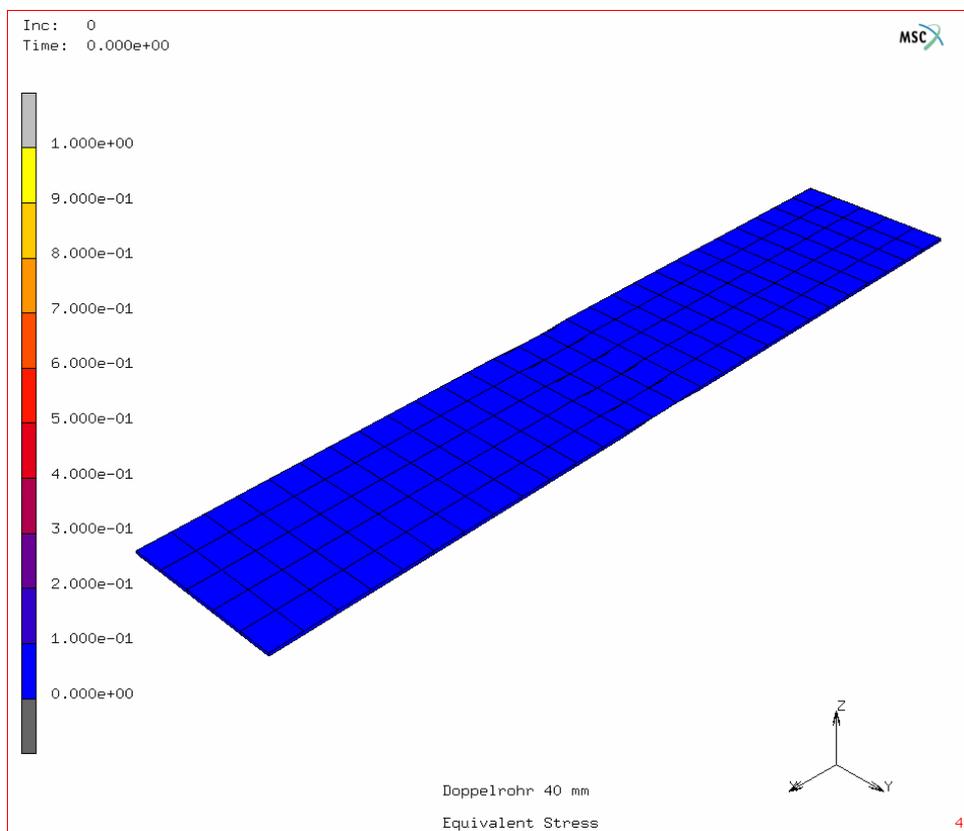
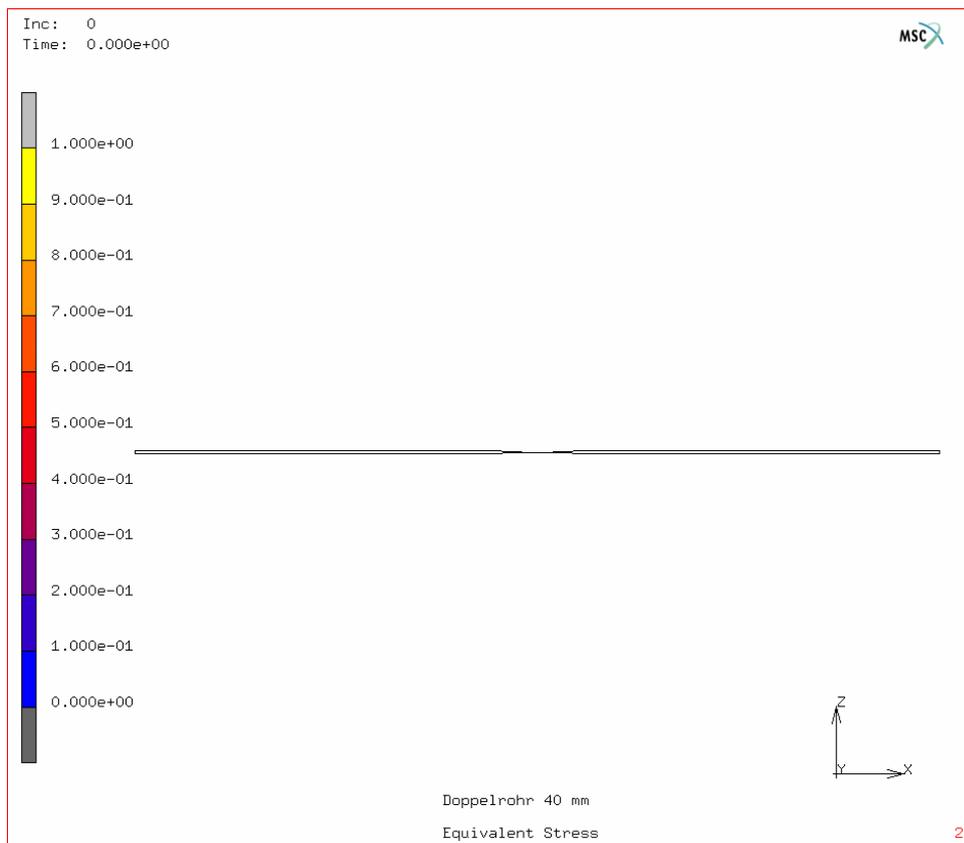


Abbildung 60: Druckstufe 0,0 bar [140]

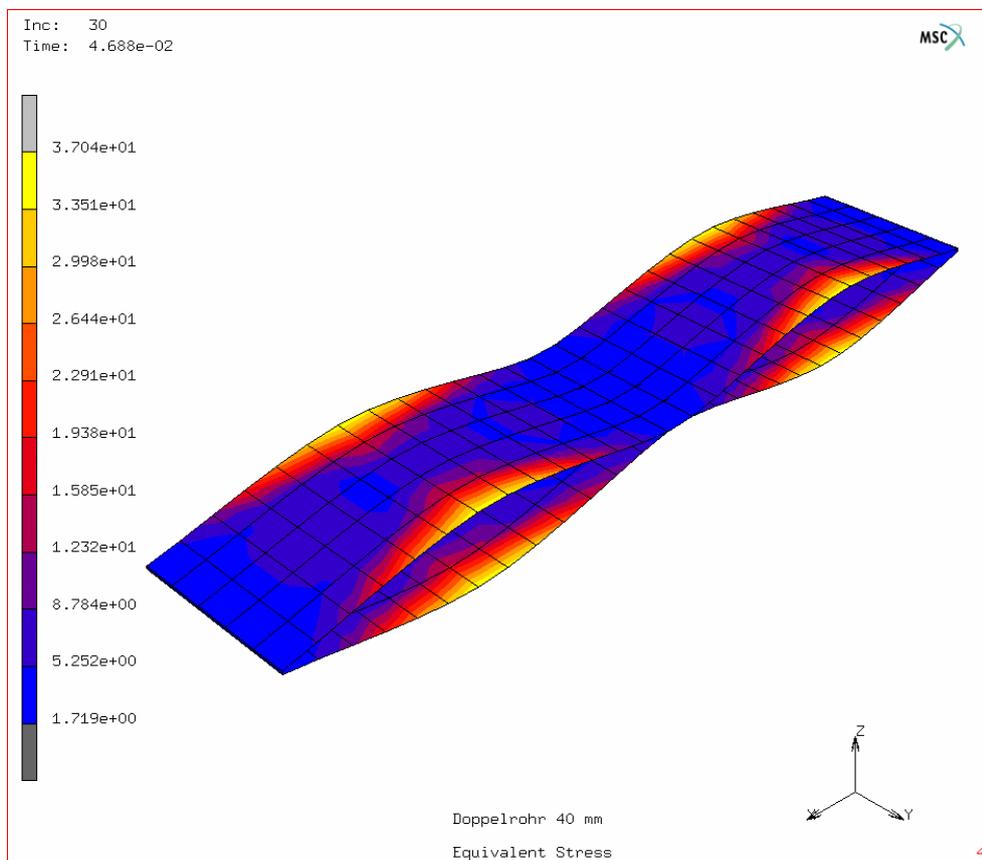
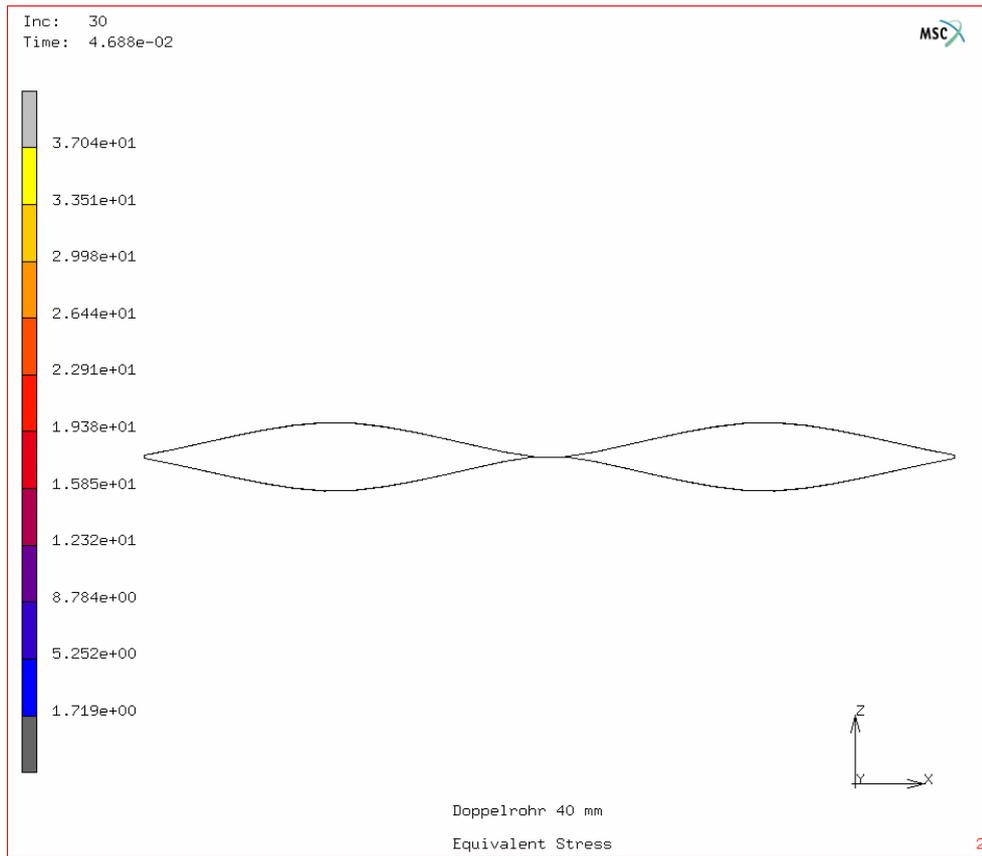


Abbildung 61: Druckstufe 0,3 bar [140]

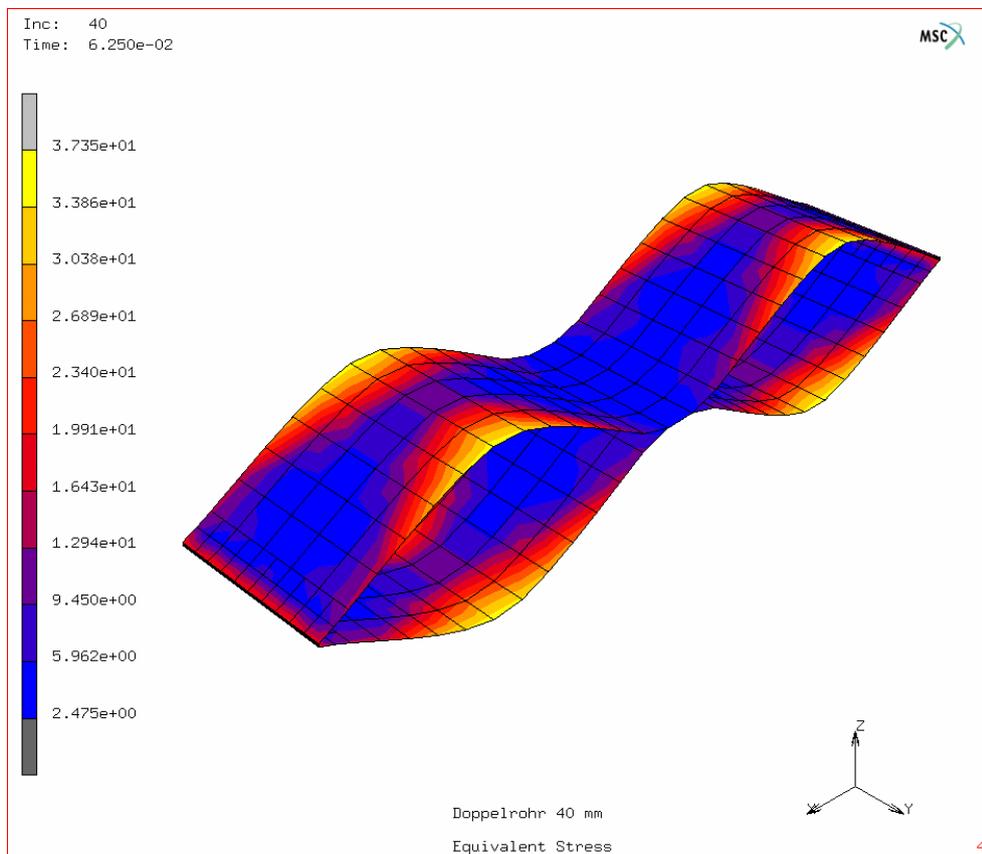
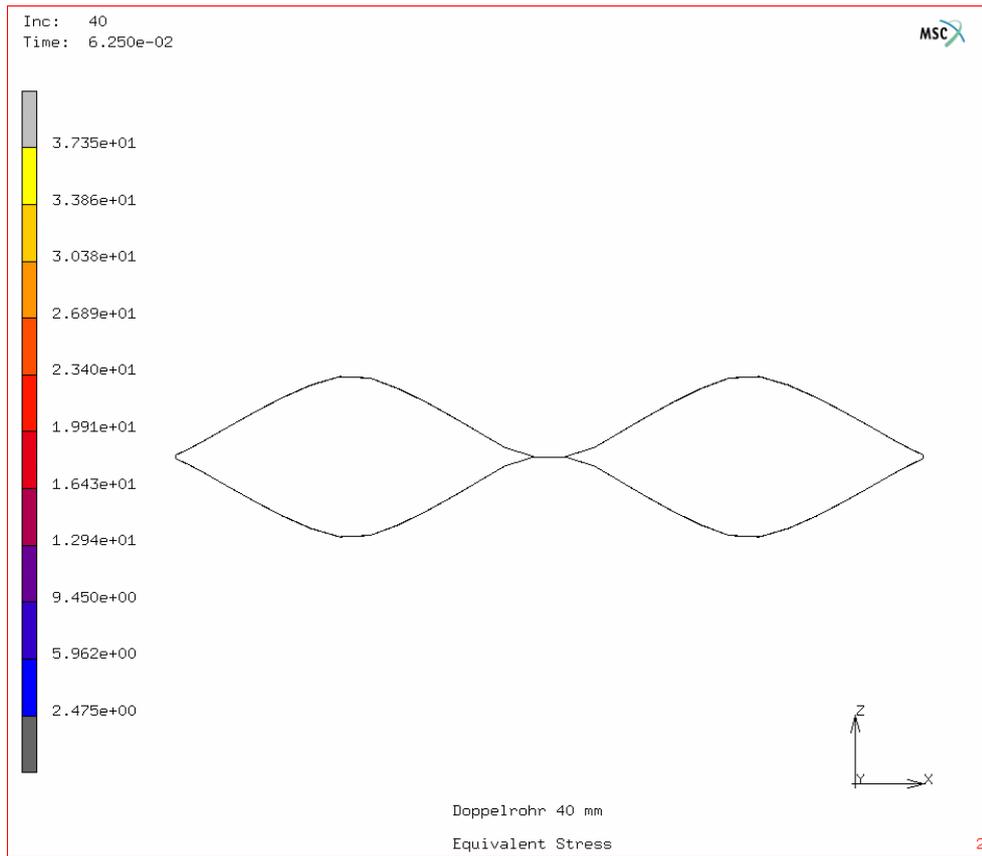


Abbildung 62: Druckstufe 0,5 bar [140]

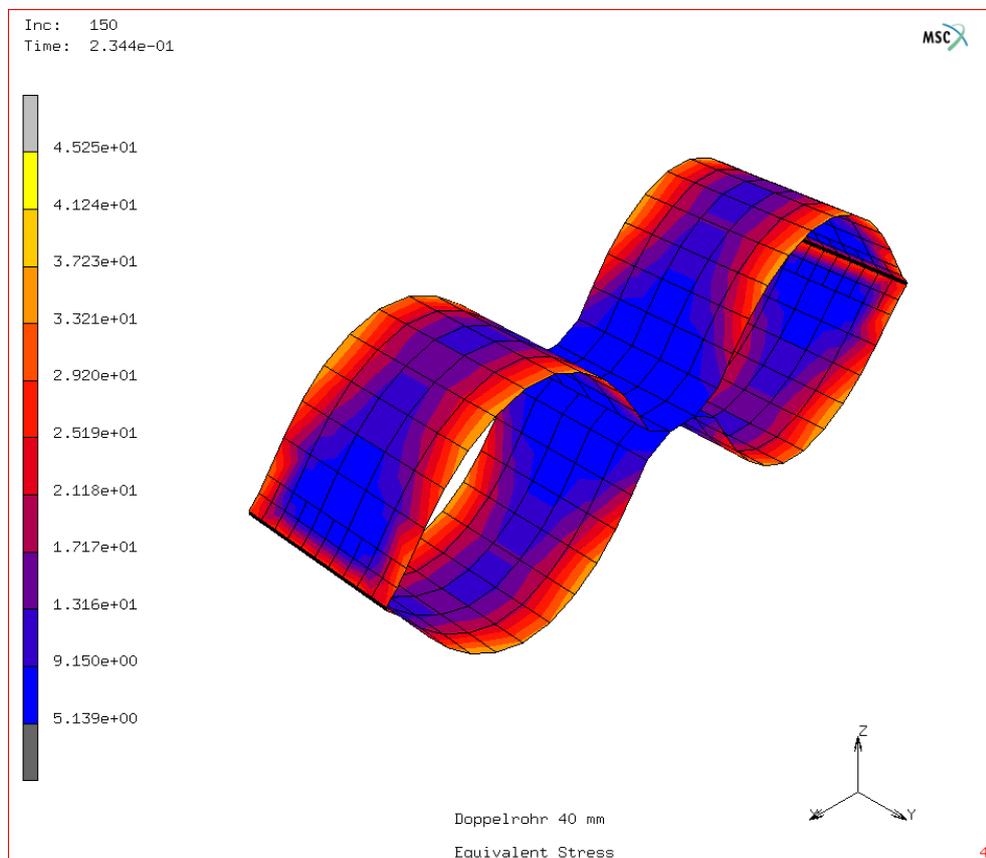
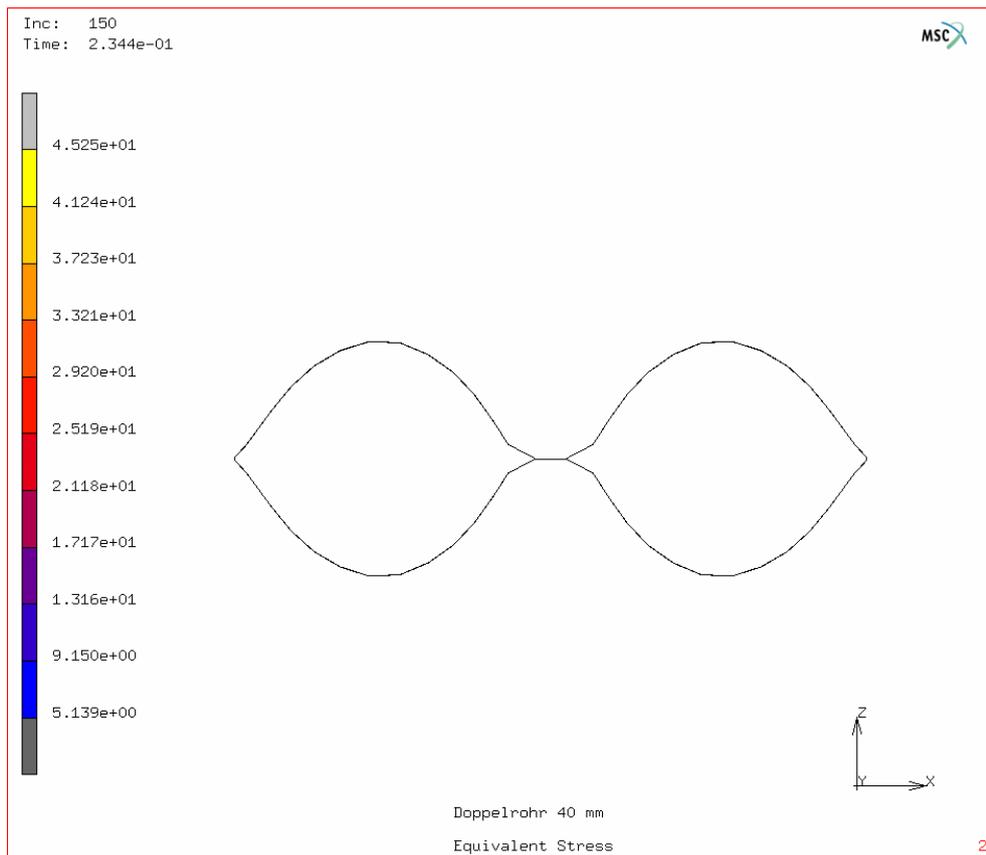


Abbildung 63: Druckstufe 0,75 bar [140]

Vom Rohr zum Profil

Allein die beiden Längsnähte bei einem einfachen Rohr verleihen den Rohrgebilden eine zusätzliche Stabilität, die man auch für Leichtbauanwendungen nutzen kann. Klassische Walzprofile sind entweder sehr gut für eine Biegebeanspruchung (z.B. C-Profil) bzw. für eine Torsionsbeanspruchung (z.B. Rohr) geeignet. Für kombinierte Beanspruchungen von Biegung und Torsion werden bevorzugt Rund- und Rechteckrohre eingesetzt, die jedoch nur als Walz- oder Schweißprofil erhältlich sind.

Am Platinenzuschnitt für das „leichte Stahlrohr“ entstehen durch ein Verschieben der Längsnähte des Rohres vom Plattenrand in Richtung Rohrmitte freie Schenkel, die umgeformt bzw. verstärkt werden können. So sind aus den leichten Stahlrohren auch [-und I-Profile mit sehr guter Eignung für Biege- und Torsionsbeanspruchung möglich.

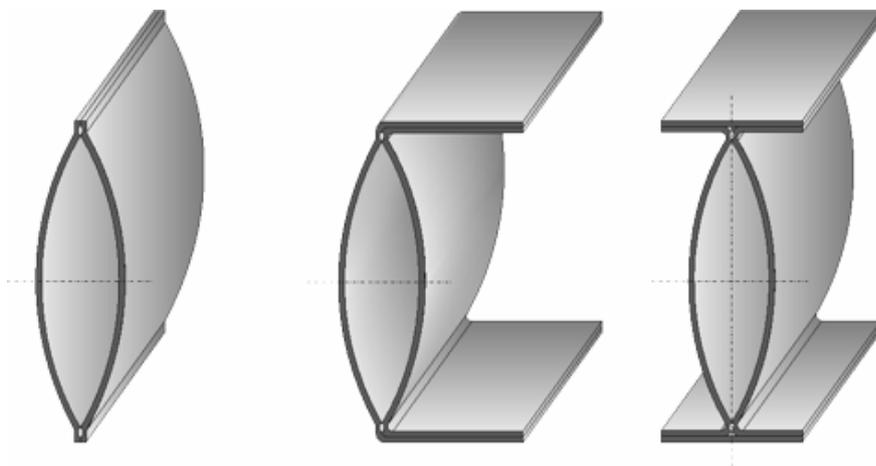


Abbildung 64: Leichte Stahlrohre als Leichtbauprofile

Aus diesen leichten Stahlrohrprofilen, die auch durch Gleitziehen und als Doppelrohr vorgefertigt werden können, lassen sich auch leichte Rahmenkonstruktionen z.B. für Fahrzeuge herstellen. [141]

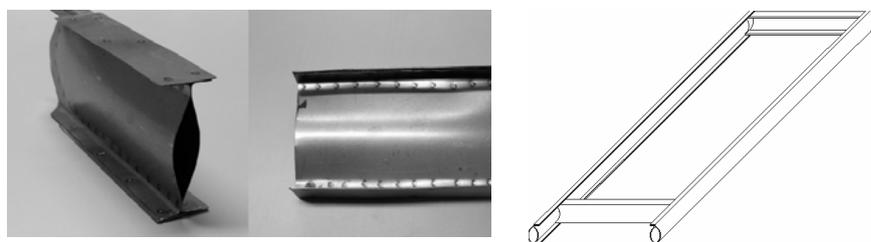
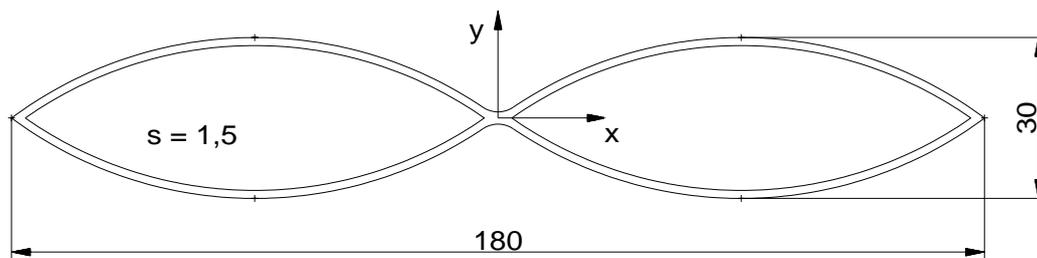


Abbildung 65: Produktmuster und Ideenskizze leichter Fahrzeugrahmen

Das Doppelrohr eignet sich auch für Trägerelemente und kann, wie es die Simulation zeigt, unterschiedlich weit ausgeformt werden. Ein Einsatz des Doppelrohres als

Leitplanke ist so möglich. Das abgebildete Doppelrohr ist hier liegend dargestellt, so dass die Werte für die x- und die y- Achse beim Profilvergleich (Mit Angaben aus Taschenbüchern) getauscht werden müssen. Der Vergleich mit Walzprofilen ist insofern schwierig, da die Profilflansche der Walzprofile üblicherweise breiter ausfallen.



$I_{xx} = 60327 \text{ mm}^4$, $I_{yy} = 7827765 \text{ mm}^4$, $W_x = 4022 \text{ mm}^3$, $W_y = 86975 \text{ mm}^3$, $A = 567 \text{ mm}^2$, $m' = 4,45 \text{ kg/m}$

Abbildung 66: Kennwerte eines Doppelrohres 180 x 30 x 1,5

Aus den geometrischen Gegebenheiten der Profile lassen sich schnell die Flächenmomente 2. Ordnung ermitteln und mit den klassischen Profilen vergleichen. Gegenüber klassischen Walzprofilen können die leichten Stahlrohrprofile eine deutlich erhöhte Torsionsbeanspruchung ertragen, da das geschlossene Profil die Schubbeanspruchung aufnimmt.

So entstehen in dem aus 2.7 mm starkem Stahlblech gefertigten I 100-Profil (Abbildung 65) bei einem Torsionsmoment von 100 Nm mittlere Schubspannungen von 196 N/mm^2 . Das entspricht einem Widerstandsmoment gegen Torsion von $W_t = 5102 \text{ mm}^3$. Damit ist das Widerstandsmoment gegen Torsion etwa doppelt so groß wie bei einem I 100-Profil.

Gestaltungsregeln

Für die Verwendung von leichten Stahlrohren als Leichtbauprofile konnten bereits folgende Gestaltungsregeln herausgearbeitet und erprobt werden:

- die Biegebeanspruchung möglichst mittig in der Hauptbiegeachse (Hauptträgheitsachse) einleiten (Abbildung 67 a),
- Torsionsbeanspruchung möglichst durch einen flächigen Querschnittsanschluss einleiten (Abbildung 67 b),
- Steifigkeitssprünge können durch die Reduzierung der Flanschbreiten oder durch Reduzierung der Profilausrundung minimiert werden (Abbildung 67 c),

- Querträger können durch ausgeklinkte und abgewinkelte U – Profile angeschlossen werden (Abbildung 67 d).

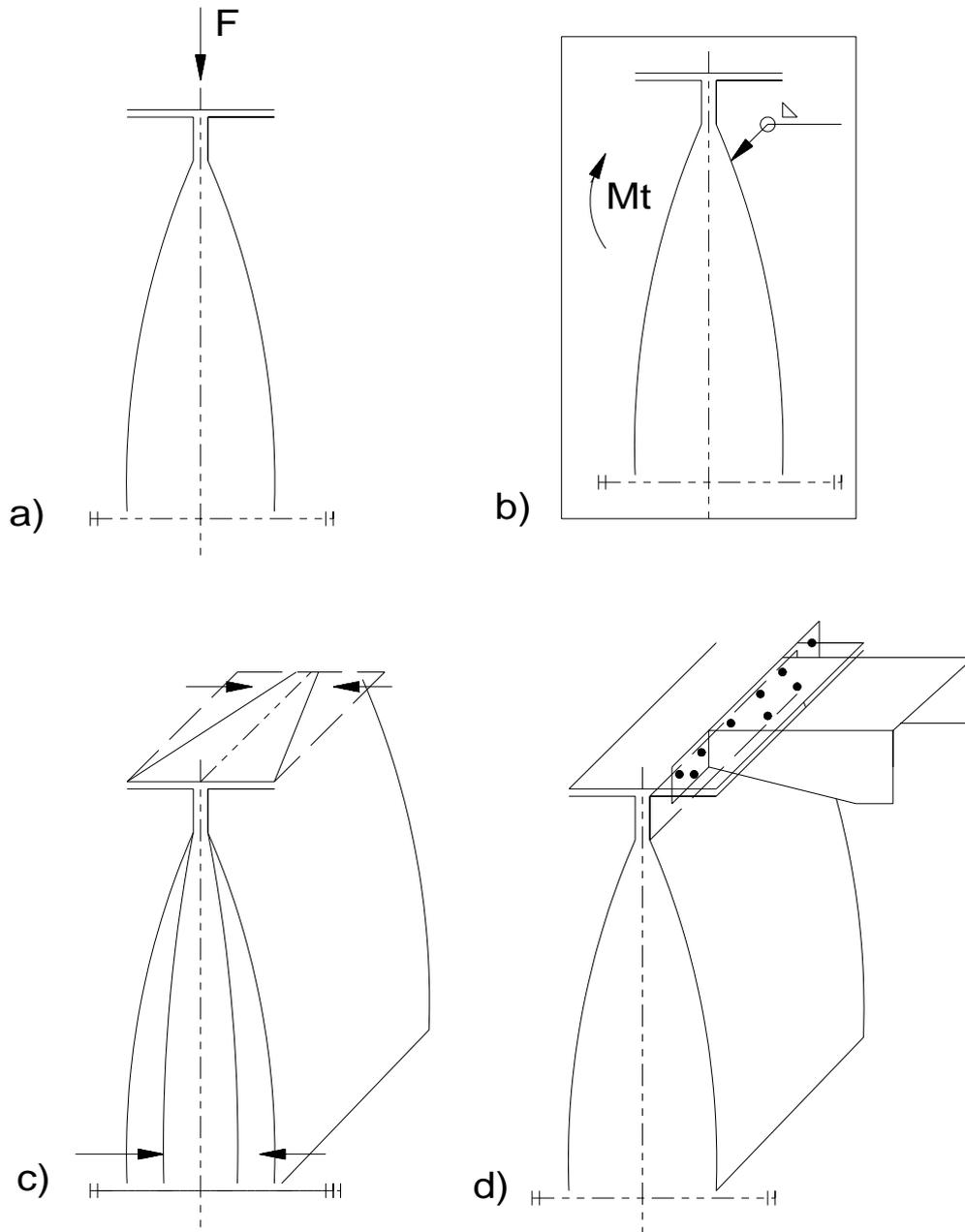


Abbildung 67: Gestaltungsregeln für Profile aus leichten Stahlrohren

4.2 Durch Walzen gefügte Tailored Blanks aus Aluminium und Stahl

Einführung

Die bisherigen Hybrid Blanks werden im Wesentlichen mittels Laserschweißens überlappend gefügt. Überlappnähte sind für Tailored Blank Anwendungen nur mit Einschränkungen nutzbar. Problematisch sind auch die interkristallinen Zonen im Bereich der Fügestelle, die eine Umformung erschweren und das Dauerfestigkeitsverhalten einschränken.

Völlig neue Möglichkeiten eröffnen sich jedoch, wenn die Fügung zwischen Aluminium und Stahl nicht auf einem Verfahren des Schmelzschweißens beruht, sondern im Wesentlichen durch eine Verfahrensvariante des Kaltpressschweißens erzeugt wird. Beim Kaltpressschweißen wird die Verbindung zwischen den Fügepartnern unterhalb der Schmelztemperatur des niedrigschmelzenderen Materials gebildet. Kaltpressschweißen ist für massive Querschnitte und ähnliche Materialien ein anerkanntes Fügeverfahren. Bisherige Versuche mit Stahl – und Aluminiumwerkstoffen erfolgten jedoch mit massiven Querschnitten, mit geringlegierten Werkstoffen und mit geringer Werkstofffestigkeit. Zur weiteren Entwicklung von Hybrid Blanks wurde daher nach möglichen Verfahrensvarianten des Kaltpressschweißens gesucht.

Voruntersuchungen

Für Referenzverbindungen wurden Reibschweißproben aus den Vormaterialien der zu untersuchenden Tiefziehgüten gefertigt. Die Vormaterialien der Tiefziehgüten werden benutzt, da die Materialstärke der Tiefziehbleche unterhalb eines für das Reibschweißen sinnvollen Anwendungsbereiches liegt. Das Reibschweißen ist als Verfahren für die zugrunde liegenden Geometrien und Verbindungsaufgaben in der Industrie etabliert. Die Reibschweißverbindung ergibt den anzustrebenden Grenzwert der Bindefestigkeit für die Aluminium-Stahl-Verbindung an. Als Verfahren wurde das Rotationsreibschweißen ausgewählt.

Durch Rotationsreibschweißen lassen sich vielfältige Aluminiumlegierungen mit unterschiedlichsten Stählen verbinden. Hier gibt es inzwischen auch sehr zahlreiche Praxisanwendungen. Probleme bereiten jedoch die manganhaltigen Aluminiumlegierungen. Hier lassen sich keine Reibschweißverbindungen mit reproduzierbaren Festigkeitswerten herstellen. Der Einfluss des Mangans ist aber bis heute, auch durch Schweißfachleute noch nicht vollständig aufgeklärt.

Bei der Rotationsreibschweißung wird die Fügestelle des Aluminiumteils durch das rotierende Stahlteil bearbeitet. Durch den gleichzeitig aufgebrauchten axialen Druck

kommt es zu einer Erwärmung der Fügepartner. Das Aluminium beginnt zu fließen und bildet eine Reibschweißtulpe. Durch die Stahlabdeckung während des Reibschweißvorganges wird die Aluminiumfügestelle vor Luftsauerstoff geschützt.

Das Linearreibschweißen ist für eine Verbindung zwischen Stahl und Aluminium weniger geeignet, da die Fügeflächen bei der linearen Bewegung nicht permanent abgedeckt sind und der Luftsauerstoff in die frisch aktivierten Oberflächen eingetragen wird.

Für das Forschungsvorhaben wurden die folgenden Reibschweißversuche an den Aluminiumlegierungen AlMg5Mn und AlMg0,4Si1,2 durchgeführt. Ein Beispiel für eine solche Fügung zeigt der metallografische Längsschliff einer Schweißtulpe.

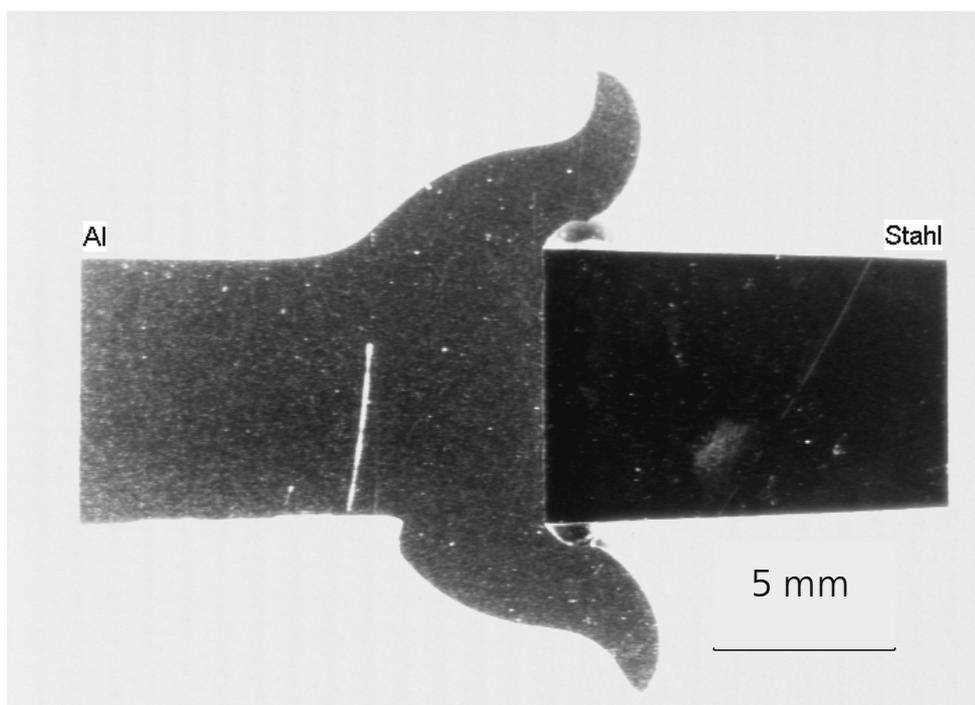


Abbildung 68: Reibschweißtulpe im Längsschliff

Da die Mn-haltige Al-Legierung jedoch keine reproduzierbaren Ergebnisse beim Reibschweißprozess liefert, wurde auf die Legierung AlMg0,4Si1,2 gewechselt. Diese aushärtbare Aluminiumlegierung ist sehr gut für Reibschweißprozesse geeignet. Es ergaben sich jedoch Schwierigkeiten aufgrund der Qualität des Vorbandmaterials. Die aus diesem Material gewonnenen Reibschweißproben, rissen während der Schweißung auf (Krokodileffekt). Deshalb wird nachfolgend die Aluminiumlegierung AlMgSi1 als Reibschweißpartner für den Stahl ZStE180BH verwendet. Die Zugversuchseigenschaften des Ausgangsmaterials für die Reibschweißproben sind in der folgenden Tabelle ersichtlich.

Vorbandmaterial	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
ZstE 180 BH	209	215	305	36,0
Al Mg Si 1	69	290	311	12,5

Tabelle 4: Festigkeiten des Ausgangsmaterials

Der Aluminiumpartner zeigt eine deutlich höhere Dehngrenze und vergleichbare Zugfestigkeit zum Stahl. Es wurden Reibschweißverbindungen mit verschiedenen Oberflächenmodifikationen hergestellt. Dabei beschränkte man sich auf eine Variation der Verbindungsoberfläche des Stahlpartners, da der Aluminiumpartner starken Materialfluss an der Fügestelle zeigte; die Stahlseite blieb beim Fügen makroskopisch unbeeinflusst (Abbildung 68). Die Zugfestigkeiten dieser Reibschweißverbindungen zeigt Tabelle 5.

Stahloberfläche vor dem Reibschweißen	Zugfestigkeit R _m [MPa] (2 Versuche)	Bemerkungen
gedreht	167 172	
geschliffen	219 171	
sandgestrahlt	34 30	Sandeinschlüsse in Reibschweißflächen
kugelgestrahlt	52 44	

Tabelle 5: Festigkeiten der Reibschweißproben

Die gedrehten bzw. geschliffenen Stahloberflächen zeigen die höchsten Verbindungsfestigkeiten. Die niedrigeren Festigkeiten nach Sand- und Kugelstrahlen sind darauf zurückzuführen, dass Strahlpartikel in der Fügefläche zurückbleiben und die Verbindung stören.

Abbildung 69 zeigt das Härteprofil quer zur Schweißnaht einer reibgeschweißten Stahl-Aluminiumverbindung. Auf der Aluminiumseite fällt der Härtewert nahe der

Fügestelle deutlich von ca. 120 HV 0,2 auf 80 HV 0,2 ab, während auf der Stahlseite ein leichter Anstieg zu verzeichnen ist. Die Ursache dafür ist die starke örtliche Erwärmung des Aluminiumpartners, die zu Versetzungsabbau und Überalterungsvorgängen führt.

Um die Festigkeit der Fügestelle beurteilen zu können, muss die lokal erniedrigte Festigkeit des Aluminiums nahe der Fügestelle als Referenz benutzt werden. Diese beträgt laut den gemessenen Härtewerten ca. 35 % weniger als im Grundmaterial. Eine Abschätzung der Festigkeit des Aluminiumpartners führt zu einem Referenzwert von ca. 200 MPa (65% von $R_m \approx 310$ MPa). Vergleicht man diese mit den Festigkeiten der Reibschweißverbindungen (geschliffen und gedreht;), so erreicht man Verbindungsfestigkeiten von mindestens 80 % des schwächeren Partners.

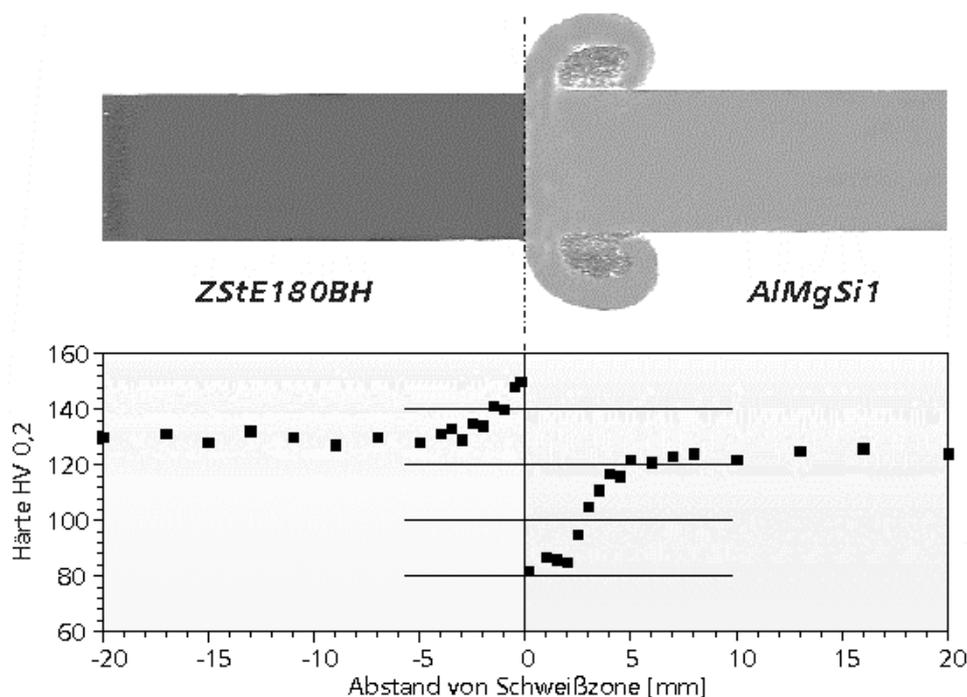


Abbildung 69: Härteverlauf in der Reibschweißzone

Für die Analyse der Reibschweißproben wurden die Proben durch einseitiges Schleifen und Polieren (Korngröße $3 \mu\text{m}$) präpariert. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf den Bereich der Grenzfläche. Dieser erscheint in den verschiedenen Mikroskopiearten unterschiedlich breit: In den Video - Photos ist der optisch sichtbare Bereich ca. $20 \mu\text{m}$ breit (Abbildung 70). In den PEEM- Aufnahmen beträgt die Breite ca. $50 \mu\text{m}$ (Abbildung 72), während die REM / WDX Untersuchungen einen Grenzbereich von ca. $10 \mu\text{m}$ erkennen lassen (Anhang – Bilder 4-6).

Die polierten Scheiben sind in einer Video-Mikroskop-Aufnahme in Abbildung 70 gezeigt. Die Grenzfläche ist zwischen den beidseitigen tulpenähnlichen

Ausstülpungen als breiter Strich zu erkennen. Im Ausschnitt (Abbildung 71, $500\ \mu\text{m}$) erkennt man einen ungleichmäßigen Verlauf, die Breite beträgt ca. $20\ \mu\text{m}$.

Entsprechend präparierte Proben wurden mit PEEM und REM / WDX untersucht. Für die PEEM Untersuchungen (Abbildung 72) wurde der Schrägschliff im Ultrahochvakuum gesputtert und mit einem Photoelektronen-Emissionsmikroskop (PEEM) untersucht. Ein Bild dieser Aufnahmevariante ist in Anlage – Bild 2 oben rechts zu erkennen. Auf der linken Bildhälfte ist hell die Aluminiumseite zu erkennen. Die Stahlseite auf der rechten Seite erscheint dunkel. Auffällig ist die sog. Mikroverzahnung, wobei stets Aluminium in die Eisenmatrix eindringt. Diese „Aluminium-Zähne“ sind etwa $20\ \mu\text{m}$ groß und erscheinen alle $100 - 200\ \mu\text{m}$ an dem Aluminium-Eisen-Interface.

Des Weiteren wurden am Synchrotron (BESSY-I / HE-TGM 2) Photoelektronenspektren von unterschiedlichen Bereichen des Al-Stahl-Interfaces aufgezeichnet (schwarze, rote und grüne Kurve in Anlage – Bild 2). Diese wurden zum einen auf der Stahl-Seite (schwarz, Kreis 1) und auf der Al-Seite (rot, Kreis 2) nahe dem Interface und zum anderen ca. $70\ \mu\text{m}$ weit vom Interface auf der Al-Seite (grün, Kreis 3) aufgenommen. Darin zu erkennen ist zum einen, dass sowohl noch Al auf der Stahl-Seite (Al-2p in schwarzer Kurve) als auch Eisen auf der Al-Seite (Fe-3p in roter und grüner Kurve) zu finden sind. Auf der Al-Seite liegt das Aluminium größtenteils als Al_2O_3 vor (hoher Anteil oxidisch verschobenem Al-2p gegenüber wenig unverschobenem, metallischen Al-2p in roter und grüner Kurve). Dieses korreliert mit dem Vorhandensein von Sauerstoff (O-2s und O-2p) besonders auf der Al-Seite (rote und grüne Kurve). Die Verschiebung des Fe-3p-Peaks als auch die Intensitätsüberhöhung auf der Al-Seite (man beachte die Anhebung der schwarzen Kurve um den Faktor 4 und die der grünen um den Faktor 10) deuten auf eine Legierungsbildung zwischen Al und Fe auf der Al-Seite nahe dem Interface hin! Die NEXAFS-Spektren im Bereich der O1s-Absorptionskante (Anlage – Bild 1) zeigen auf der Grenzfläche deutlich höhere Sauerstoffanteile auf der Al-Seite, während die Stahl-Seite nahezu frei von Sauerstoff ist.

Die REM Aufnahmen (Anlage – Bilder 3-6) lassen die Grenzfläche deutlich erkennen, mit einer Breite von ca. $10\ \mu\text{m}$. Die Elementverteilung des in Anlage – Bild 3 gezeigten Ausschnittes wurde mit WDX bestimmt. Die Anlage – Bilder 4-6 zeigen die Verteilung der O $K\alpha$, der Al $K\alpha$ und der Fe $L\beta$ - Röntgenemissionen. Deutlich werden Verzahnungen im Fe sichtbar, die mit Al aufgefüllt sind. Die Daten lassen schließen, dass beim Reibschweißen die härtere, spröde Fe-Seite aufgebrochen wird. Al, aufgrund der hohen Temperatur im Grenzbereich flüssig, dringt beim Anpressen in die Ritzen ein. Fe-Bruchstücke werden im Hochtemperaturbereich des Al eingebettet.

Durch die kurzzeitig hohe Temperatur kann Al in die Fe-Matrix eindiffundieren. In diesem Bereich ist der Kontrast im PEEM zu erkennen.

Aus den PEEM-Valenzbandspektren an der Grenzfläche (\varnothing ca. $30 \mu\text{m}$) ergibt sich eine Legierungsbildung Fe-Al. Die Rolle des Sauerstoffs im Grenzbereich konnte nicht vollständig eindeutig geklärt werden. Die beobachtete Anreicherung im PEEM kann durch eine nicht vollständig entfernte Oberflächen- Oxidation verursacht worden sein. In Übereinstimmung mit der im WDX gefundenen O-Anreicherung kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass ein FeAl-Mischoxid die Grenzfläche bildet. Diese experimentellen Befunde lassen folgende Ursachen für eine stabile Haftung erkennen:

- mechanische Mikroverzahnung
- Al-Diffusion in das Fe
- Legierungsbildung im Grenzbereich



Abbildung 70: Videoaufnahme eines metallographischen 45°-Schliffs in der Fügeebene - Ansicht der Schweißtulpe bei einer Reibschweißverbindung

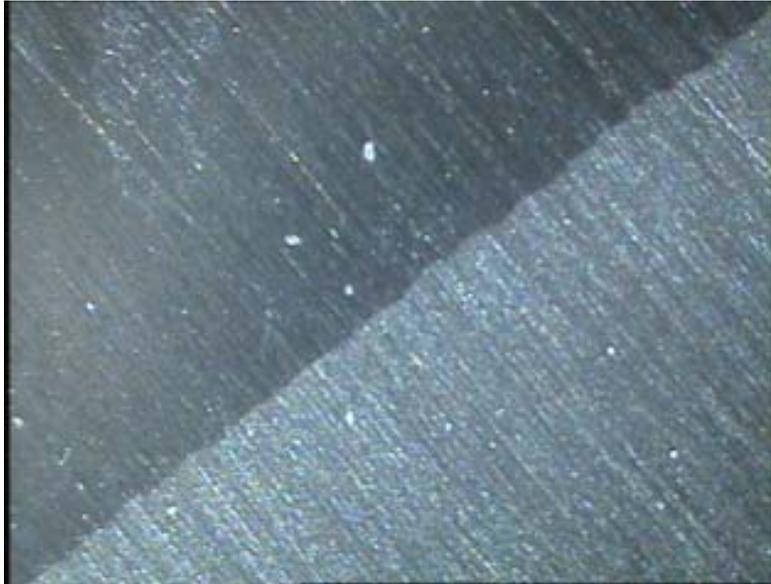


Abbildung 71: Starke plastische Verformung auf der Seite des Aluminiumpartners (Trennebene Aluminium / Stahl)

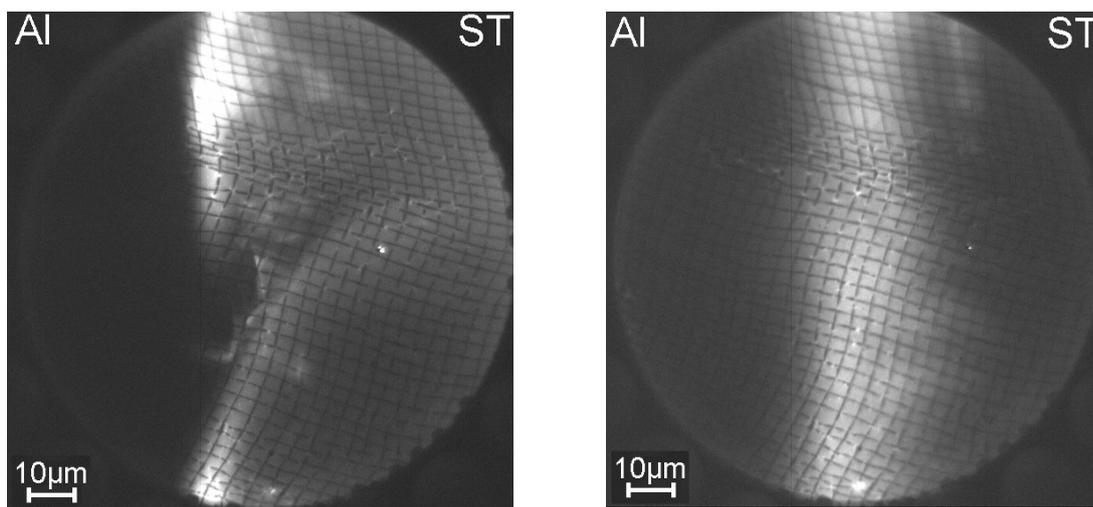


Abbildung 72: PEEM Aufnahmen eines Stahl - Aluminium Schrägschliffs μ - Verzahnung von Al

Kaltpressschweißen

Beim Kaltpressschweißen werden Metalle bei Raumtemperatur miteinander verbunden. Die Arbeitstemperatur der Werkstoffe liegt dabei unterhalb der Rekristallisationsschwelle. Das Verfahren beruht darauf, dass zwischen den festen metallischen Werkstoffen atomare Bindekräfte wirksam werden, im Idealfall ohne die Anwendung von Druck, Verformung oder Temperatur. Dies ist möglich wenn:

- spiegelbildlich gleiche Oberflächen bis hinab zu atomaren Abständen im Nahtbereich vorliegen
- keine Fremdschichten (gasförmig, flüssig oder fest) auf diesen Oberflächen vorhanden sind
- eine Annäherung der Körper bis auf atomare Abstände erfolgt.

Da dieser Idealfall in der industriellen Praxis nicht erfüllt ist, müssen unter der Anwendung von Druck und Verformung diese Voraussetzungen einer Kaltverschweißung erzeugt werden.

Durch die Verformung der Werkstoffe sollen die auf der Oberfläche befindlichen Fremdschichten aufgerissen werden. Der zusätzlich aufgebrachte Druck soll die so entstandenen metallisch reinen Oberflächen im Nahtbereich vor dem Eindringen von Luftsauerstoff schützen, um weitere Oxidation auszuschließen und die Oberflächen der Fügepartner so weit annähern, dass die atomaren Bindekräfte der Metalle wirksam werden, folglich passen sich die Nahtflächen durch die damit verbundene Verformung gegenseitig an, so dass ein gemeinsames Oberflächenrelief entsteht. Dieses Oberflächenrelief ist nicht unbedingt eben, wodurch sich das Material in der Nahtzone verzahnen kann und so zusätzlich zur Festigkeit in der Verbindungszone beiträgt.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Verbindung ist die gründliche Entfernung der Deckschichten wie Fette und Oxide durch chemische und mechanische Reinigung. Die nach der Reinigung vorliegenden reinen Metalloberflächen bilden sofort wieder neue Oxidschichten, welche dann durch die nachfolgende Verformung wieder aufgerissen und durch die dabei größer werdende Kontaktfläche im Nahtbereich verteilt bzw. aus diesem durch Materialfluss herausgetragen.

Das Kaltpressschweißen eignet sich neben der Verbindung von artgleichen oder ähnlichen Werkstoffen besonders gut für das Fügen artverschiedener Metalle. Durch das Schweißen bei Raumtemperatur bilden sich bei ungleichen Metallen keine unerwünschten spröden Zwischenschichten, wie sie beim Schmelzschweißen von artverschiedenen Metallen entstehen.

Zum Kaltpressschweißen existieren bekannte und anerkannte Verfahren. Diese können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Einmal in Kaltpressschweißen mit plastischer Deformation und zum zweiten mit zusätzlicher Bewegungskomponente. Zu ersteren zählt das Kaltpressschweißen mittels Fließpressen, Stauchen und Walzen. In der zweiten Gruppe wird zwischen überlagerter Rotation bzw. Translation beim Kaltpressschweißen unterschieden[142].

Zum Kaltpressschweißen von Blechen, speziell von Stahl- und Aluminiumblechen, mit einer überlagerten Bewegungskomponente, finden sich nach bisherigen Recherchen in der industriellen Nutzung keine Anwendungen. Untersuchungen im Bereich der Forschung zum rationellen Einsatz des Kaltpressschweißens mit Überlagerung einer zusätzlichen Bewegungskomponente finden sich unter anderem bei *D'Angelo* und *Schur*[142].

Das klassische Kaltpressschweißen eignet sich jedoch nur bedingt zur Herstellung von Aluminium – Stahl – Tailored - Blanks, da im Bereich der Fügestelle sehr große Umformungen und damit verbunden große Kerben auftreten. Eine Optimierung der Fügestelle durch Materialanhäufung an den Ausgangsmaterialien oder durch Einfügen eines zusätzlichen Verbrauchers ist zurzeit technisch sehr aufwendig. Auch ein Verfahren, das die gefügten Abschnitte nach dem Kaltpressschweißen durch Walzen einebnet, kann noch nicht realisiert werden.

Nach den Voruntersuchungen wurden verschiedenen Untersuchungen zum Kaltpressschweißen von Stahl und Aluminium durchgeführt. Anfängliche Fügungen von Stahl und Aluminium mit stark strukturierten Oberflächen führten zwar zu einem partiellen Haften, nicht aber zu einer dauerhaften Verbindung. Die durch die Strukturierung vorhandene große Oberfläche konnte während des Fügevorganges nicht ausreichend vergrößert werden.

Als Fügeverfahren wurde eine Art Kaltpressschweißen ähnlich dem Flachstauchversuch untersucht, bei dem durch die Stauchung die Schaffung der oxidfreien Oberfläche der Fügepartner sowie der notwendige Fügedruck gewährleistet wurde. Die zu fügenden blechartigen Werkstoffe wurden nach mechanischer Oxidbeseitigung und Entfettung zwischen die Pressstempel des Fügewerkzeuges gelegt und gegen Lagerverschiebung fixiert. Dann wurden die Pressstempel zusammengefahren und eine Fügung durch ein Kaltverschweißen erzeugt.

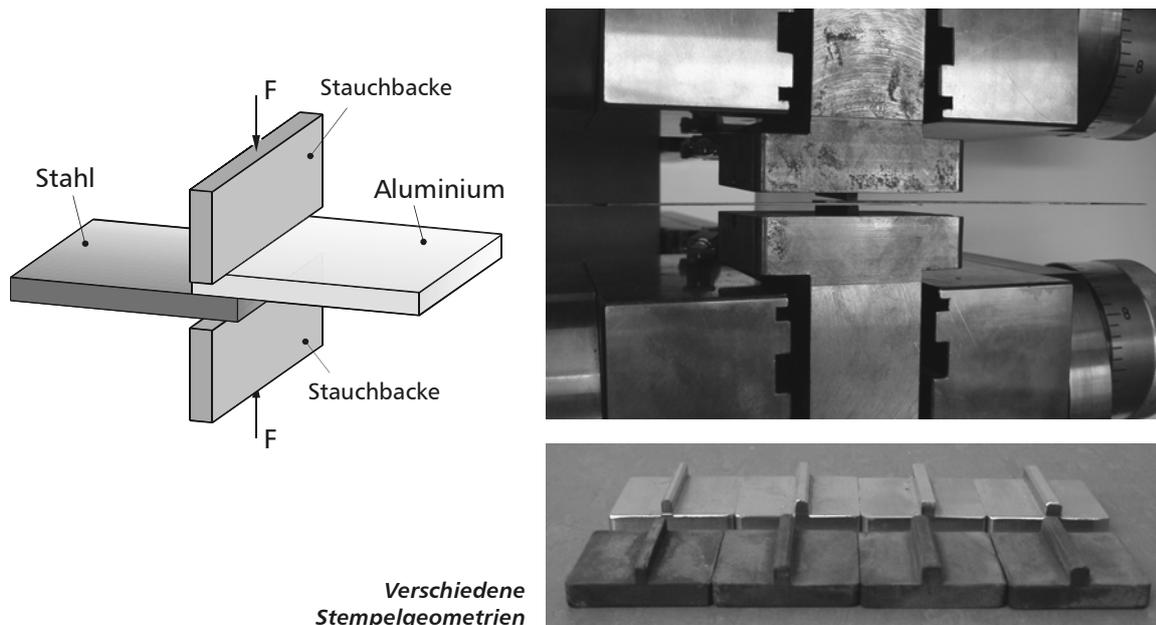


Abbildung 73: Verfahrensprinzip Pressschweißen mit Werkzeug und verschiedenen Stempelgeometrien

Die aus der Literatur bekannten Werte und Erkenntnisse konnten nur zum Teil auf unsere Versuche übertragen werden. Hauptursache dafür waren die verwendeten Stahl- und Aluminiumwerkstoffe, die in dieser Zusammensetzung, Wärmebehandlung und Festigkeit, so noch nicht untersucht worden waren. Jedoch konnten Ähnlichkeiten bei den dabei erreichten Ergebnissen mit der Fachliteratur bestätigt werden. Repräsentativ dafür ist die Abbildung 74.

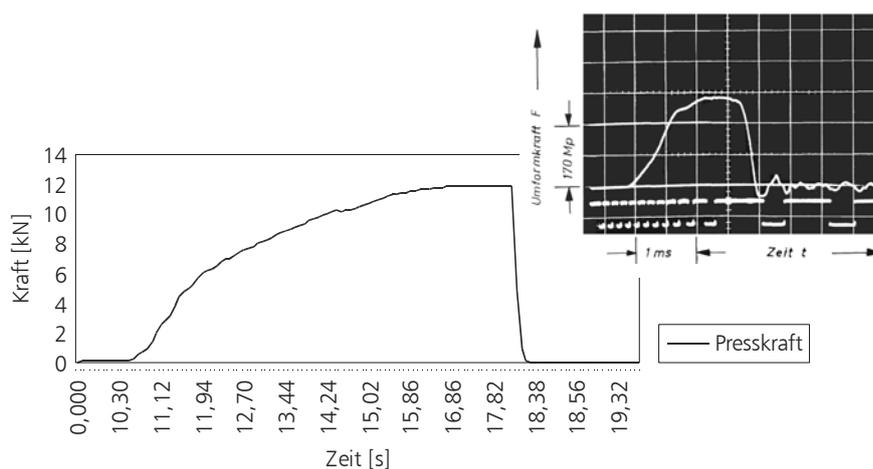


Abbildung 74: Exemplarischer Verlauf der Pressschweißkraft im Vergleich mit der Literatur

Die entstandenen Fügeverbindungen wurden bei Raumtemperatur ohne weitere Energiezufuhr hergestellt. Die Hauptparameter für die Fügung sind die gereinigten und aktivierten Oberflächen und der hohe Umformgrad von ca. 80 % zur Schaffung

der benötigten oxidfreien Oberflächen. Die folgenden Abbildungen zeigen kaltpressgeschweißte Stahl-Aluminiumverbindungen.

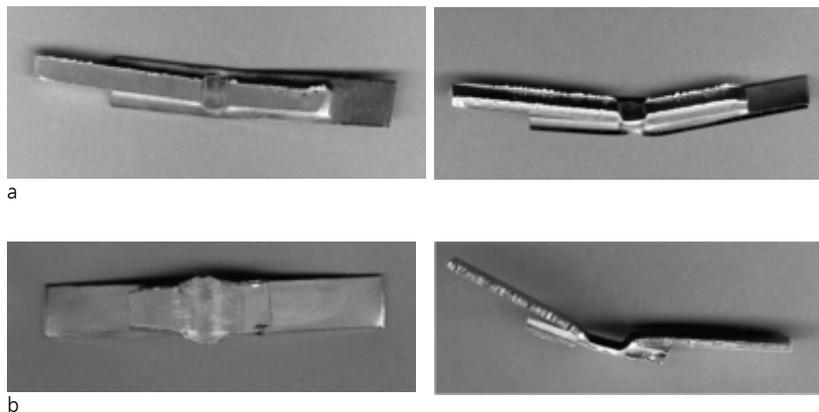


Abbildung 75: Kaltpressschweißproben aus AlMg0,4 Si1,2 und FE P04

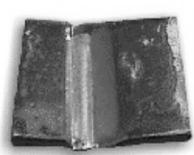
Im Rahmen der Versuche zum Pressschweißen sind verschiedene Parameter variiert worden. Materialeitig erwies sich die siliziumhaltige Aluminiumlegierung aufgrund ihrer Festigkeit als vorteilhafter. Bei den Prozessparametern wurden vor allem der Umformgrad und die Lage der Fügepartner variiert. In Verbindung mit der Breite des Pressstempels ergaben sich hierbei verschiedene Umformgrade bei der Pressschweißung.

Materialparameter

- verschiedene Werkstoffe
- Oberflächenrauigkeiten
- Oberflächenvorbereitung



- Oxidbeseitigung
- Aktivierung
- Reinigung



Prozessparameter

- Temperatur
- Querschnitt der Fügepartner
- Lage der Fügepartner
- Relativbewegung der Fügepartner
- Umformgrad
- Umformgeschwindigkeit

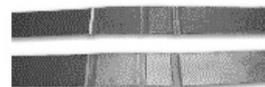


Abbildung 76: Parametervariation beim Pressschweißen

Besonderes Augenmerk gilt der Prüfung der Fügestelle. Hier wurden die Prüfparameter und ihre Beurteilung definiert, da keine genormten Prüfverfahren vorlagen. Das hauptsächlich angewandte Prüfverfahren ist ein Zugversuch, mit dem

die Scherzugfestigkeit der Verbindung ermittelt wurde. In Analogie zu Punktschweißverbindungen erweist sich auch hier der „Kopfzug“ als besonders schädlich. Dieser Kopfzug kann durch zwei Fügstellen nebeneinander erheblich reduziert werden. Sofern das Herstellen von zwei Fügstellen nacheinander erfolgt, führt der Materialfluss durch das Umformen nicht zu einer Bauteilverformung. Beim gleichzeitigen Fügen an zwei benachbarten Stellen tritt jedoch ein Materialfluss zwischen den Fügstellen auf. Nachteilig erweist sich auch, dass es in den bisherigen Fügungen zu einer starken Umformung der Fügstelle kommt. Daher sind Kerbspannungseinflüsse einerseits und Kaltverfestigungen andererseits nicht ausgeschlossen.

Die Festigkeitsprüfung einer doppelt gefügten Probe im Zugversuch ergab ein Versagen des Aluminiumwerkstoffes im Bereich der umgeformten Zone, direkt neben der Fügstelle. Die max. Zugkraft lag bei 800 N. Auf einem Messmikroskop wurde die Restbruchfläche von ca. 3,5 mm² bestimmt, so dass sich daraus eine Versagensspannung von ca. 225 N/mm² ergibt. Vergleicht man diese mit der Festigkeit der Fügstellen bei Reibschweißverbindungen, so ergibt sich für die beste Reibschweißung etwa die gleiche Festigkeit. Im Vergleich zur Ausgangsfestigkeit des Vorbandmaterials (ca. 300 N/mm²) liegt die Festigkeit nur bei etwa 75 %. Der hohe Umformgrad führt hierbei sowohl zu einer Materialverfestigung als auch zu einer Ermüdung und einer damit verbundenen Kerbempfindlichkeit des Aluminiumwerkstoffes [143].

Die an Kaltpressschweißverbindungen durchgeführten REM- und WDX-Untersuchungen sind in Anlage - Bild 7 gezeigt. Durch den hohen Umformgrad ist die Anfertigung der Proben für solche Untersuchungen sehr aufwendig. Die Grenzfläche verläuft deutlich geradliniger, im Vergleich zu den durch Reibschweißen hergestellten Al-Fe Verbindungen. Auffallend ist auch der hohe Sauerstoff-Anteil im untersuchten Bereich. An der Grenzfläche erhalten wir Sauerstoff-Fluoreszenz aus einem ca. 5 µm breiten Band. Lokale Sauerstoffcluster mit einem Durchmesser von ebenfalls ca. 5 µm treten aber auch im Bereich der Al-Seite auf.

Neben diesen signifikanten Unterschieden sind jedoch auch ausgeprägte Ähnlichkeiten zu den bisher untersuchten Reibschweißverbindungen vorhanden. An der Grenzfläche sind einzelne Mikro-Verzahnungen zu erkennen. Diese sind ausschließlich auf der Fe-Seite, Al dringt in diese Ausbrüche ein. Des Weiteren ist festzustellen, dass das Al-Signal im Fe deutlich weiter eindringt als umgekehrt. Dieses Ergebnis ist bemerkenswert, weil es anzeigt, dass eine Diffusion auftritt, obwohl die Umformung bei Raumtemperatur durchgeführt wurde.

Umfangreiche Untersuchungen der Reibschweißverbindungen sowie eine große Anzahl von Versuchen ergaben die notwendigen technologischen Bedingungen, unter denen prinzipiell eine Kaltschweißverbindung entsteht. Dabei wurde berücksichtigt, dass keine zusätzliche Energie der Fugestelle zugeführt wird. Zu den wesentlichen Bedingungen für das sichere Entstehen der Fügeverbindung gehören aktivierte, möglichst oxidfreie Oberflächen. Da vollständige Oxidfreiheit der Oberflächen nur mit hohem technischem Aufwand gewährleistet werden kann und daher wenig praxisrelevant ist, wurden die Versuche mit gereinigten, aber nicht vollständig oxidfreien Proben fortgesetzt. Diese Proben ergaben sichere Kaltschweißverbindungen, wenn während der Fügung mindestens 50 % neue, oxidfreie Aluminiumoberfläche entsteht.

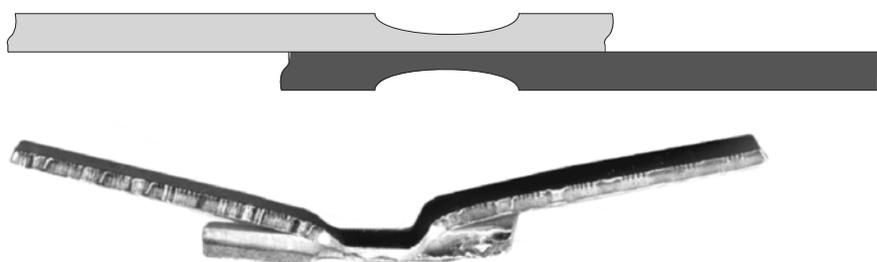


Abbildung 77: Schematische Darstellung und reale Fügeverbindung des Kaltpressschweißens [144]

Durch den großen Umformgrad beim Kaltpressschweißen kommt es am Verbindungsrand zu Fließerscheinungen der Fügepartner. Die auftretende Reibung am Pressstempel bewirkt eine Verformung der überstehenden Enden. Diese Verformung verstärkt sich durch Instabilitäten im Fügewerkzeug.

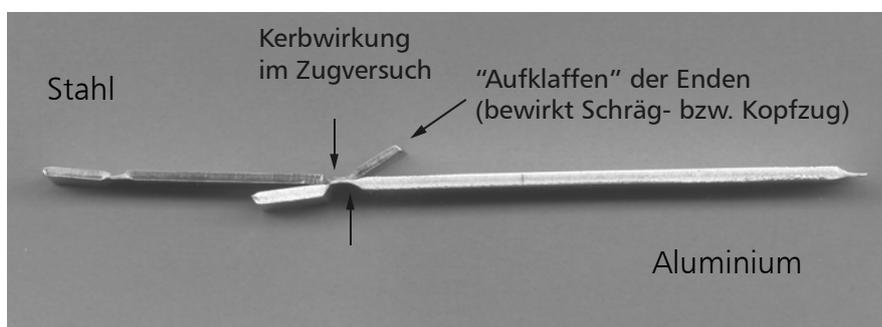


Abbildung 78: Fügstellen mit Kerben und klaffenden Enden.

Betrachtet man die Stahl– Aluminium – Fügeverbindung als symmetrische Probe mit Flachkerbe, dann lässt sich nach *Dubbel* [163] die Formzahl der vorhandenen Flachkerbe ermitteln. Die Gesamtkerbwirkung unter Berücksichtigung der Formzahl,

der entstehenden Oberflächenrauigkeit sowie der Probengröße beträgt etwa 1,5 und ist vor allen von der Stärke der Ausgangsmaterialien abhängig. Diese Kerbwirkung reduziert die erreichbare Festigkeit auf ca. 66 % der Ausgangsfestigkeit des schwächeren Materials. Dies schlägt sich vor allem im Versagen der Probe neben der Fügestelle wieder. Der Einfluss des Kopfzuges kann durch Verwendung von Niederhaltern während der Fügung reduziert werden, ist aber bezogen auf die Kerbwirkung gering. Zur Erhöhung der Verbindungsfestigkeit wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Dazu gehörten:

- Maßnahmen zur Reduzierung des Oxids
- Untersuchungen des Fügevorganges
- Maßnahmen zum Einbringen zusätzlicher Energie.

Durch Videoaufzeichnung des Pressschweißvorganges konnte eine werkzeugbedingte Relativbewegung der Pressbacken festgestellt werden. Diese Relativbewegung schwächt den Materialzusammenhalt in der Fügestelle. Die Relativbewegung kann die entstandene Fügeverbindung vor allem bei kleinen Fügequerschnitten zerstören. Weitere Untersuchungen wurden daher mit einem geänderten Werkzeug fortgeführt, bei dem diese Relativbewegung der Pressbacken durch entsprechende Führungen unterbunden wurde.

Für die Zuführung zusätzlicher Energie in den Fügevorgang bzw. für einen verbesserten Fügevorgang wurden verschiedene Varianten des Pressschweißens diskutiert. Mögliche Verfahren zeigt die folgende Abbildung:

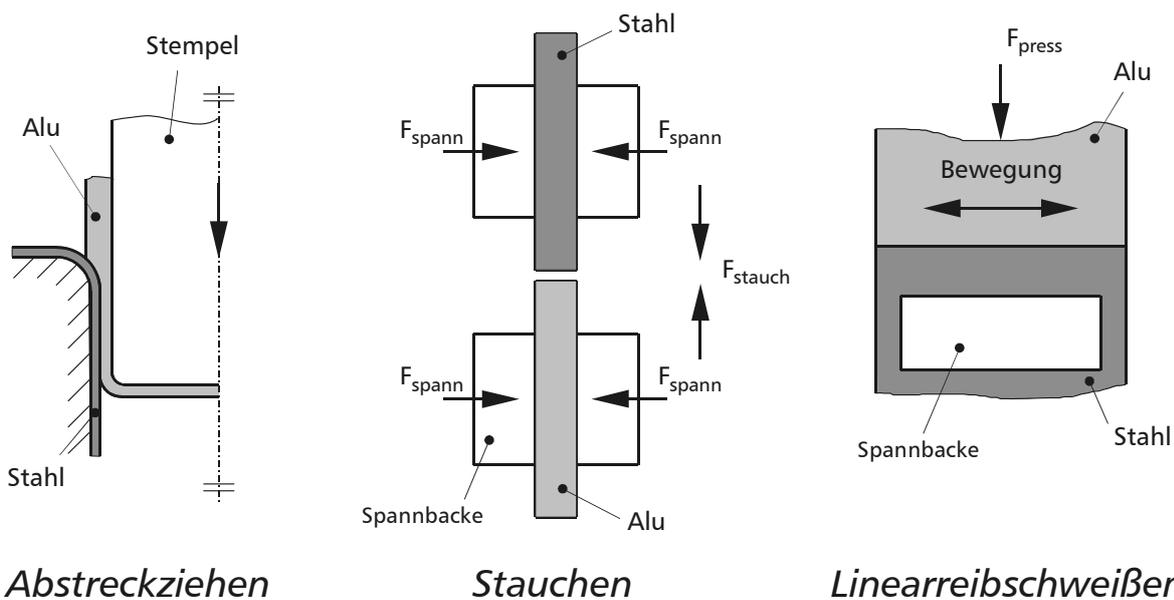


Abbildung 79: Verfahrensvarianten

Ermittlung von Prozessfenstern beim Kaltpressschweißen

Im Rahmen der Kaltpressschweißuntersuchungen wurden durch eine Vielzahl von Versuchen verschiedene Parameter ermittelt und Prozessfenster erstellt, in denen eine sichere Fügung der Stahl– Aluminium– Verbindungen erfolgt. Diese Prozessfenster sind neben den geometrischen Größen auch von der Fügegeschwindigkeit abhängig. Die notwendige Fügekraft ergibt sich aus dem Versagenswert R_m (Bruchspannung) des Aluminiums. Aufgrund des Stauchvorganges und der damit verbundenen Umformung ergibt sich die notwendige Fügekraft aus dem ca. verdoppelten R_m -Wert.

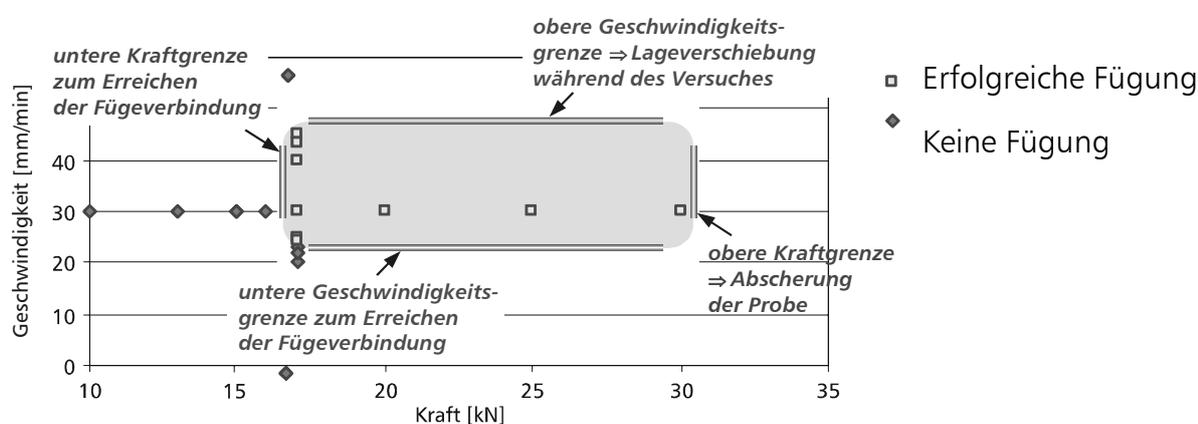


Abbildung 80: Prozessfenster für Kaltpressschweißverbindungen

Während die Kraftgrenzen als Material- und Fügeflächenabhängig charakterisiert wurden, sind die Geschwindigkeitsgrenzen vor allem maschinenbedingt. Eine gewisse Mindestgeschwindigkeit zum Fügen ist gleichzusetzen mit einem Zeitanteil, bei dem die Aluminiumprobe schon wieder oxidiert. Allein an diesen beiden Zusammenhängen ist der komplexe Mechanismus des Kaltpressschweißens erahnbar. Weitere Prozessfenster befinden sich im Anhang. (Anhang – Bilder 8 – 13)

Insgesamt ergaben die Untersuchungen zum Kaltpressschweißen, dass Halbzeuge aus Stahl – Aluminium hergestellt werden können, welche z.B. durch Walzen, zu Zweistoff-Tailored-Blanks weiterverarbeitet werden können. Vor allem durch Effekte der Warmauslagerungsbehandlung konnte eine zusätzliche Erhöhung der Verbindungsfestigkeit erreicht werden.

Walzen

Die Fügung durch Kaltpressschweißen ist zurzeit auf schmale Querschnitte beschränkt, so dass sich die Suche nach einer stoffschlüssigen Fügeverbindung an bekannten Fügeverfahren orientiert. In Anlehnung an das Quetschnahtschweißen wurde ähnlich dem Rollnahtschweißen das Quetschnahtwalzen erprobt.

Beim Quetschnahtwalzen werden die überlappenden Fügepartner durch ein schmales Walzenpaar so stark umgeformt, dass eine Haftung in der Verbindungsstelle eintritt. Die hohen örtlichen Umformungen bedingen jedoch einen Materialfluss entlang der Fügestelle und damit ein Auseinanderklaffen der Verbindungspartner, so dass auch dieses Verfahren auf schmale Fügstellen begrenzt ist.

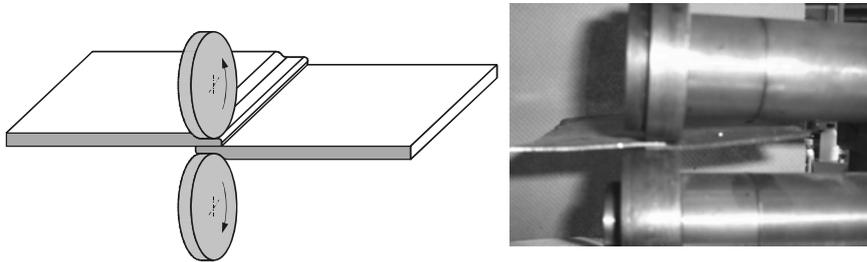


Abbildung 81: Verfahrensprinzip Quetschnahtwalzen [144]

Da die Fügestelle beim Kaltpressschweißen stets als Kerbe bei den verwendeten blechartigen Halbzeugen entsteht, kann diese Kerbwirkung nur durch eine nachfolgende Dickenreduzierung gemindert bzw. beseitigt werden. Für diese Dickenreduzierung kommen prinzipiell mehrere Umformverfahren in Betracht. Zum einen kann durch Pressen eine Dickenreduzierung erfolgen, zum anderen ist auch ein Walzen möglich. Alternativ ist auch eine Verwendung spezieller Halbzeuge denkbar. Diese Halbzeuge müssten dann im Bereich der Fügestelle eine erhöhte Blechstärke aufweisen.

Beim Pressen waren der gewünschte Materialfluss und eine gleichmäßige Einebnung beider Materialien nicht möglich. Der dickenreduzierte Verbund war ungleichmäßig sowohl in seiner Materialstärke als auch in seinen äußeren Konturen. Der Walzvorgang führte zu einem optisch besseren Ergebnis, problematisch war jedoch der Walzbeginn, der in der Fügestelle liegen und ein gleichmäßiges Ausstrecken der vorhandenen Kerbe bewirken sollte.

Bei der Verbindung von Aluminium und Stahl durch das Verfahren Umformen durch Walzen findet eine Prozesskopplung zwischen Umformen und Oberflächenbeschichten statt. Dabei werden beide Metalle durch den hohen Umformdruck und die hieraus resultierende plastische Formänderung fest miteinander verbunden. Die wichtigste Voraussetzung für eine gute Haftung der Partner ist die Vorbehandlung zur Erzielung eines völlig fettfreien und metallisch

sauberen Oberflächenzustandes. Das Aluminium wird letztlich gebürstet, um die Oxidschicht zu beseitigen und die Oberfläche zu aktivieren.

Die Haftung zwischen Aluminium und Stahl wird sehr stark vom aufgetragenen Walzdruck, der Walztemperatur und den verwendeten Materialien und deren Oberflächenzustand beeinflusst. Als Aluminiumwerkstoff wird die Konstruktionslegierung AlMgSi 1 (6082) verwendet. Bei der Wahl des geeigneten Stahlpartners für diese Versuche wurde zu der vakuumberuhigten Variante St 2 übergegangen. Damit soll der Effekt der Bildung von unerwünschten intermetallischen Verbindungen in der Bindeebene verhindert werden. Positive intermetallische Verbindungen vom Typ Al_5Fe_2 sind dagegen für die Haftung verantwortlich, sie entstehen durch Diffusionsprozesse, die durch Relativbewegung, hohen Walzdruck und bei einer erhöhten Temperatur begünstigt ablaufen.

Zur Prüfung der Verbindungsfestigkeit der gefertigten Aluminium - Stahl - Verbindungen, wurde deren Haftfestigkeit im Scherversuch getestet. Hierzu wurden zuerst einmal verschiedene Probengeometrien erarbeitet und auf ihre prinzipiellen Fügbarkeit getestet. Die geeignete Geometrie der Walzrohlinge, um vorrangig hohe Haftscherfestigkeiten zu erreichen, ist in Abbildung 82 abgebildet.

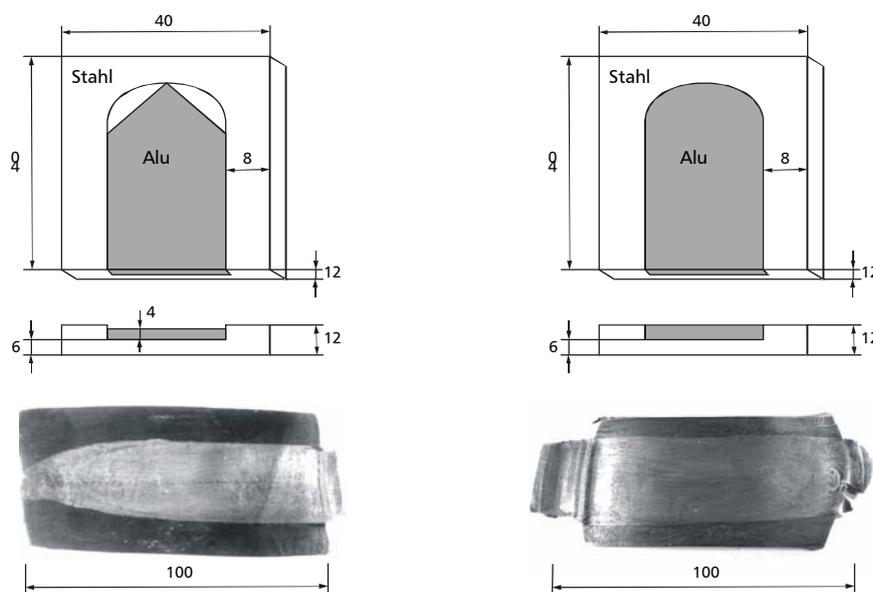


Abbildung 82: Probengeometrien und erste Ergebnisse zum Fügen durch Walzen

Die prinzipielle Machbarkeit eines Fügens durch Walzen und die dabei erreichten Verbindungsfestigkeiten dienen als Grundlagen für die Verfahrensentwicklung des Fügens durch Walzen von Aluminium-Stahl-Tailored-Blanks. Dabei wurde die Fügstelle aus sich überlappenden Aluminium- und Stahlblechen gebildet und

gemeinsam gewalzt, so dass sich die Fügestelle parallel zu den Walzenachsen verläuft.

Optisch einwandfreie Verbindungen konnten erst mit einer Walztemperaturerhöhung bis auf ca. 400 °C erreicht werden. Nach dem Walzvorgang wurden Flachzugproben in Walzrichtung entnommen und die Haftscherfestigkeit in Abhängigkeit des Umformgrades und der Variation einer Endwärmebehandlung ermittelt. Die abgebildeten Zugproben sind mechanisch durch Fräsen so weiterbehandelt worden, dass die eigentliche Fügestelle für den Zugversuch frei lag.

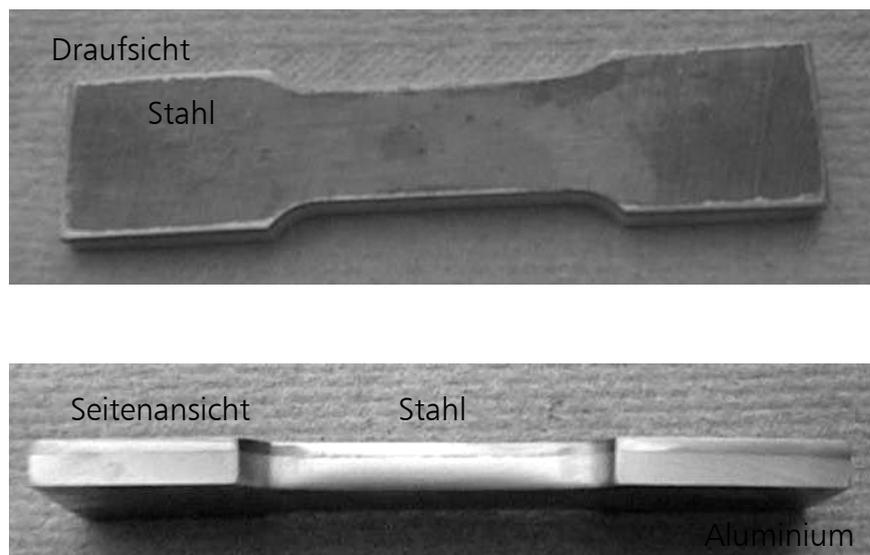


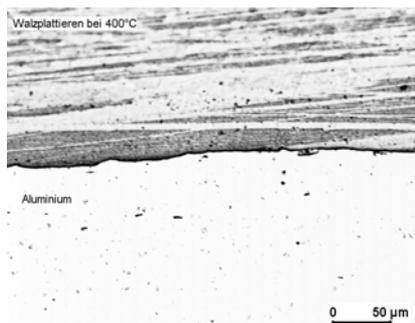
Abbildung 83: Flachzugprobe aus Aluminium-Stahl-Verbund

Zur Bestimmung der Haftscherfestigkeit wurden beide Partner bis zu einer definierten Fläche abgefräst und die Proben in der Universalprüfmaschine zerrissen. Die Variation des Walzumformgrades ergab bei Umformung bis zu 20 % Haftscherfestigkeiten von ca. 35 MPa. Im Bereich 30 – 50 % Walzumformung konnte die Verbindungsfestigkeit auf ca. 50 MPa erhöht werden.

Der Versuch einer Wärmebehandlung im Anschluss an das Walzen im Bereich von 165 °C bis 240 °C ergab einen günstigen Einfluss auf die Scherfestigkeit. Die Wärmebehandlung von 8 Stunden 165 °C, die gleichzeitig der Auslagerungstemperatur für den höchstfesten Zustand der Aluminiumlegierung darstellt erwies sich als optimal. Die Haftscherfestigkeit konnte um ca. 10 MPa auf 60 MPa gesteigert werden. Durch Wärmebehandlungen bei höheren Temperaturen fiel die Verbindungsfestigkeit wieder stark ab. Um die Umformenergie beim Walzprozess stärker in die Bindeebene zu übertragen, wurden Versuche mit verschiedener Auflagedicke des Aluminiums durchgeführt.

3 mm Stahl wurden mit 2, 3, 4 und 5 mm dicken Aluminiumblechen gewalzt. Die geringeren Auflagedicken von 2 – 4 mm bewirkten – gekoppelt mit der optimalen

Endwärmebehandlung eine reproduzierbare Haftscherfestigkeit von 85 MPa. Zieht man hier das Verhältnis zur Streckgrenze der Aluminiumlegierung von 140 MPa im Ausgangszustand heran, kann von ca. 60 % Haftscherfestigkeit der Verbindung gegenüber der Festigkeit des schwächeren Verbindungspartners ausgegangen werden. Eine weitere Charakterisierung der Güte der Verbindung erfolgte durch metallografische Schliffpräparation. Im Längsschliff der erzielten Verbindungen konnte eine einwandfreie und porenlose Verbindung nachgewiesen werden (siehe Abbildung 84).



Wärme- behandlung	Scherfestigkeit [MPa]	Blechstärke Alu t[mm]
2h 240°C	25	8
2h 220°C	27	8
2h 200°C	50	8
8h 165°C	60	8
8h 165°C	85	3, 4, 5

Abbildung 84: Metallografischer Längsschliff durch eine Aluminium - Stahl – Walzverbindung, erreichbare Zugscherfestigkeiten

Die achtstündige Wärmebehandlung stellt auch den zulässigen Maximalwert für Wärmebehandlungen dar. Die Prüfung der Umformfähigkeit der so entstandenen Proben erfolgte durch einfache Biegeversuche im Schraubstock. Sie bestätigten, dass sich die Proben homogen wie ein einzelner Werkstoff bzgl. anschließender Weiterverarbeitung verhalten.

Mit dem Einsatz einer Duo-Warmwalzanlage mit einer maximalen Walzdruckkraft von 1600 kN wurden die bisherigen Ergebnisse auf größere Aluminium – Stahl - Verbindungen mit überlappendem Nahtbereich übertragen. Für den Walzvorgang werden ein Stahl- und ein Aluminiumblech gereinigt und gebürstet und überlappend aufeinandergelegt. Die Führung des Aluminiums auf dem Stahlblech erfolgt durch seitliche Stahllaschen (Abbildung 86). Nach einer Aufwärmung der Bleche auf 400 °C wurden sie bei der gleichen Temperatur in einem Walzstich umgeformt. Dabei betrug die Walzumformung zwischen 60 und 70 %. Wie bei den vorangegangenen Aluminium – Stahl – Verbindungen, erfolgte eine nachträgliche Endwärmebehandlung 8 h bei 165 °C, um Diffusionsvorgänge in der Verbindungsschicht anzuregen und zu stabilisieren.

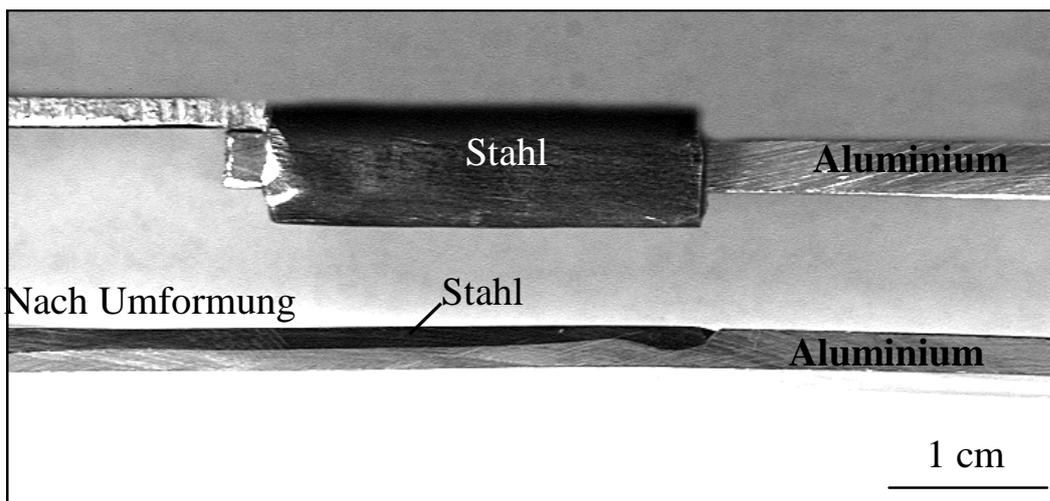


Abbildung 85: Draufsicht auf Walzrohling vor und nach der Umformung

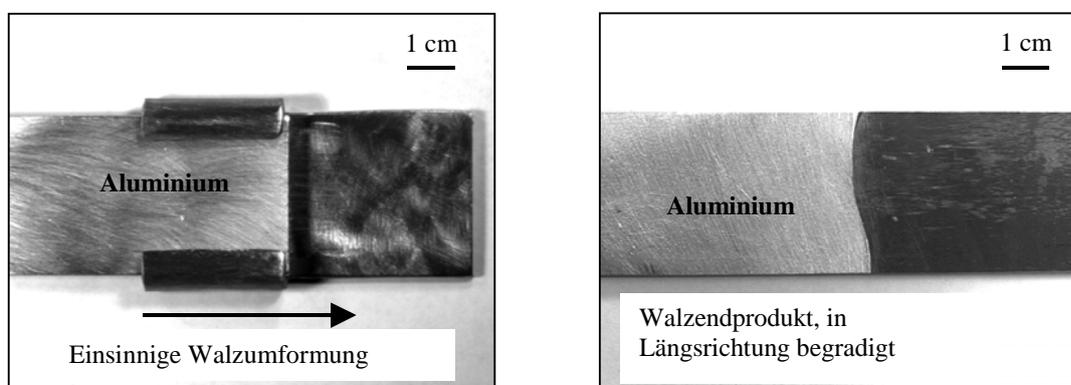


Abbildung 86: Seitenansicht des Walzrohlings vor und nach der Umformung

Nach der Umformung und seitlichen Begradigung liegt ein Blechverbund vor, der im Mittelbereich aus Stahl und Aluminium besteht und zu beiden Enden als Einzelwerkstoff vorliegt (Abbildung 86). Die guten Ergebnisse des Fügens durch Walzen, welches aus dem Quetschnahtwalzen entwickelt worden war, dienen als Grundlagen für die Verfahrensoptimierung. Dabei wurde die Fügestelle aus sich überlappenden Aluminium- und Stahlblechen gebildet und gemeinsam gewalzt. Dieser Walzvorgang findet unter Berücksichtigung der Erkenntnisse des Kaltpressschweißens statt. Das bedeutet, dass die Dickenabnahme im 1. Stich mehr als 50 % betragen muss. Das Walzenpaar übernimmt dabei die Funktion der Presstempel beim Kaltpressschweißen. Da der Walzvorgang sich nicht nur auf die Fügestelle beschränkt, erfolgt eine Dickenreduzierung auch in den nicht an der Fügung beteiligten Materialbereichen. Somit kann durch den Walzvorgang das Entstehen einer Kerbstelle vermieden werden. Die Ausbildung einer Kaltverschweißung in der Fügezone wurde durch die mikros- und spektroskopischen Untersuchungen bestätigt.

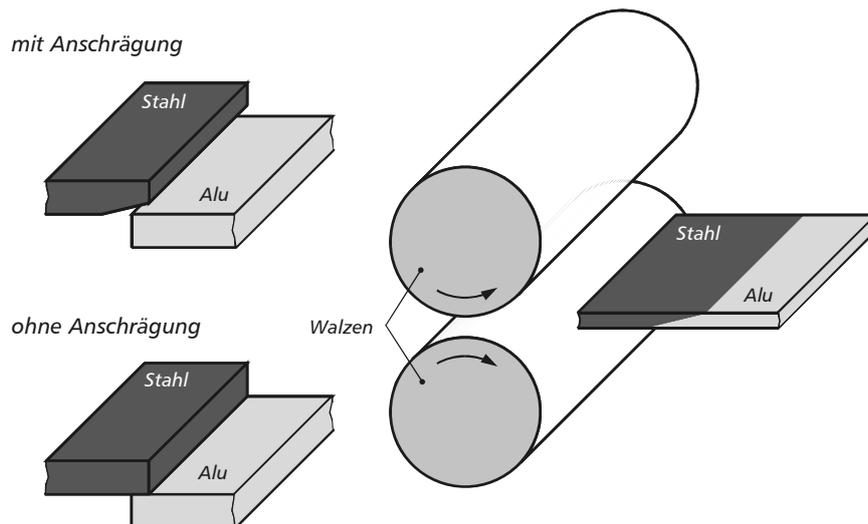


Abbildung 87: Verfahrensprinzip des Fügens durch Walzen zur Herstellung von Aluminium-Stahl-Tailored-Blanks [144]

Somit steht ein Verfahren zur Verfügung, das in der Lage ist, durch einen umformenden Fügevorgang aus Aluminium- und Stahlbändern ein Aluminium-Stahl-Tailored-Blank zu walzen. Gegenüber bisherigen, bekannten Fügeverfahren zur Herstellung von Aluminium-Stahl-Tailored-Blanks erfolgt kein Aufschmelzen der Fügepartner, die Bildung intermetallischer Verbindungen, die einen nachfolgenden Umformprozess behindern können, wird vermieden. Das gewalzte Aluminium-Stahl-Tailored-Blank ist blecheben und kann in verschiedenen Materialstärken erzeugt werden [145].



Abbildung 88: Durch Walzen hergestelltes Aluminium-Stahl-Tailored-Blank [146]

Das Ziel der Bauteilentwicklung geht eigentlich dahin, auf die Zwischenstufe Fertigung des Tailored Blank zu verzichten, und durch Einlegen der unterschiedlichen Stahlblechteile bzw. Stahlblech- und Aluminiumteile in einem gemeinsamen Umform- und Fügeprozess das Endbauteil wie z.B. ein Türinnenblech zu erstellen.

Untersuchungen der Fügeverbindungen

Zur Ermittlung der mechanischen Festigkeit wurden Zugscherversuche an den gewalzten Aluminium-Stahl-Tailored-Blanks durchgeführt. Die erreichbare Verbindungsfestigkeit lag in Abhängigkeit der Wärmebehandlung bei bis zu 85 MPa (Abbildung 84). Nach *Neumann / Hobbacher* beträgt die zulässige Spannung für Aluminium-Schweißnähte z.B. für die Legierung AlMg4,5Mn [F27] = 70 N/mm² [147]. *Hofmann und Ruge* weisen in ihren Untersuchungen darauf hin, dass für die Kaltverschweißung eine Höhenabnahme von 60% der Ausgangsdicke erforderlich ist. Für verschieden gestaltete Überlappverbindungen gaben sie folgende Festigkeitswerte an [148]:

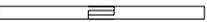
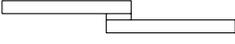
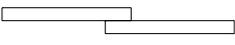
Bezeichnung	Vor dem Schweißen	nach	Zugfestigkeit bezogen auf den Stabquerschnitt [N/mm ²]
A			40
B			50
C			48

Tabelle 6: Festigkeiten verschieden gestalteter Überlapp-Flächenschweißungen ohne Blechschwächung (nach Hofmann/Ruge) [148]

Zur Optimierung der Festigkeit der Fügstellen wurden fortlaufend Untersuchungen an den geschaffenen Fügstellen sowohl der Walzproben als auch der kaltpressgeschweißten Proben vorgenommen. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen, die sowohl wichtige Informationen über die in der Fügstelle vorhandenen Elemente als auch über ihren chemischen Zustand erbrachten, trugen maßgeblich zur Optimierung der Fügstelle bei. Dadurch konnten die Fügeparameter und sich anschließende Wärmebehandlungen optimiert werden. Besonders deutlich ist das bei den Kaltpressschweißverbindungen zu sehen.

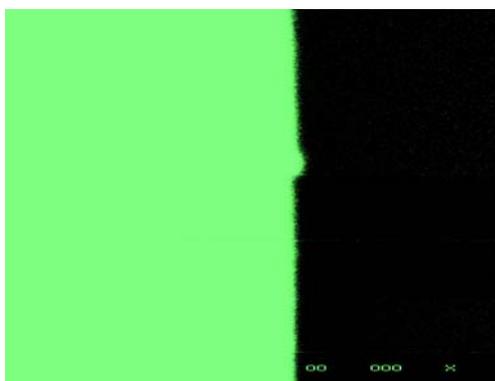
Die an Kaltpressschweißverbindungen durchgeführten REM- und WDX-Untersuchungen sind in Abbildung 89: REM- und WDX- Untersuchungen an einer der ersten Kaltpressschweißproben (oben) und an einer optimierten Probe (unten). gezeigt. Durch den hohen Umformgrad ist die Anfertigung der Proben für solche Untersuchungen sehr aufwendig. Zum Vergleich verschiedene Aufnahmen von Kaltpressschweißproben zu Beginn der Forschungsarbeiten und von optimierten Proben. Auffallend bei ersterer Probe ist der hohe Sauerstoff-Anteil im untersuchten

Bereich. An der Grenzfläche erhalten wir Sauerstoff-Fluoreszenz aus einem ca. $5\ \mu\text{m}$ breiten Band. Lokale Sauerstoffcluster mit einem Durchmesser von ebenfalls ca. $5\ \mu\text{m}$ treten aber auch im Bereich der Al-Seite auf.

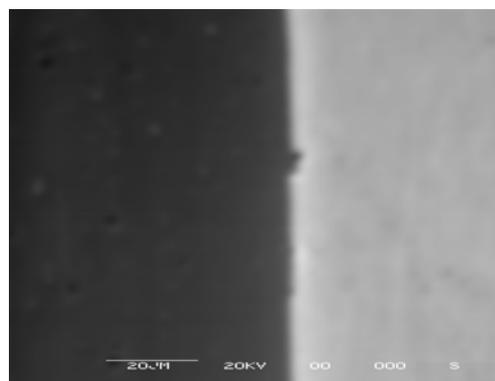
Der hohe Sauerstoffanteil an der Grenzfläche konnte durch gezielte Vorbehandlung eliminiert werden, wodurch die Legierungsbildung an der Grenzfläche ungehindert möglich ist. Im Abstand von ca. $15\ \mu\text{m}$ zur Grenzfläche in der Eisenseite liegen schwache Sauerstoff-Fluoreszenzen in Form eines ca. $10 - 20\ \mu\text{m}$ breiten diffusen Bandes vor, welche möglicherweise durch die Vorbehandlung eingebracht werden.

An der Grenzfläche sind einzelne Mikro-Verzahnungen zu erkennen. Diese sind ausschließlich auf der Fe-Seite, Al dringt in diese Ausbrüche ein. Desweiteren ist festzustellen, dass das Al-Signal im Fe deutlich weiter eindringt als umgekehrt. Dieses Ergebnis ist bemerkenswert, weil es anzeigt, dass eine Diffusion auftritt, obwohl die Umformung bei Raumtemperatur durchgeführt wurde. Weiterhin treten lokale Fe-Cluster mit einem Durchmesser von bis zu $5\ \mu\text{m}$ im Bereich der Al-Seite auf. Hierbei handelt es sich um Teile der Stahloberfläche, welche im Umformprozess spannungsbedingt in den weicheren Aluminiumkörper eindringen.

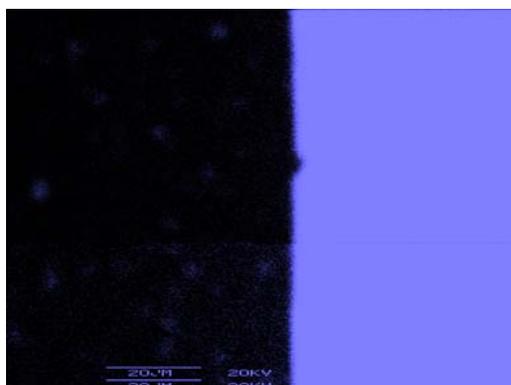
Al – Verteilung



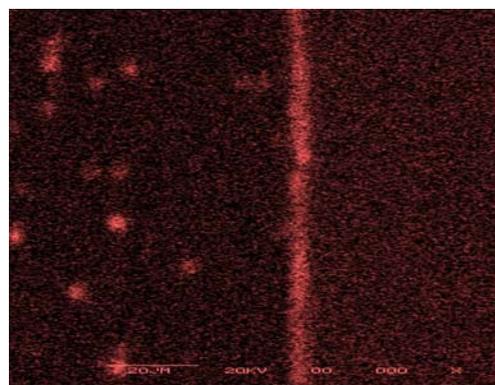
REM



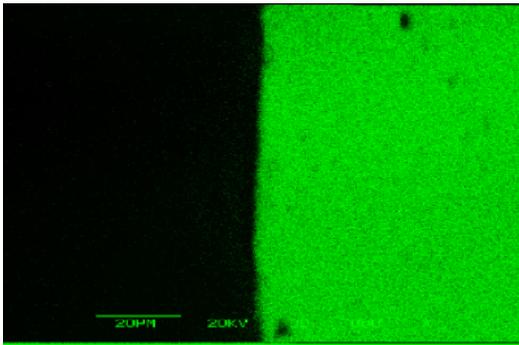
Fe – Verteilung



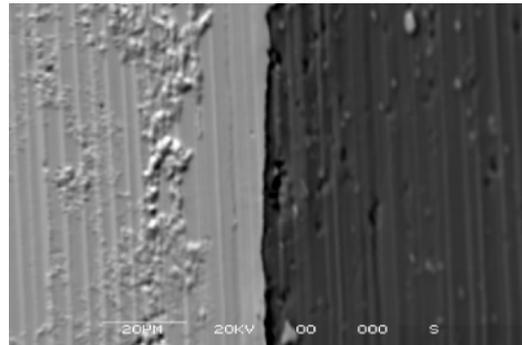
O – Verteilung



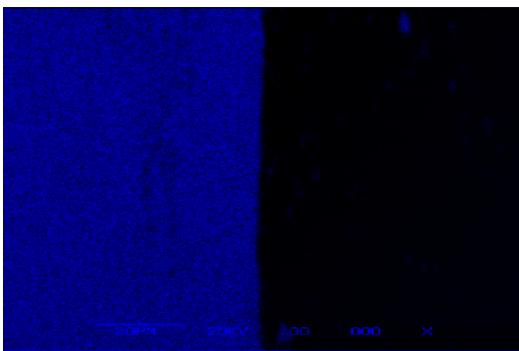
Al-Verteilung



SEM



Fe-Verteilung



O-Verteilung

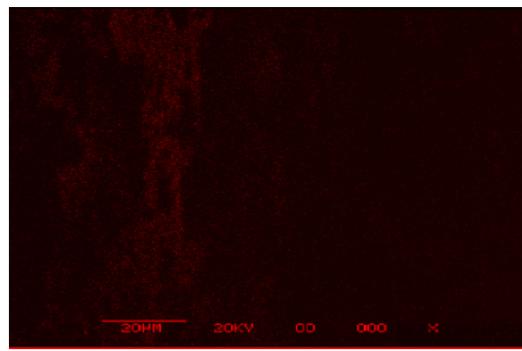


Abbildung 89: REM- und WDX- Untersuchungen an einer der ersten Kaltpressschweißproben (oben) und an einer optimierten Probe (unten).

Das blechebene Aluminium – Stahl – Tailored Blank eröffnet im Karosserie- und Fahrzeugbau vielfältige Möglichkeiten. Vor allem bei den Karosserieaußenteilen wie Kotflügeln, Heckklappen und Dächern ist nicht die Materialfestigkeit das entscheidende Dimensionierungskriterium, sondern das Verformungs- und Schwingverhalten der Bauteile im elastischen Bereich.

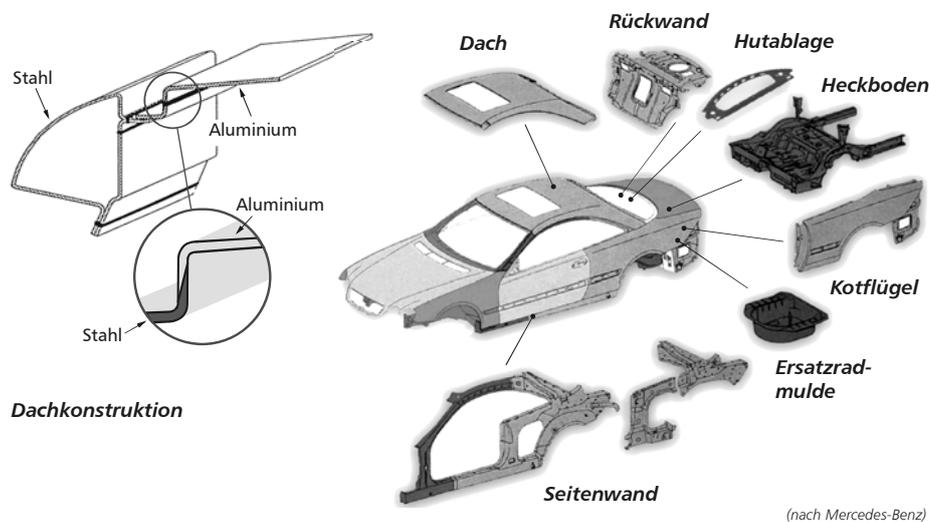


Abbildung 90: Mögliche Einsatzvarianten für Aluminium – Stahl – Tailored Blanks

Hierbei spielt die Materialstärke eine übergeordnete Rolle. Für diese Bauteile mit verringerten Festigkeitsansprüchen aber notwendiger Materialstärke eignen sich hervorragend Materialien mit geringer Dichte wie Aluminium. Diese geringbelastete Bauteile können aus einem Aluminium – Stahl – Tailored Blank gefertigt werden, so dass die Stahlseite als Verbindungsstelle ausgearbeitet wird. Dadurch können konventionelle, erprobte Fügeverfahren eingesetzt werden. Hier ergeben sich nicht nur produktionstechnische Vorteile, auch Karosseriereparaturen können mit bewährten Verfahren durchgeführt werden.

Die Übertragung der Ergebnisse des Kaltpressschweißens in ein fügendes Walzverfahren sollte auch für andere Fügepartner untersucht werden. Erste eigene Vorversuche zum Kaltpressschweißen von Magnesium- und Aluminiumblechlegierungen mit Stahlfeinblechen brachten entsprechend positive Ergebnisse.

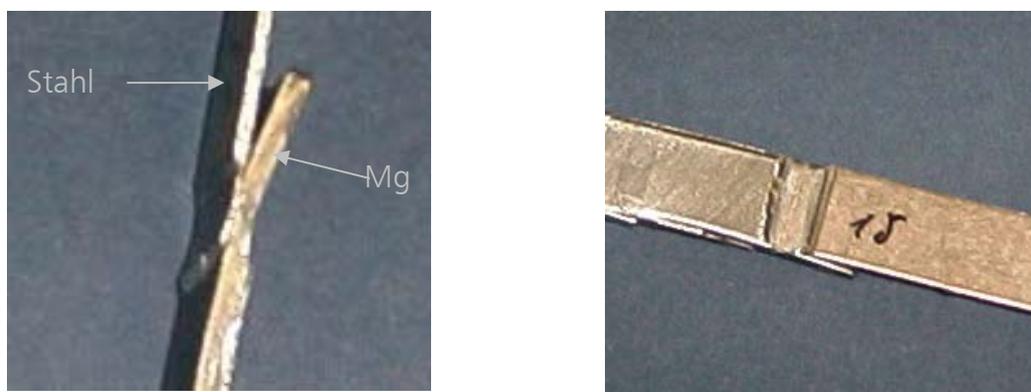


Abbildung 91: Vorversuche zum Kaltpressschweißen von Stahl (FeP04) und Magnesium (AZ31)

Mit der erreichten Verbindungsfestigkeit von 85 MPa liegt der Aluminium – Stahl – Verbund über den zulässigen Spannungswerten für Aluminiumschweißnähte (70 MPa) und deutlich über den Ergebnissen von *Hofmann / Ruge* (Tabelle 6).

Gestaltungsregeln

Für die Verwendung von gewalzten Aluminium – Stahl – Tailored Blanks konnten bereits folgende Gestaltungsregeln herausgearbeitet und erprobt werden:

- die Fügestelle sicher vor Korrosion zu schützen,
- größere Umformungen nicht in die Fügezone legen,
- Schubspannungen und Thermospannungen in der Fügezone vermeiden,
- auf die unterschiedliche Wärmedehnung der Fügepartner achten,
- Beanspruchungen möglichst in die Bauteilebene legen, Zugbeanspruchungen bevorzugen.

4.3 Umformverhalten strukturierte Feinbleche

Einteilung strukturierte Feinbleche

Je nach Strukturierungsverfahren unterscheidet man walzstrukturierte oder beulstrukturierte Feinbleche, die in verschiedenen Stahl- und Aluminiumlegierungen gefertigt werden. Für die Fertigung strukturierter Feinbleche haben sich die dargestellten Verfahren mit den dazugehörigen Halbzeugen durchgesetzt.

Fertigung mit Werkzeugen		
Zugumformverfahren	Fertigungsverfahren	Halbzeug
Tiefen - Hohlprägen mit starrem Werkzeug	Hohlprägen	Waffelstrukturblech
Biegeumformverfahren	Fertigungsverfahren	Halbzeug
Biegen mit drehender Werkzeugbewegung - Walzbiegen	Wellbiegen	Wellblech
Zugdruckumformverfahren	Fertigungsverfahren	Halbzeug
Tiefziehen mit Werkzeug - Tiefziehen mit starrem Werkzeug (mit starrer Walze)	Walzstrukturierung	Walzstrukturblech
Sonderverfahren zur Blechherstellung	Fertigungsverfahren	Halbzeug
Umformen mit Werkzeug mit Elastomer - Beulstrukturieren	Beulstrukturierung	Beulstrukturblech
Fertigung mit Wirkmedien		
Zugdruckumformverfahren	Fertigungsverfahren	Halbzeug
Tiefziehen mit Wirkmedien - Tiefziehen mit Wirkmedien mit kraftgebundener Wirkung (mit Flüssigkeiten)	Kugelstrukturierung	Kugelstrukturblech
Sonderverfahren zur Blechherstellung	Fertigungsverfahren	Halbzeug
Umformen mit Wirkmedien - Kombination aus Streck- und Tiefziehen	Hydrostatisches Streck- Stülp-Umformen	Höckerblech

Abbildung 92: Einteilung der Verfahren zur Fertigung strukturierter Feinbleche (Auswahl) [131]

Die Walzstrukturen werden symmetrisch zur Blechmitte (beidseitig) in das Ausgangsmaterial eingebracht. Walzstrukturen sind gekennzeichnet durch die geringe Strukturhöhe und die sehr kleine Geometrie der Noppen. So entstehen Produkte wie z. B. NOPAL® (aus Aluminiumblech) oder NOSTAL® (aus Stahlfeinblech), das maschinell mit gekreuzten Wellen versehen wird oder das

genoppt ist, siehe Abbildung 93. Es gibt weiterhin ausgerichtetes und homogenes NOPAL®. Beim ausgerichteten (direktionalen) NOPAL® hat eine Wellenrichtung eine stärkere Prägung als die kreuzende Welle. Direktionales NOPAL® ist deshalb in einer Richtung besonders steif (wellblechartig) und es lässt sich besser starken Formungen anpassen. [149]

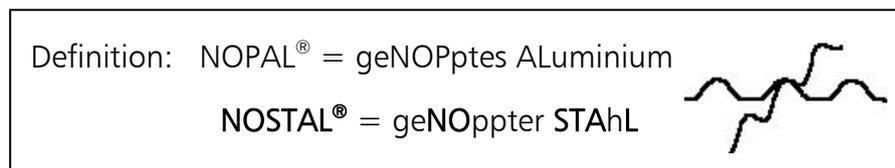


Abbildung 93: Bezeichnung der Walzstrukturen DIEDRICHS und gekreuzte Wellen zum Einbringen der Walzstrukturen

Kugel- und die Beulstrukturen werden nicht symmetrisch zur Blechmitte (also einseitig) ins Versuchsmaterial eingebracht und weisen auch eine geringe Strukturhöhe auf. Die ausgewählte Beulstruktur besitzt die Schlüsselweite SW 33. Zur besseren Vergleichbarkeit der Kugelstruktur und der Beulstruktur mit der Walzstruktur und zur Ermittlung des Struktureinflusses sollten alle Strukturen in ihren geometrischen Abmessungen, vor allem der Strukturhöhe sehr klein sein.

Neben der erhöhten Steifigkeit besitzen strukturierte Feinbleche auf Grund ihrer größeren Oberfläche auch eine erhöhte Wärmeaufnahme und Schwingsteifigkeit. Die Bleche werden daher gern auch als Wärmeabschirmblech oder als schallisolierende Maschinenverkleidung eingesetzt. Für diese Verwendungen sind vor allem umformende Fertigungsverfahren zur Herstellung dieser Teile notwendig.

Hierbei zeigt sich ein weiterer Vorteil strukturierter Feinbleche. Bezogen auf den Werkstoff besitzen strukturierte Feinbleche ein höheres Umformvermögen, mit der Fähigkeit, bewusst Falten zu bilden oder Strukturierungen zu reduzieren. Diese Eigenschaft tritt auch bei der Aufnahme von Materialkennwerten deutlich hervor. Jede Struktur besitzt ihre spezifischen Eigenschaften [150].

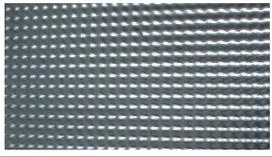
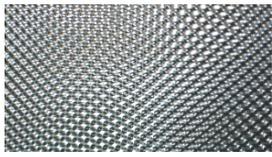
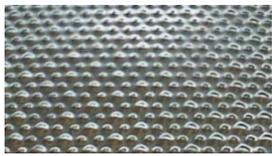
Strukturhersteller/ Strukturbezeichnung	Strukturmuster	Versuchswerkstoff	Strukturhöhe h_s [mm]
Fa. DIEDRICHS Walzstruktur DIEDRICHS		AlMg2,5 /0.5	2,15
		FeP04 / 0.5	1,8
Fa. KMT Walzstruktur KMT		AlMg2,5 /0.5	2,4
		FeP04 / 0.5	-----
Fa. PWO Walzstruktur PWO		AlMg2,5 /0.5	1,6
		FeP04 / 0.5	1,6
Fa. FQZ Kugelstruktur FQZ		AlMg2,5 /0.5	1,6
		FeP04 / 0.5	1,4
Fa. MIRTSCHE Beulstruktur MIRTSCHE		AlMg2,5 /0.5	3,1
		FeP04 / 0.5	3,1

Abbildung 94: Strukturen: Strukturhersteller, Strukturbezeichnung, Strukturmuster, Strukturhöhe [131]

Versuchswerkstoffe

Für die im Rahmen der Forschungsarbeiten durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung der Umformeigenschaften sowie des Biege- und Torsionsverhaltens von strukturierten Feinblechen wurden folgende Versuchswerkstoffe aus Stahl und Aluminium ausgewählt. Im Sinne des Leichtbaus wurde die Ausgangsblechdicke 0,5 mm gewählt. Daraus wurden dann die verschiedenen strukturierten Feinbleche hergestellt.

Versuchswerkstoff	Lieferant
AlMg2,5 in 0.5 mm Dicke	VAW aluminium AG (VAW)
FeP04 in 0.5 mm Dicke	EKO Stahl GmbH (EKO)

Tabelle 7: Versuchswerkstoffe: Bezeichnung und Lieferant

Vorraussetzung für die vergleichenden Untersuchungen war die Ermittlung der mechanischen Kennwerte der Versuchswerkstoffe im Zugversuch vor der Strukturierung. Diesbezügliche Herstellerangaben, die im Zugversuch bestätigt wurden, zeigt Tabelle 8.

Werkstoff / Dicke	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]	A ₅₀ [%]
AlMg2,5 / 0.5	110	207	---	23,5
FeP04 / 0.5	176	315	43,1	---

Tabelle 8: Mechanische Eigenschaften: untersuchte Versuchsmaterialien (Herstellerangaben)

Werkstoffmechanische Kennwerte

Der effektive Einsatz strukturierter Feibleche kann nur unter Beachtung der Sicherheit, der Steifigkeitsoptimierung konstruktionsseitig und des Festigkeitsverhalten werkstoffseitig erfolgen. Eine bessere Nutzung der Werkstofffestigkeit und ein damit verbundener geringerer Materialeinsatz ist jedoch nur möglich, wenn die Konstruktion mit einer geringeren, aber zulässigen Sicherheit ausgelegt wird. Eine optimale Auslegung erfordert daher die genaue Kenntnis spezifischer Eigenschaften strukturierter Feibleche, welche im Wesentlichen beeinflusst werden durch:

- die Beanspruchung während der Herstellung der strukturierter Feibleche
- die werkstoffmechanischen Festigkeitseigenschaften der strukturierter Feibleche
- die günstige Einleitung der Kräfte und Momente für strukturierter Feibleche
- die Beanspruchung während der Herstellung strukturierter Bauteile
- die Beanspruchung während des Einsatzes strukturierter Bauteile. [151]

Die Grundlage für die Fertigung von Bauteilen aus Glattblechen ist die Kenntnis über das Festigkeits- und Verformungsverhalten der Konstruktionswerkstoffe. Für die Ermittlung werkstoffmechanischer Festigkeitswerte für strukturierter Feibleche gibt es bislang keine Normen. Daher orientiert sich die Prüfung der strukturierter Feibleche an den genormten Prüfverfahren der Werkstoffprüfung von Glattblechen. [152, 153] Diese Werkstoffprüfung liefert Kennwerte, die genormte Probengeometrien und komplette Bauteile unter definierten Bedingungen charakterisieren. Dies trifft jedoch nicht für strukturierter Bauteile zu. Nachfolgend sind einige Besonderheiten strukturierter Feibleche in Kürze zusammengefasst dargestellt.

Strukturangepasste, modifizierte Probengeometrie und modifizierte Prüfverfahren

Mit dem Ziel, die vorliegenden Strukturen qualitativ vergleichend gegenüberzustellen, wurden für die einzelnen Prüfverfahren strukturangepasste, modifizierte Proben-Geometrien definiert. Bei der Entwicklung der Probengeometrien wurden normativ bedingte Längen- und Breitenverhältnisse realisiert. Die Proben weisen jeweils mindestens ein vollständiges Strukturmodul „Wabe“ mit SW 33 der Beulstruktur in allen geprüften Walzrichtungen (WR) auf.

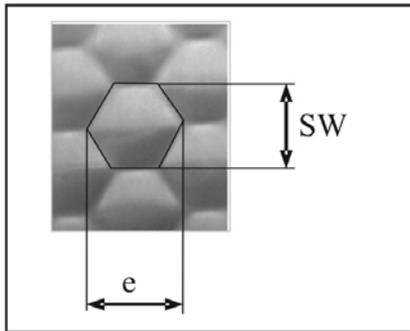


Abbildung 95: Beulstruktur: Wabengröße mit Schlüsselweite „SW“ und Eckenmaß „e“

Zuschnitt, Lage, Anordnung und Richtung der Strukturbleche

Der **Zuschnitt** der Proben muss sehr präzise erfolgen, wenn mit den oben genannten modifizierten Prüfverfahren vergleichbare Ergebnisse erzielt werden sollen. Abweichend von der klassischen Probenpräparation ist der Zuschnitt der Proben mittels Laserschneiden erfolgt. Im Verhältnis zum Struktureinfluss ist der Temperatureinfluss in der Wärmeeinflusszone im Randbereich sehr klein und somit bei der Ermittlung der mechanischen Bauteileigenschaften zu vernachlässigen.

Einen weiteren Gesichtspunkt für eine Probenpräparation mittels Laser stellt die Strukturhöhe dar. Die Einebnung der Strukturen im Randbereich beim Zuschneiden auf Scheren konnte somit vermieden werden.

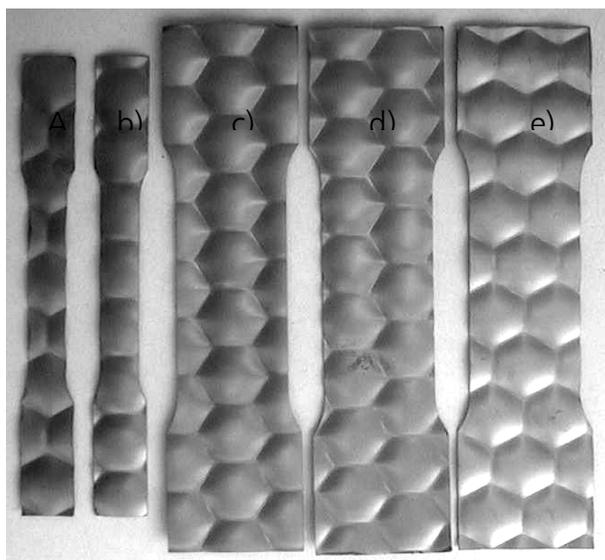
Bei den kugel- und beulstrukturierten Feiblechen ist zu beachten, dass die Strukturen auf Grund des Strukturierungsverfahrens unsymmetrisch zur Blechmitte und damit einseitig eingebracht wurden. Für die weiteren Betrachtungen wird folgende Definition der Struktur Lage verwendet.



Abbildung 96: „Struktur Lage positiv“ und „Struktur Lage negativ“ für kugel- und beulstrukturierte Feibleche

Im Weiteren wird die **Lage** der Proben während der Untersuchungen als „Struktur Lage positiv“ (pos.) bezeichnet, wenn die Struktur der Beanspruchungsrichtung zugewandt ist. „Struktur Lage negativ“ (neg.) definiert sich entsprechend aus dem entgegengesetzten Fall. Die Lage der Strukturen ist insbesondere beim modifizierten 3-Punkt-Biegeversuch für die kugel- und beulstrukturierten Feinbleche zu beachten. Für die walzstrukturierten Feinbleche ist dieser Einfluss nicht zu berücksichtigen.

Verschiedene Varianten der **Anordnung** der Struktur nach dem Zuschnitt auf der modifizierten Probe sind möglich. Am Beispiel der Zugprobe entsprechend DIN 50125 ist eine Auswahl in Abbildung 97 a), b) dargestellt. Dieser Einfluss ist für die Beulstruktur am deutlichsten zu erkennen, da die Geometrie des Strukturmodules „Wabe“ gegenüber der DIN-Probengeometrie mit einer Probenbreite von 20 mm relativ groß ist. Für eine Probengeometrie nach DIN 50125 erscheint noch nicht einmal ein Strukturmodul „Wabe“ vollständig auf der Probe. Für alle Strukturbleche wurden die modifizierten Probengeometrien mit einer Probenbreite von 57 mm angewandt siehe c) - e).



a) Strukturmodul „Wabe“ in der Probenmitte WR 90°, Probe nach DIN 50125

b) Strukturmodul „Wabe“ in der Probenmitte WR 0°, Probe nach DIN 50125

c) Strukturmodul „Wabe“ in der Probenmitte WR 0°, Modifizierte Probe

d) Biegekante in der Probenmitte WR 0°, Modifizierte Probe

e) Strukturmodul „Wabe“ in der Probenmitte WR 90°, Modifizierte Probe

a) b) c) d) e)

Abbildung 97: Anordnung der Struktur: Beulstruktur (Auswahl)

So ist gewährleistet, dass für alle untersuchten Material-Struktur-Kombinationen sich wenigstens ein Strukturmodul auf der Probe abzeichnet. Der Struktureinfluss auf die werkstoffmechanischen Festigkeitswerte kann ermittelt werden.

Der Einfluss der Geometrie der Strukturen auf die **Richtung** des Zuschnittes auf der Platine ist bei der Probenvorbereitung zu berücksichtigen. Besonders deutlich ist dieser Einfluss an den kugel- und beulstrukturierten Feinblechen zu erkennen.

Längs zur Walzrichtung (WR) entspricht 0° zur Walzrichtung, quer zur Walzrichtung entsprechend 90° zur Walzrichtung. Zusätzlich wurden die Strukturbleche in 45° zur Walzrichtung geprüft.

Festigkeitsverhalten und Kaltverfestigung der Strukturbleche

Aufgrund der Strukturierung der untersuchten Proben handelt es sich bei den **Festigkeitsuntersuchungen** bereits um Bauteiluntersuchungen. In allen Fällen treten mehrachsige, nicht definierte Spannungszustände unter Belastung auf. Die strukturbedingte Mehrachsigkeit des Spannungszustandes führt dazu, dass man sich z. B. zur Auswertung der Zugversuche nur auf das Kraft- / Wegverhalten beziehen kann.

Durch die Einbringung der Strukturen haben die Ausgangsmaterialien unterschiedlich große plastische Formänderungen erfahren und sind dementsprechend kaltverfestigt. Diese **Kaltverfestigung** schlägt sich in den Versuchsergebnissen bei der Ermittlung der werkstoffmechanischen Kennwerte nieder.

Die dazu durchgeführten Untersuchungen ergaben, (beispielhaft für die Struktur Diedrichs), die in der Abbildung 98 dargestellten Werte der Härte. Aus denen lässt sich die Festigkeitszunahme sicher abschätzen. Im Vergleich dazu wies das nichtstrukturierte Stahlblech des Vorbandmaterials an der Oberfläche den Härtewert $\varnothing 101,6$ HV 0,5 und in der Blechmitte $\varnothing 87$ HV 0,5 auf. In diesem konkreten Fall nimmt die Festigkeit durch die Strukturierung um ca. 30 % zu.

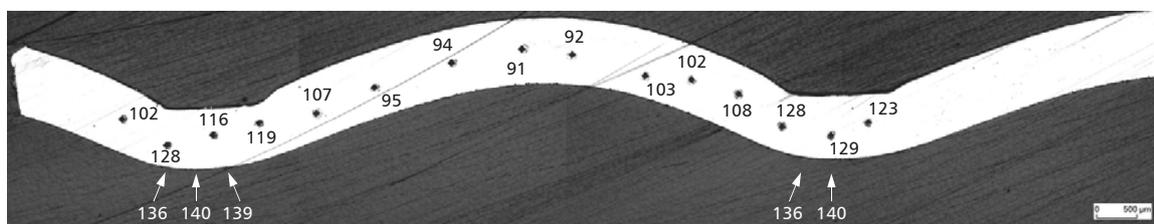


Abbildung 98: Kleinlasthärtemessung an einem strukturierten Stahlblech HV 0,5

Diese Besonderheiten der strukturierten Feinbleche führen dazu, dass die Prüfverfahren modifiziert werden müssen. Zur Untersuchung des Einflusses der Beanspruchung während der Herstellung und zur Ermittlung der werkstoffmechanischen Festigkeitseigenschaften strukturierter Feinbleche sowie zur Auffindung günstiger Möglichkeiten der Einleitung der Kräfte und Momente in strukturierte Bauteile dienen die im nachfolgenden Abschnitt dargestellten modifizierten Prüfverfahren.

Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten nach modifizierten Prüfverfahren

Zur Ermittlung der werkstoffmechanischen Festigkeitswerte und der Biege- und Torsionssteifigkeiten sowie des Einebnungsdruckes wurden die im Nachfolgenden Versuche durchgeführt:

- modifizierter Zugversuch in Anlehnung an DIN EN 10 002
- modifizierter 3-Punkt-Biegeversuch
- modifizierter Torsionsversuch
- modifizierter Einebnungsversuch

Dazu wird im modifizierten Zugversuch die Maximale Zugkraft $F_{z,max}$ und die dazugehörige Längenänderung Δl für alle Material-Struktur-Kombinationen in Abhängigkeit von der Walzrichtung (WR) ermittelt. Mit dem modifizierten Zugversuch soll des Weiteren der Einfluss der Strukturanordnung auf das Zugkraft-Längenänderungs-Verhalten dargestellt werden.

Im modifizierten 3-Punkt-Biegeversuch werden die maximalen und minimalen Biegesteifigkeiten für alle Material-Struktur-Kombinationen in Abhängigkeit von der Walzrichtung und zusätzlich von der Lage der Struktur ermittelt. Diese stehen für die Bestimmung der Formänderungsarbeiten zur Verfügung.

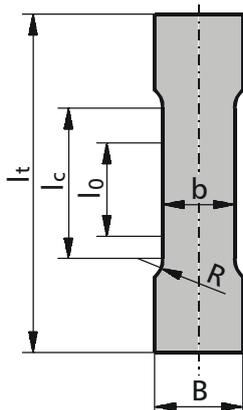
Die Ermittlung der maximalen und minimalen Torsionssteifigkeit erfolgt anhand der Torsionskräfte F_T bei einem festgelegten Verdrehwinkel ρ für alle Material-Struktur-Kombinationen in Abhängigkeit von der Walzrichtung und wird im modifizierten Torsionsversuch durchgeführt.

Der maximal zulässige Druck (Einebnungsdruck), welcher erreicht werden darf, ohne die Strukturen einzuebnen, wird für alle Material-Struktur-Kombinationen im modifizierten Einebnungsversuch aus den gemessenen Druckkräften berechnet. Anhand der Untersuchung des Verhaltens der Strukturbleche bei überkritischen Flächenpressungen sollen erste Erfahrungen zur maximal erzielbaren Struktureinebnung gesammelt werden.

Zur Ermittlung des Walzrichtungseinflusses werden die Proben sowohl aus den Strukturblechen als auch aus den Glattblechen in den drei Hauptrichtungen 0° , 45° und 90° zur Walzrichtung aus den Platinen entnommen. So sind Aussagen zu Richtungsabhängigkeiten der Materialeigenschaften möglich, die in Konstruktionshinweise zur günstigen Einleitung der Momente und Kräfte einfließen können. Die Ergebnisse sollen Basis für die Auslegung von Konstruktionen mit strukturierten Feinblechen für alle Bereiche des Leichtbaus sein.

Modifizierter Zugversuch

Der Zugversuch nach DIN EN 10 002 definiert die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse aus dem einachsigen Zug als mechanische Werkstoffkennwerte. Die Geometrie der Zugproben ist ebenfalls normativ festgelegt. Ausgehend von der Beulstruktur mit der SW 33 und dem zugehörigen Eckenmaß und in Anlehnung an die geltende Norm wurde eine modifizierte Zugprobengeometrie entwickelt. Die Werte für die Probengeometrie wurden ganzzahlig aufgerundet.



Probenbreite:	$b = 1,5 \times \text{Eckenmaß} = 57\text{mm}$
	$B = 70\text{mm}$
Radius:	$R = 40\text{mm}$
Probenlänge:	$l_t = 300\text{mm}$
Messlänge:	$l_0 = 80\text{mm}$
Versuchslänge:	$l_c = l_0 + 0,5 \times b = 108,5\text{mm}$
	gewählt: $l_c = 120\text{mm}$

Abbildung 99: Modifizierter Zugversuch: Probengeometrie, Flachprobe

Der modifizierte Zugversuch wurde auf der Universalprüfmaschine, Typ 1486, der Fa. ZWICK durchgeführt. Die Zugproben wurden mit einem zweiseitig wirkenden hydraulischen Probenhalter eingespannt und in Längsrichtung der Proben einer Zugbeanspruchung ausgesetzt und bis zum Bruch verformt. Die Messwerte für die wirkende Kraft F_z und die dadurch hervorgerufene Probenverlängerung Δl wurden mit der in der Prüfmaschine integrierten Messtechnik aufgenommen. Die Maximale Zugkraft $F_{z,max}$ wurde in Abhängigkeit der Längenänderung Δl für das Messprotokoll aufgezeichnet. Jede Messung wurde an mindestens 7 Proben wiederholt, der Mittelwert ist im Kraft-Verlängerungs-Diagramm dargestellt.

Modifizierter Einebnungsversuch

Die Werkstoffkennwerte aus dem Druckversuch werden zur Festigkeitsberechnung druckbeanspruchter Werkstoffe sowie zur Ermittlung des Kraft- und Arbeitsbedarfs für die Umformtechnik verwendet. Hinsichtlich der durchzuführenden angepassten Näpftentiefziehversuche soll die Bestimmung von Druckspannungen zur Struktureinebnung durch modifizierte Einebnungsversuche wesentliche Parameter zur Ermittlung der Niederhalterkräfte liefern. Der Druckversuch für ebene Feibleche ist nicht genormt. Die Versuche werden in Anlehnung an den Druckversuch nach DIN 53291 und DIN EN ISO 7500 / 1 durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurde eine Probengeometrie definiert, die sich an den Erfahrungswerten der vorhergehenden Prüfverfahren orientiert. Für die Probenbreite der quadratischen Proben wurde $3 \times$ das Eckenmaß e der Wabenstruktur $b = 114 \text{ mm}$ gewählt. Der modifizierte Einebnungsversuch wurde auf der Universalprüfmaschine, Typ 1486, der Fa. ZWICK durchgeführt. Die Proben wurden auf gehärteten, plangeschliffenen und hochglanzpolierten Druckplatten zentrisch aufgelegt.



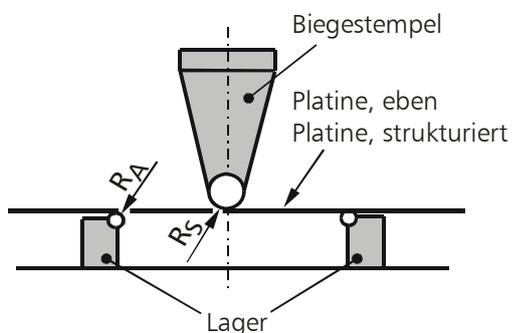
Abbildung 100: Einebnungsversuch auf der Prüfmaschine

Entgegen den vorhergehenden Prüfverfahren werden die Proben für alle Versuchsmaterialien nur in 0° zur Walzrichtung aus den strukturierten Platinen entnommen. Die Belastung der Proben erfolgte senkrecht zur Blechebene und kraftgeregelt mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min . Es wurde kein Schmierstoff zusätzlich aufgebracht.

Die Messwerte für die wirkende Druckkraft F_D und die Verringerung der Strukturhöhe Δl wurden mit der in der Prüfmaschine integrierten Messtechnik aufgenommen. Die Druckkraft F_D in kN wurde in Abhängigkeit der Längenänderung Δl in mm für das Druckkraft-Längenänderungs-Diagramm aufgezeichnet. Es wurden je Material-Struktur-Kombination 5 Proben geprüft.

Modifizierter 3-Punkt-Biegeversuch

Für die Durchführung dieses Prüfverfahren wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 7438 und DIN EN 7500 / 1 ein Prüfstand entwickelt und die Probengeometrie definiert.



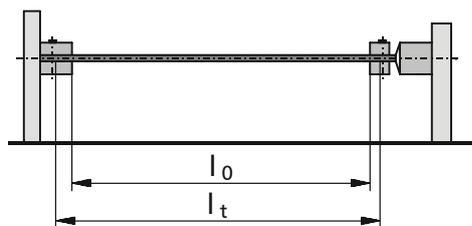
Probenbreite:	b	$= 3 \times \text{Eckenmaß} = 114\text{mm}$
Probenlänge:	l_t	$= 1,2 \times \text{Lagerabstand} = 410\text{mm}$
Lagerabstand:	l_l	$= 3 \times \text{Probenbreite} = 342\text{mm}$
Auflageradius:	R_A	$= 20\text{mm}$
Radius des Biegestempels:	R_S	$= 10\text{mm}$

Abbildung 101: Modifizierter 3-Punkt-Biegeversuch: Prüfstand und Probengeometrie

Die Proben wurden symmetrisch auf den Lagern aufgelegt und zentrisch durch den Biegestempel weggeregelt belastet. Der maximale Stempelweg beträgt $h = 50 \text{ mm}$ bei einer Stempelgeschwindigkeit von 20 mm/min . Die sich einstellende Stempelfkraft F_{St} wurde mit einer Frequenz von 10 Hz abgetastet, so dass alle $0,033 \text{ mm}$ Stempelweg ein Kraftwert aufgezeichnet wurde. Jede Messung wurde an drei Proben wiederholt, deren Mittelwert im Stempelfkraft-Stempelweg-Diagramm grafisch dargestellt ist.

Modifizierter Torsionsversuch

Der Torsionsversuch zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Glattblechen ist nicht genormt [154, 155, 156, 157, 158,]. Der modifizierte Torsionsversuch wird an Flachproben durchgeführt. Überwiegend werden zur Prüfung nicht strukturierter Materialien rotationssymmetrische Torsionsstäbe eingesetzt. Die Ermittlung der maximalen und minimalen Torsionssteifigkeiten erfolgt nach Abbildung 102.



Probenbreite:	b	$= 114\text{mm}$
Probenlänge:	l_t	$= 200\text{mm}$
Messlänge:	l_0	$= 180\text{mm}$

Abbildung 102: Modifizierter Torsionsversuch: Prüfstand und Probengeometrie

Die Flachproben wurden einseitig fest eingespannt und auf der anderen Seite drehbar gelagert. Die Torsionskraft F_T wurde in Abhängigkeit vom Drehwinkel ρ mit dem Programm CATMAN V2.2 der Fa. HBM für die Auswertung aufgezeichnet. Von jeder Material-Struktur-Kombination wurden mindestens 3 Proben geprüft.

Ergebnisse der Versuche

Ergebnisse: Modifizierter Zugversuch

Innerhalb der Zugversuche konnte für die Walzstruktur KMT, die Kugelstruktur und die Beulstruktur eine starke Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte von der Strukturanordnung auf der Probe beobachtet werden. Am Beispiel der Struktur KMT werden in Abbildung 103 verschiedene Zuschnittmöglichkeiten für das Prüfen in 90° zur Walzrichtung dargestellt. Die Zugproben für den Zuschnitt 1 wurden auf der strukturierten Platine so angeordnet, dass die Noppen der Struktur am Rand der Proben nicht in der Schnittebene lagen, der Zuschnitt 2 dagegen so, dass die Noppen aufgetrennt wurden.

Die Auswirkungen der Anordnung der Strukturen auf der Probe auf das Zugkraft-Längenänderungs-Verhalten ist in Abbildung 104 dargestellt. Für die Längenänderung $\Delta l \approx 20$ mm ist eine Zunahme der Maximalen Zugkraft für die Zugproben des Zuschnittes 1 von ca. 360 N zu verzeichnen.

Ergebnisse: Modifizierter 3-Punkt-Biegeversuch

Im Stempelpfaden-Stempelweg-Diagramm, Abbildung 109 und Abbildung 110, wird für die Referenzstruktur der Walzrichtungseinfluss dargestellt. Die Flächen unterhalb der Kurven entsprechen der Formänderungsarbeit $F_{\Delta 50}$, die geleistet werden muss, um den Stempelweg $h = 50$ mm zu erreichen. Die grafische Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt anhand der maximalen und minimalen Formänderungsarbeiten Abbildung 111 und Abbildung 112.

Ergebnisse: Modifizierter Torsionsversuch

Die Torsionskraft wird bei einem Verdrehwinkel φ , $\varphi = 3^\circ$ ermittelt. Für die Ergebnisauswertung wurde die Messgröße Torsionskraft F_T durch Multiplikation mit der Hebelarmlänge $l_{Al} = 50$ mm für den AlMg2,5 / 0.5 bzw. $l_{Fe} = 30$ mm für den FeP04 / 0.5 in das Torsionsmoment M_T überführt. Die Tabelle 13 und Tabelle 14 zeigen die ermittelten Torsionsmomente für den AlMg2,5 / 0.5 und den FeP04 / 0.5 für ausgewählte Strukturen in allen Walzrichtungen.

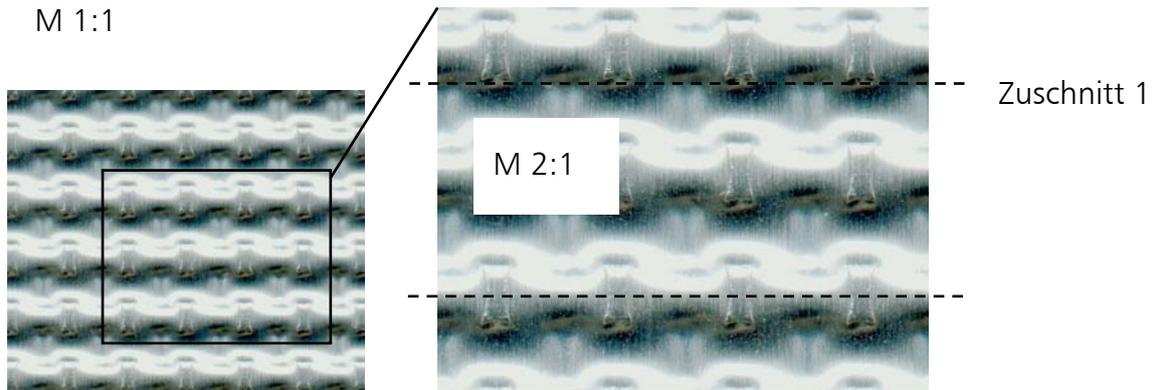


Abbildung 103: Modifizierter Zugversuch: Zuschnittmöglichkeiten, AlMg2,5 / 0.5, Struktur KMT, 90° zur Walzrichtung

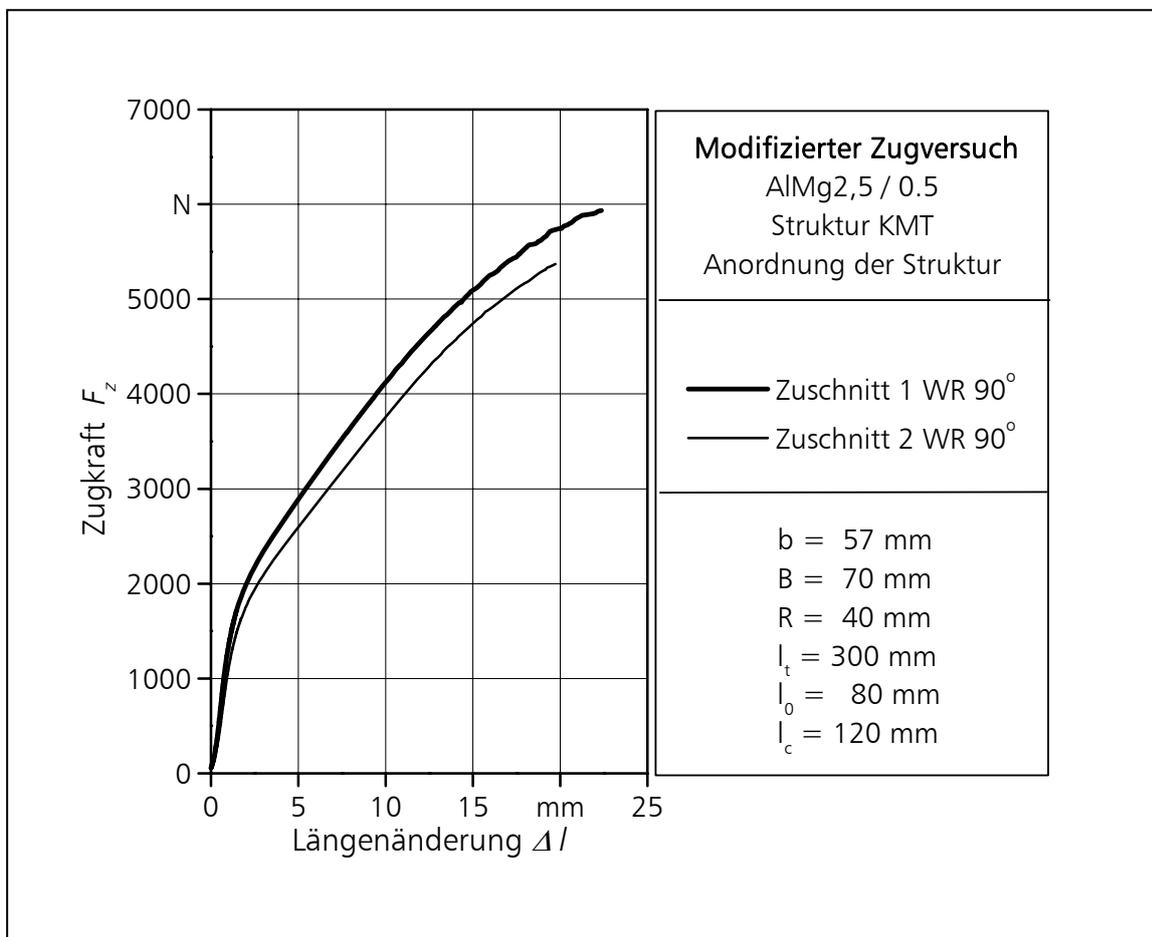


Abbildung 104: Modifizierter Zugversuch: Zugkraft- Längenänderungs- Verhalten, verschiedene Zuschnittvarianten, AlMg2,5 / 0.5, Struktur KMT, 90° zur Walzrichtung

Zugkraft-Längenänderungs-Schaubild des modifizierten Zugversuches

AlMg2,5 / 0.5

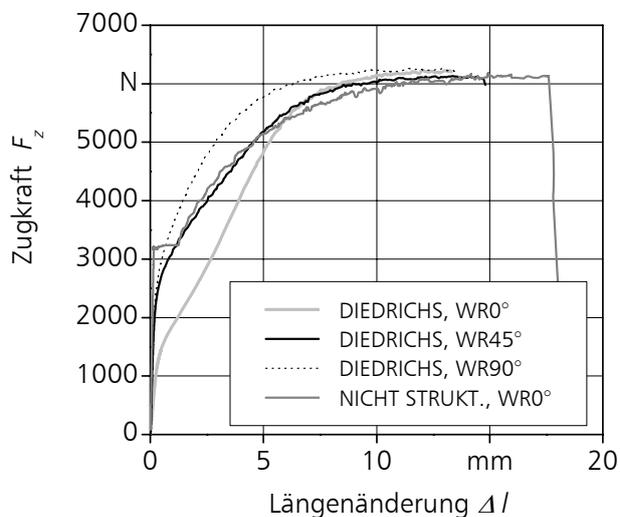


Abbildung 105: Modifizierter Zugversuch: Walzrichtungseinfluss, exemplarisch, AlMg2,5 / 0.5, Struktur DIEDRICHS

FeP04 / 0.5

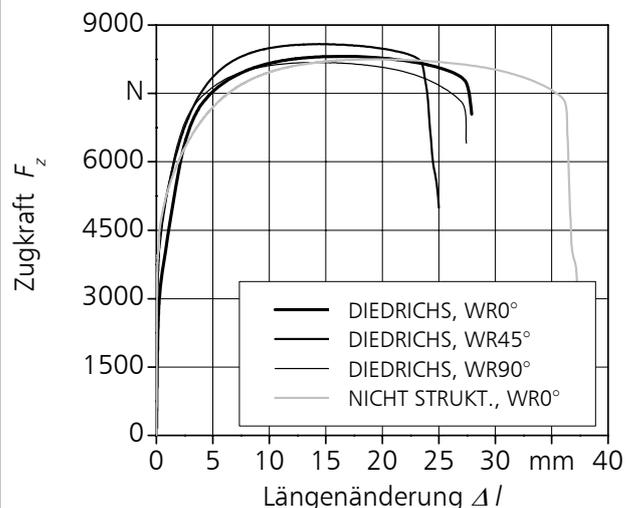


Abbildung 106: Modifizierter Zugversuch: Walzrichtungseinfluss, exemplarisch, FeP04 / 0.5, Struktur DIEDRICHS

$F_{Z,max}$ in kN	AlMg2,5 / 0.5		
Richtung der Proben	0° WR	45° WR	90° WR
ohne Struktur	6,18	---	---
DIEDRICHS	6,21	6,15	6,26
PWO	6,22	6,09	6,10
FQZ	5,97	5,76	5,79
MIRTSCH	6,27	6,03	6,01
KMT	6,30	5,47	5,77

Tabelle 9: Modifizierter Zugversuch: Maximale Zugkraft, AlMg2,5 / 0.5, alle Strukturen

$F_{Z,max}$ in kN	FeP04 / 0.5		
Richtung der Proben	0° WR	45° WR	90° WR
ohne Struktur	8,19	---	---
DIEDRICHS	8,30	8,55	8,19
PWO	8,42	8,61	8,29
FQZ	7,94	8,16	7,97
MIRTSCH	8,43	8,61	8,26

Tabelle 10: Modifizierter Zugversuch: Maximale Zugkraft, FeP04 / 0.5, alle Strukturen

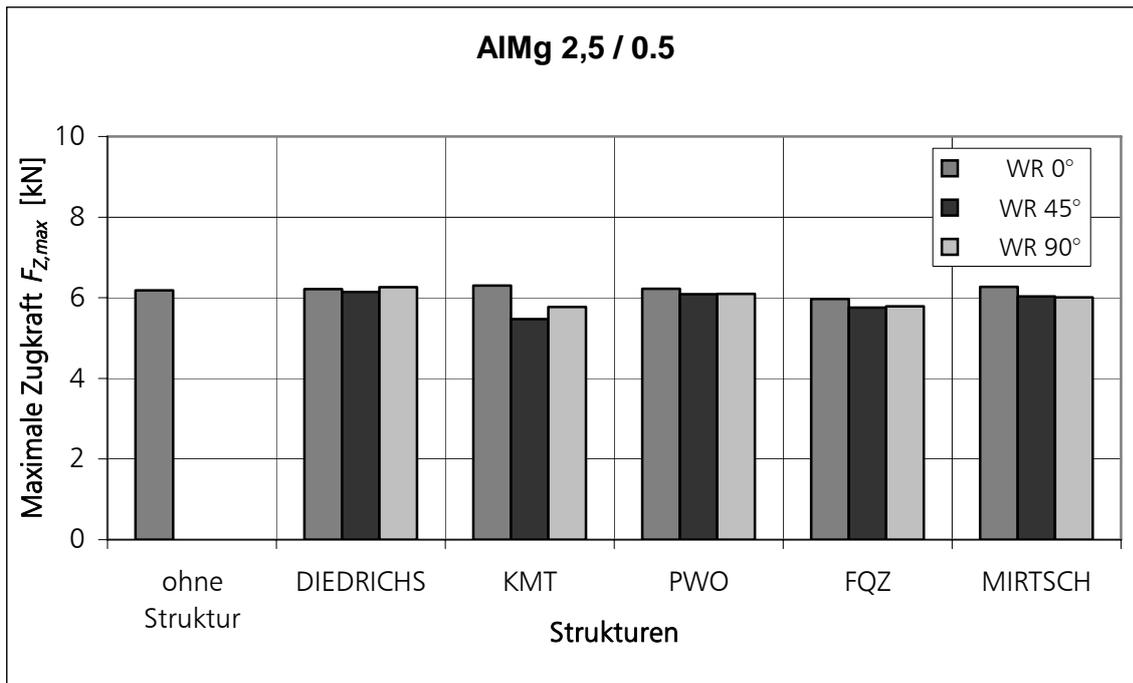


Abbildung 107: Modifizierter Zugversuch: Walzrichtungseinfluss auf die maximale Zugkraft, AlMg2,5 / 0.5, alle Strukturen

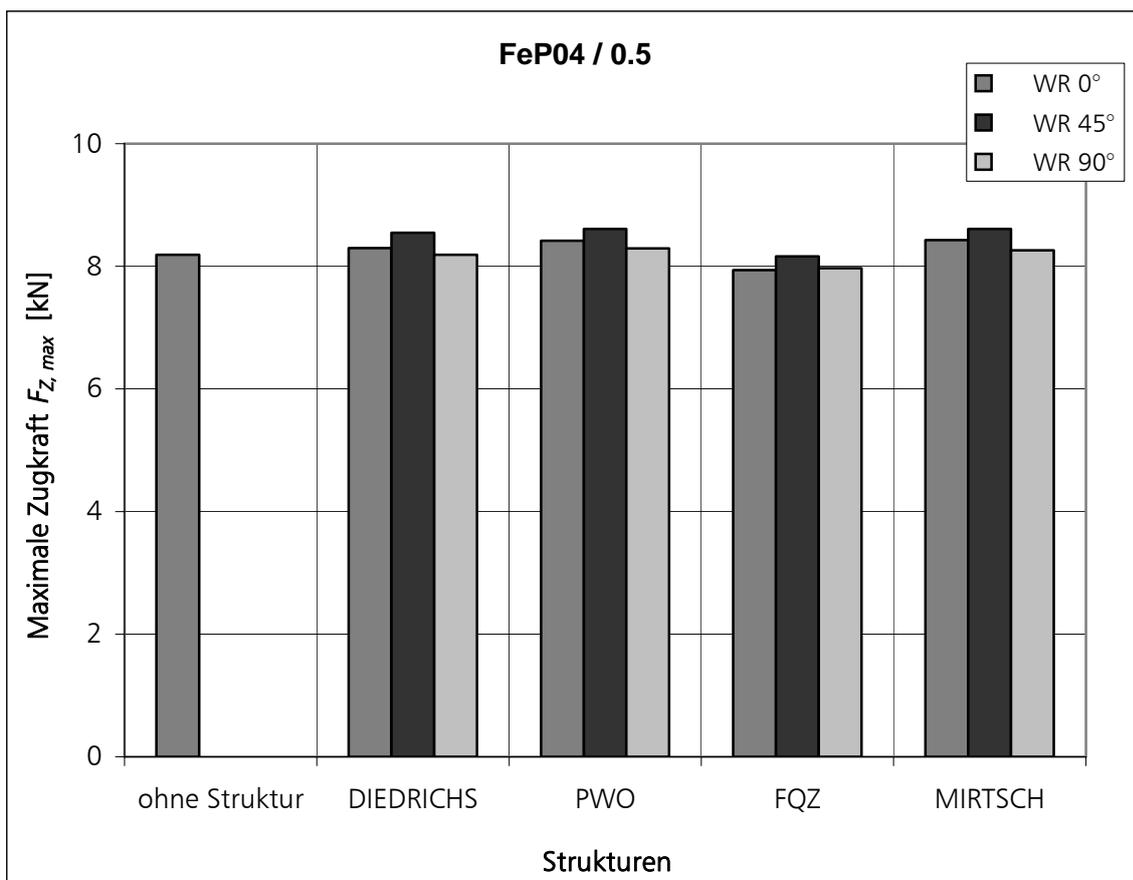
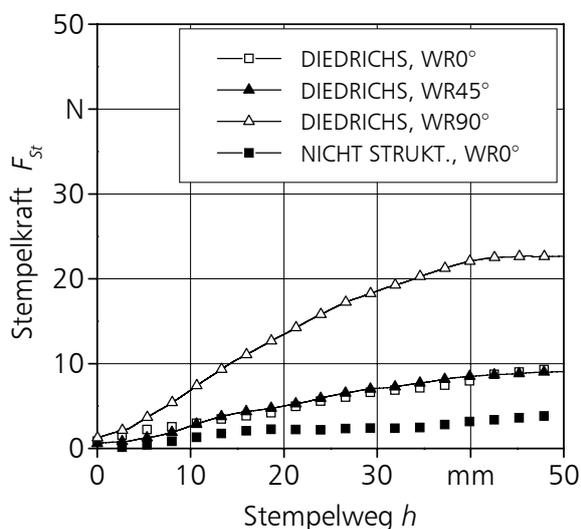


Abbildung 108: Modifizierter Zugversuch: Walzrichtungseinfluss auf die Maximale Zugkraft, FeP04 / 0.5, alle Strukturen

Stempelkraft-Stempelweg-Schaubild des modifizierten 3-Punkt-Biegeversuchs

AlMg2,5 / 0.5



FeP04 / 0.5

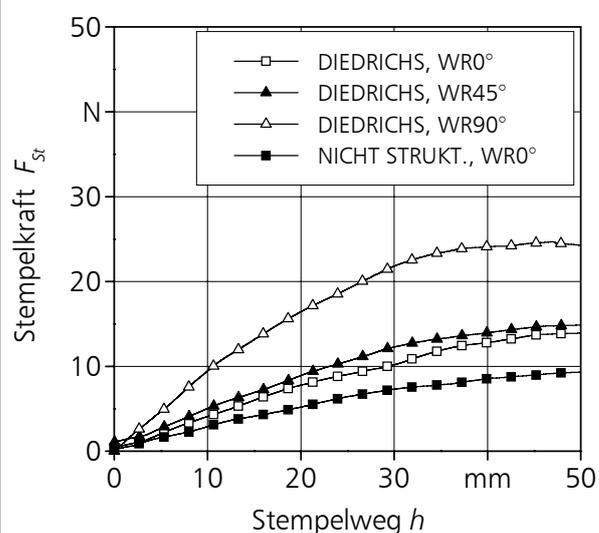


Abbildung 109: Modifizierter 3-Pkt.-Biege-Versuch: Walzrichtungseinfluss, exemplarisch, AlMg2,5 / 0.5, Struktur DIEDRICHS

Abbildung 110: Modifizierter 3-Pkt.-Biege-Versuch: Walzrichtungseinfluss, exemplarisch, FeP04 / 0.5, Struktur DIEDRICHS

$F_{\bar{A}50}$ in Nmm	AlMg2,5 / 0.5		
Richtung der Proben	0° WR	45° WR	90° WR
ohne Struktur	109	---	---
DIEDRICHS	276	---	732
KMT	660	240	---
PWO	---	205	130
FQZ (pos./neg.)	151/ 180	---	---
MIRTSCH, neg.	983	---	249

Tabelle 11: Modifizierter 3-Pkt.-Biege-versuch: Maximale und minimale Formänderungsarbeit, AlMg2,5 / 0.5, alle Strukturen

$F_{\bar{A}50}$ in Nmm	FeP04 / 0.5		
Richtung der Proben	0° WR	45° WR	90° WR
ohne Struktur	289	---	---
DIEDRICHS	424	---	847
PWO	---	499	276
FQZ (pos./neg.)	---/ 348	---	369/ ---
MIRTSCH, neg.	1561	---	549

Tabelle 12: Modifizierter 3-Pkt.-Biegeversuch: Maximale und minimale Formänderungsarbeit, FeP04 / 0.5, alle Strukturen

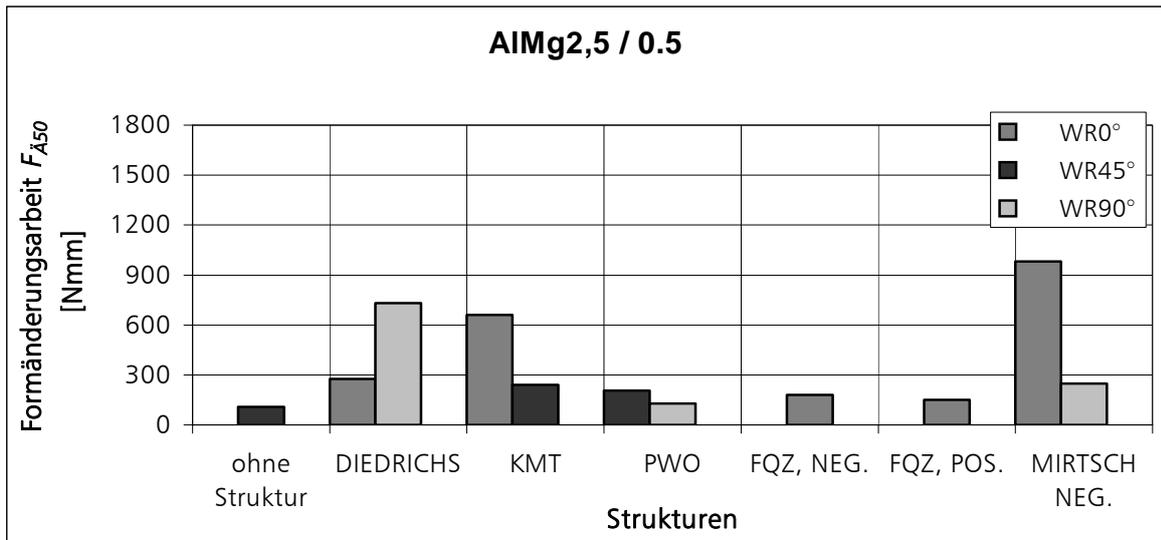


Abbildung 111: Modifizierter 3-Pkt.-Biegeversuch: Walzrichtungseinfluss auf die maximale und minimale Formänderungsarbeit, AlMg2,5 / 0.5, alle Strukturen

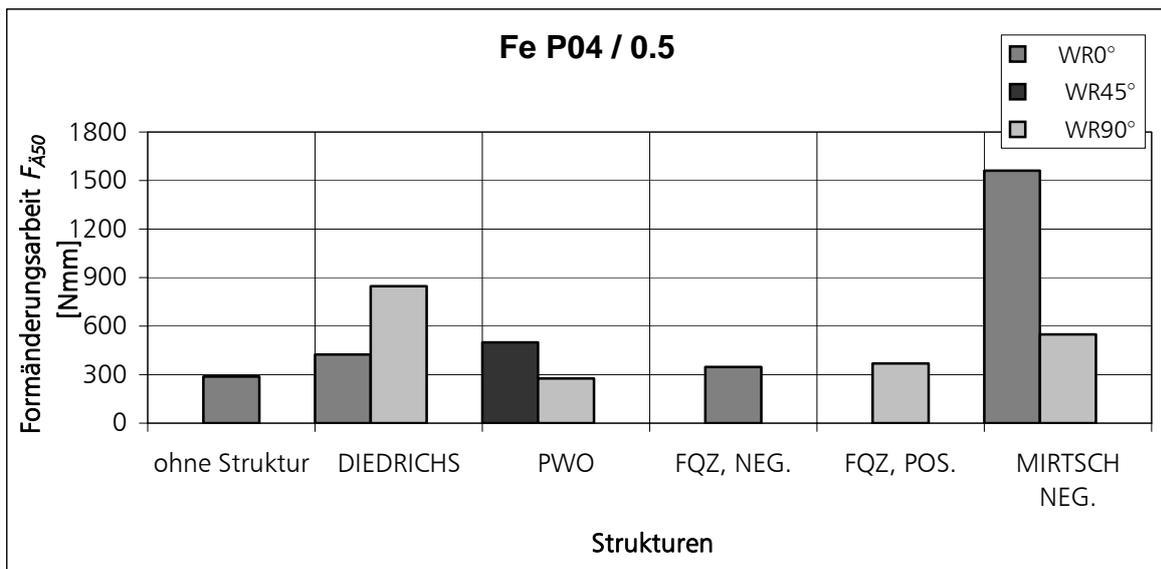


Abbildung 112: Modifizierter 3-Pkt.-Biegeversuch: Walzrichtungseinfluss auf die maximale und minimale Formänderungsarbeit, FeP04 / 0.5, alle Strukturen

Torsionskraft-Drehwinkel-Schaubild

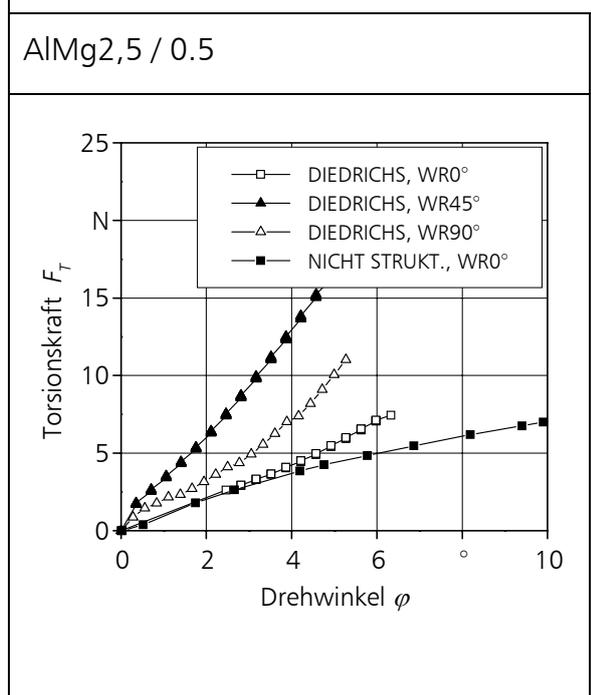


Abbildung 113: Modifizierter Torsionsversuch: Walzrichtungseinfluss, exemplarisch, AlMg2,5 / 0.5, Struktur DIEDRICHS

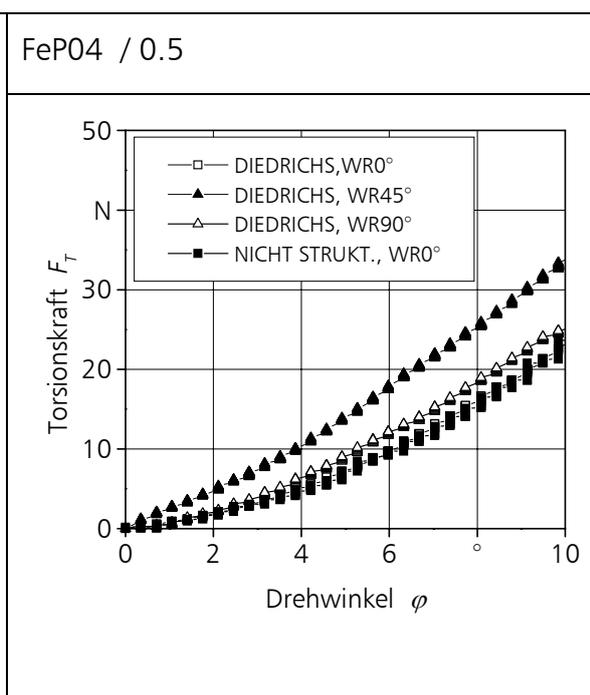


Abbildung 114: Modifizierter Torsionsversuch: Walzrichtungseinfluss, exemplarisch, FeP04 / 0.5, Struktur DIEDRICHS

M_T in Nmm bei $\varphi = 3^\circ$	AlMg2,5 / 0.5		
	Richtung der Proben 0° WR	45° WR	90° WR
ohne Struktur	100	---	---
DIEDRICHS	100	280	160
PWO	180	160	160
MIRTSCH	130	160	100
KMT	160	340	320

Tabelle 13: Modifizierter Torsionsversuch: Torsionsmoment ($\rho\varphi = 3$), AlMg2,5 / 0.5, alle Strukturen

M_T in Nmm bei $\varphi = 3^\circ$	FeP04 / 0.5		
	Richtung der Proben 0° WR	45° WR	90° WR
ohne Struktur	280	---	---
DIEDRICHS	200	450	240
PWO	380	120	200
MIRTSCH	230	420	180

Tabelle 14: Modifizierter Torsionsversuch: Torsionsmoment ($\varphi = 3^\circ$), FeP04 / 0.5, ausgewählte Strukturen

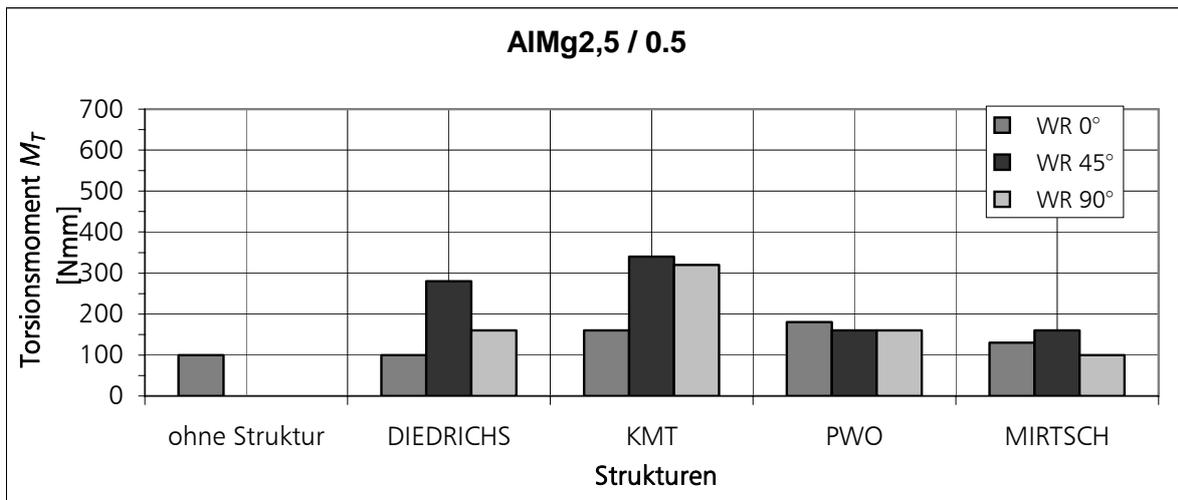


Abbildung 115: Modifizierter Torsionsversuch: Walzrichtungseinfluss auf das Torsionsmoment ($\varphi = 3^\circ$, AlMg2,5 / 0.5, alle Strukturen)

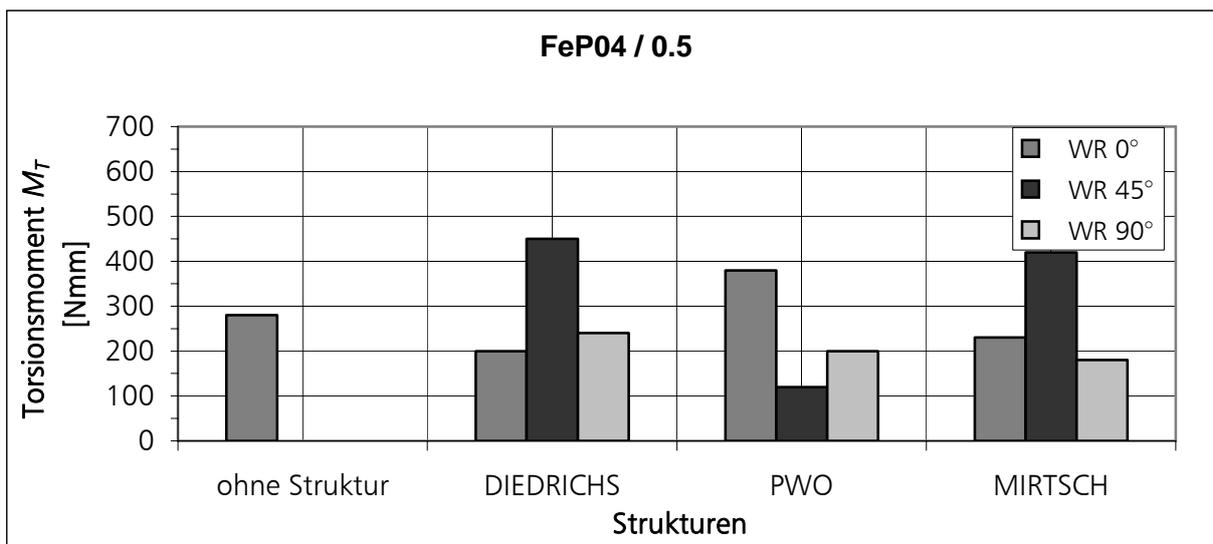


Abbildung 116: Modifizierter Torsionsversuch: Walzrichtungseinfluss auf das Torsionsmoment ($\varphi = 3^\circ$, FeP04 / 0.5, ausgewählte Strukturen)

Ergebnisse: Modifizierter Einebnungsversuch

AlMg2,5 / 0.5 und FeP04 / 0.5, alle Strukturen

Es ergibt sich für alle Strukturen ein charakteristischer Druckkraft-Längenänderungs-Verlauf. Die Darstellung des Einflusses der Struktur auf die Druckfestigkeit erfolgt daher exemplarisch anhand der **Referenzstruktur**, Abbildung 117. Die Kurvenverläufe der anderen Material-Struktur-Kombinationen zeigen ein ähnliches Verhalten, so dass sich der Bereich des Beginns der Einebnung der Strukturen durch das Abfallen der Kurven nach einem steilen ersten Anstieg deutlich definieren lässt. Die auf diesen Punkt bezogene Druckkraft $F_{D,bez}$ wurde aus den Diagrammen für jede Struktur ermittelt. Aus der Probengeometrie $b \times l = 114 \text{ mm} \times 114 \text{ mm}$ für den Einebnungsversuch wird die Ausgangsquerschnittsfläche $A_{D,0}$ als konstant festgelegt. Mit $p_{D,bez} = F_{D,bez} / A_{D,0}$ kann die bezogene Flächenpressung $p_{D,bez}$ für jede Material-Struktur-Kombination berechnet werden. Tabelle 15 stellt die aus den Diagrammen bestimmten strukturbezogenen Druckkräfte $F_{D,bez}$ und die dazu berechneten strukturbezogenen Flächenpressungen $p_{D,bez}$ gegenüber. In Abbildung 118 ist das Verhalten der Strukturbleche bei überkritischer Flächenpressung dargestellt. Die maximal erzielbare Struktureinebnung wurde für die Versuche bei einer maximalen Druckkraft $F_{D,max} = 220 \text{ kN}$ und daraus resultierend mit einer überkritischen Flächenpressung von $p_{D,max} = 17 \text{ N/mm}^2$ erreicht.

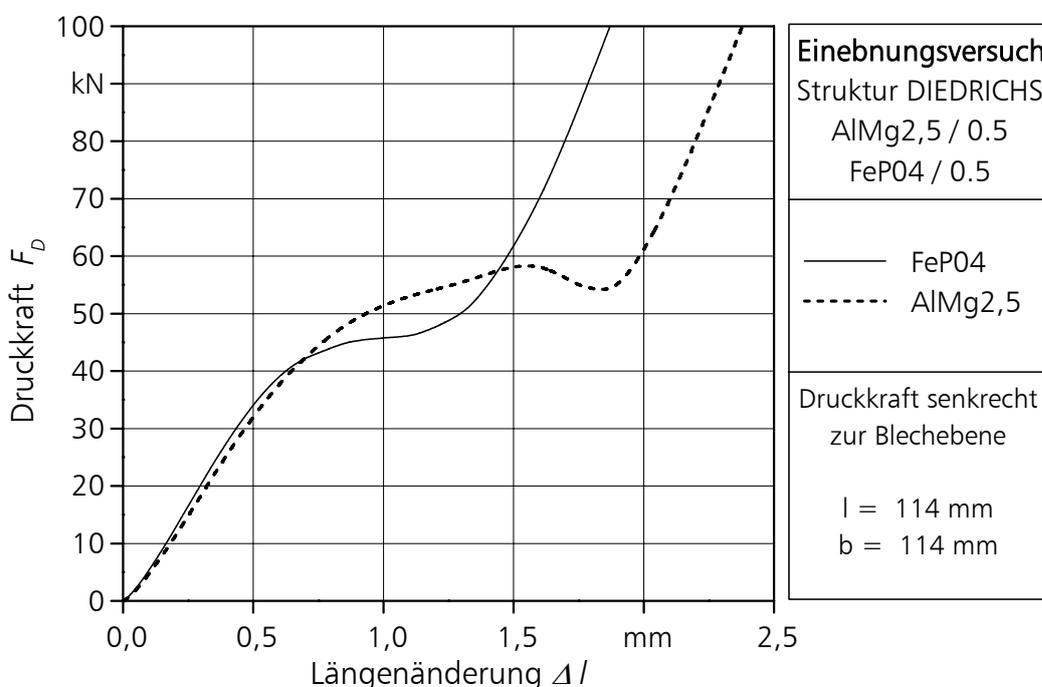


Abbildung 117: Modifizierter Einebnungsversuch: Druckkraft-Längenänderungs-Verlauf, AlMg2,5 / 0.5, Struktur DIEDRICHS und FeP04 / 0.5, Struktur DIEDRICHS

Material	Struktur	Druckkraft $F_{D,bez}$	Flächenpressung $p_{D,bez} = F_{D,bez} / A_{D,0}$
AlMg2,5 / 0.5	DIEDRICHS	48 kN	3,69 N/mm ²
	KMT	80 kN	6,16 N/mm ²
	PWO	45 kN	3,46 N/mm ²
	FQZ	45 kN	3,46 N/mm ²
	MIRTSCH	3 kN	0,23 N/mm ²
FeP04 / 0.5	DIEDRICHS	42 kN	3,23 N/mm ²
	PWO	70 kN	5,39 N/mm ²
	FQZ	58 kN	4,46 N/mm ²
	MIRTSCH	3 kN	0,23 N/mm ²

Tabelle 15: Modifizierter Einebnungsversuch: Strukturbezogene Druckkraft, strukturbezogene Flächenpressung, alle Material-Struktur-Kombinationen

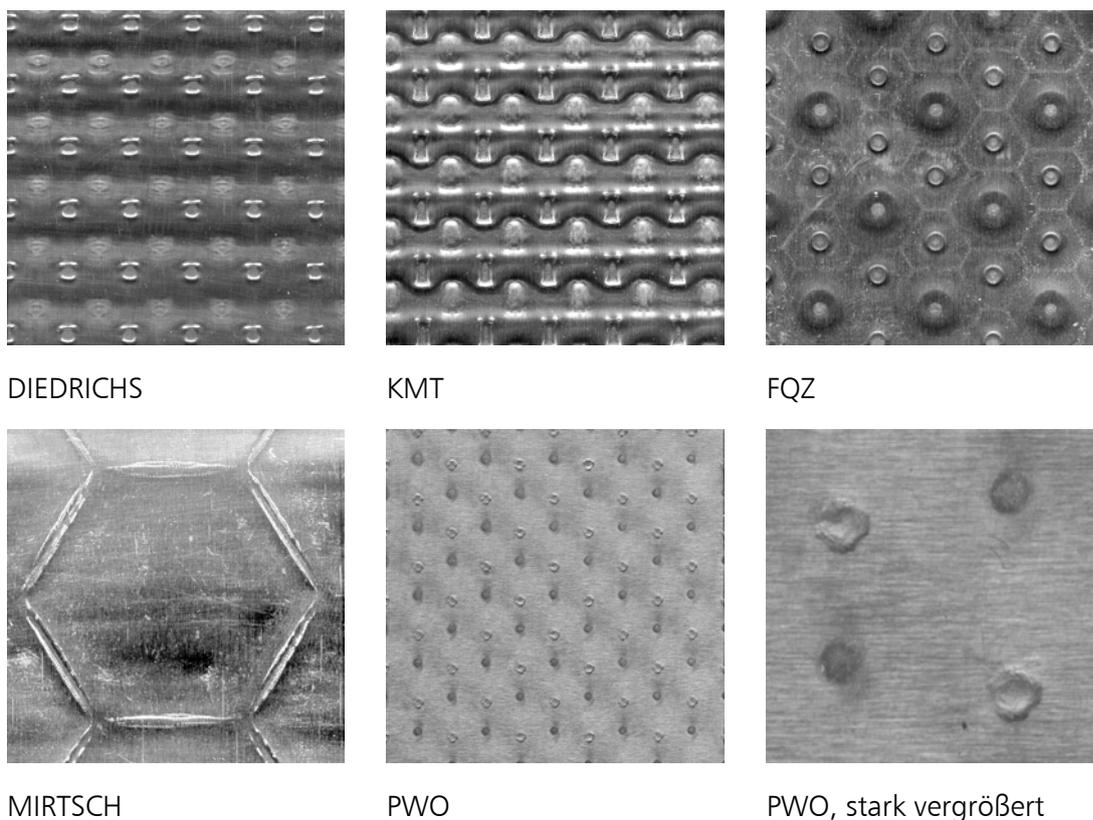


Abbildung 118: Modifizierter Einebnungsversuch: Einebnung der Strukturen bei überkritischer Flächenpressung $p_{D,max} = 17 \text{ N/mm}^2$, Maßstab 1:1, AlMg2,5 / 0.5, alle Strukturen

Zusammenfassung der Ergebnisse der modifizierten Prüfverfahren

Die Ermittlung von werkstoffmechanischen Eigenschaften für strukturierte Feinbleche mit den modifizierten Prüfverfahren ist möglich. Die modifizierten Versuchsbedingungen sind zu normieren. Die werkstoffmechanischen Festigkeitseigenschaften strukturierter Feinbleche sind maßgeblich durch die Strukturierung beeinflusst. Für alle geprüften Material-Struktur-Kombinationen stellt sich in Abhängigkeit von der Struktur für die Darstellung der Ergebnisse ein typischer Kurvenverlauf ein.

Weiterhin sind die werkstoffmechanischen Festigkeitswerte von der Richtung, von der Lage und von der Anordnung der Strukturen auf der Probe sowie von den Ausgangswerkstoffen abhängig. Dieses anisotrope Verhalten zeigen in unterschiedlich starker Ausprägung alle untersuchten Material-Struktur-Kombinationen. Die gewählte Bezeichnung Walzrichtung WR kennzeichnet jeweilig auch eine Anordnungsrichtung der Strukturelemente.

Mit dem modifizierten Zugversuch wurde der Einfluss der Richtung der Proben nachgewiesen. Die maximalen Zugkräfte der strukturierten Materialien liegen durchgängig über den Werten der nicht strukturierten. Mit der Erhöhung der maximalen Zugkraft $F_{z,max}$ geht eine Verminderung der bezogenen Längenänderung Δl an der Stelle $F_{z,max}$ einher. Strukturbleche weisen somit unter Zugbeanspruchung das Verfestigungsverhalten von Glattblechen auf. Die ermittelten Längenänderungen bei maximaler Zugkraft $F_{z,max}$ entsprechen nicht den Erwartungen bezüglich einer deutlichen Umformreserve aus der Struktur.

Jede der untersuchten Material-Struktur-Kombination besitzt aufgrund der Strukturierung Biegehauptrichtungen, in denen die Biegesteifigkeit maximale oder minimale Werte annimmt. Die maximalen und die minimalen Biegesteifigkeiten einzelner Strukturen für einen Werkstoff streuen dabei um mehrere 100 %. So ist insbesondere für die Referenzstruktur DIEDRICHS eine maximale Biegesteifigkeit, geprüft in 90° zur Walzrichtung, und eine minimale Biegesteifigkeit, geprüft in 0° zur Walzrichtung, zu verzeichnen. Die maximale Biegesteifigkeit steigt auf das 2,4fache. Hierbei kommt der Wellblecheffekt durch die directionale Strukturierung des Ausgangsmaterials deutlich zum Tragen. Die Biegesteifigkeiten schwanken in den Hauptrichtungen 0° zur Walzrichtung zu 90° zur Walzrichtung um 240 % Prozent.

Für die nicht symmetrisch (einseitig) zur Blechmitte eingebrachte Kugel- bzw. Beulstruktur wird der Walzrichtungseinfluss auf die Biegesteifigkeiten durch die Faktoren „Strukturlage positiv“ oder „Strukturlage negativ“ überlagert. Mit der Formänderungsarbeit wurde eine qualitative Datenbasis geschaffen, mit welcher grundlegende, strukturbedingte Eigenschaften aufgezeigt werden. Gegenüber den

Glattblechproben sind die Formänderungsarbeiten F_{A50} für alle Strukturproben größer und können Steigerungen von bis zu 800 % erreichen. Dies gilt hauptsächlich für die Beulstruktur, geprüft in 0° zur Walzrichtung und in der „Strukturlage negativ“.

Für den modifizierten Torsionsversuch stellen sich in Abhängigkeit von der Richtung der Proben für die einzelnen Strukturen und Walzrichtungen charakteristische, werkstoffabhängige Steifigkeitsmaxima bzw. -minima ein. Die minimalen Torsionssteifigkeiten aller Material-Struktur-Kombinationen des AlMg2,5 / 0.5 sind mindestens so groß wie die der Glattbleche. Die Torsionssteifigkeit strukturierter gegenüber nicht strukturierten Versuchswerkstoffen kann durch die Berücksichtigung der Richtung der Proben zur Walzrichtung um das 3fache gesteigert werden. Dies trifft für die Walzstruktur KMT zu, geprüft in 45° zur Walzrichtung.

Für die Material-Struktur-Kombinationen des FeP04 / 0.5 ist das Verhältnis der Torsionssteifigkeiten der Strukturbleche zu denen der Glattbleche sehr gestreut. Für die Torsionssteifigkeiten der Strukturbleche stellt sich sowohl ein Zuwachs an Steifigkeiten gegenüber den Glattblechen als auch eine Abnahme ein. Der höchste Gewinn an Torsionssteifigkeit kann für den FeP04 / 0.5, Walzstruktur DIEDRICHS, geprüft in 45° zur Walzrichtung, mit einem Zuwachs von 60 % gegenüber dem nicht strukturierten Versuchsmaterial erreicht werden.

Die Durchführung von modifizierten Einebnungsversuchen mit der Druckkraft senkrecht zur Blechebene liefert werkstoff- und strukturbezogene Grenzwerte für die Flächenpressung, ab der eine Einebnung der Strukturen stattfindet. Diese Werte dienen zur Ermittlung der strukturbezogenen Niederhalterkräfte für den angepassten Näpftiefziehversuch. Die Strukturen werden selbst nach einer Beaufschlagung mit einer maximalen Druckkraft $F_{D,max}$ und der daraus resultierenden überkritischen Flächenpressung $p_{D,max} = 17 \text{ N/mm}^2$ nur unvollständig eingeebnet. Bemerkenswert ist dabei die Ausbildung von gleichmäßig verteilten Sechseckstrukturen an der FQZ-Struktur. Offensichtlich wird hier ein mechanischer Instabilitätszustand erzeugt, in dessen Folge ein so genannter Selbstorganisationseffekt eintritt. Dieser Effekt ist auch beim Verfahren der Beulstrukturierung zu beobachten

Für die wirkmedienbasierten Umformversuche müssen Dichtungssysteme entwickelt werden, die flexibel genug sind, um ein Nachfließen des strukturierten Materials zu ermöglichen und dennoch ein Abdichten des Umformraumes vor allem bei nicht eingeebneten Proben zu realisieren.

Mit zunehmender Festigkeit des Ausgangswerkstoffes nimmt der Zuwachs der Steifigkeit durch die Strukturierung ab. Aufgrund der unterschiedlich hohen Festigkeiten der Ausgangswerkstoffe konnten nicht alle Materialien beim Strukturieren mit den gleichen Strukturhöhen versehen werden. Die Strukturhöhen

der strukturierten Stahl-Feinbleche sind wesentlich geringer als die Strukturhöhen der Aluminium-Feinbleche. Dadurch ergibt sich ein geringeres Widerstandsmoment für die Werkstoffe mit höheren Festigkeiten und demzufolge ist das Versteifungspotential nicht vollständig ausgeschöpft.

Der Einfluss der Strukturhöhe auf das Steifigkeitsverhalten konnte mit den zur Verfügung stehenden Versuchsmaterialien nicht untersucht werden. Es ist davon auszugehen, dass durch Variation der Strukturhöhen eine weitere Erhöhung der Steifigkeiten möglich ist.

Erklärung des Zugversuchverhaltens strukturierter Feinbleche

Als Ergebnis der Zugversuche wurde festgestellt, dass die maximalen Zugkräfte der strukturierten Materialien durchgängig über den Werten der nicht strukturierten liegen. Auf die bei Zugversuchen übliche Darstellung des Spannung – Dehnung – Diagramms wurde bisher verzichtet, da es nicht gelingt, den Probenquerschnitt exakt zu erfassen, und damit die Spannung zu ermitteln. Anders als bei einem nur in Zugrichtung profiliertes Blech, ändert sich der Querschnitt je nach betrachtetem Schnitt. Anhand eines Schliffbildes einer DIEDRICHS-Probe konnte exemplarisch ein zufälliger Probenquerschnitt ermittelt werden.



Abbildung 119: Ermittlung der Probenfläche

Der Abstand zweier Strukturen wurde mit 7.74 mm ermittelt. Die gemessene Länge der gedachten Mittellinie beträgt 8.14 mm. Das entspricht einer Verlängerung von rund 5 %. Wie in Abbildung 119 deutlich sichtbar weißt das strukturierte Blech vor allem im Bereich der Kerbe eine deutliche Materialstärkenreduzierung auf. Die Fläche zwischen zwei Strukturen wurde unter dem Messmikroskop ausgemessen und entspricht der Fläche aus Ausgangsblechdicke mal Strukturabstand.

Dieses Ergebnis stimmt auch mit den Beobachtungen aus der Einbringung der Strukturen überein, wo kaum Änderungen der Abmaße der Ausgangsplatte beim Strukturierungsvorgang beobachtet wurden. Durch das Strukturieren erfolgt eine Streckziehen des Werkstoffs. Damit kann wenigstens zu Beginn des Zugversuches ein Ausgangsquerschnitt ermittelt und ein scheinbares Spannungs – Dehnungs – Diagramm erstellt werden.

Mit dem klassischen Zugversuch werden jetzt keine reinen Material- bzw. Festigkeitskennwerte, sondern durch die Struktur vorgegebene Bauteileigenschaften ermittelt. Dabei treten im Zugversuch verschiedene Beanspruchungen der Probe auf. Bei genauer Betrachtung der Probe gibt es Materialanteile, die direkt in der Proben- und damit in der Beanspruchungsebene liegen. Diese werden auf Zug beansprucht. Andere Materialanteile, die die eigentliche räumliche Struktur ergeben, befinden sich nicht direkt in der Beanspruchungsebene – diese werden durch die eingeleitete Zugbelastung auf Biegung beansprucht.

Unter Zugbeanspruchung wird zuerst ein Teil der Struktur aus der Beanspruchungsebene „herausgezogen“. Das heißt, die direkt in der Beanspruchungsebene liegenden Probenteile werden soweit gestreckt, bis die strukturierten, räumlich ausgebildeten Anteile fast vollständig eingeebnet sind. Damit stellen sich in der Zugprobe Zonen unterschiedlicher Beanspruchung ein. Im Vergleich zu einem Glattblech mit gleichen Querschnittsabmessungen steht beim strukturierten Blech nur ein geringerer, direkt auf Zug beanspruchter Querschnitt zur Verfügung.

Das strukturierte Element besitzt jedoch gegenüber dem blechebenen Element durch den bereits eingebrachten Strukturierungsvorgang veränderte Materialeigenschaften, die im Wesentlichen als Verfestigung nachweisbar sind. Erst wenn die Strukturierung überwiegend eingeebnet ist, nimmt der gesamte Probenquerschnitt die Zugbeanspruchung auf und der klassische Zugversuch kann beendet werden. Auf Grund dieses komplizierten Mechanismus weicht das Spannungs-Dehnungs-Diagramm zwischen strukturierten- und unstrukturierten Materialien im typisch elastischen Bereich so stark ab.

Da, bezogen auf den beanspruchten Probenquerschnitt, der Anteil der mittragenden Elemente in der strukturierten Probe geringer ist als in der Glattblechprobe, kann nur ein geringer Kraftanteil elastisch übertragen werden. Der Bereich des Fließens setzt deutlich eher ein. Daher ergibt sich keine ausgeprägte Streckgrenze wie bei einem Glattblech. Da die Zugversuche nur zur Bestimmung der maximalertragbaren Kraft durchgeführt wurden, liegen auch keine Erkenntnisse über das „Elastische“ Verhalten der strukturierten Feinbleche vor. Wie Abbildung 105 sehr deutlich zeigt, ist der Kurvenverlauf im Kraft – Verlängerungs – Diagramm stark Strukturanordnungsabhängig (WR). Für die Ermittlung der Dehnsteifigkeit sind weitere Versuche, auch mit anderen Strukturanordnungsrichtungen (WR) notwendig.

Zu den interessantesten Ergebnissen des Zugversuches gehört die Musterbildung auf Proben unter einem bestimmten Strukturanordnungswinkel (Abbildung 120). Während der Zugversuch bei Glattblechen wegen seinem einachsigen Spannungszustand sehr geeignet ist, erweicht sich der dreiachsige Spannungszustand

beim strukturierten Feinblech als nicht so günstig. Es ist zu prüfen, ob ein anderer Versuch nicht besser geeignet ist, diesbezügliche „Materialkennwerte“ der strukturierten Feinbleche zu ermitteln.

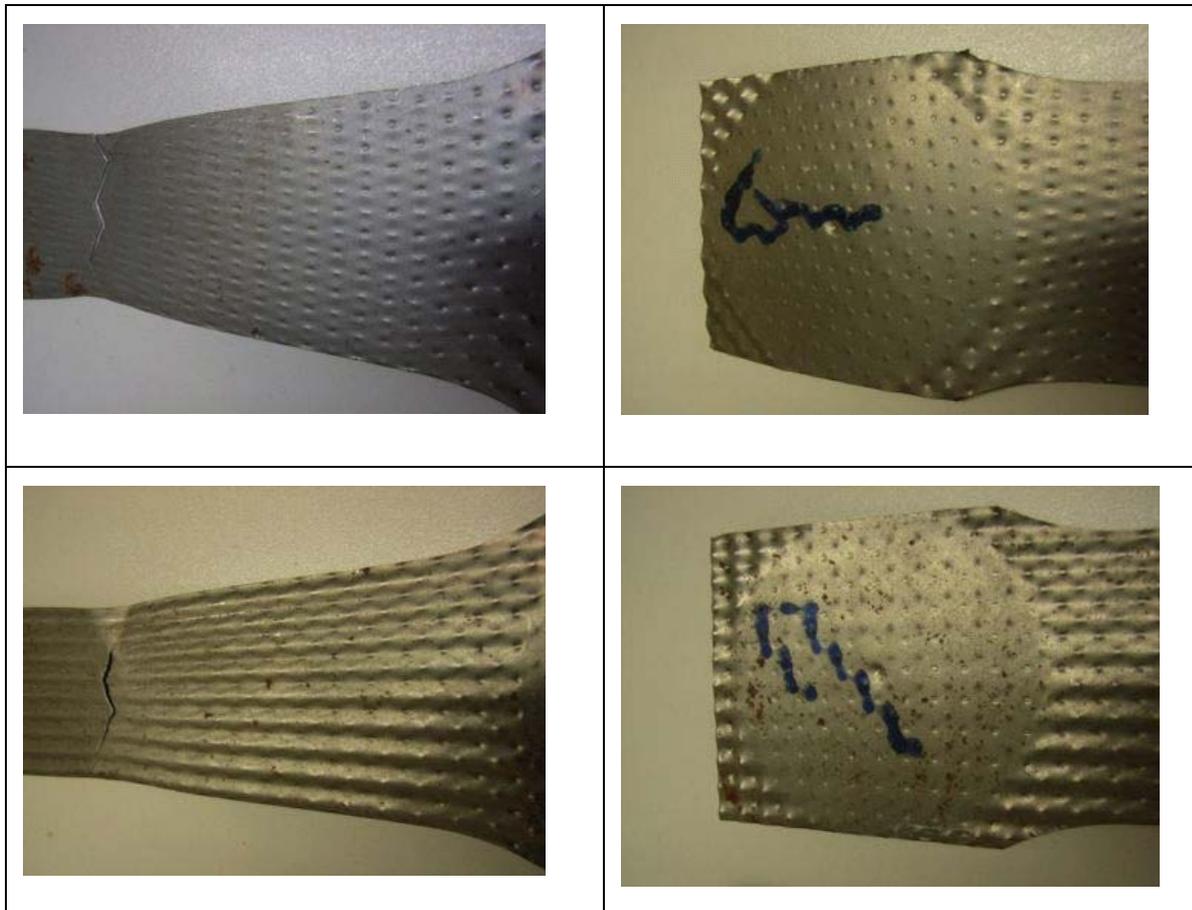


Abbildung 120: Musterbildung bei Zugversuchen

Zur Simulation des Zugverhaltens strukturierter Feinbleche wurde eine Struktur in drei Teile gegliedert, einem Glattblechanteil in Zugebene um den Strukturteil außerhalb der Zugebene vermindert (Bauteil B) und einen reinen Strukturteil (Bauteil C). Zum Vergleich der Ergebnisse wird ein Glattblech mit simuliert (Bauteil A). Abbildung 121 zeigt die Simulation eines Zugversuches von drei verschiedenen Zugproben und ihr Verhalten. Dabei stellt das Bauteil A ein Glattblech dar, die Kurve entspricht den üblichen Spannungs–Dehnungs–Diagrammen für niedriglegierte Stähle mit ausgeprägter Streckgrenze.

Das Bauteil B ist ein Glattblech mit Durchgangsbohrung, wobei der durch die Bohrung entfernte Materialteil dem nicht in der Zugebene liegendem Materialanteil entspricht. Dieses Bauteil besitzt real eine geringere Querschnittsfläche, so dass die ertragbaren Spannungen entsprechend geringer sind. Bauteil C stellt nun ein die gesamte Zugprobe Struktur dar. Es tritt zuerst durch die eingeleiteten Zugkräfte eine Biegebeanspruchung auf, die den Prozess der plastischen Verformung schon bei

geringen Spannungen einleitet, obwohl die Proben den gleichen beanspruchten Probenquerschnitt wie das Bauteil A besitzt. Das reale strukturierte Feinblech verhält sich wie eine netzartige Federschaltung aus den Kennlinien, denn jede Kurve im Kraft – Weg – Diagramm entspricht einer Federsteifigkeit.

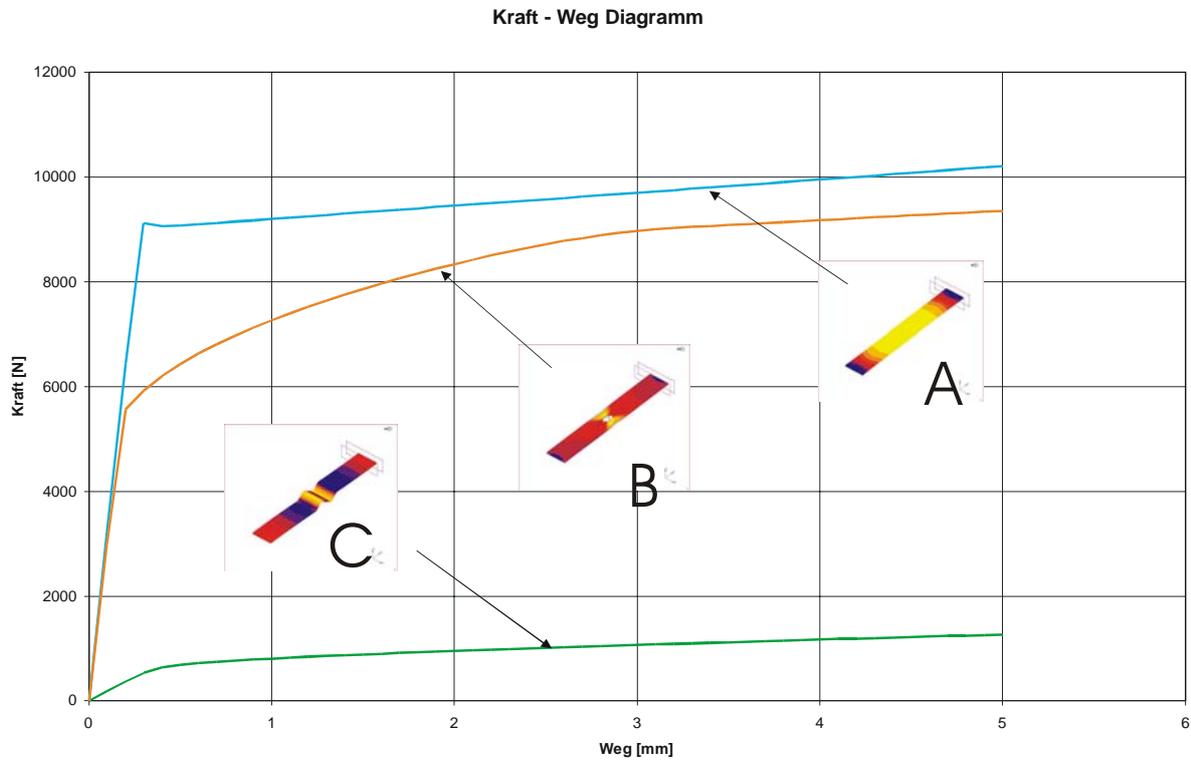


Abbildung 121: Ergebnisse der Simulation eines Zugversuches

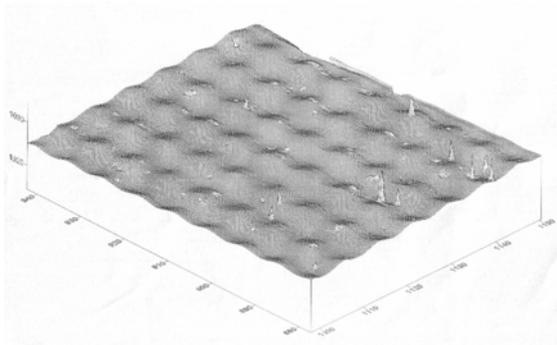


Abbildung 122: Nachgebildete Struktur eines vermessenen strukturierten Feinbleches

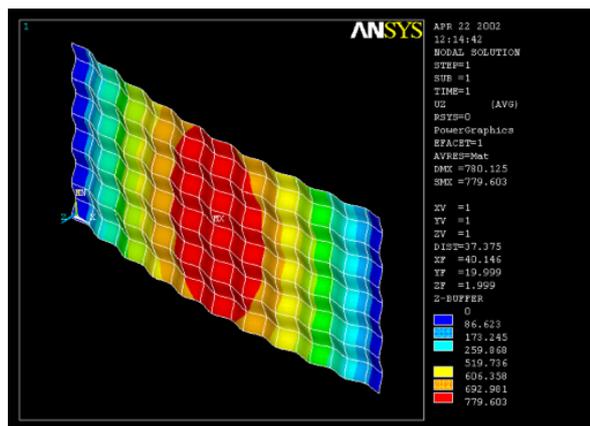


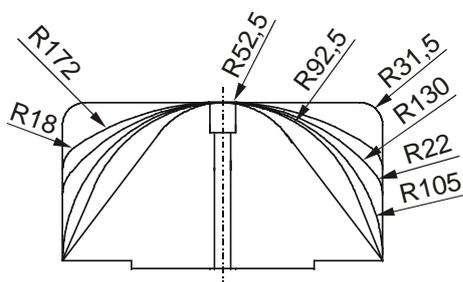
Abbildung 123: Verformungsfigur“ des strukturierten Feinbleches bei Biegebeanspruchung

Vorversuche zur Ermittlung der Umformeigenschaften für das Tiefziehen

Ein sehr großer Anteil der Bauteile wird heute durch Tiefziehen mit Werkzeugen (Konventionelles Tiefziehen) gefertigt. Konventionelles Tiefziehen gehört entsprechend der Klassifikation der Umformverfahren, DIN 8582, zu den Zug-Druck-Umform-Verfahren. Der Verfahrensablauf mit Hinweisen zur Werkzeuggestaltung und zu den Prozessparametern wird in vielen Arbeiten für die Werkstoffgruppen Stahl und Aluminium hinreichend untersucht [159, 160, 161, 162].

Die Umformeigenschaften beschreiben das Werkstoffverhalten bei der Formgebung [160, 161, 162, 163; 152, 153, 164]. Die Prüfung der Eignung von Werkstoffen für das konventionelle Tiefziehen von Blech und Band wird im Allgemeinen mit dem Näpfchenziehversuch nach Swift durchgeführt. Ziel des Näpfchenziehversuches nach Swift ist die Ermittlung des Grenzziehverhältnisses $\beta = d_{0,max}/d_1$. Dazu wird schrittweise der Rondendurchmesser d_0 vergrößert, unter Beibehaltung des Stempeldurchmessers d_1 . Die Prüfung erfolgt mit einem flachen Stempel (Stempeldurchmesser $d_1 = 33$ mm, Stempelkantenradius $r_{st} = 5$ mm nach DIN 50155). Als Maß für die Tiefziehfähigkeit wird der maximale Rondendurchmesser $d_{0,max}$ ermittelt, der ohne Bodenreißer umgeformt werden kann. Fehler nicht strukturierter Feinbleche treten bei Überschreiten der zulässigen Höchstbelastung auf.

Die **Umformeigenschaften von Glattblechen** lassen sich auch durch den Verfestigungsexponenten n und die senkrechte Anisotropie r beschreiben [159, 153]. Der Verfestigungsexponent n ist ein Maß für das Verfestigungsvermögen des Werkstoffes bei der Kaltumformung. Die senkrechte Anisotropie r ist das Verhältnis der Umformgrade in Breiten- und Blechdickenrichtung beim Flachzugversuch. Diese beschreibt den Widerstand eines Ausgangsmaterials gegen Fließen in Dickenrichtung.



Stempelgeometrie	Stempelkantenradius r_{st}	
Stempel 1	R31,5	
Stempel 2	R18	R172
Stempel 3	R22	R130
Stempel 4	R105	
Stempel 5	R52,5	Tangente
Stempel 6	R92,5	Tangente

Abbildung 124: Versuchswerkzeug: Stempel, Stempelgeometrie, Stempelkantenradius

Beim **Umformen strukturierter Feinbleche** sind die Strukturgeometrie und die Kaltverfestigung zu beachten. Die folgende Tabelle die Unterschiede bei der Umformung glatter und strukturierter Feinbleche.

Glattbleche	Strukturbleche
Näpffchenziehversuch nach Swift	Angepasster Näpffchentiefziehversuch
Kenngroßen	Umformeigenschaften
Grenzziehverhältnis β aus Ronden- durchmesser/Stempeldurchmesser Maß für Tiefziehfähigkeit	Ziehverhältnis β_z aus Ronden- durchmesser/Stempeldurchmesser Maß für Grad der Einebnung und / oder des Raffens der Strukturen
Verfestigungsexponent n aus dem Anstieg der Fließkurve k_f	Werkstoff zusätzlich verfestigt durch Strukturierungsprozess
Anisotropiewert r aus Dicken- und Breitenänderung der Probe	zusätzlich Anisotropieverhalten der Strukturen zu den Walzrichtungen
Fließkurve k_f in Abhängigkeit von A_0 (A_0 = Ausgangsquerschnittsfläche) Gleichmaßdehnung A_G	Darstellung $\Delta l = f(F_z)$ Elastizität der Struktur zugeordnete Längenänderung bei $F_{z, max}$

Tabelle 16: Definition des Umformverhaltens strukturierter Feinbleche (Auswahl)

Bei den Untersuchungen zum Umformen strukturierter Feinbleche bewusst darauf verzichtet, ein Grenzziehverhältnis β für Strukturbleche zu ermitteln. Das Grenzziehverhältnis β charakterisiert die Tiefziehfähigkeit von Glattblechen. Die Ermittlung des Versagens strukturierter Feinbleche durch Reißer setzt voraus, dass die Struktur während des Umformens vollständig eingeebnet wurde. Das steht im Widerspruch zur erwünschten Bauteilqualität. Die Struktur soll zur Steifigkeitserhöhung überwiegend erhalten bleiben.

Daher wird als Verfahrensgrenze ein Ziehverhältnis β_z festgelegt. Dieses definiert das Verhältnis von Rondendurchmesser d_0 zu Stempeldurchmesser d_1 , bei welchem optimale Ziehtiefen bei bestmöglicher Strukturhaltung und möglichst geringem Raffen der Strukturen erreicht werden können. Für diese Verfahrensgrenze spielen vor allem die Anforderungen an die Qualität der strukturierten Bauteile eine übergeordnete Rolle. So wird derzeit innerhalb der industriellen Verarbeitung von strukturierten Bauteilen ein Raffen und Falten der Strukturen geduldet.

Auf Grund der Strukturgeometrien können Blechdickenänderungen Δs während des Umformens zur Bestimmung z. B. der Anisotropie n im Flachzugversuch oder auch Ausgangsquerschnittsflächen A_0 zur Berechnung des Umformgrades nicht eindeutig oder ohne höheren messtechnischen Aufwand bestimmt werden. Auch bei der Suche

nach Versagensgrenzen für das Tiefziehen ist der Struktureinfluss zu berücksichtigen. Die Bildung von Falten 1. und 2. Ordnung im Flanschbereich und das Auftreten von Reißen, sowohl in der Zarge als auch im Bodenbereich, kennzeichnen Versagensgrenzen beim Tiefziehen nicht strukturierter Ziehteile. Die Versagensarten und –grenzen für das konventionelle Tiefziehen strukturierter Feinbleche sind neu zu definieren. Ein kennzeichnendes Qualitätskriterium für das Tiefziehen strukturierter Feinbleche besteht darin, dass die Ziehteile bei größtmöglicher Strukturhaltung ein Minimum des Raffens der Strukturen aufweisen.

Ergebnisse

Auch beim Umformen und Ziehen weichen die Ergebnisse der strukturierten Feinbleche von denen der Glattbleche ab. Zum Einen gestattet die Strukturierung während des Ziehens, dass die Struktur gestreckt wird und damit eine zusätzliche Materialreserve besteht und zum Anderen behindert aber die Struktur auch den Fließvorgang, so dass die Struktur gerafft wird. Weitere Besonderheiten ergeben sich auch bei der Gestaltung des Umformwerkzeuges. So darf durch den Niederhalter die Struktur nicht verformt werden. Ziehradien und Ziehspalte sind der Struktur anzupassen. Durch eine optimierte Schmierung ist ein Fließen des strukturierten Bleches zu ermöglichen.

Für den Vergleich der Tiefzieheigenschaften der strukturierten Feinbleche wurde ein angepasster Nüpfchenziehversuch entwickelt, der die Ermittlung des Grenzziehverhältnisses ermöglicht. Dabei wird der Ziehvorgang beendet, wenn sich die Struktur im Boden einebnet. Mit umfangreichen Versuchen wurde die optimale Ziehtiefe bei maximaler Strukturhaltung und Minimierung des Raffens der Strukturen für jede Material-Struktur-Kombination ermittelt (Tabelle 17).

Material	Struktur	Distanzhöhe $h_{D,NH}$ [mm]	Strukturhöhe h_s [mm]	Distanzhöhe/ Strukturhöhe	Ziehtiefe h_z [mm]
AlMg2,5 / 0.5	KMT	2,5	2,4	1,04	40
AlMg2,5 / 0.5	DIEDRICHS	2,3	2,15	1,07	30
AlMg2,5 / 0.5	PWO	1,7	1,6	1,06	25
AlMg2,5 / 0.5	FQZ	1,7	1,6	1,06	30
AlMg2,5 / 0.5	MIRTSCHE	4,2	3,1	1,36	30
FeP04 / 0.5	DIEDRICHS	1,8	1,8	1,0	25
FeP04 / 0.5	PWO	1,5	1,6	0,94	40
FeP04 / 0.5	FQZ	1,0	1,4	0,71	45
FeP04 / 0.5	MIRTSCHE	1,5	3,1	0,48	< 25

Tabelle 17: Niederhalterkraft: Distanzhöhe, Strukturhöhe, Ziehtiefe, alle Material-Struktur-Kombinationen

Innerhalb der durchgeführten Versuche wurde festgestellt, dass durch die gewählte konstante Niederhalterkraft, die Flächenpressung beim Tiefziehen strukturierter Feinbleche zu groß wird. Die Struktur wird am Ende der Versuche im Flansch vollständig eingeebnet. Es findet kein Tiefziehvorgang statt, sondern überwiegend Streckziehen. Dadurch wird dann das gesamte Bauteil auch bei sehr geringen Ziehtiefen eingeebnet.

Nachfolgend erfolgte die Begrenzung der Niederhalterkraft mittels distanziertem Niederhalter. Mit dieser Vorgehensweise kann ein großer Teil der vorhandenen Strukturen unter den verschiedensten Einflussgrößen geprüft werden, da der Aufwand im Vergleich zur Verfahrensweise mit der degressiven Steuerung der Niederhalterkraft für jede Material-Struktur-Kombination relativ gering ist. In Abhängigkeit von der Strukturhöhe wurden kreisringförmige Distanzen in das Werkzeug eingelegt. Die Distanzen wurden in unterschiedlicher Höhe aus Glattblechen zugeschnitten.

Die Ermittlung der Höhe der Distanzen ist daher sehr kostengünstig und erfolgt in geringer Versuchszeit. Innerhalb erster Stichprobenversuche stellte sich heraus, dass für ein Verhältnis von Distanzhöhe zu Strukturhöhe größer als 1,0 für den AlMg2,5 / 0.5, Struktur DIEDRICHS, die Struktur am besten erhalten bleibt. Ein weiterer Punkt, der für die Versuche mit distanziertem Niederhalter spricht, ist die Praxistauglichkeit. In den Zulieferbetrieben werden strukturierte Feinbleche ebenfalls mittels Distanzierung gezogen.

Der wirkmedienbasierte Tiefziehversuch wird zur Prüfung des Umformverhaltens strukturierter Feinbleche durchgeführt. Mit diesem Tiefziehversuch soll beanspruchungsmäßig überwiegend das Tiefziehen der strukturierten Feinbleche dargestellt werden. Er ist eine Kombination aus angepasstem Näpfchentiefziehversuch und hydraulischem Tiefzugsversuch. Aus dem angepassten Näpfchentiefziehversuch werden die Werkzeugparameter übernommen. Der Durchmesser des Stempels d_1 für den angepassten Näpfchentiefziehversuch beträgt $d_1 = 210$ mm und wurde mit dieser Größe ausreichend groß für das Prüfen der großflächigen Strukturen ausgelegt. Der Matrizeninnendurchmesser d_{MI} für das Versuchswerkzeug für den wirkmedienbasierten Tiefziehversuch beträgt demzufolge auch $d_{MI} = 210$ mm.

Somit ist auch ein Verfahrenvergleich zwischen dem konventionellen und dem wirkmedienbasierten Tiefziehen möglich. Das Tiefziehen einer strukturierten Blechprobe erfolgt entsprechend der Durchführung des hydraulischen Tiefzugsversuches reibungslos durch das Aufbringen eines einseitig wirkenden

hydrostatischen Druckes eines Wirkmediums. Der Versuch ist praxisnah. Als Verfahrensgrenze für das Prüfen von Glattblechen wird die Polhöhe, bei der ein Riss auftritt, ermittelt. Für die Strukturbleche erfolgt die Ermittlung der maximalen Ziehtiefe, bei welcher die Strukturen nicht mehr als 10 % eingebnet sind.

Für die Beurteilung der Ergebnisse wurden folgende Qualitätskriterien beachtet (Tabelle 18). Eine, von den Herstellern der strukturierten Feinbleche vermutete Umformreserve durch die vorhandene Struktur, konnte durch die Versuche nicht bestätigt werden. Die während der Strukturierung erfolgten Umformungen reduzieren das Umformvermögen des Grundwerkstoffes.

Im Rahmen von Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass sich strukturierte Feinbleche sowohl mit den konventionellen, mechanischen Umformverfahren als auch prinzipiell mit hydromechanischen Umformverfahren umformen lassen. Hydromechanische Umformverfahren beanspruchen die Struktur geringer, erfordern aber einen höheren konstruktiven Abdichtaufwand im Umformwerkzeug.

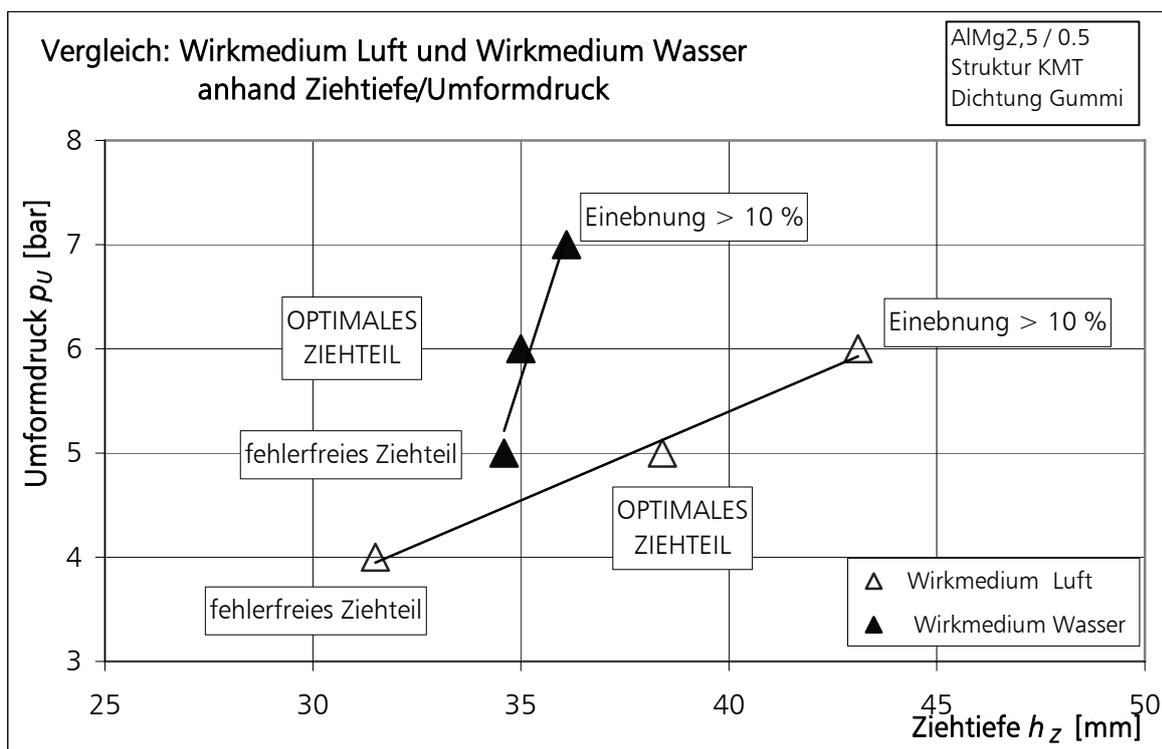


Abbildung 125: Umformdruck, Ziehtiefe, AlMg_{2,5} / 0.5; alle Strukturen [131]

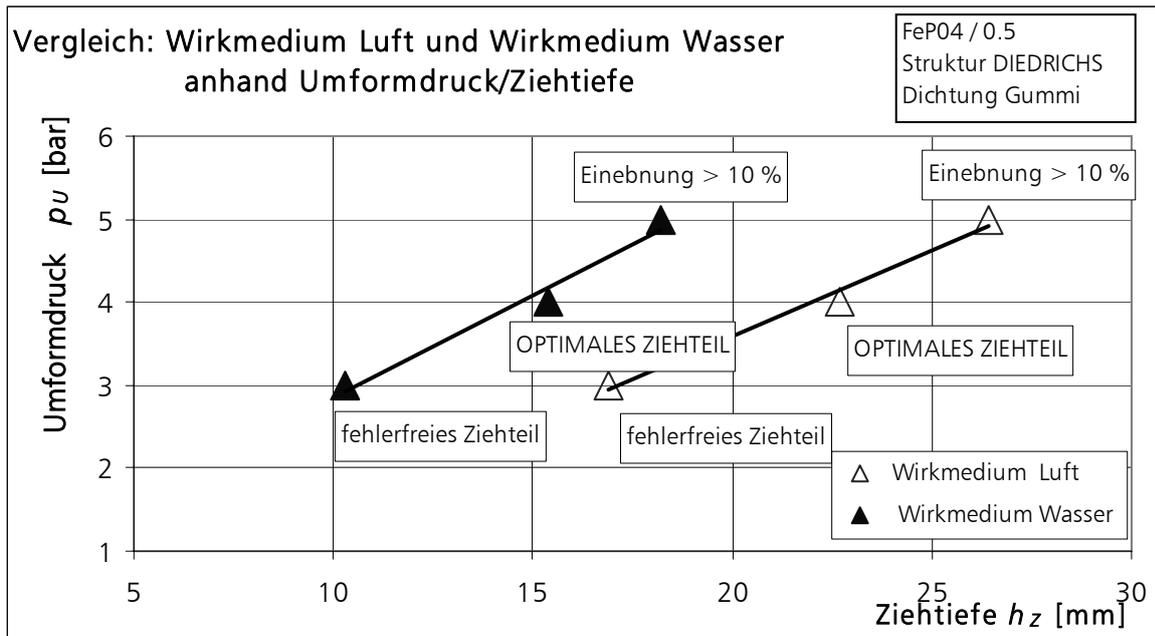
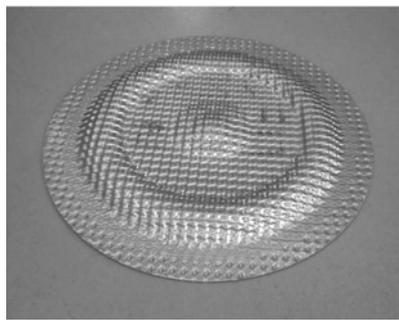
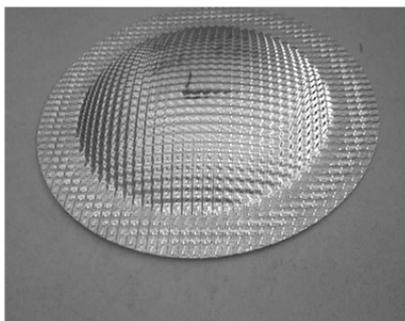


Abbildung 126: Umformdruck, Ziehtiefe, FeP 04/0,5; alle Strukturen [131]

Die Eigenschaft glatter Feinbleche, unter bestimmten Beanspruchungen Falten zu bilden, zeigt sich bei den strukturierten Feinblechen durch das Raffen der Struktur. In diesem gerafften Bereichen tritt ein erhöhtes Flächenmoment und damit ein erhöhtes Widerstandsmoment gegen Biegebeanspruchung auf. Durch ein gezieltes Einleiten des Raffvorganges kann das strukturierte Feinblech zusätzlich, ähnlich einer Sicke, verstärkt werden [131].



Struktur KMT, AlMg2,5

Struktur KMT, AlMg2,5

Wirkmedium: Luft

Wirkmedium: Wasseremulsion

Abbildung 127: Ergebnisse des wirkmedienbasierten Umformens [131]

Glattbleche	Strukturbleche
Qualitätskriterien beim Tiefziehen	
Bodenreißer, Längsreißer, Umfangsrisse	Bodenreißer, Längsreißer, Umfangsrisse
Faltenbildung am Flansch (Falten I. Ordnung)	Raffen der Strukturen am Flansch
Faltenbildung am Ziehteil (Falten II. Ordnung)	Raffen der Strukturen am Ziehteil
Faltenbildung am Bodenrand (Querfalten)	an den geprüften Werkstoffen und Strukturen nicht aufgetreten
nicht bekannt	Faltenbildung der gerafften Strukturen am Ziehteil
Zipfelbildung	Zipfelbildung
Fließfiguren	durch Strukturen nicht erkennbar
nicht bekannt	Einebnen der Strukturen im Flansch
nicht bekannt	Einebnen der Strukturen im Ziehteil
nicht bekannt	Einebnen der Strukturen im Boden

Tabelle 18: Qualitätskriterien beim Tiefziehen: Gegenüberstellung [131]

Vergleich des konventionellen mit dem wirkmedienbasierten Tiefziehen

Mit der Variation der Umformgeschwindigkeit konnte kein Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf die Qualität der strukturierten Ziehteile für die untersuchten Geschwindigkeiten im Bereich $v_U = 5$ bis 30 mm/s ermittelt werden. Alle Versuche zum konventionellen Tiefziehen wurden mit der Umformgeschwindigkeit $v_U = 20$ mm/s durchgeführt.

Das wirkmedienbasierte Tiefziehen mit dem Wirkmedium Druckluft ist besonders zu empfehlen, da in den Zulieferbetrieben meist eine Druckluftversorgung vorhanden ist. Für das Umformen strukturierter Feinbleche mit dem Wirkmedium Druckluft werden sehr geringe Umformdrücke (bis 5 bar) benötigt. Ein weiterer Vorteil ist, dass mit geringerem Umform- und Niederhalterdruck gegenüber dem Tiefziehen mit dem Wirkmedium Wasser größere optimale Ziehtiefen zu erzielen sind. Druckluft zeichnet sich auch als günstiges Wirkmedium ab, da keine Wirkmedienrückstände am Ziehteil oder am Werkzeug zu verzeichnen sind. Es besteht auch keine Korrosionsgefahr.

Weiterhin können in Abhängigkeit vom Umformdruck und vom Niederhalterdruck beim wirkmedienbasierten Tiefziehen schon bei sehr geringen Ziehtiefen geometrisch bestimmte Freiformen erzeugt werden. Dafür ist insbesondere das Wirkmedium Druckluft geeignet. Sollen jedoch komplexe strukturierte Ziehteile gefertigt werden, kann mit dem Wirkmedium Wasser bei Erhöhung des Umformdruckes und des Niederhalterdruckes gearbeitet werden.

Ergebnis der Untersuchungen zum konventionellen Tiefziehen zur Variation der Stempelgeometrie ist, dass mit dem Stempel 1 (flache Form, Stempeldurchmesser $d_0 = 210$ mm, Stempelkantenradius $r_{St} = 31,5$ mm) für alle Material-Struktur-Kombinationen optimale Ziehtiefen erzielt werden können. Der Stempel 1 wurde als Vorzugsstempel für alle weiteren Untersuchungen festgelegt. Die gewählte Stempelform (Vorzugsstempel) ermöglicht für das konventionelle Tiefziehen größere Ziehtiefen gegenüber dem wirkmedienbasierten Tiefziehen. Somit konnte für das konventionelle Tiefziehen nachgewiesen werden, dass werkzeugseitig mit dem Stempel 1 eine optimale Stempelgeometrie ermittelt wurde.

Beim konventionellen Tiefziehen ohne formgebende Matrize schmiegt sich das strukturierte Ziehteil bei geringen Ziehtiefen nicht an den Stempel an. Das ist vor allem auf die erhöhte Formsteifigkeit der strukturierten Feinbleche gegenüber Glattblechen zurückzuführen. In Abhängigkeit von der Stempelgeometrie ist ein vollständiges Anschmiegen des Strukturbleches erst bei großen Ziehtiefen zu erreichen. Eine zu hohe Beanspruchung im Bodenbereich des Ziehteiles kann dann jedoch schon zur Einebnung der Strukturen führen und zum Versagen durch Reißen.

Die Freiform wirkmedienbasiert geformter Ziehteile entspricht in etwa konventionell gezogener Ziehteile mittels Halbkugelstempel (Stempel 4, Stempelkantenradius $r_{St} = 105$ mm). Mit dieser Stempelgeometrie sind für das konventionelle Tiefziehen für den AlMg2,5 / 0.5 maximal 25 mm Ziehtiefe erreichbar, währenddessen für das wirkmedienbasierte Tiefziehen mit dem Wirkmedium Druckluft bis ca. 38 mm für den AlMg2,5 / 0.5 erreicht werden können. Strukturierte Feinbleche können unter der Bedingung der bestmöglichen Strukturhaltung sowohl mit Druckluft als auch mit Wasser wirkmedienbasiert umgeformt werden.

Gestaltungsregeln

Für die Gestaltung von Bauteilen aus strukturierten Feinblechen aus Aluminium und Stahl sollten folgende Regeln beachtet werden:

- Ausnutzung der strukturspezifischen Steifigkeiten für die Bauteilgestaltung,
- sofern die Struktur am Bauteilrand erhalten bleiben muss, darf der Zuschnitt nicht auf Scheren erfolgen,
- strukturierte Feinblech können unter Erhalt der Struktur sowohl konventionell als auch wirkmedienbasiert tiefgezogen werden,
- Stempelradien sind nicht in Abhängigkeit der Materialstärke sondern in Abhängigkeit der max. Strukturhöhe zu gestalten.

4.4 Untersuchungen zum Fügen strukturierter Feinbleche

Das Fügen von ebenen Flächen kann in drei wichtige Verbindungsarten eingeteilt werden:

- Mechanische Verbindung – Schrauben, Nieten
- Thermische Verbindung – Schweißen, Hartlöten und Weichlöten
- Chemische Verbindung – Kleben

Eine Schraubenverbindung als **mechanische Verbindung** ist eine ideale und zuverlässige Verbindungsmethode, wenn ein häufiges, problemloses Lösen der Verbindung erforderlich ist. Bei Schrauben- oder Nietverbindungen müssen Bohrungen angebracht werden, die zur Schwächung der Bauteile führen. Im Bereich der Bohrungen entstehen Spannungsspitzen, wenn die Verbindung Belastungen ausgesetzt ist. Dies kann in einigen Fällen zu einer vorzeitigen Ermüdung des Materials führen. Infolgedessen muss bei der Verwendung solcher Verbindungselemente die Materialstärke erhöht werden, damit die erforderliche Stabilität gewährleistet ist. Außerdem wird durch Schrauben- bzw. Nietlöcher die Korrosionsgefahr verstärkt. Aus diesem Grund ist häufig ein zusätzliches Abdichten oder ein Schutz des Werkstoffs erforderlich, und dies ist zumeist kompliziert und kostspielig. Werden unterschiedliche Metalle miteinander verbunden, können Kontaktkorrosion und unterschiedliche thermische Ausdehnung auftreten.

Schweißen oder Löten als **thermische Verbindung** kommt normalerweise nur bei ähnlichen Werkstoffen infrage. Diese Verbindungen können nicht mehr oder nur unter sehr großen Schwierigkeiten gelöst werden. Während der Schweiß- und Lötvorgänge treten sehr hohe Temperaturen auf, die unerwünschte Spannungen verursachen, in deren Folge Bauteilversagen oder Schädigung des Metallgefüges eintreten können.

Kleben als **chemische Verbindung** ist neben den herkömmlichen Verbindungsmethoden, wie Schweißen, Nieten und Schrauben, ein anerkanntes und gleichwertiges Verfahren. Das Kleben ermöglicht auch das Fügen von zwei nicht schweißbaren Werkstoffen, ohne Verwendung von Schrauben und Nieten. Es findet Anwendung beim Verbinden von einem nichtmetallischen Werkstoff mit einem metallischen, oder in den Fällen, wo eine Schweißung sich nachteilig auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der zu fügenden Materialien auswirkt. Vor allem bei Werkstücken, die durch ihre Größe und ihrer Materialstärke nur unter großen Aufwand oder gar nicht durch Schweißen oder Nieten sich fügen lassen,

können durch Kleben verbunden werden. Klebstoffe verteilen Belastungen und Spannungen über die gesamte Fügefläche und erzielen so eine gleichmäßigere Verteilung der statischen und dynamischen Belastungen, anstatt diese auf hochbeanspruchte Punkte zu konzentrieren. Klebeverbindungen sind aus diesem Grund beständiger gegen Biege- und Vibrationsbelastungen als beispielsweise Nietverbindungen. Klebstoffe können Klebeverbindungen gleichzeitig abdichten und beugen so der Korrosion vor, die bei mechanischen Verbindungen auftreten kann. Klebstoffe erleichtern das Fügen unregelmäßig geformter Oberflächen – und sorgen so für einfachere Verbindungen mit geringen (oder keinen) Änderungen an Abmessungen oder Geometrie der Teile.[163]

Kleben

Klebstoffe sind Brücken zwischen Werkstoffoberflächen, ungeachtet der Tatsache, ob es sich um einen oder um verschiedene Werkstoffe handelt. Die Bindefähigkeit von Klebeverbindungen wird von der Größe, der konstruktiven Gestaltung und der Oberflächenbeschaffenheit der Klebefuge sowie die Haftfähigkeit und Festigkeit des Klebstoffes bestimmt. Grundlegend hängt das Klebverhalten von folgenden Kriterien ab:

- der Klebefestigkeit des Klebstoffes am Werkstoff, die so genannte Adhäsion sowie,
- der Festigkeit innerhalb des Klebstoffes, die so genannte Kohäsion.

Gemäß DIN 16920(6.81) können Klebstoffe zu ihrer Charakterisierung noch Benennungen tragen, die auf den zur Herstellung verwendeten Grundstoff hinweisen, z.B. Polyvinylacetat-Dispersionsklebstoff, Polychlorporen-Lösungsmittelklebstoff oder Epoxidharz-Reaktionsklebstoff. Andere Bezeichnungen (Schmelzklebstoffe, Kontaktklebstoffe, Aktivierklebstoffe) geben einen Hinweis auf die Eignung von Klebstoffen zur Verarbeitung nach einem bestimmten Klebverfahren. Zusammengesetzte Benennungen können für eine weitergehende Charakterisierung von Klebstoffen hinsichtlich mehrerer Merkmale dienen, welche in der DIN 2330 näher erläutert werden.

Die meisten heutzutage in der Industrie verwendeten Klebstoffe sind reaktive Polymere. Durch eine Reihe von chemischen Polymerisationsreaktionen gehen sie vom flüssigen in den festen Aggregatzustand über. Für besondere Anwendungsbereiche wurden unterschiedliche Klebstoffe mit speziellen Aushärtungseigenschaften entwickelt. Anhand der Aushärteeigenschaften können die Klebstoffe in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- anaerob aushärtende Klebstoffe
- anionisch aushärtende Klebstoffe
- mit Aktivatoren aushärtende Klebstoffe
- durch Feuchtigkeit aushärtende Klebstoffe
- warmhärtende Klebstoffe
- durch UV-Licht aushärtende Klebstoffe.

Für optimale Ergebnisse beim Kleben ist eine geeignete Oberflächenvorbehandlung erforderlich. Die Festigkeit einer Klebeverbindung wird vor allem von der Adhäsion zwischen den Fügeoberflächen und dem Klebstoff bestimmt. Dabei ist besonders zu beachten, dass eine Verbindung umso fester ist, je gründlicher die Oberflächen zuvor gereinigt und vorbehandelt wurden.

Die Adhäsionskräfte können durch folgende Maßnahmen verbessert werden:

- Entfernen unerwünschter Oberflächenfilme durch Entfetten oder mechanisches Abschleifen
- Aufbau einer neuen aktiven Oberfläche durch Primerauftrag
- Änderung der Oberflächenaktivität durch Beizen, Coronabehandlung, Niederdruckplasmabehandlung usw.

Die Festigkeit und Langzeitbeständigkeit von Klebeverbindungen wird vorrangig durch folgende Parameter beeinflusst:

- Klebstoff
- Werkstoff
- Einsatzbedingungen
- Klebefugengeometrie
- Belastung

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Klebstoffs bestimmen das Adhäsionsvermögen und die innere Festigkeit von Klebeverbindungen. Ebenso hängt die Langzeitbeständigkeit stark von der Art des Klebstoffs ab. Die unterschiedlichen Klebstofftechnologien stellen nicht nur unterschiedliche Festigkeitsklassen und Elastizitätsmodule zur Auswahl, sondern bieten auch die Wahl der besten Adhäsionseigenschaften.

Häufig stellen die Werkstoffe und ihre Oberflächenbeschaffenheit die ersten Auswahlkriterien hinsichtlich des optimalen Klebstoffs oder der Klebefugengestaltung dar; aber auch die Steifigkeit der Bauteile und die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe sind wichtige Kriterien für die Auswahl des am besten geeigneten Klebstoffs. Die Einsatzbedingungen der Klebeverbindung (Temperatur, Chemikalien/Lösungsmittel, Feuchtigkeit usw.) beeinflussen die Klebstoffauswahl unmittelbar. Hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit sind die Einsatzbedingungen und die einwirkenden Kräfte die wichtigsten Parameter.

Die **Klebefugengestaltung** wird als wichtigster Parameter für den optimalen Einsatz eines ausgewählten Klebstoffs angesehen. Die Gestaltung muss den Limitationen des Klebstoffs angepasst (z.B. Durchhärtetiefe, Spaltfüllung usw.) und dahingehend optimiert werden, die ungünstigsten Belastungen für Klebeverbindungen (Spalt- und Schälbeanspruchung) zu vermeiden.

Ziel einer optimalen Klebefugengestaltung ist es, eine gleichförmige Spannungsverteilung zu erzielen. Aus diesem Grund müssen Konstrukteure gute Kenntnisse darüber besitzen, wie in Klebefugen die Spannungsverteilung bei Einwirken von Kräften erfolgt. Beim Konstruieren von Klebeverbindungen sind einige Leitlinien zu beachten.

Die Spannungsverteilungen in (Abbildung 128) lassen erkennen, dass Schäl- und Spaltbeanspruchungen nach Möglichkeit auszuschließen sind. Abbildung 129 zeigt einige Vorschläge, wie Schäl- oder Spaltbelastungen in günstigere Belastungen umgewandelt werden können.

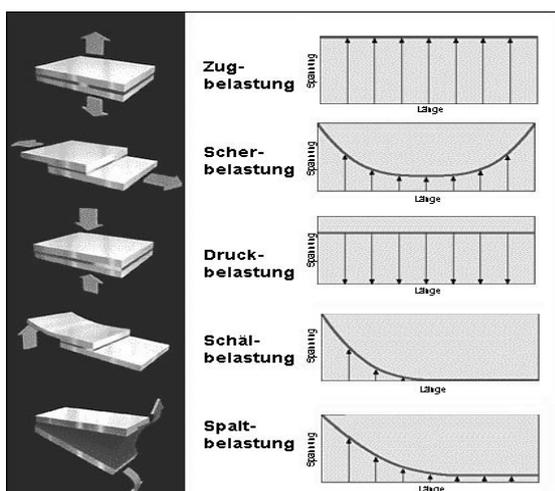


Abbildung 128: Die häufigsten Belastungsarten und ihre Spannungsverteilung in der Klebefuge

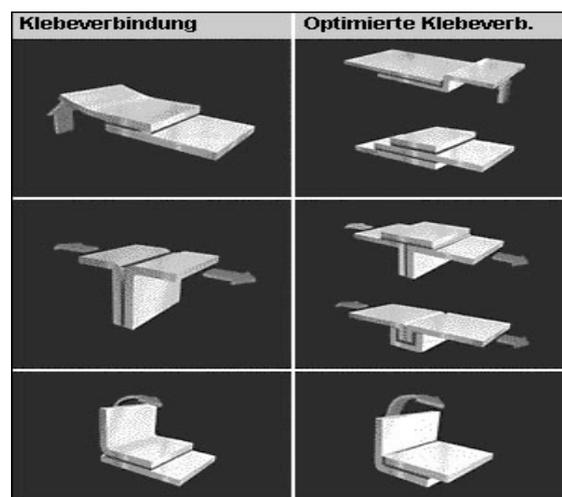


Abbildung 129: Schälbeanspruchung und konstruktive Gegenmaßnahmen

Die **Bestimmung der Klebefestigkeit** erfolgt nach DIN EN 1465 - Bestimmung der Zugscherfestigkeit hochfester Überlappungsklebungen. Die Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen wird mit Hilfe einer Scherbelastung zwischen den Füge­teilen durch Einwirkung einer Zugkraft bestimmt, die parallel zur Klebefläche und zur Hauptachse der Probe wirkt. Die gemessene Kraft oder Bruchspannung wird als Ergebnis festgehalten.

Zur **Probenvorbereitung** muss die Oberfläche des Füge­teils sachgemäß behandelt werden, um eine optimale Klebung zu erzielen. Wenn metallische Füge­teile verwendet werden, muss die Oberfläche nach ISO 4588 vorbehandelt werden, falls nichts anderes festgelegt wurde. Für alle Füge­teile ist das für die Oberflächenbehandlung verwendete Verfahren im Prüfbericht anzugeben. Die Anzahl der Klebproben hängt von der gewünschten Genauigkeit ab. Es sind jedoch nicht weniger als sechs Messwerte zu ermitteln.

Der Klebstoff muss entsprechend den Empfehlungen des Klebstoffherstellers eingesetzt werden und aushärten. Falls solche Empfehlungen fehlen, muss ein Verfahren gewählt werden, dass eine optimale Klebung mit minimalen Abweichungen zustande kommt. Es ist notwendig, eine geeignete Vorrichtung zur Ausrichtung der Füge­teile während des Klebevorgangs zu verwenden. Die Klebproben sind in einem der in ISO 291 festgelegten Labor-Normalklimate zu lagern und zu prüfen.

Die Probe ist in den Einspannklemmen symmetrisch anzuordnen, wobei sich jede Einspannklemme in einem Abstand von (50 ± 1) mm von der nächstgelegenen Kante der Überlappung befindet. In die Einspannklemmen kann ein Zwischenstück gesetzt werden, damit die aufgebrachte Kraft in der Klebungsebene wirkt. Die Prüfgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass die Klebung in der Regel innerhalb von (65 ± 20) s zerstört wird. Für jede Probe ist die größte Kraft zu ermitteln und festzuhalten. Ergebnisse von Proben, bei denen ein Füge­teil bricht, sind mit Ausnahmen von Routineprüfungen zu verwerfen.

Für die **Reinigung der Proben** und Aktivierung nicht poröser Untergründe wurde Sika Cleaner[®]-205 (Haftreiniger), eine alkoholische Lösung mit haftaktiver Substanz, verwendet. Als **Klebstoffe** kamen Sikaflex[®] -252, ein standfester, pastöser 1-Komponenten-Polyurethanklebstoff, der mit Luftfeuchtigkeit zu einem Elastomer aushärtet und Terokal-221, ein hochwertiger, lösungsmittelfreier Zweikomponenten-Klebstoff auf Epoxidharzbasis, dessen ausgehärtete Klebstoff-Film hart, aber nicht spröde ist, zum Einsatz.

Die Klebeversuche wurden in Anlehnung nach DIN EN 1465 durchgeführt. Die beiden Testreihen wurden jeweils unter gleichen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Lagerungsbedingungen und Prüfbedingungen) geklebt und geprüft.

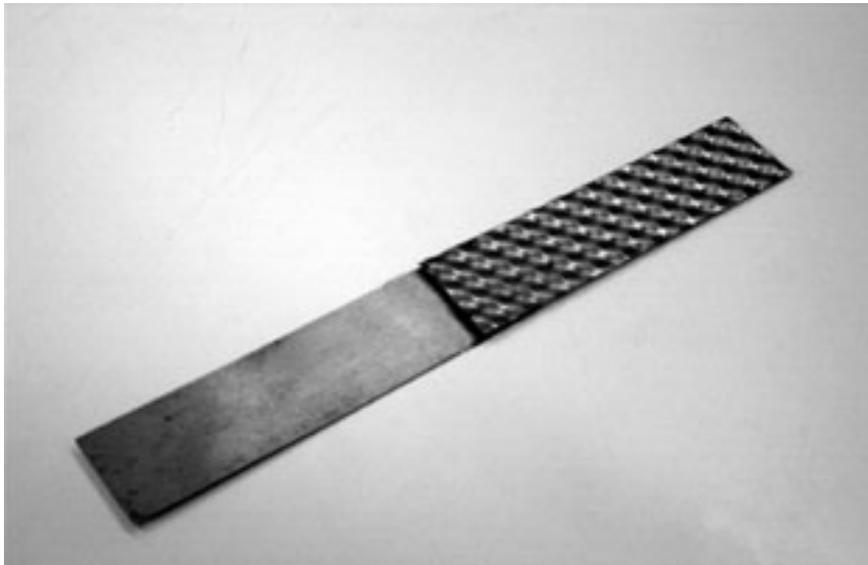


Abbildung 130: Klebprobe aus glattem und strukturiertem Feinblech

Als Vergleich für die Festigkeit der strukturierten Klebeverbindungen diente die Festigkeit der Klebeverbindung von glatten Blechen. Untersucht wurden jeweils 10 Proben:

- Glatte Bleche geklebt mit glatten Blechen,
- Glatte Bleche geklebt mit strukturierten Blechen,
- Strukturierte Bleche geklebt mit strukturierten Blechen.

Für die Versuche standen zwei Klebstoffe zur Verfügung und somit besteht die Testreihe A und die Testreihe B aus jeweils drei Probenreihen A1, A2 und A3 bzw. B1, B2 und B3. Die Probenreihen A1 und B1 sind jeweils die Vergleichsreihen, da glatte Bleche mit glatten Blechen und dem jeweiligen Kleber gefügt wurden. Bei den Reihen A2 und B2 wurden glatte Bleche mit strukturierten Blechen und bei den Reihen A3 und B3 wurden strukturierte Bleche mit strukturierten Blechen geklebt.

Zur Bewertung der Bruchbilder wurde die DIN EN ISO 10365 herangezogen. Die erreichten Zugfestigkeiten sind in den Abbildung 132 und Abbildung 133 dokumentiert. Prinzipiell wurden aber beim Verkleben glatter Bleche miteinander die größten Scherfestigkeiten erreicht. Die vorhandene Struktur der Bleche erzeugt Kraftkomponenten, welche die Proben bei Zugbelastung auseinander drücken und damit eine Schäl- und Spaltbelastung der Fügestellen (siehe Abbildung 128) verursachen.

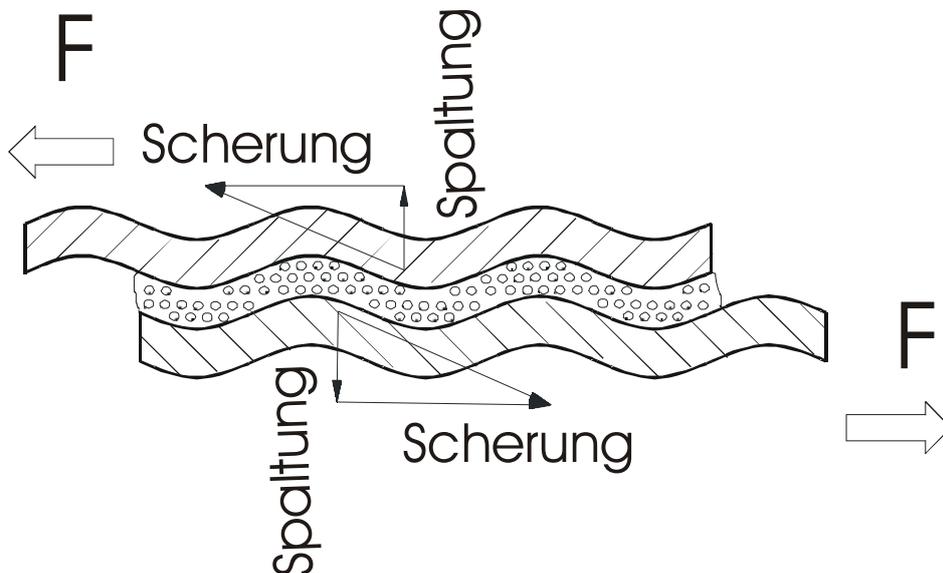


Abbildung 131: Klebprobe strukturierter Bleche (Variante 3) unter Zugbeanspruchung

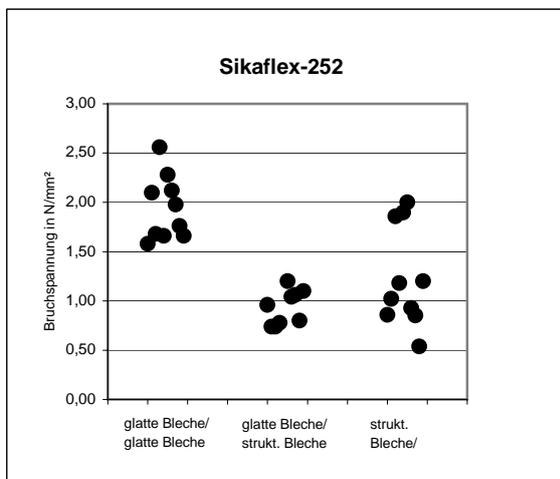


Abbildung 132: Ergebnisse für Sikaflex

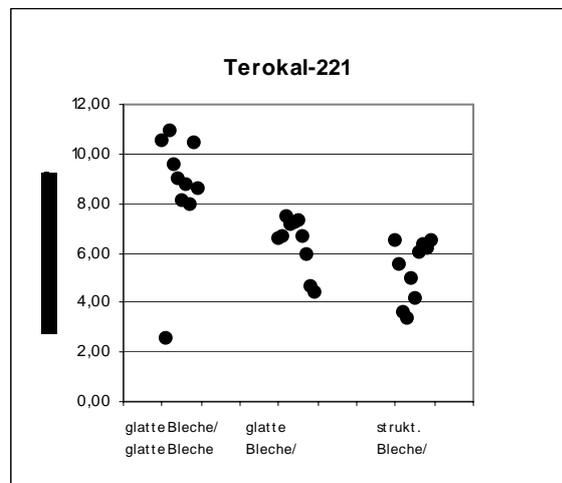


Abbildung 133: Ergebnisse für Terokal

Die Bruchbilder der Testreihe A kann man alle einem Kohäsionsbruch zuordnen. Die Bruchbilder bestanden zu ca. 90% aus Kohäsionsbruch und die restlichen 10% teilten sich auf in substratnaher spezieller Kohäsionsbruch und Adhäsionsbruch. Es war bei den unterschiedlichen Strukturen nicht zu erkennen, ob der substratnahe spezifische Kohäsionsbruch oder der Adhäsionsbruch überwiegt.

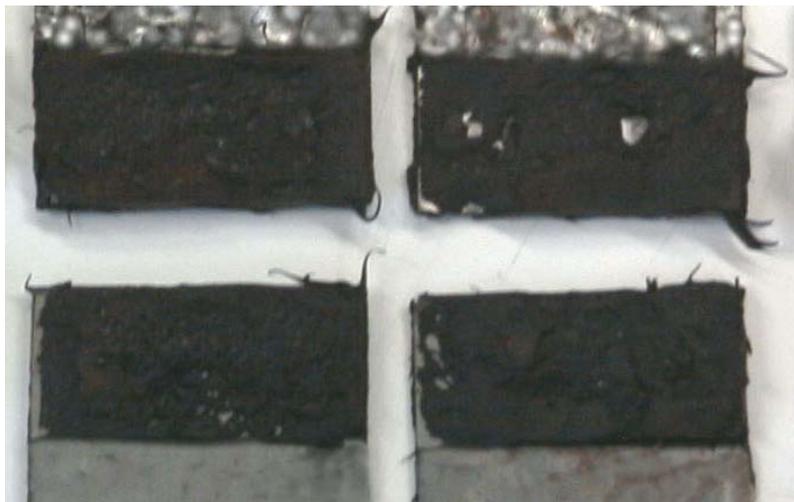


Abbildung 134: Bruchbilder der Versuchsreihe A2 mit Sikaflex geklebt.

Die Bruchbilder der Testreihe B kann man alle zu den Adhäsionsbrüchen zuordnen. Hierbei löste sich die feste und spröd gewordene Klebstoffschicht zu ca. 80% (der getesteten Proben) komplett von einem der Fügeteile. Eine Ausnahme machten hier die Klebeverbindungen der Testreihe B1 (glatte Bleche/glatte Bleche), wo ca. 50% der Klebstoffschicht an jedem Fügeteil noch haftete. Bei der Testreihe B2 ist beachtenswert, dass die Klebstoffschicht bei 8 Proben auf dem strukturierten Blech haftete.

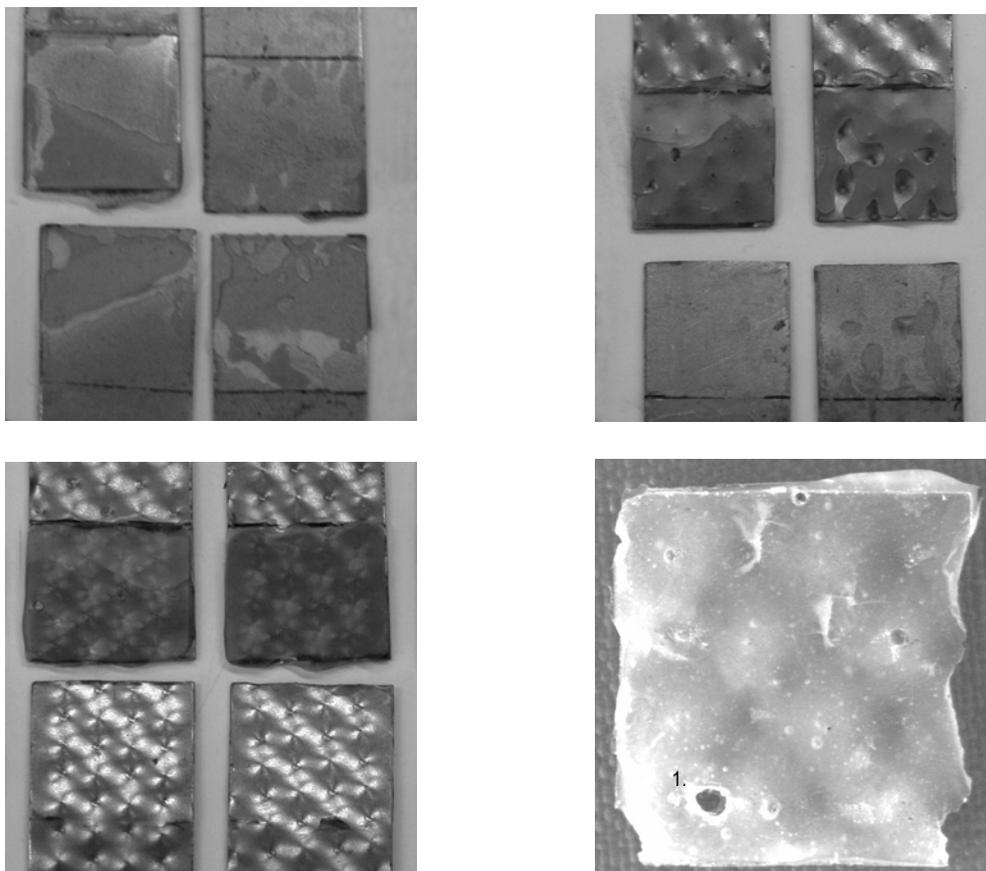


Abbildung 135: Bruchbilder der Testreihe B

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch eine vorhandene Struktur die Klebestelle bei Beanspruchung durch Zug zusätzlich mit Spaltkräften (ähnlich dem Kopfzug von Punktschweißverbindungen) beansprucht wird. Es können daher, im Vergleich zu Klebproben aus Glattblechen, nur etwa halb so große Zugkräfte übertragen werden.

Mit dem verwendeten Klebstoff Terokal 221 konnten die Proben der strukturierten Feinbleche mit bis zu 5 N/mm^2 beansprucht werden. Der elastische Kleber Sikaflex lässt hingegen nur Beanspruchungen von ca. 1 N/mm^2 für strukturierte Feinbleche zu.

Gestaltungsregeln

Beim Kleben strukturierter Feinblechen ist zu beachten, dass:

- die auch für glatte Bleche geltenden Gestaltungsregeln berücksichtigt werden,
- beim Verkleben strukturierter Bleche untereinander bei Zugbeanspruchung eine zusätzliche Spaltkraft wirkt,
- Beim Verkleben von strukturierten und glatten Blechen sich eine Klebstoffschicht unterschiedlicher Dicke in der Fügezone befindet.

Punktschweißen

Punktschweißen ist ein gebräuchliches Fügeverfahren für Stahlbleche. Es gehört zu den Pressschweißverfahren. Zu seinen besonderen Vorteilen vor allem für Blechkonstruktionen gehören die geringe Wärmebelastung der Fügepartner und damit ein verzugsarmes bis verzugsfreies Fügen. Auch im Karosseriebau werden diese Verfahren angewendet, wobei es im Außenbereich durch das Laserschweißen vielfach ersetzt wurde.

Das Widerstandsschweißen ist nach DIN 1910-5 folgendermaßen definiert: „Die zum Schweißen erforderliche Wärme wird durch den Stromfluss über den elektrischen Widerstand der Schweißzone erzeugt. Beim Widerstandspressschweißen gilt zusätzlich: Der Strom wird konduktiv über Elektroden zugeführt. Die Werkstücke werden an den Stoßflächen erwärmt und unter Anwendung von Kraft punktförmig (genauer linsenförmig) geschweißt. Strom und Kraft werden durch Punktschweißelektroden übertragen. Es kann ein Punkt (Einzelpunktschweißen) oder es können gleichzeitig zwei (Doppelpunktschweißen) oder mehr Punkte (Vielpunktschweißung) geschweißt werden.

Im Schweißstromkreis gibt es insgesamt 7 Widerstände, welche die notwendige Wärme erzeugen. Es sind vier Stoffwiderstände und drei Übergangswiderstände. Die

Stoffwiderstände sind abhängig von den Materiallegierungen und -dicken. Der Übergangswiderstand zwischen den Fügepartnern ist der größte Widerstand, daher entstehen dort auch die höchsten Temperaturen. Durch die Wärme und den Druck werden Unebenheiten der Kontaktfläche schnell beseitigt und der Werkstoff in diesem Bereich linsenförmig aufgeschmolzen. Es entsteht eine punktförmige Verbindung.

Stromstärke, Schweißzeit und Elektrodenkraft sind beim Widerstandspunktschweißen die gängigen Parameter. Die Schweißzeit wird in Perioden (Per) des Wechselstroms angegeben. Die Elektrodenkraft muss der Blechdicke angepasst werden. Bei zu geringer Kraft kommt es zu einer stärkeren Spritzerbildung, bei zu hoher Kraft entstehen zu tiefe Eindrücke im Werkstoff.

Bei den durchgeführten Punktschweißversuchen kam die Handpunktschweißzange TECNA 7901 der Firma Elektroschweißtechnik Dresden GmbH zum Einsatz. Es wurden dabei die Standard-Kupfer-Elektroden verwendet. Die Elektrodenspitzen wurden zur **Versuchsvorbereitung** auf die abgebildeten Abmaße gebracht. Damit sollte ein optimales Fügen auch in den Strukturtälern erreicht werden. Zur Auswahl standen keine Elektroden mit balliger Kontaktfläche, wie sie für korrodierte Bleche verwendet werden.

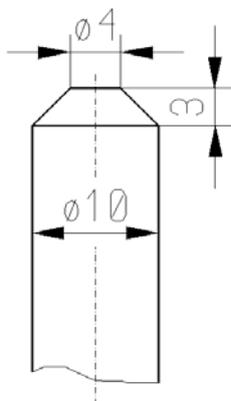


Abbildung 136: Geometrie der Punktschweißelektroden.

Nach erfolgter Verschweißung wurden die Proben im Scherzugversuch auf der Zug-Druck-Prüfmaschine ZWICK 1486 geprüft. Für die Versuche kamen folgende Blechstrukturen und Blechdicken zum Einsatz. Bei der Blechdicke 0,7 mm liegt nur die DIEDRICHS-Struktur sowie ein Glattblech vor, womit sich die Untersuchung auf diese beiden beschränkt. Bei der Blechdicke 0,5 mm liegt ein Glattblech sowie die DIEDRICHS- und PWO-Struktur vor.

Der eingesetzte Werkstoff FeP04 (gleiche Charge für Glatt- und Strukturblech) weist folgende mechanische Kenngrößen und Zusammensetzung auf:

Werkstoff	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
FeP04	176	315	43,1

Tabelle 19: Ermittelte Kennwerte des FeP04 / 0,5

Nr.	Struktur	Blechdicke [mm]	Werkstoff
1	Glatt	0,5	FeP04
2	DIEDRICHS	0,5	FeP04
3	PWO	0,5	FeP04
4	Glatt	0,7	FeP04
5	DIEDRICHS	0,7	FeP04

Tabelle 20: Probenauswahl für Punktschweißversuche

Da die Schweißpunkte einem Scherzugversuch unterzogen werden sollen, ergeben sich die Probenabmaße aus der DIN 50 124. Die Proben wurden je nach Blechdicke wie folgt zusammengeschweißt:

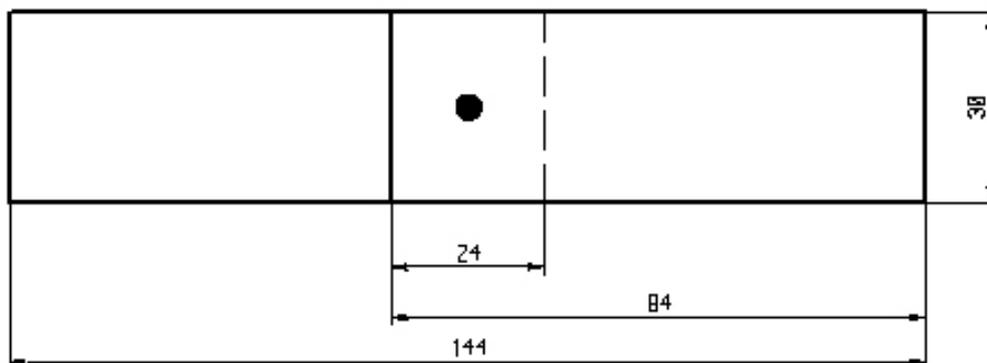


Abbildung 137: Probenabmaße für 0,5 mm starkes Blech

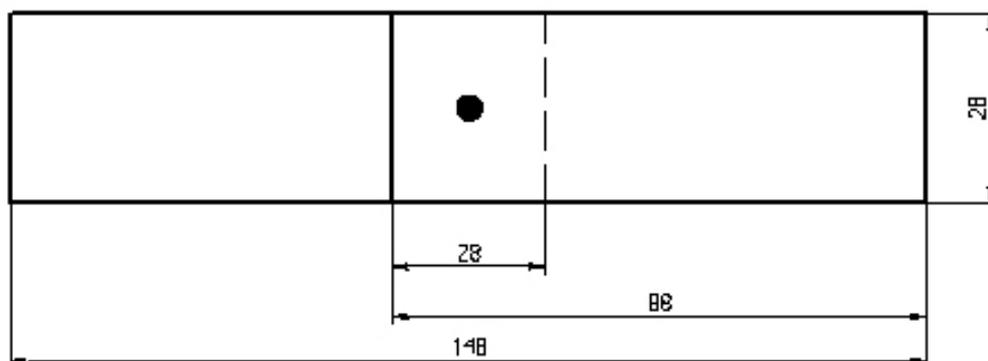


Abbildung 138: Probenabmaße für 0,7 mm starkes Blech

Die in Tabelle 20 gegebenen Strukturen sollten, nach Blechdicke getrennt, in allen möglichen Varianten gefügt werden. Insgesamt ergibt das 9 verschiedene Kombinationen. Als veränderlicher Schweißparameter wurde die Schweißzeit ausgewählt, da diese sehr leicht zu variieren ist und sich in Vorversuchen ergeben hat, dass sie den größten Einfluss auf die Schweißpunkte hat. Jede Werkstoffkombination wird mit 5 verschiedenen Schweißzeiten gefügt.

Die Elektrodenkraft wurde aus der Tabelle (siehe Anhang – Bild) an der Punktschweißzange abgelesen. Sie ergab sich aus Blechdicke und Elektrodendurchmesser. Der Elektrodendurchmesser beträgt 4 mm und damit ergibt sich für alle Proben mit 0,5 mm Blechdicke eine Kraft von 60 daN. Für die Proben mit der Blechdicke 0,7 mm muss die Kraft auf 75 daN erhöht werden.

Nach DIN 50 124 sollten für einen Scherzugversuch jeweils 10 Proben angefertigt werden. Da diese Anzahl den Rahmen der Versuche sprengen würde, kann die Probenzahl auf 3 Proben optimiert werden [165]. Insgesamt ergibt das also 15 Proben je Kombination, also 135 Proben. Hinter den Probenbezeichnungen verstecken sich folgende Eigenschaften:

Unterteilung in verschiedene Struktur-Kombinationen

Proben-Nr.	Material	Dicke [mm]	Elektrodenkraft [daN]	Struktur 1	Struktur 2
1	FeP04	0,5	60	Glatt	Glatt
2	FeP04	0,5	60	DIEDRICHS	DIEDRICHS
3	FeP04	0,5	60	PWO	PWO
4	FeP04	0,5	60	Glatt	DIEDRICHS
5	FeP04	0,5	60	Glatt	PWO
6	FeP04	0,5	60	DIEDRICHS	PWO
7	FeP04	0,7	75	Glatt	Glatt
8	FeP04	0,7	75	Glatt	DIEDRICHS
9	FeP04	0,7	75	DIEDRICHS	DIEDRICHS

Tabelle 21: Probeneinteilung zum Punktschweißen

Unterteilung der Struktur-Kombinationen in verschiedene Schweißzeiten:

Nr.	Per	Nr.	Per	Nr.	Per	Nr.	Per	Nr.	Per
1.1	2,5	1.2	5	1.3	7,5	1.4	10	1.5	12,5
2.1	2,5	2.2	5	2.3	7,5	2.4	10	2.5	12,5
3.1	2,5	3.2	5	3.3	7,5	3.4	10	3.5	12,5
4.1	2,5	4.2	5	4.3	7,5	4.4	10	4.5	12,5
5.1	2,5	5.2	5	5.3	7,5	5.4	10	5.5	12,5
6.1	2,5	6.2	5	6.3	7,5	6.4	10	6.5	12,5
7.1	5	7.2	7,5	7.3	10	7.4	12,5	7.5	15
8.1	5	8.2	7,5	8.3	10	8.4	12,5	8.5	15
9.1	5	9.2	7,5	9.3	10	9.4	12,5	9.5	15

Tabelle 22: Schweißzeitzuordnung

Da für jeden Parameter 3 Proben existieren, werden diese nochmals mit den römischen Ziffern von I – III bezeichnet. Diese genaue Bezeichnung ist notwendig, um auch nach dem Zugversuch die einzelnen Bleche einander genau zuordnen zu können.

Der **Probenzuschnitt** erfolgte auf einer Laserschneidanlage des Typs TRUMPF LY 2500. Die Proben wurden entsprechend dem Material, der Struktur und der Blechstärke beschriftet und von Hand entgratet. Um die strukturierten Bleche später in die Zug-Druck-Prüfmaschine ZWICK 1486 einspannen zu können, mussten an den Enden der Proben jeweils 20 mm flach gedrückt werden. Im Anschluss wurde auf der einen Probenhälfte die Überlappung und auf der anderen die Position des Schweißpunktes angerissen. Vor dem eigentlichen Punktschweiß-Vorgang wurden alle Proben mit Azeton von Schmutz, Fett, Farbe und Zunder befreit werden.

Der **Scherzugversuch** nach DIN 50 124 wird als so genannter freier Zugversuch durchgeführt, d.h. die Probe wird nicht parallelgeführt. Da die Einzelblechdicke immer unter 3 Millimeter liegt, können die Proben ohne Beilagen in die Klemmbacken eingespannt werden. Die Probe wurde zügig bis zum Bruch beansprucht. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit beträgt 10 mm/min. Die höchste Kraft F_{max} wurde gemessen.

Zur Auswertung wurde der Punkt- oder Ausknöpfdurchmesser dokumentiert. Der mittlere Durchmesser der Bruchfläche einschließlich der beim Widerstandspunktschweißen auftretenden Haftsweißzone gilt beim Scherbruch als Punktschweißdurchmesser. Der mittlere Durchmesser der Grundfläche des ausgeknöpften Butzens gilt beim Ausknöpfbruch als Ausknöpfdurchmesser. Der Durchmesser wird in zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen gemessen und daraus der mittlere Durchmesser berechnet.

Im Rahmen der **Versuchsdurchführung** bereitete das **Punktschweißen der glatten Bleche** als Referenzproben keine Komplikationen. Die Bleche ließen sich problemlos aufeinander legen und zusammenpunkten. Sie verrutschen nicht, wenn die Zange geschlossen wird und es entstanden sehr maßgenaue Proben. Der Funkenflug ist bei 2,5 Per sehr gering, steigert sich aber mit steigender Schweißzeit. Wenn die Bleche etwas verbogen sind und nicht genau aufeinander liegen, ist der Funkenflug wesentlich höher. Ab einer Schweißzeit von 10 Perioden kommt es auch vor, dass die Elektroden am Material festgebacken.

Das **Fügen eines strukturierten Blechs mit einem glatten Blech** war nicht mehr so einfach zu bewerkstelligen, wie das Fügen zweier glatter Bleche. Da die Blechproben beliebig ausgeschnitten worden sind und bewusst nicht auf die Struktur geachtet wurde, ist es rein zufällig, auf welche Stelle der Struktur der Schweißpunkt zu setzen ist. In der industriellen Fertigung ist es auch nicht möglich, darauf zu achten, dass jeder Schweißpunkt in der Vertiefung einer Struktur sitzt. Es lassen sich drei Fälle charakterisieren die in Tabelle 23: Lage der Schweißpunkte bei der Kombination Glatt / Strukturiert beschrieben sind.

Der **Funkenflug** ließ sich beim Schweißen strukturierter Bleche nicht verhindern. Er ist selbst bei kurzen Schweißzeiten im Vergleich zum Glattblechschweißen viel stärker. Das liegt an der Struktur der Bleche, die durch ihre vielen Hohlräume dem flüssigen Metall das Austreten erleichtern.

Die in Tabelle 23 genannten Lagen lassen sich auch auf den Fügevorgang für zwei strukturierte Bleche übertragen, wobei sogar die Strukturen verschieden sein können. Für die Fälle a und b ergeben sich stabile Lagen und ein sicheres Fügen ohne Probenverschiebung. Fall c kann ohne Verschiebung nur durch enormen Spann- und Fixieraufwand gefügt werden.

Fall	Lage des Schweißpunktes	Lageart	Bemerkungen
a	Schweißpunkt im Strukturtal	stabile Lage	Verschweißung wie bei Glatt / Glatt, problemlos möglich
b	Schweißpunkt zentral auf dem Strukturberg	stabile Lage	Einebnung der Struktur durch Elektrodenkraft vor dem eigentlichen Schweißvorgang erforderlich
c	Schweißpunkt beliebig auf der Struktur	labile Lage	Elektrodenkraft und -bewegung versucht Strukturblech zu verschieben, hohe Spannkraft zum Fixieren erforderlich, Schweißstelle muss vorher eingeebnet werden, erhöhte Gefahr von Schweißspritzern

Tabelle 23: Lage der Schweißpunkte bei der Kombination Glatt / Strukturiert

Zur **Auswertung der Fügeversuche** wurde die Schweißpunktausbildung und die Zerreißkraft in den Abbildungen 139 bis 142 beurteilt.

Von der **optischen Auswertung** der Schweißpunkte (siehe Anlagen) ausgehend, kann festgestellt werden, dass unabhängig von der Struktur und der Dicke des Bleches qualitativ gute Schweißverbindungen herstellbar sind. Die Strukturbleche benötigen in den meisten Fällen eine höhere Schweißzeit im Vergleich zu den Glattblechen, aber das stellt kein Problem dar.

Die ungleichmäßigere Form der Wärmeeinflusszone bei den Strukturblechen lässt sich auf die Unebenheiten des Bleches zurückführen. Durch diese liegt die Elektrode nicht optimal auf der Blechoberfläche auf und der Strom fließt etwas unregelmäßig durch die Bleche. Hier sollten gegebenenfalls noch Versuche mit anderen Elektrodenformen, die sich der Struktur besser anpassen, durchgeführt werden.

Auch die Berührungsfläche zwischen den Blechen ist durch die Struktur ungleichmäßiger als bei Glattblechen. An dieser Stelle wären noch Untersuchungen zu anderen Elektrodenkräften möglich. Andere Fehler, wie zum Beispiel Risse oder Hohlräume, konnten nicht entdeckt werden. Es kam auch in keinem Fall zum Durchbrennen der Fügestelle.

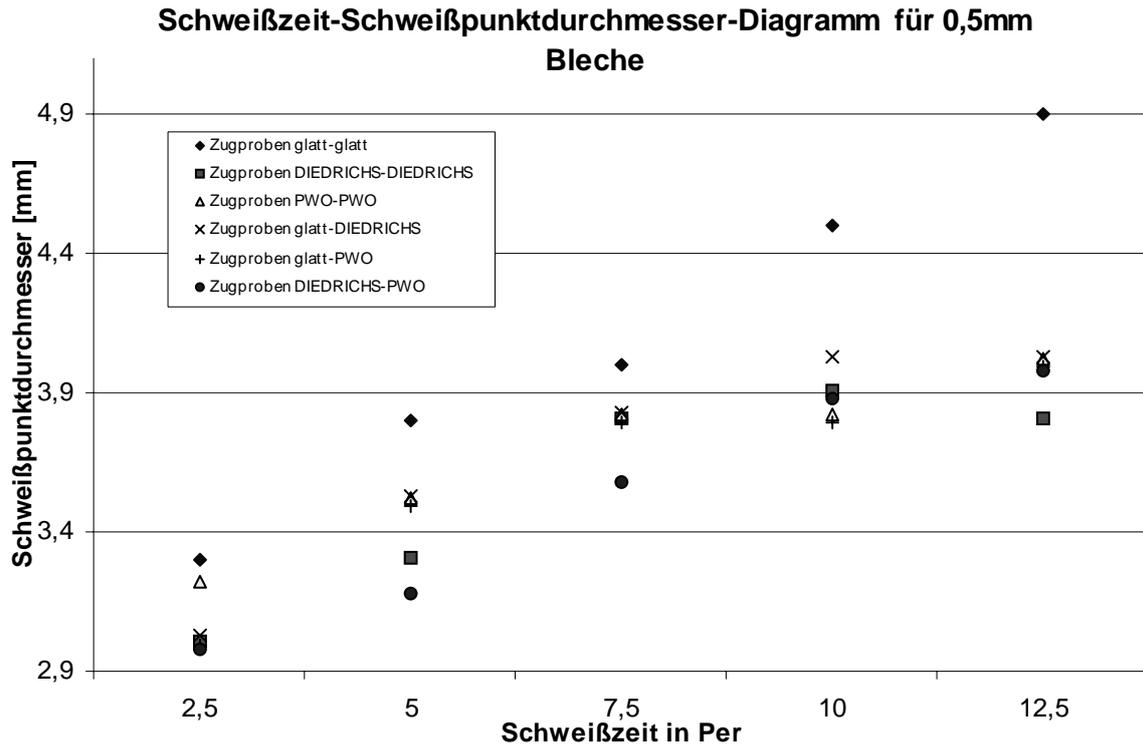


Abbildung 139: Schweißpunktausbildung in Abhängigkeit von der Schweißzeit für 0,5 mm Bleche

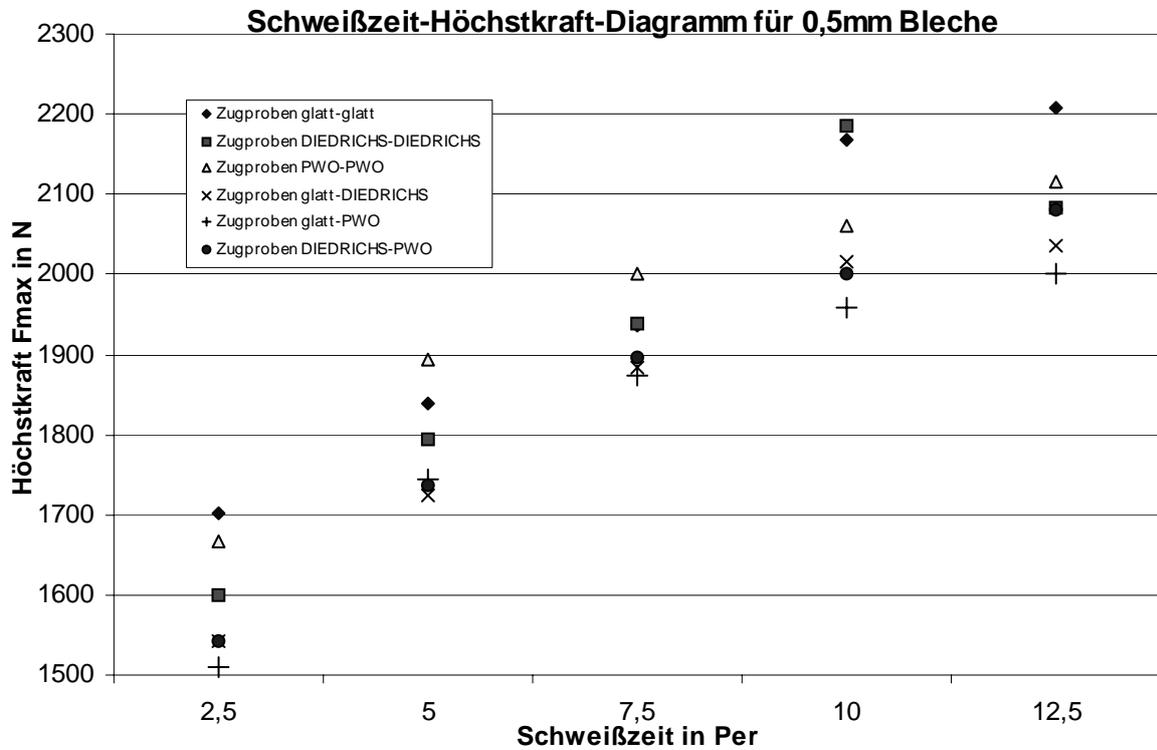


Abbildung 140: Zerreißkraft in Abhängigkeit der Schweißzeit für 0,5 mm Bleche

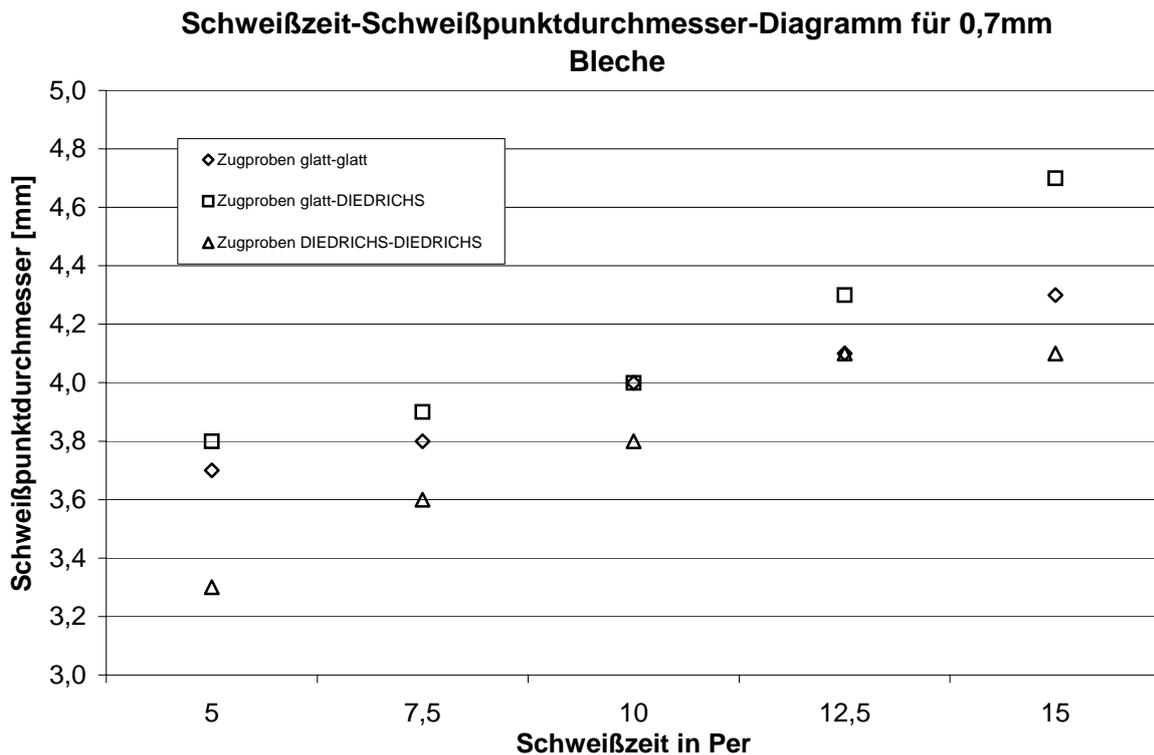


Abbildung 141: Schweißpunktausbildung in Abhängigkeit von der Schweißzeit für 0,7 mm Bleche

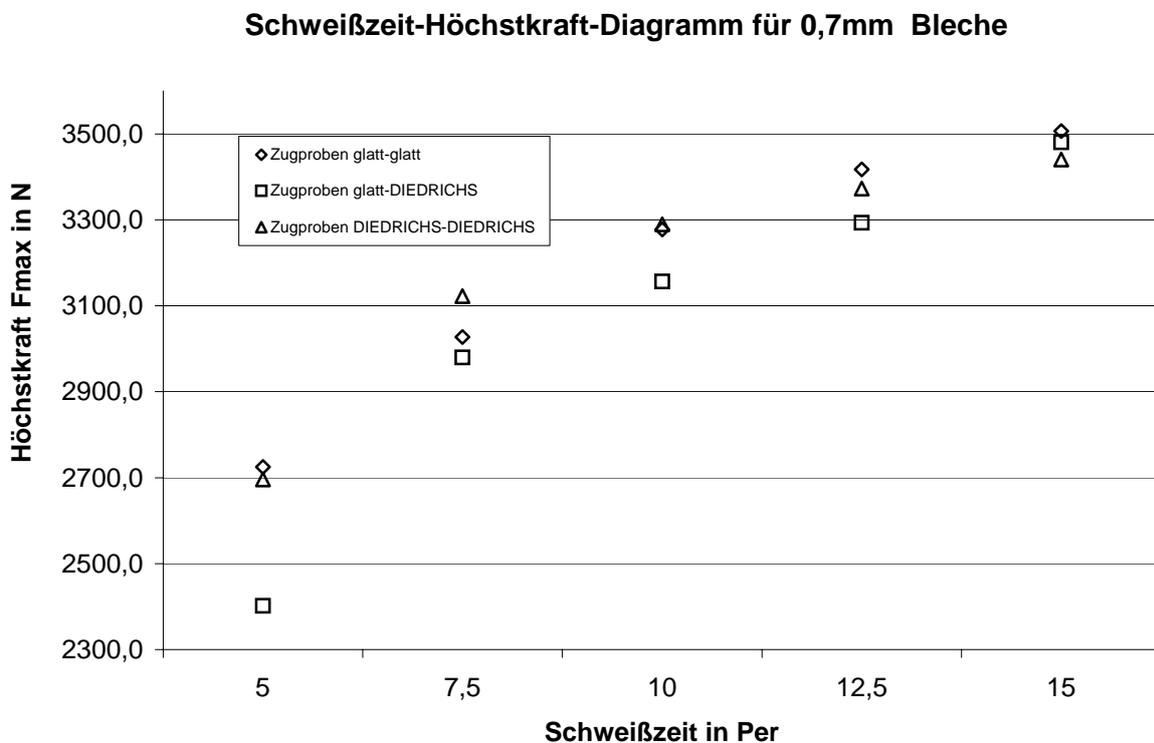


Abbildung 142: Zerreißkraft in Abhängigkeit der Schweißzeit für 0,7 mm Bleche

Beurteilung der Qualität der Schweißpunkte

Im Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone entstehen durch Reaktionen des aufgeschmolzenen Werkstoffs mit der Atmosphäre, Verschmutzungen oder der Elektrode Schweißfehler, die nach EN ISO 6520-2 in Unregelmäßigkeitsgruppen eingeteilt werden. Dazu gehören Risse, Hohlräume, feste Einschlüsse, Bindefehler, Form- und Maßabweichungen sowie sonstige Unregelmäßigkeiten. Im Folgenden werden von jeder Strukturkombination die markantesten Schweißpunkte abgebildet und eventuell aufgetretene Fehler erläutert.

Von der Qualität her sind die Schweißpunkte der **Probengruppe 1** mit einer Schweißzeit von 7,5 und 10 Per am besten. Die Wärmeeinflusszone ist als schwarzer Ring um den Schweißpunkt zu erkennen. Ist der Ring gleichmäßig, ist der Strom gleichmäßig durch die Bleche geflossen und der Werkstoff hat sich überall gleich gut erwärmt (siehe Abbildung 143). Die Abbildungen der weiteren Probengruppen befinden sich im Anhang.

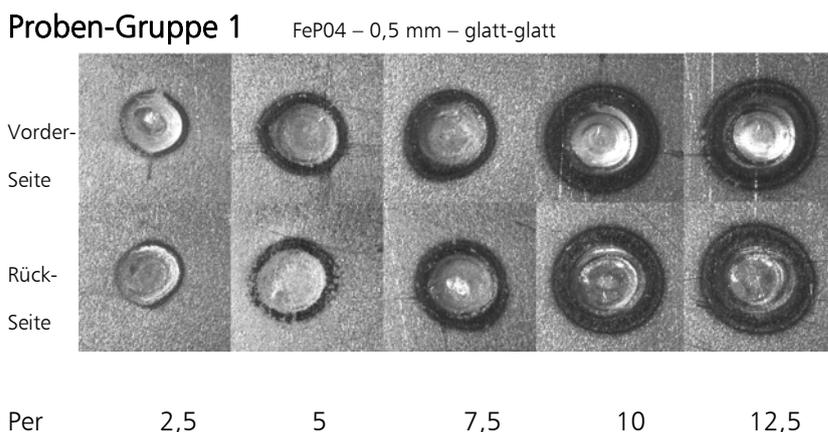


Abbildung 143: Schweißpunkte der Probengruppe 1

Die ersten drei Schweißpunkte der **Probengruppe 2** sind qualitativ ungenügend. Der Stromfluss war zu kurz und die Elektrode hatte zu wenige Berührungsflächen mit dem Blech. Somit ist der Strom sehr unregelmäßig geflossen, es konnte nicht genügend Wärme erzeugt werden und es ist ein ungleichmäßiger Schweißpunkt entstanden. Erst bei 10 Per Schweißzeit ist die Wärmeeinflusszone regelmäßig und kennzeichnet somit einen guten Schweißpunkt. Beim letzten Schweißpunkt sind Schweißspritzer zu erkennen. Nach der oben genannten Norm ist dieser Fehler unter dem Bereich sonstige Unregelmäßigkeit einzustufen und zeugt von einer zu langen Schweißzeit.

Bei den Proben der **Probengruppe 3** sind die letzten drei Schweißpunkte qualitativ in Ordnung. Die Wärmeeinflusszone ist regelmäßig ausgebildet. Doch bei 12,5 Per blieben die Elektroden nach dem Schweißen am Blech haften.

Bei **Probengruppe 4** sind genau wie bei den Proben davor die letzten drei Schweißpunkte vom optischen Aspekt her qualitativ in Ordnung. Beim Strukturblech bildet sich die Wärmeeinflusszone nie so gleichmäßig wie beim Glattblech aus. Das liegt einfach an der Struktur, durch welche die Elektrode nie gleichmäßig mit dem Blech in Berührung kommt und somit der Strom auch nicht so gleichmäßig fließen kann. Die **Probengruppe 5** verhält sich genauso wie die Probengruppe 4. Der einzige Unterschied ist bei 7,5 Per sichtbar. Dort ist auf der Rückseite die Wärmeeinflusszone um den Schweißpunkt noch nicht so deutlich ausgebildet.

Die letzten beiden Schweißpunkte der **Probengruppe 6** lassen rein optisch auf eine gute Verbindung schließen. Bei der DIEDRICHS-Struktur (Rückseite) ist eine längere Schweißzeit als bei der PWO-Struktur notwendig, bevor sich ein guter Schweißpunkt herausbildet. Bei einer Blechdicke von 0,7 mm bildet sich bei der **Probengruppe 7** erst bei 10 Per der erste ordentliche Schweißpunkt aus. Auch der Schweißpunkt bei 7,5 Per sieht gut aus, weist aber noch wesentlich geringere Festigkeitswerte auf.

Der erste Schweißpunkt der **Probengruppe 8** ist völlig ungenügend, auf der Rückseite ist sogar ein Nebenschluss erkennbar. Das kommt bei strukturierten Blechen immer wieder vor, wenn die Bleche im Bereich der Elektrode sich nicht ausreichend berühren und sich der Strom einen anderen Weg sucht. Die letzten beiden Schweißpunkte sind in Ordnung. Im Fall der **Probengruppe 9** ist bei 10 Per und 15 Per ein Schweißfehler, nämlich ein Nebenschluss etwas abseits der eigentlichen Schweißzone erkennbar. Da das 0,7 mm dicke Blech wesentlich steifer ist als das 0,5 mm dicke Blech, sollte die Elektrodenkraft vielleicht noch etwas erhöht werden, damit die Bleche in der Schweißzone genügend aufeinander gedrückt werden und damit solche Fehler verhindert werden.

Gestaltungsregeln

Zum Punktschweißen von strukturierten Feinblechen ist das Folgende zu beachten:

- Die Fügestelle sollte möglich eingeebnet werden, das kann durch eine große Elektrodenkraft erfolgen,
- beim Fügen strukturierter Feinbleche untereinander ist auf eine ausreichende Lagefixierung zu achten,
- es besteht durch die Strukturierung eine erhöhte Spritzergefahr,
- vorzugsweise sind ballige Elektroden zu verwenden,
- die Fügeverbindungen sollten optisch kontrolliert werden,
- die allgemeinen Gestaltungsregeln für blechgerechte Punktschweißkonstruktionen sind sinngemäß auch für strukturierte Feinbleche anwendbar.

Schraubverbindungen an strukturierten Feiblechen

Die Schraubenverbindung ist eine der häufigsten, vielseitigsten und wichtigsten Verbindungsarten in der Montage- und Fügetechnik. Sie beruht auf der Paarung von Schraube bzw. Gewindestift mit Außengewinde und Bauteil mit Innengewinde (z.B. Mutter). Dabei wird zwischen beiden ein Formschluss im Gewinde erreicht. Sie sind die einzigen Verbindungen, die meist voll belastbare und beliebig wiederholbare definierte Lasten aufnehmen und übertragen können.

Die Schraubenverbindungen haben sich in den letzten Jahren sehr stark verändert. Methoden zur Berechnung und neu entwickelte Schraubverfahren, die mit Rechnerunterstützung optimal eingesetzt werden können, bieten die Möglichkeit, die Schrauben in ihren Abmessungen wesentlich zu verkleinern. Dieses führt zu leichten Konstruktionen. Weitere Vorteile dieser Verbindungsart sind das problemlose Fügen unterschiedlicher Werkstoffe und dass der Fügevorgang ohne das Einbringen von Wärme in die Fügestelle erfolgen kann.

Die zunehmende Verwendung von Feiblechen in der Industrie bringt das Problem der Verbindung mit sich. Tragfähige **Schraubverbindungen an Feiblechen** sind bei den verwendeten Blechdicken problematisch, denn das Bauteil muss gesondert vorbereitet werden, die Verbindung ist den Belastungen nicht gewachsen oder aber das Gewicht der benutzten Verbindung reduziert den Leichtbauvorteil des Feibleches.

Ausreichende Festigkeiten von Schraubverbindungen werden bei Feiblechen nur durch Anbringen zusätzlicher Gewinde- oder Sicherungselemente erreicht. Die weniger aufwendige Direktverschraubung bietet im Allgemeinen unbefriedigende Qualitäten, da die erforderliche Gewindetiefe nicht immer gewährleistet ist.

Mit der Blechschaube können dünne Bleche schnell, sicher und stets lösbar miteinander verbunden werden. Basierend auf dem alten Prinzip des Gewindes der selbstschneidenden Holzschraube, entstanden eigene Blechschaubengewinde mit dafür charakteristischen Steigungen, Profilen und Durchmessern. In DIN EN ISO 1478 sind der Gewindedurchmesser und das Gewindeende genormt. Daneben gibt es, dem jeweiligen Verwendungsfall angepasst, eine Reihe von Gewindevarianten. Die Blechschaube vereint zwei Funktionen:

- Werkzeug zum Formen des Gewindes
- Verbindungselement im geformten Mutterngewinde.

Um das Gewinde formen zu können, müssen die zu verbindenden Teile vorgebohrt werden. Das Bauteil, auf dem der Schraubenkopf aufliegt, benötigt eine Durchgangsbohrung, das zweite demzufolge ein Kernloch. Damit in dieses Blech das Gewinde geformt werden kann, muss die Blechschaube eine hohe Oberflächenhärte

besitzen. So werden Blechschrauben fast ausschließlich einsatzvergütet und weisen deswegen keine nennenswerte Dehnung auf.

Die entscheidenden Dimensionsparameter sind nicht Zugfestigkeit und Streckgrenze der Schraube, sondern die Festigkeit und Zähigkeit des Werkstoffs der zu verbindenden Teile und die Höhe des Mutterngewindes. Weiterhin entscheiden das Bruchdrehmoment M_B und die Oberflächenhärte über den Einsatz der Schrauben. Wegen der von voll belastbaren Schraubenverbindungen abweichenden Aufgaben und Bedingungen sind besondere Kenntnisse und Regeln für die Belastbarkeit und Zuverlässigkeit der Verbindung mit Blechschrauben notwendig.

Blechschrauben werden auch aus austenitischem Chrom – Nickel – Stahl der Stahlgruppen A2/A4 hergestellt. Somit sind auch korrosionsfeste Verbindungen möglich. Weil diese Schrauben nicht vergütbar sind, wird die Oberflächenhärte durch Kaltverformen während der Herstellung erreicht. Diese Härte reicht jedoch nicht aus, um die im heutigen Leichtbau eingesetzten hochfesten Stahlbleche zu verbinden.

Im Gegensatz zur Maschinenschraube, bei der mit dem Anziehmoment nur ein Drehmoment während der Montage von Bedeutung ist, treten bei der Blechschraubenverbindung mehrere Momente auf (siehe Abbildung 144).

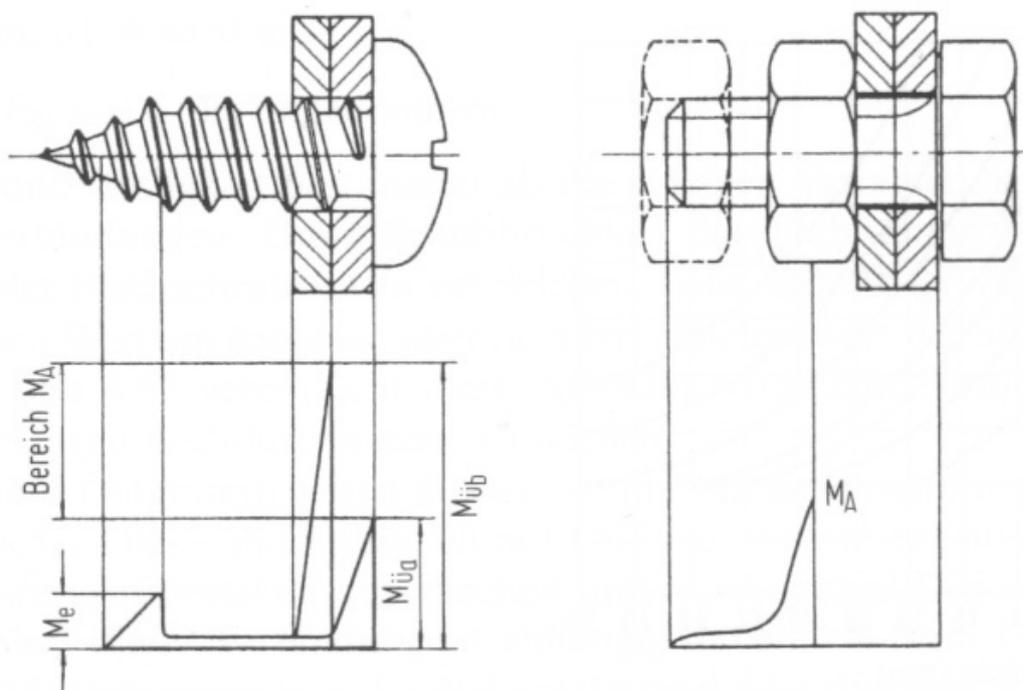


Abbildung 144 Vergleich des Verlaufs der Anziehmomente einer Blechschrauben- und einer Durchsteckverbindung [166]

Zu betrachten sind dabei folgende Drehmomente:

- Einschraubmoment M_e : erforderlich zum Schneiden des Muttergewindes,
- Überdrehmoment $M_{\text{üb}}$: entsteht, wenn der Gewindeauslauf der Blechschraube das Muttergewinde im oberen Teil des Schraubloches durch Überdrehen zerstört. Wird wirksam, wenn das obere Bauteil kein Durchgangsloch oder nicht dicker als eine Gewindesteigung ist. Ist notwendig, um im oberen Teil ein Durchgangsloch zu erzeugen und damit die Bauteile fest aneinander zu pressen.
- Überdrehmoment $M_{\text{üa}}$: zerstört Muttergewinde im vollen Bereich des Gewindes, $M_{\text{üa}} > M_{\text{üb}}$
- Anziehmoment M_A : muss stets größer als M_e und $M_{\text{üa}}$ sein
- Mindestbruchdrehmoment M_B : reißt die Schraube im reibungsfreien Zustand ab, obere Grenze der Belastbarkeit
- Bruchdrehmoment M_{BR} : reißt in der zusammengebauten Verbindung den Kopf der Schraube ab, ist um mindestens den Betrag von Gewinde- und Kopfauflagerreibung größer als M_B
- Das Anziehmoment M_A muss zwischen M_e und $M_{\text{üb}}$ liegen. Vorteilhaft ist ein großer Abstand zwischen M_e und $M_{\text{üb}}$, um übliche Streuungen des Anziehmomentes aufzufangen.

Da eine Blechschraubenverbindung in erster Linie eine Heftverbindung ist, d.h. die aufgebrachte Vorspannung sehr gering ist, ist die Torsionsbelastung beim Anziehen der Schrauben deren größte Belastung.

Ausführungsmöglichkeiten

Abbildung 145 zeigt verschiedene Arten der Herstellung und Gestaltung von Kernlöchern, die im Wesentlichen die Größe der auftretenden Drehmomente beeinflussen. Vor allem besteht bei dünnen Blechen die Gefahr, dass auch das untere Blech in den Bereich des Gewindeauslaufes gerät und somit keine sichere Verbindung zustande kommt. Wenn das Kernloch gebördelt wird, ist die Höhe des Muttergewindes sehr groß, wodurch ein großer Bereich zur Wahl des Anziehdrehmomentes zur Verfügung steht. Außerdem bietet ein gebördeltes Schraubloch Vorteile, wenn die Verbindung häufig gelöst werden muss.

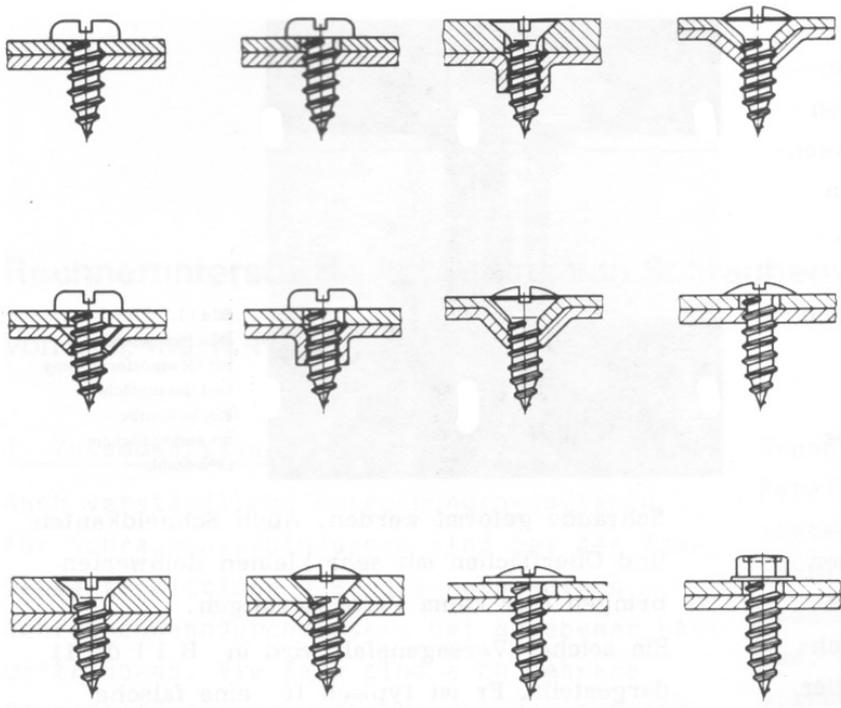


Abbildung 145: Ausführungsmöglichkeiten von Blechverbindungen [167]

Funktionsweise der FDS[®] – Schraube

Mit der FDS[®] – Schraube der Fa. EJOT ist eine äußerst stabile und belastbare Schraubenverbindung möglich. Die FDS[®] – Schraube reduziert die Arbeitsgänge Fließlochformen, Gewinde furchen und Bauteil befestigen auf einen Arbeitsgang.

Die Arbeitsweise gliedert sich in sechs Phasen (siehe Abbildung 146):

- Phase 1: Erwärmen des Blechs durch Andrückkraft und hohe Drehzahl
- Phase 2: Durchdringen des Materials mit der konischen Schraubenspitze
- Phase 3: Ausformen des zylindrischen Durchzugs
- Phase 4: spanloses Furchen eines metrischen lehrenhaltigen Mutterngewindes
- Phase 5: Durchschrauben
- Phase 6: Anziehen der Schraube mit eingestelltem Drehmoment

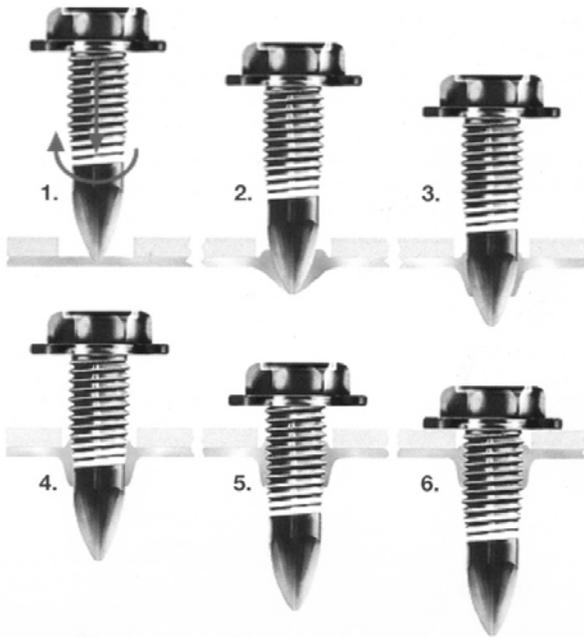


Abbildung 146: Ablaufphasen der FDS® – Verschraubung [168]

Um das Material in Temperaturbereiche zu bringen, in der das Fließen zur Formung des Gewindes gewährleistet ist, sind Temperaturen von ca. 300°C notwendig. Die benötigten Drehzahlen liegen je nach Material und Dicke bei 2000...4000 min⁻¹ [169]. Die Andrückkraft liegt bei $F = 200\text{N}$.

Das durch die Schraube erwärmte Blechmaterial kühlt nach der Verschraubung ab, wodurch sich ein axiales und radiales Schrumpfen im Bereich des Durchzuges ergibt. Dies führt zu einem zusätzlichen Klemmeffekt, der sehr hohe Lösemomente zur Folge hat. Dadurch werden zusätzliche Sicherungselemente überflüssig und dynamisch belastete Bauteile können zuverlässig miteinander verbunden werden. Der von der FDS® – Schraube erzeugte Durchzug erreicht in etwa die dreifache Höhe der Blechdicke. Damit steht eine höhere tragende Gewindelänge zur Verfügung, die höhere Anziehmomente erlaubt.

Bei der Montage der FDS® – Schrauben treten folgende Momente auf:

- Eindrehmoment M_e : erforderlich um die Schraube ins Material einzuschrauben,
- Überdrehmoment M_U : bei diesem Drehmoment wird zuvor gefurchtes Gewinde zerstört,
- Anziehmoment M_A : erforderlich um Verbindungspartner fest aufeinander zu pressen.

Vergleich der Verbindungsarten

Mit Blechkonstruktionen kann der Konstrukteur Bauteile entwerfen, in die eine hohe Anzahl von Funktionen integriert sind. Die Blechkonstruktionen müssen aber noch mit anderen Bauteilen gefügt werden, um die Teilfunktionen miteinander zu kombinieren und zu nutzen. Um das Leichtbaupotenzial strukturierter Feinbleche auszuschöpfen, ist eine Verbindungsart notwendig, die ein möglichst geringes Eigengewicht hat. Weiterhin wird von dieser Verbindung gefordert, dass sie preiswert und leicht automatisierbar ist und somit die Gesamtkonstruktion einen marktfähigen Preis erreicht. Eine weitere Forderung vieler Verbindungen ist ihre Lösbarkeit. Ein Lösen der Verbindung soll daher ohne Zerstören der Bauteile und Verbindungsmittel möglich sein.

Für den Vergleich der Verbindungen wurden folgende Schrauben verwendet (siehe Abbildung 147):

- Sechskantschraube ISO 4017 – M6x16 – 8.8; für eine sichere Verbindung wurden weiterhin benötigt: Sechskantmutter DIN EN 28 673, Unterlegscheibe Scheibe DIN 125 – A6,4 – 140HV, Federring DIN 128 – A6,4 – FSt
- Blechschraube ISO 1481 – ST6,3x16 – C
- EJOT FDS[®] Schraube M6x18 WN 2142.

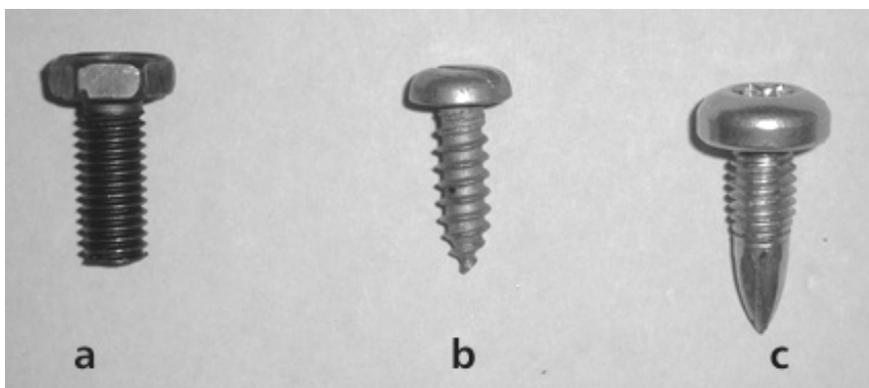


Abbildung 147: verwendete Schraubentypen a- Sechskantschraube, b- Blechschraube, c- EJOT FDS[®]-Schraube

Im Folgenden wird die Verbindung mit der Maschinenschraube mit MS, die mit der Blechschraube mit BS und die FDS[®] - Verschraubung mit FDS bezeichnet.

Verbindungsraum und Verbindungsgewicht

Der Raum, den die Verbindungselemente benötigen, ist ein wichtiges Kriterium für eine kleine und damit auch leichte Konstruktion. Je geringer der Platzbedarf für Verbindungen ist, desto kleiner und damit leichter kann konstruiert werden. Bei der

Maschinenschraube werden die Volumina der weiteren Verbindungselemente hinzugerechnet.

Die geometrischen Daten der Elemente des MS- und BS – Verbindung werden aus den zutreffenden Normen entnommen. Für die FDS – Verbindung werden die benötigten geometrischen Daten dem Firmenkatalog entnommen [168]. Weiter Angabe in den Anlagen

Schraubentyp	Bezeichnung	Verbindungsraum:	Verbindungsgewicht:
	MS	1287,48mm ³	7,48g
	BS	772,82mm ³	3,24g
	FDS	1212,03mm ³	5,34g

Tabelle 24: benötigter Verbindungsraum und Verbindungsgewicht der Schraubenverbindungen.

Aus Tabelle 24 kann entnommen werden, dass der benötigte Raum für eine Verbindung mit der Blechschraube am geringsten ist. Es sind lediglich 63,7% des Raumes nötig, den die EJOT FDS[®] - Schraube verwendet. Die Maschinenschraube benötigt unwesentlich mehr (6,22%) Platz als die EJOT FDS[®] - Schraube.

Mit diesen Zahlen wird nicht der Raum beschrieben, der benötigt wird, um die Verbindung herzustellen. Der Verbindungsraum wurde aus den Verbindungsmitteln einhüllenden Körpern bestimmt. Das birgt einen großen Fehler in sich, wenn aus dem bekannten Raum und der bekannten Dichte die Masse bestimmt werden sollte. Um genaue Aussagen zum Gewicht zu erhalten, werden die verwendeten Schrauben und Sicherungselemente gewogen. Die Wägungen wurden auf einer Präzisionswaage durchgeführt. Das leichteste Verbindungsmittel ist demzufolge die Blechschraube. Die FDS[®] - Schraube wiegt mit 5,32 g ca. 65 % mehr und die Maschinenschraube mit ihren zusätzlichen Elementen sogar ca. 130 % mehr als die Blechschraube.

Montagegerechtheit der Verbindung

Eine kleine und leichte Verbindung, wie die Blechschraube, verliert im Leichtbau jeglichen Wert, wenn die Realisierung dieser Verbindung sehr teuer ist oder die Tragfähigkeit nicht den Anforderungen entspricht. Betrachtet man die Vorbereitung der Verbindungsstelle und die eigentliche Montage ergibt sich Tabelle 25.

	MS	BS	FDS
Bohrarbeiten	Bohrungen in beide Bleche, gleicher Durchmesser	Bohrungen in beide Bleche, oberes Blech Durchgangsloch, unteres Blech Kernloch	oberes Blech eventuell Durchgangsloch, unteres Blech ohne Bohrung, beide Bleche auch ohne eine Bohrung zu verschrauben
Verschrauben	Schraube durchstecken; Scheibe und Federring auf Schraubengewinde zentrieren und aufstecken, Mutter auf Schraubengewinde zentrieren und aufschrauben, dabei Scheibe und Ring fixieren; Anziehen der Verbindung (beidseitig zugänglich)	Schraube zentrieren und einschrauben, Verbindung anziehen (einseitig zugänglich)	falls oberes Blech gebohrt: Schraube zentrieren, sonst Schraube auf gewünschte Stelle aufsetzen; mit Andrückkraft und erforderlicher Drehzahl Schraube einschrauben; Verbindung anziehen (einseitig zugänglich)
Merkmale der Verbindung	hoher Aufwand für Realisierung der Verbindung; große Anzahl von Elementen; überstehende Mutter und Gewindeende; sehr hohe Belastbarkeit; mit geeigneter Kopfform hohe Anzugsmomente	geringer Aufwand für Realisierung; ein Element pro Verbindung; überstehendes spitzes Gewindeende: Verletzungsgefahr; Heftverbindung, daher keine Aufnahme äußerer Belastungen, bei sehr dünnen Blechen steht nicht ausreichend Material zur Verfügung für tragfähiges Gewinde	geringer Aufwand für Realisierung; ein Element pro Verbindung; überstehendes spitzes Gewindeende: Verletzungsgefahr; sehr hohe Belastbarkeit, auch dynamisch; mit geeigneter Kopfform hohe Anzugsmomente; es entstehen keine Bohrspäne

Tabelle 25: Vergleich der Verbindungsarten bezüglich der Montage

Für viele Blechkonstruktionen werden die benötigten Blechteile aus einer Tafel ausgeschnitten. Für die oben aufgeführten Verbindungsarten die Bohrungen benötigen, können diese Bohrungen auch schon im Arbeitsschritt des Blechausschneidens eingebracht werden, was den extra Arbeitsschritt des Bohrens erübrigt. Jedoch sollte dabei das Problem der Überdeckung der Bohrungen in den Blechen nicht außer Acht gelassen werden.

Wenn die Löcher nicht gebohrt werden, sondern z.B. gestanzt, ist besonders beim Einsatz von Blechschrauben auf die Randzonenverhärtung, die wegen der Kaltverfestigung am Lochrand auftritt, zu achten. In das harte Gefüge des Bleches kann dann unter Umständen nicht das Gewinde geformt werden.

Mit der FDS[®] - Schraube ist es möglich, die Bleche frei zu positionieren, d.h. das Problem der Überdeckung von Durchgangsloch und Gewindeloch entfällt vollständig. Auch das Profil des strukturierten Feinbleches hat keine Auswirkungen auf die Positioniergenauigkeit der Schraube.

Um eine Verbindung mit den anderen beiden Verbindungsarten herzustellen sind Bohrungen notwendig, die fluchten müssen, damit die Schraube durchgesteckt bzw. eingeschraubt werden kann. Damit sich die Bleche beim Anziehen der Verbindung nicht „zurechtschieben“ müssen die Bohrungen sehr genau angebracht sein. Ein wichtiger Vorteil der FDS[®] - Schraube und der Blechschraube ist, dass sie von einer Seite montiert werden können. Man kann diese Schrauben in „toten“ Raum schrauben, wie er z.B. in Hohlprofilen oder Bodenblechen von Automobilen vorhanden ist.

Fügeverhalten des strukturierten Feinbleches

Die betrachteten Verbindungsarten werden, je nach Belastungshöhe und Art der Herstellung, bei Blechkonstruktionen verwendet. Die FDS[®] - Schraube wird jedoch, wegen der einfachen und preiswerten Art und Weise der Verbindung, zunehmend eingesetzt. Folgende Besonderheiten waren beim Herstellen der drei Verbindungsarten zu beobachten:

Das strukturierte Feinblech besitzt eine hohe Tragfähigkeit. Es konnte festgestellt werden, dass die Strukturhöhe im Bereich der Schraubverbindung, bei großen Anziehungsmomenten M_{An} , verringert. Die FDS[®] - Schrauben wurden mit $M_{An}=2,5$ Nm angezogen. Hierbei wurden die „Strukturberge“ nicht eingedrückt und es bildete sich auch kein erkennbarer Tragrand aus. Die Verbindung mit der Maschinenschraube weist ähnliche Merkmale auf.

Mit der MS – Verbindung wurde das Anzugsmoment schrittweise erhöht. Ab einem Anzugsmoment von $M_{An}=5$ Nm konnte ein sich deutlich erkennbarer Tragrand ausbilden, wobei die Strukturen der Bleche etwas „eingedrückt“ wurden. In Abbildung 148 ist sehr deutlich der Rand zu erkennen, der sich um den Schraubenkopf und die Scheibe gebildet hat. Aufgrund des Anziehungsmoments wurden die Strukturen eingeebnet. Da die Schraubenverbindung eine sehr steife Stelle in der Blechebene darstellt, ist nicht mit negativen Auswirkungen auf die Stabilität einer Blechkonstruktion aus strukturiertem Feinblech zu rechnen.

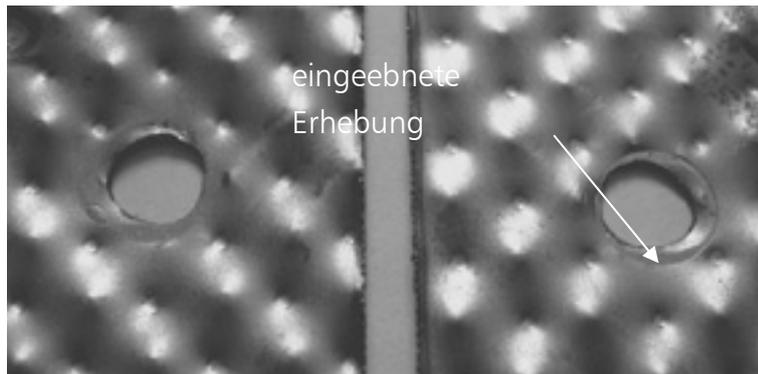


Abbildung 148: Tragrind der MS – Verbindung bei $M_{An}=10\text{Nm}$; links: Mutterseite, rechts: Schraubenkopfseite.

Wegen der Struktur der Bleche tritt eine weitere Besonderheit auf. Während glatte Bleche „stufenlos“ aufeinander verschoben werden können, ist dieses bei strukturierten Feinblechen nicht möglich. Es gibt die stabile Lage, d.h. die Bleche „rasten“ ein. Dabei liegt im überlappenden Bereich der „Berg“ des oberen Bleches im „Tal“ des unteren. Bei der labilen Lage liegt „Berg“ auf „Berg“.

Werden die Bleche in der letztgenannten Lage angezogen, biegen sich die Blechränder der Probenkörper stärker auf als wenn die Bleche in der so genannten stabilen Lage (siehe Abbildung 149) miteinander verschraubt werden.



Abbildung 149: sich aufbiegende Blechränder bei $M_{An}=10\text{ Nm}$, links- stabile Lage, rechts- labile Lage

Dieses Aufbiegen der Blechränder macht sich bei Mehrschraubverbindungen negativ bemerkbar. Es werden zusätzliche Spannungen in das Blechmaterial eingebracht, die wegen der Blechstruktur, nicht in einer Ebene verlaufen. Demzufolge sollten die Verschraubungen im strukturierten Blech mit einem Anziehmoment von $M_{An} < 5\text{Nm}$ angezogen werden.

Die eingebrachte Struktur in das Feinblech hat keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionierung mit einer FDS[®] – Schraube. Wegen der Andrückkraft $F_A=200\text{N}$ wird die Position der Schraubenspitze beibehalten. Als problematisch dagegen erwies sich das Bohren auf Punkten, die auf der Spitze eines „Berges“ liegen, bzw. am „Hang“, also das Bohren auf einer zur Bohrerachse geneigten Ebene. Falls das Bohren zur Vorbereitung der Verbindungsstelle notwendig ist, z.B. bei MS- oder BS - Verbindungen, muss mit geeigneten Methoden das Verlaufen der Bohrer Spitze verhindert werden.

In den Schlißbildern (Abbildung 150) ist zu erkennen, dass die Blechschraube sehr schlecht geeignet ist Dünnsblech, im speziellen strukturierte Feinbleche, miteinander zu verbinden. Wegen der fehlenden Mutterngewindgänge ist keine belastbare Verbindung zu Stande gekommen.

Das strukturierte Feinblech mit seinen höheren Steifigkeitseigenschaften erfordert angepasste, tragfähige Verschraubungskonzepte. Die Blechschraubenverbindung und die Maschinenschraubenverbindung auf Grund ihres Herstell- und Kostenaufwandes sind dazu nicht geeignet. Moderne Schraubensysteme wie FDS[®] - Schrauben ermöglichen hochtragfähige Schraubverbindungen in Blech.

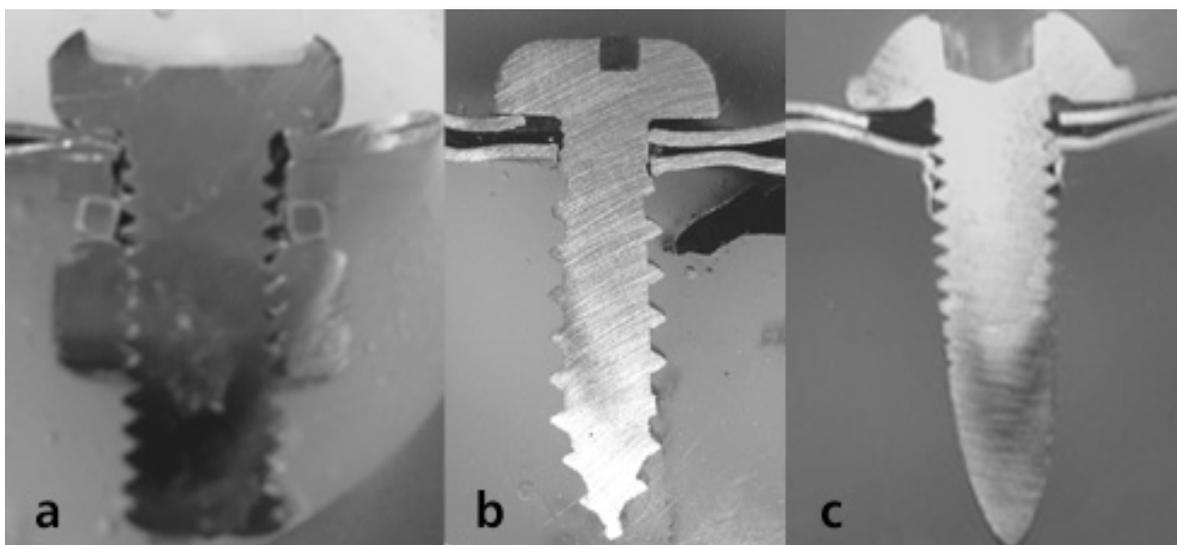


Abbildung 150: Schlißbilder der a- MS-, b- BS- und c- FDS[®] – Verbindung

Gestaltungsregeln

- Für Verschraubungen in strukturierten Feinblechen sollten folgende Hinweise beachtet werden:
- es sind tragfähige Schraubensysteme wie FDS[®] - Schrauben auszuwählen,
- die zu verschraubenden Bleche sind vor der Verschraubung sicher zu fixieren,
- soll eine Einebnung der Struktur vermieden werden, sind elastische Unter- bzw. Zwischenlagen zu verwenden,
- die zulässigen Anzugmomente sind zu beachten und dürfen nicht überschritten werden, da sonst das „Mutterngewinde“ zerstört wird,
- sofern zusätzliche Schraubensicherungen gewünscht werden, sollten Klebsysteme verwendet werden, da mechanische Sicherungselemente oft selbst eine hohe Vorspannung benötigen.

..

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Systematisierung verschiedener, bereits verfügbarer Halbzeuge aus metallischen Werkstoffen unter Berücksichtigung der Konstruktion und Gestaltung von Bauteilen stellt den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit dar. Neben klassischen Halbzeugen sind heute vielfach Halbzeuge mit bereits an den späteren Produktverwendungszweck angepassten Eigenschaften erhältlich. Diese Halbzeuge haben vor allem in der Automobilindustrie einen beträchtlichen Marktanteil eingenommen. Die Gruppe der Tailored Products gehört zu diesen Halbzeugen. Im Rahmen der Systematisierung wurden auch die Fertigungsverfahren der Halbzeuge und Fertigungsprobleme ausführlich diskutiert.

Bei der bisherigen schweißtechnischen Fertigung von Aluminium–Stahl–Tailored Blanks sind eine Vielzahl von fertigungstechnischen und materialspezifischen Besonderheiten zu beachten. Dazu gehört auch das unterschiedliche Schrumpfungsverhalten der Werkstoffe Aluminium und Stahl.

Für die werkstoffgerechte Konstruktion und Gestaltung von modernen, leichten Bauteilen sind Kenntnisse über die aktuell verfügbaren Werkstoffe und Halbzeuge, u die für sie anwendbaren Fertigungs- und Simulationsverfahren erforderlich. Vielfach ist ein zur Bauteilherstellung notwendiges Halbzeug zu entwerfen, welches mit den beschriebenen Verfahren hergestellt werden kann.

Ausgehend von der erarbeiteten Systematik wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Halbzeuge aus metallischen Werkzeugen weiterentwickelt und für ihre Praxisverwendung untersucht. Unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der weiterentwickelten Halbzeuge wurden Konstruktions- und Gestaltungsregeln abgeleitet und erprobt. Die weiterentwickelten Halbzeuge sind das leichte Stahlrohr und der Aluminium – Stahl – Verbund.

Die bereits am Markt erhältlichen strukturierten Feibleche wurden hinsichtlich ihrer Bauteileigenschaften überprüft. In Anlehnung an die Werkstoffprüfung wurden hierfür spezifische Prüfbedingungen formuliert. Das konventionelle und das wirkmedienbasierte Tiefziehen wurde an den strukturierten Feiblechen erprobt und für diese Halbzeuge entsprechend weiterentwickelt.

Für die Bauteilgestaltung wurden auch die Fügeverfahren Kleben, Punktschweißen und Schrauben an strukturierten Feiblechen untersucht und Gestaltungsregeln abgeleitet. Gleichzeitig bilden die bisherigen Ergebnisse Ansätze für eine weiterführende Forschungs- und Entwicklungstätigkeit.

Das leichte, aus Stahlblech gefertigte Rohr kann als Trägerelement in verschiedenen Konstruktionen verwendet werden. Vorteilhaft gegenüber Walz- und Blechprofilen ist

die durch die wirkmedienbasierte Umformung in gewissen Bereichen einstellbare äußere Gestalt des Bauteils. Dazu kann das Bauteil auf Grund seiner konstruktiven Ausbildung besser als die genannten Profile Schubspannungen aufnehmen. Darüber hinaus ist es als klassisches Stahlblechprofil auch handwerklich leicht be- und verarbeitbar. Das rohrförmige Trägerelement kann in seinem Inneren auch als Rohr oder Schutzrohr verwendet werden.

Weitere Arbeiten sollten sich mit:

- der Optimierung der Gestaltung von Verbindungsstellen und Anschlüssen,
- der Übertragung der Erkenntnisse auf andere Werkstoffe und Halbzeuge, wie z. B. Aluminium, strukturierte Feinbleche,
- weiteren Untersuchungen zum Trag- und Crashverhalten und
- weiteren Einsatzmöglichkeiten

beschäftigen.

Für die Gruppe der Hybrid Blanks wurde ein Herstellverfahren entwickelt, dass ohne ein Schmelzschweißen die beiden Fügepartner verbindet. Die entstehenden Hybrid Blanks sind blecheben und weisen keine interkristallinen Zonen auf. Sie sind damit gut umformbar, die Umformwerkzeuge müssen Fügestellen nicht besonders berücksichtigen. Die bisher erreichten Festigkeiten liegen über den bisher bekannten Festigkeiten für kaltpressgeschweißte Blechverbindungen und den zulässigen Spannungen für Aluminiumschweißverbindungen.

Für die durch Walzen hergestellten Hybrid Blanks sollten folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

- Untersuchungen zur weiteren Steigerung der Verbindungsfestigkeit z.B. durch angepasste Wärmebehandlungen oder spezielle Probenvorbereitungen.
- Weitere Untersuchungen zum Umformverhalten und zum Schmiermitteleinsatz bei der Umformung der Hybrid Blanks.
- Untersuchungen zum Dauerschwingverhalten und zum Korrosionserhalten, Erprobung von Beschichtungen.
- Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Materialien z.B. andere Aluminium- und Stahllegierungen und andere Materialpaarungen z.B. Stahl – Magnesium, Aluminium – Magnesium.
- Untersuchungen zum Fügen von Hybrid Blanks mit anderen Bauteile,
- Erarbeitung von Simulationsmodellen.

Zu den Halbzeugen mit angepassten Eigenschaften gehören auch die strukturierten Feibleche. Sie weisen je nach Struktur eine erhöhte Biege- und Torsionssteifigkeit auf. Das Einbringen der Struktur führt zu einer Kaltverfestigung der Feibleche, die nachgewiesen wurde. Auch das Verhalten bei Zugbeanspruchung, beim Tiefziehen und wirkmedienbasierten Umformen unterscheidet sich von dem glatter Bleche. Es mussten neue, für strukturierte Feibleche angepasste Prüfbedingungen formuliert werden, um eine gewisse Vergleichbarkeit zu den glatten Blechen zu bekommen. Diese Prüfbedingungen sollten weiterentwickelt werden. Die durchgeführten Untersuchungen zum Tiefziehen und zum wirkmedienbasierten Umformen ergaben Hinweise für die Produkt- und Werkzeuggestaltung.

Noch fehlt es an geeigneten, effizienten Messverfahren um die Gestalt und wahre Geometrie der Struktur der Feibleche exakt zu erfassen. Dies ist für den Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Umform-, Tragfähigkeits- oder Crashsimulation aber auch für die exakte Auswertung von Zugversuchen notwendig. Die Zugversuche sollten unter der Möglichkeit einer exakten Geometrieerfassung fortgesetzt werden. Aber auch für die Herstellung von strukturierten Feiblechen aus anderen Materialien und Legierungen z. B. höherfesten Feiblechen ist diese Messtechnik notwendig.

Auch konnte der Einfluss des Strukturierungsverfahrens auf die Festigkeit noch nicht vollständig ermittelt werden. Aus den zu gewinnenden Erkenntnissen ließen sich Gestaltungshinweise für die Strukturen ableiten. Mit Hilfe der FEM – Simulation wurde versucht, das Verhalten strukturierter Feibleche unter Zugbeanspruchung zu beschreiben. Die Simulationsergebnisse haben sich dem realen Bauteilverhalten angenähert.

Weiter Untersuchungen könnten:

- das partielle Strukturieren von Bauteilen zur örtliche Versteifung,
- die beanspruchungsgerechte Strukturoptimierung,
- die Erstellung eines Strukturauswahlkataloges für bestimmte Beanspruchungsfälle,
- die Entwicklung von Umformsimulationsmodellen für verschiedene Strukturierungen,
- die Prüfung der Weiterverarbeitbarkeit strukturierter Feibleche mit typischen Blechverarbeitungsverfahren wie Sicken und Falzen

betreffen.

Hinsichtlich der Untersuchungen zum Fügen von strukturierten Feinblechen wurden Ergebnisse im Scherzugversuch beim Kleben mit elastischen als auch aushärtenden Klebmassen ermittelt, die auf Grund der Strukturierung nur etwa halb so groß wie die der Glattbleche waren. Die Untersuchungen sollten mit weiteren Klebstoffen fortgesetzt werden, um die Klebeverbindung zu optimieren.

Die durchgeführten Untersuchungen zum Punktschweißen bestätigen die prinzipielle Machbarkeit von Punktschweißverbindungen zwischen Glattblechen und strukturierten Blechen als auch zwischen strukturierten Blechen untereinander. Die erreichten Festigkeiten sind ausreichend, sollten aber durch weitere Versuchsreihen auch für andere strukturierte Werkstoffe bestätigt werden. Zur Optimierung der Schweißpunktausbildung sollten angepasste Elektrodenformen entwickelt werden. Die Einebnung der Fügestelle vor dem Verschweißen ist notwendig. Das kann durch die Elektroden geschehen.

Um spritzerarm zu schweißen, sollte möglichst nur eine geringe, besser gar keine Luft mehr zwischen den Fügepartnern im Bereich der Fügestelle vorhanden sein. Dazu sollte die Schweißpunktauslösung so spät wie möglich erfolgen. Beim Verschweißen von strukturierten Feinblechen untereinander müssen Hilfsmittel für eine sichere Lagefixierung entwickelt werden.

Schraubverbindungen mit strukturierten Feinblechen weisen Besonderheiten auf. Hierzu gehören, dass die Struktur z. T. eingeebnet wird und dass das Bohren notwendiger Durchgangslöcher nur in Strukturtälern ohne Positionsabweichungen erfolgen kann. Moderne Schraubsysteme wie FDS[®] - Schrauben ermöglichen hochtragfähige Schraubverbindungen in Blech. In weiteren Versuchsreihen muss geklärt werden, wie weit FDS[®] - Schraub – und andere Verbindung in strukturierten Feinblechen belastbar sind, um die Leichtbaupotenziale der strukturierten Feinbleche maximal zu nutzen.

Die begonnenen Untersuchungen zum Fügeverhalten von strukturierten Feinblechen sollten fortgesetzt werden. Zu untersuchen wären:

- weitere Fügeverfahren, auch die Kombination von Fügeverfahren,
- ob durch die Einebnung des Materials beim Verschrauben oder auch beim Punktschweißen die Dauerschwingfestigkeit an den eingeebneten Stellen reduziert wird,
- das Korrosionsverhalten der Fügstellen bzw. möglich geeignete Beschichtungen zur Reduzierung der Korrosion.

Durch die Weiterentwicklung von leichten Stahlrohren, Aluminium - Stahl - Verbänden und strukturierten Feiblechen wurde ein beachtlicher Wissenszuwachs auf dem Gebiet der Halbzeuge dokumentiert. Diesbezügliche Konstruktions- und Gestaltungsregeln wurden unter Beachtung der zurzeit verfügbaren Werkstoffe herausgearbeitet. Unter Nutzung dieser Erkenntnisse können Halbzeuge bauteilspezifisch ausgelegt und gefertigt werden. Damit leistet diese Arbeit einen Beitrag zum werkstoffsparenden Konstruieren und Gestalten und damit zur Weiterentwicklung des Leichtbaus.

6 Literatur

- 1 Kleiner, M.; Leichtbau in der Fahrzeugindustrie; VDI nachrichten; 18.06.1999
- 2 Hufenbach, W.; Funktionsintegrierte Leichtbaulösungen; Dresdner Leichtbausymposium 2002;
- 3 Kesselring, F.; Technische Kompositionslehre; Springer-Verlag Berlin; 1954
- 4 Pahl, G.; Beitz, W.; Konstruktionslehre; 6. Aufl.; Springer – Verlag Berlin; 2004
- 5 Hoenow, G.; Meißner, T.; Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau; Fachbuchverlag Leipzig; 2004
- 6 Wiedemann, J.; Leichtbau, Bd. 1, Springer Verlag Berlin, 1986
- 7 Decker, K.H.; Maschinenelemente; Hansa – Verlag, 15. Auflage
- 8 Leyer, A.; Wesen und Wert des Leichtbaues; Technica Nr. 23; 1970
- 9 Hachmann, B.; Flexibles Walzen zur Herstellung von Langprodukten mit variablen Querschnitten; Shaker – Verlag Aachen, 2002
- 10 Hufenbach, W.; Verbesserte Werkstoff- und Struktursimulation als Grundlage für einen effizienten Leichtbau; Dresdner Leichtbausymposium 1998; Studiengesellschaft Stahlanwendung; Tagungsband 725; funktionsintegrierte Hybridstrukturen in Leichtbauweise
- 11 Hufenbach, W.; Adam, F.; Langkamp, A.; Jaschinski, J.; Hybridverbunde im Fahrzeugbau; Sächsische Fachtagung Umformtechnik 2004; S. 175 - 184
- 12 Huber, O.: Leichtbaugerechtes Konstruieren, Themenabend "Leichtbaukonstruktion" des Leichtbau-Clusters, Landshut, Juni 2003
- 13 Viehweger, B., Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen; Symposium alternative Materialien für in Schienenfahrzeugen; Henningsdorf; 18.06.2004

- 14 Kühhorn, A.; Golze, M.; CFK-/GFK- Auslegung am Beispiel eines Modellflügels; Konferenz Einzelbericht ABAQUS; ABAQUS Anwendertreffen 2002, 7.1-7.11
- 15 Leyens, C.; Peters, M.; Titan- und Titanlegierungen; Wiley-VCH Verlag; 2002
- 16 Weber, R.; Neue Leichtbauansätze mit Konstruktionswerkstoffen in Mischbauweise; Dresdner Leichtbausymposium 1998; Studiengesellschaft Stahlanwendung; Tagungsband 725; funktionsintegrierte Hybridstrukturen in Leichtbauweise
- 17 Schulz, P.; Kaufmann, H.; Multi-materials approach and design for light weight applications, Metall, Giesel – Verlag; 9/2004
- 18 N.N.; Meilenstein. Das weltweit erste Magnesium–Aluminium–Verbund kurbelgehäuse; Metall, Giesel – Verlag; 1-2/2004
- 19 Klein, B.; Leichtbaukonstruktion; Vieweg – Verlag Wiesbaden / Braunschweig; 1994
- 20 Hertel, H., Leichtbau; Springer Verlag Berlin; 1960
- 21 Hahn, O.; Kleben – Fertigungssysteme für eigenschaftsoptimierten Leichtbau; Dresdner Leichtbausymposium 1998; Studiengesellschaft Stahlanwendung; Tagungsband 725; funktionsintegrierte Hybridstrukturen in Leichtbauweise
- 22 VDI-Richtlinie 2225, Blatt 1; Technisch-wirtschaftliches Konstruieren; Düsseldorf; VDI-Verlag 1977
- 23 Buckisch, K.; Strategische Konzeption eines Zentrums für multifunktionale Leichtbauwerkstoffe; BTU Cottbus, 2003,
- 24 N.N.; Recyclingdruck bringt Leichtbau aus der Waage; VDI – Nachrichten; Nr. 16 / 2003 vom 17.04.2003; S. 14
- 25 N.N.; Magnesiumrecycling; Metall, Giesel – Verlag; 12/2004
- 26 Ameling, D.; Stahl im Fokus; Wirtschaftsvereinigung Stahl; 28.07.2004
- 27 Adam; ULSAB - advanced vehicle concepts (AVC); 10. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik; 2001

- 28 Schmidt, T.; Fritsch, C.; Mit Tailored Blanks zur steiferen Karosserie; Blech InForm; 2002
- 29 N.N.; Automobilkonzepte aus Stahl; Materialica; 2002
- 30 Takamatsu, N.; Ohashi, H.; Material selection by taking the whole system into consideration - automobile LCA from steel industry's viewpoint; Journal of the Japan Institute of Metals; 2001
- 31 Hamm, I.; Stahl – ein zukunftssträchtiger Werkstoff im Karosseriebau?; IISI 1993
- 32 Bleck, W.; Engl, B., Frehn, A.; Nicklas, D.; Steinbeck, G.; Ermittlung von Berechnungskennwerten an Karosseriewerkstoffen; Materialwissenschaft und Werkstofftechnik; WILEY-VCH Verlag; 8/2005
- 33 Bleck, W.; Frehn, A.; Ohlert, J.; Sonne, H.-M.; Steinbeck, G.; Einfluss von Temperatur und Vorverformung auf das plastische Werkstoffverhalten von modernen Karosseriestählen, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik; WILEY-VCH Verlag; 8/2005
- 34 Bleck, W.; Frehn, A.; Larour, P.; Steinbeck, G.; Untersuchung zur Ermittlung der Dehnratenabhängigkeit von modernen Karosseriestählen; Materialwissenschaft und Werkstofftechnik; WILEY-VCH Verlag; 8/2005
- 35 Osburg, B.; Patberg, L.; Grünekle, A.; Wirtschaftliche Stahlleichtbautechnologien für das Karosseriesystem der nächsten Generation; VDI-Berichte; Band 1833 (2004)
- 36 Klein, B.; Leichtbau im Automobilbau; Vorlesungsskript.
- 37 Bäuerle, H. P.; Stand der Entwicklung und zukünftiges Potenzial zum Leichtbau von Automobilkarosserien; Stuttgarter Symp. 1995, Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Band 2
- 38 Drewes, E. u.a.; Kaltgewalzte Feinblechstahlsorten- Stand und Trends von Werkstoffentwicklung u. Anwendungstechnik; Stahl 1996; S. 44 -54
- 39 Dahl, W.; Werkstoffkunde Stahl; Springer – Verlag Berlin; 1984

- 40 N.N.; Höherfester Stahl für den Automobil-Leichtbau; Thyssen Krupp Stahl AG; 2003
- 41 Wang, Z. C.; Kim, S. J.; Lee, C. G.; Lee, T. H.; Bake-hardening behavior of cold-rolled CMnSi and CMnSiCu TRIP-aided steel sheets; Journal of Materials Processing Technology; 2004
- 42 Frommeyer, G.; Schröder, T.; Ausgekochter Stahl für das Auto von morgen, Max Planck Forschung; 2004; Heft 3
- 43 N.N.; Umformverhalten höher- und höchstfester Mehrphasenstähle; ThyssenKrupp Stahl;
- 44 Drewes, E. J.; Engl, B.; Tenhaven, U.; Möglichkeiten des Karosserieleichtbaus mit Stahl; Techn. Mitteilungen Krupp; 1/1994
- 45 Engl, B.; Gerber, T.; Microalloyed, vacuum degassed high-strength steels with special emphasis on IF steels; Steel research 67 (1996); H. 10;
- 46 Gräbel, O.; Entwicklung und Charakterisierung neuer TRIP / TWIP Leichtbaustähle auf der Basis Fe-Mn-Al-Si; Dissertation TU Clausthal
- 47 Ostermann, F.; Aluminium – High Tech; Auditorium – Aluminiumtechnologie im Karosseriebau; 30.09 – 06.10.1993
- 48 N.N.; Honda NSX; Firmenprospekt; Honda Motor Europe GmbH; Offenbach; 1990
- 49 Moore, C. M.; Röhrig, K.; Deike, R.; Auto aluminium, is it really cost effective? Foundry International; 1999
- 50 Dinkel, F.; Umformbarkeit von Aluminium-Karosserieblechen mit neuartigen Oberflächen; Hironymus-Verlag München; 1997
- 51 Siegert, K.; Hydromechanical deep drawing of autobody components; Aluminium, Giesel – Verlag; 9/2004
- 52 Friedrich, H.; Schumann, S.; Forschungsstrategien für ein zweites Magnesium - Zeitalter im Fahrzeugbau; Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Band 32 (2001) Heft 1, Seite 6-12
- 53 N. N.; Magnesium – die leichte Alternative; PHI; 2 / 2000; Hannover;
- 54 Michel, B.; leicht, leichter, Leichtbau; Konstruktionspraxis; Vogel Verlag Würzburg; 6/2002

- 55 Kainer, K. U.; Magnesium; Willey-VCH Verlag Weinheim; 2000
- 56 Kainer, K. U.; Magnesium alloys and their applications ; International Congress "Magnesium alloys and their applications" 26-28 September 2000 Munich, Willey-VCH Verlag Weinheim; 2000
- 57 Kainer, K. U.; Magnesium; Willey-VCH Verlag Weinheim; 2003
- 58 Bach, F.-W.; Behrens, B. A.; Rodman, M.; Rossberg, A.; Kurz, G.; Makroskopische Werkstoffschädigung durch die Bildung von Scherbändern beim Walzen und Tiefziehen von Magnesium; Metall; Giesel – Verlag; 6/2004
- 59 Friedrich, H.; Schumann, S.; Sebastian, W.; Umformung höherduktiler Magnesium-Blechprodukte für Fahrzeugkomponenten; Metall; Jg. 57; 2003/5
- 60 Lehnert, F.; Kalke, S.; Scheer, J.; Seethaler, L.; Dürnenburg, F. T. H.; Using magnesium for automobile manufacturing - why?; IMA, 59th Annual World Magnesium Conf., Proc.; 2002
- 61 Viehweger, B., Richter, G., Düring, M., Karabet, A., Sviridov, A., Hartmann, A., Richter, U., 2004: Hydromechanisches Tiefziehen und Hochdruckumformung als Verfahren zur Herstellung komplexer Bauteile aus Magnesiumfeinblechen des Typs AZ31B-0; Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Vol.35, No. 7, Juli 2004, S. 440 – 446 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim,
- 62 Blawert, C.; Hort, N.; Kainer, K.-U. ; Automotive applications of magnesium and its alloys; Transactions of the Indian Institute of Metals; Band 57 (2004) Heft 4
- 63 Engl, B.; Eine neue Herstellungsmethode und Anwendungspotenziale für Magnesiumblech; ThyssenKrupp techforum ; 2004
- 64 Greve, Bruce, N.; Verbundplattenbauweise für Leichtbau-Fahrzeugkonstruktionen; ThyssenKrupp techforum 12/2004
- 65 Helling, V.; Untersuchungen zur Methodik der Berechnung und Herstellung von leichten Stützkernverbunden; Shaker – Verlag; 2002

- 66 Mertens, A.; Tailored Blanks – Stahlprodukte für den Fahrzeug Leichtbau; Bibliothek der Technik Bd.250; Verlag Moderne Industrie;
- 67 Geiger, M.; Merklein, M.; Kerausch, M.; Finite element simulation of deep drawing of tailored heat treated blanks; CIRP Annals; Band 53 (2004) Heft 1,
- 68 Groche, P.; Erhardt, R.; Lasererwärmung zur Verbesserung des Umformergebnisses beim Kragenziehen von Aluminium- und Magnesiumknetlegierungen; Materialwissenschaft und Werkstofftechnik; Band 35 (2004) Heft 7
- 69 Merklein, M.; Laserstrahlumformung von Aluminiumwerkstoffen; Meisenbachverlag Bamberg; 2001
- 70 Kraus, J.; Laserstrahlumformen von Profilen, Meisenbachverlag Bamberg; 1997
- 71 Hennige, T.; Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen; Meisenbachverlag Bamberg; 2001
- 72 Pircher, H.; Stegemann, T.; Nagel, M.; Polzin; R.; Tailored Blanks in Hybridbauweise; Dresdner Leichtbausymposium 1998; Studiengesellschaft Stahlanwendung; Tagungsband 725; funktionsintegrierte Hybridstrukturen in Leichtbauweise
- 73 Salminen, A.; Pantsar, H.; Jansson, A.; Kujanpää, V.; Manufacturing procedure of laser welded all steel sandwich panels; 9th NOLAMP Conf., Conf. on Laser Materials Processing in the Nordic Countries ;(2003
- 74 Röhrle, M. D.; Leichte Automobilstrukturen – Neuheiten und Trends; Aluminium; Giesel – Verlag; 10/2004
- 75 Kloth, W.; Leichtbaufibel – Eine Anleitung zur Stahleinsparung im allgemeinen Maschinenbau, Verlag Hellmut Neureuter; 1947
- 76 Kleiner, M.; Schomäcker, M.; Schikorra, M., Klaus, A., Herstellung verbundverstärkter Aluminiumprofile für ultraleichte Tragwerke durch Strangpressen; Materialwissenschaft und Werkstofftechnik; WILEY-VCH Verlag; 8/2005
- 77 Klaus, A.; Kleiner, M.; Forschung für die flexible Produktion leichter Rahmenstrukturen, ; Aluminium; Giesel – Verlag; 12/2004

- 78 N.N.; Gekrümmte Strangpressprofile für die Automobilindustrie; Aluminium; Giesel – Verlag; 5/2004
- 79 Buntoro; Müller, K.; Biegen von stranggepressten Profilen direkt an der Strangpresse; Aluminium; Giesel – Verlag; 9/2004
- 80 Klaus, A.; Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit und der Prozesssicherheit des Rundens beim Strangpressen; Shaker – Verlag Aachen; 2002
- 81 Kleiner, M.; Klaus, A.; Schomäcker, M.; Properties of curved light metal profiles manufactured by rounding during extrusion; Production Engineering. Research and Development; 2004
- 82 Arendes, D.; Direkte Fertigung gerundeter Aluminiumprofile beim Strangpressen; Shaker – Verlag Aachen; 1999
- 83 N.N.; DAVEX Ideen veredeln Flachmaterial; Firmenschrift der ThyssenKrupp Davex GmbH, Duisburg
- 84 N.N.; Davex- eine wirtschaftliche Fügetechnik zur Herstellung funktionsoptimierter Profile; Stahl; 1/2003
- 85 N.N.; Hybridprofile eröffnen neue Möglichkeiten, Metall, Giesel – Verlag; 10/2004
- 86 Hein, P.; Hofmann, A.; Braune, R.; Otto, A.; Geiger, M.; Innovative Blechumformverfahren für den Leichtbau; Dresdner Leichtbausymposium 1999; Studiengesellschaft Stahlanwendung; Tagungsband 730; Vorsprung durch fertigungsgerechte Leichtbauweisen
- 87 Neues Aluminiumrohr speziell für Kfz – Konstruktionen; Aluminium; Giesel – Verlag; 6/2004
- 88 N.N.; Technologiesprung beim Ziehbiegen von Mehrphasenstählen; Metall; Giesel – Verlag; 10/2004
- 89 Manabe; Kenichi; Titel japanisch: Aktueller Stand und weitere Perspektiven der Technologie der Rohrverarbeitung; Bulletin of the Iron and Steel Institute of Japan; Band 9 (2004) Heft 11

- 90 Kneiphoff, U.; Gerlach, J.; Blümel, K.; Dünnwandige Tailored Tubes für Karosseriestrukturen; Thin-walled tailored tubes for car body structures; 1. Stahlsymposium- Werkstoffe, Anwendung, Forschung. Hydrogeformte Bauteile aus Stahl; Studiengesellschaft Stahlanwendung, (2001)
- 91 Pohl, T.; Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminium; Meisenbachverlag Bamberg; 2002
- 92 Schultz, M.; Fertigungsqualität beim 3D – Laserstrahlschweißen; Meisenbachverlag Bamberg; 1997
- 93 Untermann, T.; Ein Beitrag zum Laserstrahlschweißen unterschiedlicher Stahlsorten; Shaker – Verlag; 1997
- 94 Knabe, E.; Ziehen von Blechformteilen aus zusammengesweißten Platinen unterschiedlicher Blechdicke und Güte („Tailored Blanks“); In: Neuere Entwicklungen in der Blechumformung (Tagungsband Fellbach 1994); Oberursel DGM 1994
- 95 N.N.; Tailored Blanks; Firmenschrift der Thyssen Fügetechnik GmbH; Duisburg 1998
- 96 Possehn, T.; Umformen von tailored Blanks mit optimierter Werkzeugtechnik und angepasstem Schweißnahtverlauf; DGM-Informationsgesellschaft; 2002
- 97 Otto, A.; Transiente Prozesse bei Laserstrahlschweißen; Meisenbachverlag Bamberg; 1997
- 98 Franz, T. u.a.; Potentials of Laser Beam Welding for Light Weight Constructions; Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.) Laser Assisted Net Shape Engineering 2, proceedings of the LANE 97; Meisenbachverlag Bamberg; 1997
- 99 Hofmann, A.; Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen; Meisenbachverlag Bamberg; 2002
- 100 Threadgill, P.; Friction stir welds in aluminium alloys – preliminary microstructural assessment; TWI-Bulletin 38 (1997) 2
- 101 Kimapong, K.; Watanabe, T.; Friction stir welding of aluminum alloy to steel; Welding Journal, New York, Band 83 (2004) Heft 10,

- 102 Furrer, P.; Kampmann, L.; Bassi, C.; Tailored Blanks aus Aluminiumwerkstoffen; Leichtbau durch intelligente Blechverarbeitung (Tagungsband T 17, Fellbach 1997) Europäische Gesellschaft für Blechverarbeitung 1997
- 103 Knipström, K.E.; New welding method for aluminium; Svetsaren 1993/3
- 104 Braun, R.; Laser beam welding of 6013 aluminum alloy sheet; Aluminium; Giesel – Verlag; 4/2004
- 105 Rapp, J.; Laserstrahlschweißung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau; Teubner – Verlag Stuttgart; 1996
- 106 Schultz, M.; Pohl, T.; Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen für Leichtbaukonstruktionen; Geiger, M. u.a.; Präzisionslaserstrahlfertigungstechnik für den Maschinenbau; Bayrisches Laserzentrum Erlangen gGmbH; 1997
- 107 Doege, E.; Bestimmung von Kennwerten zur Beschreibung der Umform eigenschaften neuer und gefügter Feinblechhalbzeuge für den Streckzieh- und Tiefziehprozess durch vergleichende Untersuchungen; Draugelates, U.; Fertigen in Feinblech; Arbeits- und Ergebnisbericht 1993 – 1996 des SFB 362; Clausthal – Zellerfeld; 1996
- 108 Vollertsen, F.; u.a.; Formability of tailored blanks from steel and aluminium alloys; In: Advanced Sheet Metal Forming. Proc. Of the 19th Biennial IDDRG Congress; Eger; 1996
- 109 Behler, K.; u.a.; Laserstrahlgeschweißte maßgeschneiderte Bleche aus Aluminium für die industrielle Fertigung; Schweißen und Schneiden 95; DVS Berichte Band 170; DVS – Verlag Düsseldorf; 1995
- 110 Zinn, W.; Untersuchungen zum Dauerschwingverhalten von Stumpfschweißverbindungen aus den naturharten Aluminiumlegierungen AlMg3 und AlMg4,5Mn; DVS – Verlag Düsseldorf 1990
- 111 Mohrbacher, H.; Rubben, K.; Van der Hoeven, J-M.; Leirman, E.; Tailored Blanks – Mit gekrümmten Nähten in die Zukunft?; Leichtbau durch

- intelligente Blechbearbeitung (Tagungsband T17, Fellbach 1997); Europäische Gesellschaft für Blechverarbeitung 1997
- 112 Kopp, R.; Hauger, A.; Scholl, C.; Strategien und Beispiele zum Stahlleichtbau; Dresdner Leichtbausymposium 1997; Studiengesellschaft Stahlanwendung; Tagungsband 714; Neuartige Fahrzeugleichtbaukonzepte durch Stahlinnovation
- 113 Hachmann, B.; Flexibles Walzen zur Herstellung von Langprodukten mit variablen Querschnitten; Shaker – Verlag Aachen; 2002
- 114 Ebert, A.; Umformung von Platinen mit lokal unterschiedlichen Dicken; Shaker – Verlag; 2002
- 115 Böhm, S.; Dilger, K.; Wisner, G.; Deiler, G.; Milch, M.; Herstellung und Einsatz geklebter „Bonded Blanks“; DVS-Berichte; Band 232 (2004)
- 116 Petitjean, P. D.; Lescart, J. C.; Sener, J. Y.; Delfanne, S.; Patchworks: de la conception. Patchworks; vom Konzept zur Industrialisierung. Patchworks; Revue de Metallurgie, Cahiers d'Informations Techniques; Band 98 (2001) Heft 10
- 117 Guyenot, M.; Waldmann, H.; Bergmann, J. P.; Bergmann, H. W.; Haldenwanger, H.-G.; Laser welding aluminium to steel for automotive skin applications; Int. Sheet Metal Review; 1-2/2002
- 118 Sonsino, C. M.; Hanselka, H.; Kaufmann, H.; Betriebsfestigkeit von laserstrahl geschweißten Leichtbaustrukturen aus Stahl und Aluminium am Beispiel von Hutprofilen; ILS 2003, Intelligente Leichtbau Systeme, Congress; 2003
- 119 Jaroni, U.; Dohr, C.; Löhneysen, H.; Maßgeschneiderte Stahlerzeugnisse; Stahl; 2000/ 5
- 120 Kimapong; K.; Watanabe, T.; Friction stir welding of aluminum alloy to steel, Welding Journal, New York; 10/ 2004
- 121 Wu, N. Q.; Cedrix, X.; Li, M.; Perrusquia, N.; Scott, X. M.; Interfacial Structure and Micro and Nano-Mechanical Behavior of Laser-Welded 6061 Aluminum Alloy Blank; Journal of Engineering Materials and Technology – ASME; January 2004

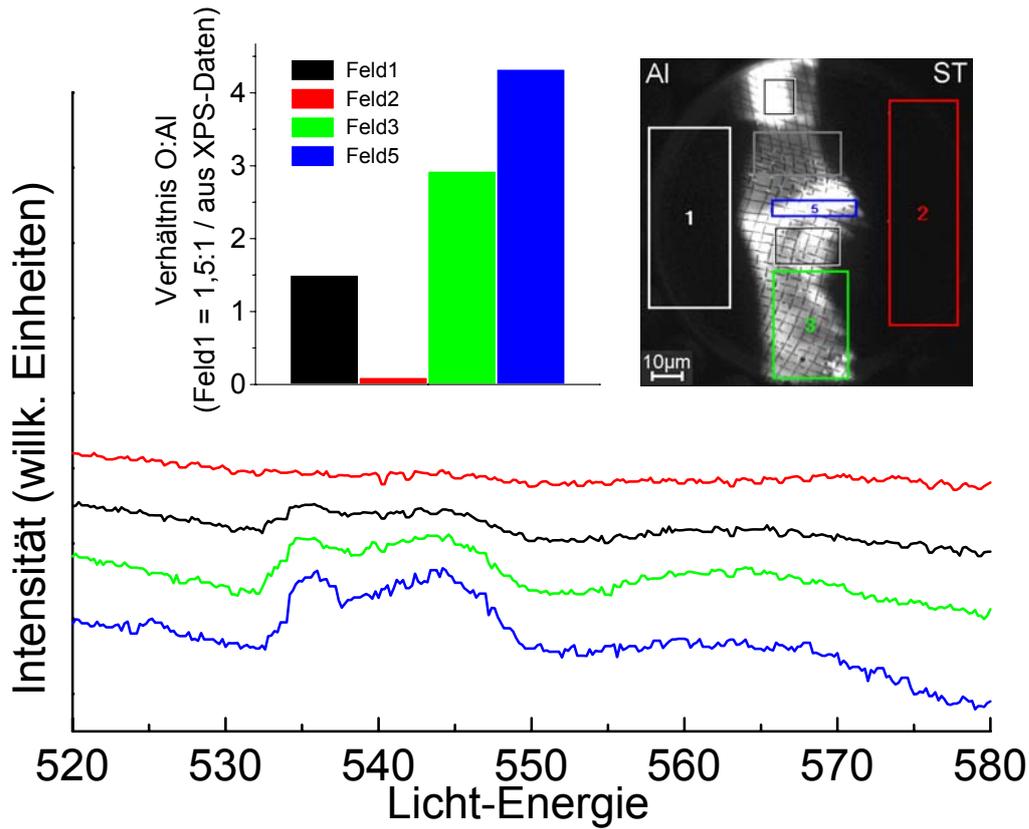
- 122 Sotirov, N., Kessler, O.; Hoffmann, F.; Mayr, P.; Zoch, H.-W.; Thermische Nachbehandlung der lasergeschweißten Al-Legierungen AlSi1MgMn und AlCu4Mg1; Materialwissenschaft und Werkstofftechnik; WILEY-VCH Verlag, 1/2005
- 123 Haferkamp, H.; u.a.; Massgeschneiderte Bauteile mit dem Laserstrahlschweißen; Werkstatttechnik; 87 (1997); S. 299 - 303
- 124 Herrmann, F.; Hibben, M.; Steimel, F.; Fischer, J.; Tailored Blanks aus Aluminium; Sievert, K. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung (Tagungsband Fellbach 1996); Oberursel; DGM – Informationsgesellschaft 1996; S. 353 - 370
- 125 Mirtsch, F.; Mirtsch, S., Schade, M.; Wölbstrukturierte Flachmaterialien mit synergetischen Eigenschaften; Konstruktion; Springer – Verlag, 2002/10
- 126 Mütze, S.; Beurteilung des Einsatzes von teilstrukturierten Stahlfeinblechen im Kfz-Karosseriebau zur Gewichtsreduzierung; FAT Schriftenreihe Nr. 171; Frankfurt; 2002
- 127 Sedlacek, G.; Hydrostatisch geformte flächige Formlichtbaukomponenten und Prägeteile aus Stahlblech; Dresdner Leichtbausymposium 1997; Studiengesellschaft Stahlanwendung; Tagungsband 714; Neuartige Fahrzeugleichtbaukonzepte durch Stahlinnovation
- 128 Mirtsch, F.; Mirtsch, S.; Schade, M.; Wölbstrukturen geben Materialien neue Perspektiven; Stahl; 2002/5
- 129 Mütze, S.; Beurteilung des Einsatzes von teilstrukturierten Stahlfeinblechen im Kfz- Karosseriebau zur Gewichtsreduzierung; FAT-Schriftenreihe; 2002
- 130 Hertel, H.; Leichtbau; Springer – Verlag 1960; S. 112
- 131 Hoppe, M.; Umformverhalten strukturierter Feinbleche; dissertation.de; 2003
- 132 Hellwig, U.; Neubauer, A.; Umformen von Nebenformelementen für Leichtbau-Strukturkomponenten; Maschinenmarkt; H. 21/97; S. 26 - 31

- 133 Adam, F.; zum anisotropen Strukturverhalten mehrschichtiger Flächenverbunde des Leichtbautragwerkes; Diss. TU Dresden; 2000; ILK
- 134 Behr, F.; Blümel, K.; Göhler, K.; Nazikkol; C.; Aufbau und Eigenschaften des Noppenbleches; Stahl; 3/2002
- 135 Hufenbach, W.; Adam, F.; Strukturierung und Klassifizierung von Stahl-Mehrschichtverbunden; Forschung für die Praxis P 307; Studiengesellschaft für Stahlanwendung e.V.; Düsseldorf 1996
- 136 Vollertsen, F.; Hollmann, F.; Umformen strukturierter Platinen mit Mehrfachmembranen im Sinne eines robusten Fertigungsprozesses, DFG – Vorhaben SPP 1098; Wirkmedienbasierte Fertigungstechniken zur Blechumformung; Internetpräsentation; 2001
- 137 Brensing, K. H.; Sommer, B.; Herstellverfahren für Stahlrohre; Salzgitter Großrohre GmbH
- 138 Mit Wasser zur Form. Blech Rohre Profile 43 (1996) Heft 1/2, S. 36 - 39
- 139 Kleiner, M.; Kolleck, R.; Rauer, J.; Weidner, T.; Die-less forming of sheet metal parts; shemet 1998
- 140 Viehweger, B.; Kindt, C.; Casajus, A.; Georgi, H.; de la Haye, W.; Hartmann, H.-J.; Rauer, J.; Untersuchungen zur Herstellung von leichten Stahlrohren mittels Wirkmedienumformung; Forschungsbericht P457; Studiengesellschaft Stahlanwendung , 2002
- 141 Simon, S., Kindt, C.; u.a.; Stabförmiges Trägerelement; DE 10249601B3
- 142 D'Angelo, R., Schur, H.-J.; Untersuchungen zum rationellen Einsatz des Kaltpressschweißens durch plastische Deformation und Überlagerung zusätzlicher Bewegungskomponenten; Dissertation; 1971,
- 143 Hoffmann, W. ; Schüller, H.-J.; Weiterentwicklung der Kaltpreßschweißung; Z. Metallkde, 1958 / 6
- 144 Simon, S.; Viehweger, B.; Wagner, L.; Entwicklung eines neuartigen Fügeverfahrens für die Herstellung von Aluminium- Stahl- Tailored Blanks; Wissenschaftsmagazin der BTU Cottbus, 2002; Nr.14; ISSN 0947 –6989

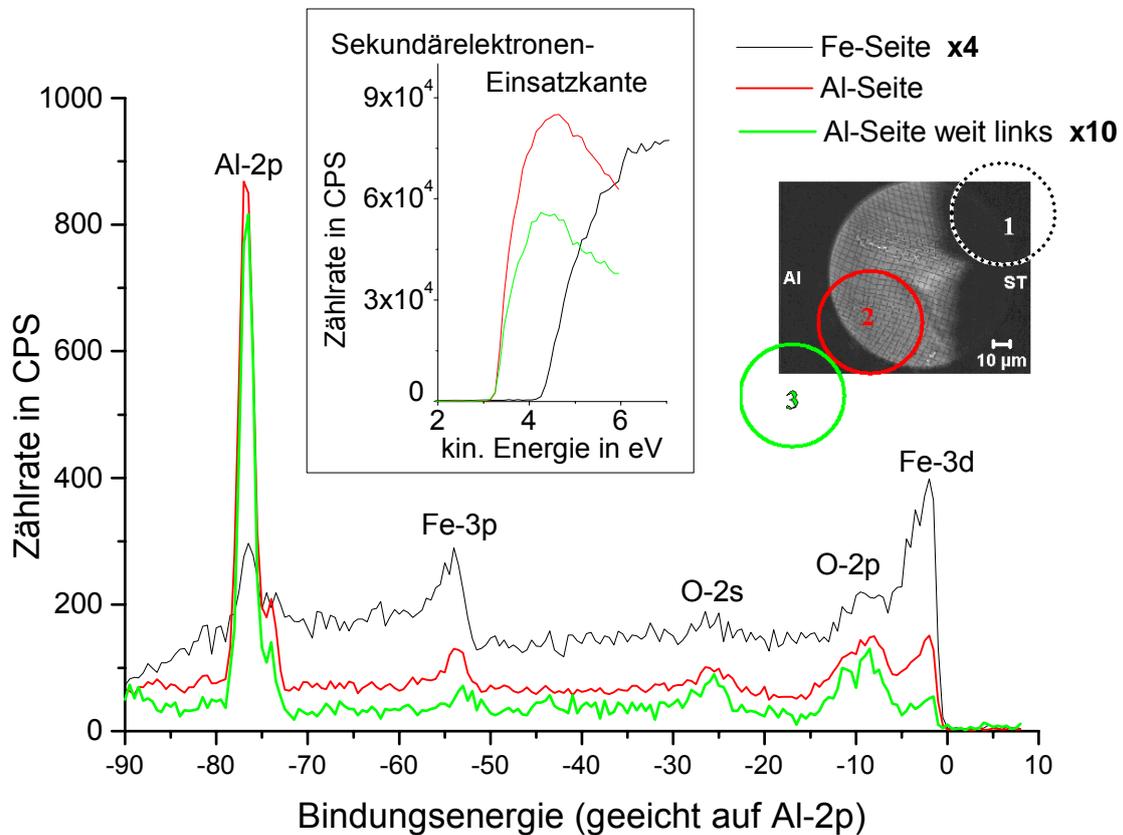
- 145 Viehweger, B.; Simon, S.; u.a.; Development of Joining Techniques through pressforming of Steel and Aluminium, Materials Week 2000, proceedings CD-ROM, 2000
- 146 Viehweger, B.; Simon, S.; u.a.; DE 101 49 183 C2; Verfahren zur Herstellung von kanten- oder stirnseitig miteinander verbundene Bleche und stirnseitig miteinander verbundener Bleche.
- 147 Neumann; A.; Hobbacher; Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure, Teil 4, DVS-Verlag
- 148 Hofmann, W.; Ruge, J.; versuche über die Kalt-Preßschweißung von Metallen; Z. Metallkunde, 1952 / 3
- 149 Fertigung Nopal, Werkzeugbau; Firmenschrift, Fa. H. Diedrichs; Darmstadt
- 150 Wang, A.-J.; McDowell, D. L.; In-Plane Stiffness and Yield strength of Periodic Metal Honeycombs; Journal of Engineering Materials and Technology – ASME; April 2004
- 151 Conrad, K.-J.; Grundlagen der Konstruktionslehre; Hanser – Verlag , München
- 152 Oehler, G.; Kaiser, F.; Das Blech und seine Prüfung; Springer-Verlag; Berlin; 1953
- 153 Pöhlandt, K.; Werkstoffprüfung für die Umformtechnik; Werkstoffforschung und Technik; Band 4; Springer –Verlag; Berlin; 1986
- 154 Pöhlandt, K.; Beitrag zur Optimierung der Probengestalt und zur Auswertung des Torsionsversuches; Dissertation; TU Braunschweig; 1977
- 155 Dannemann, E.; Pöhlandt, K.; Tekkaya, A.; Methoden zur Bestimmung von Fließkurven der Blechwerkstoffe, Teil 1, Bänder, Bleche, Rohre; Heft 9/82, S. 354-359; Teil 2, Bänder, Bleche, Rohre; Heft 10/82, S. 414-417,
- 156 Pöhland, K.; Vergleichende Betrachtungen der Verfahren zur Prüfung der plastischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe; Springer – Verlag Berlin; 1984

- 157 Stüwe, H.; Turck, H.; Zur Messung der Fließkurven im Torsionsversuch;Metallkunde; Heft 11/64, S.699-703
- 158 Gräber, A.; Weiterentwicklung des Torsionsversuches in Theorie und Praxis; Springer – Verlag Berlin; 1980
- 159 Ostermann, F.; Anwendungstechnologie Aluminium; Springer – Verlag Berlin; 1998
- 160 Ostermann, F.; u.a.; Aluminium-Werkstofftechnik für den Automobilbau; Kontakt und Studium; Expert – Verlag Ehningen; Bd. 375; 1992
- 161 Oehler, G.; Kaiser, F.; Schnitt- Stanz- und Ziehwerkzeuge; Springer – Verlag Berlin; 8. Aufl.; 2000
- 162 König, W.; Fertigungsverfahren; Studium und Praxis; VDI – Verlag; Band 5; Düsseldorf; 1990
- 163 Dubbel; Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer-Verlag; 20. Auflage
- 164 Oehler, G.; Weber, A.; Steife Blech- und Kunststoffkonstruktionen; Konstruktionsbücher Bd. 30; Springer – Verlag Berlin; 1972
- 165 Kleppmann, W.; Taschenbuch Versuchsplanung; Hanser-Verlag München; 3. Aufl.; 2003
- 166 Bauer, O., Handbuch der Verbindungstechnik, Hanser-Verlag
- 167 N. N.; VDI – Berichte 478, Schraubverbindungen heute, VDI-Verlag 1983
- 168 N. N.; Firmenkatalog der Fa. EJOT - Verbindungstechnik
- 169 N. N.; VDI – Berichte 1072; Fügen im Vergleich, Feinbleche, VDI – Verlag

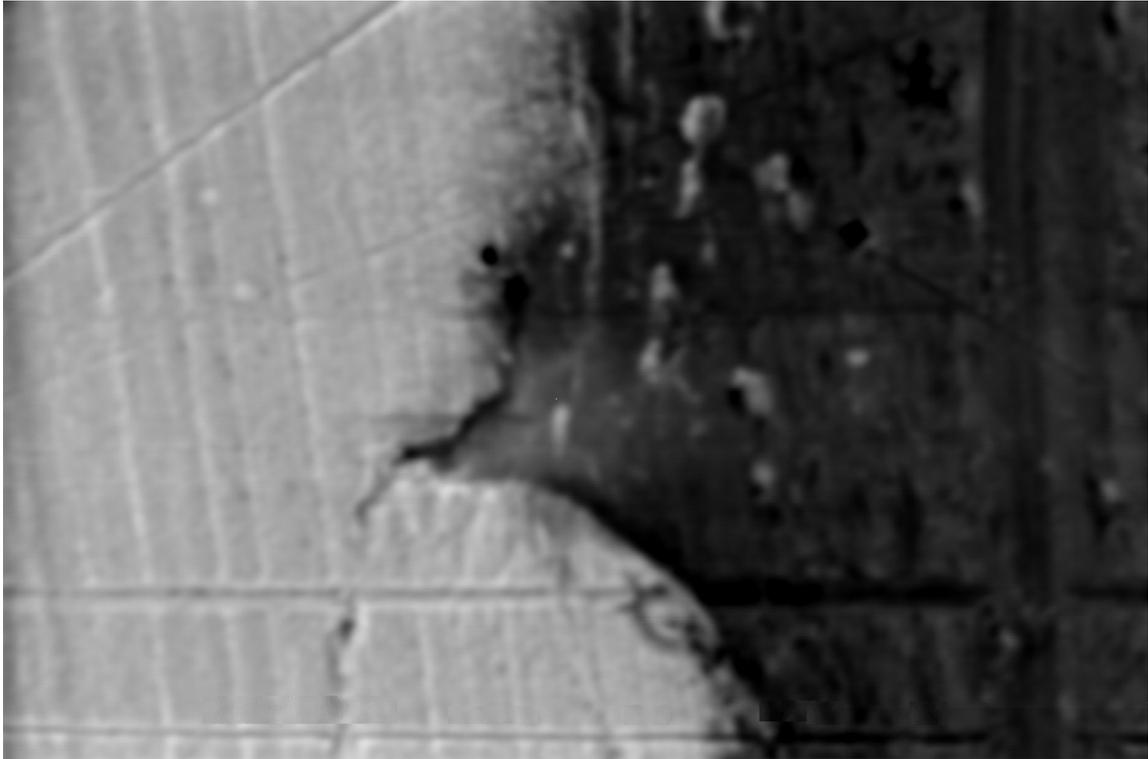
7 Anlagen



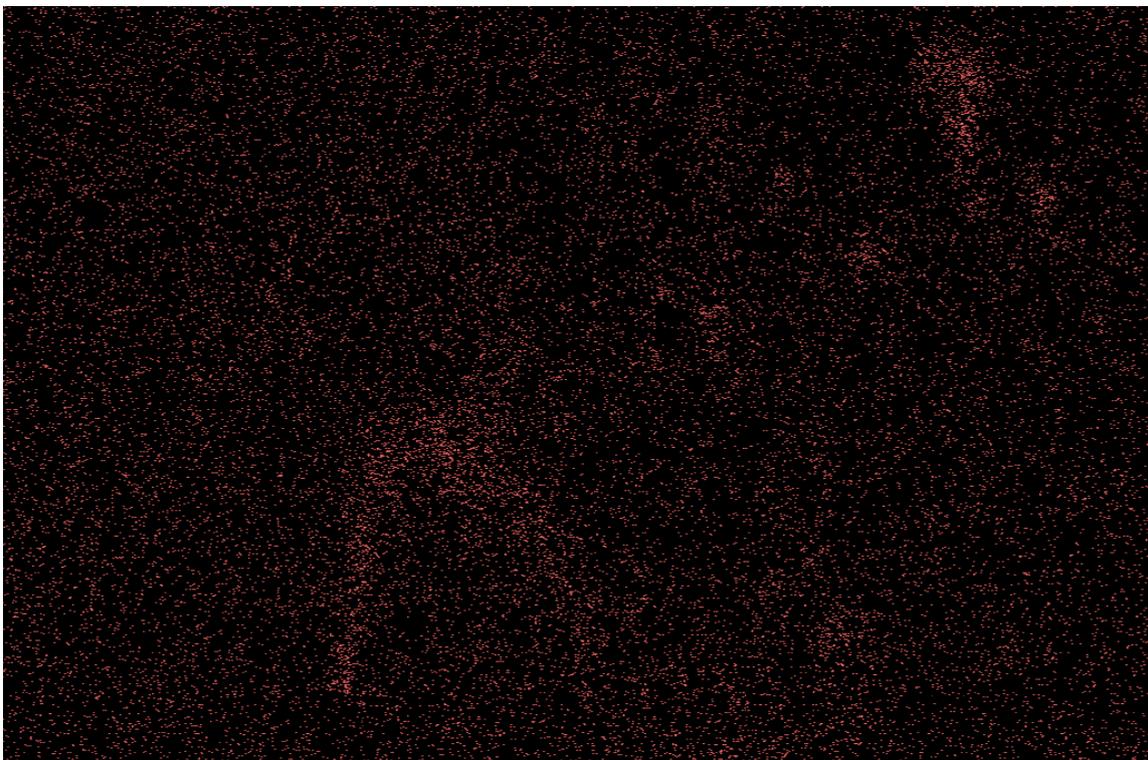
Anhang - Bild 1: PEEM Aufnahmen mit NEXAFS Spektren im Bereich der O1s-Absorptionskante jeweils aus den im Bild gezeigten rechteckigen Ausschnitten.



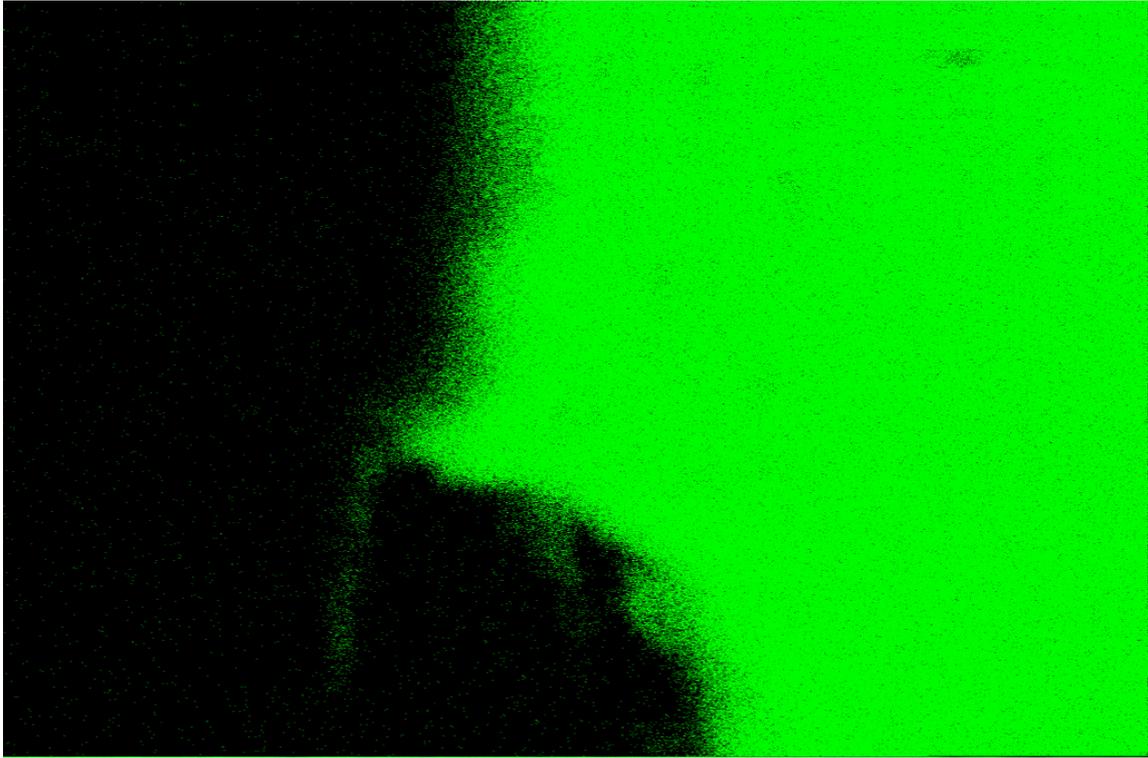
Anhang - Bild 2: Photoelektronen-Spektren im Bereich der Grenzfläche



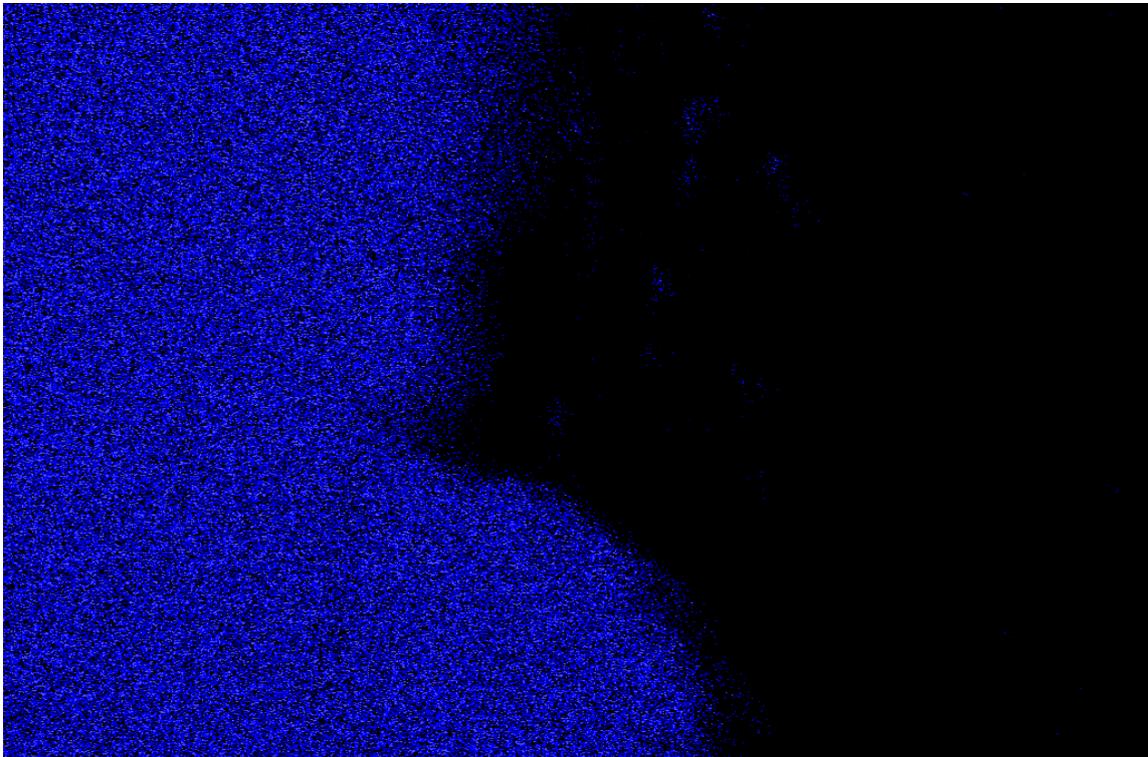
Anhang - Bild 3: REM-Aufnahmen eines Stahl - Aluminium Schrägschliffs



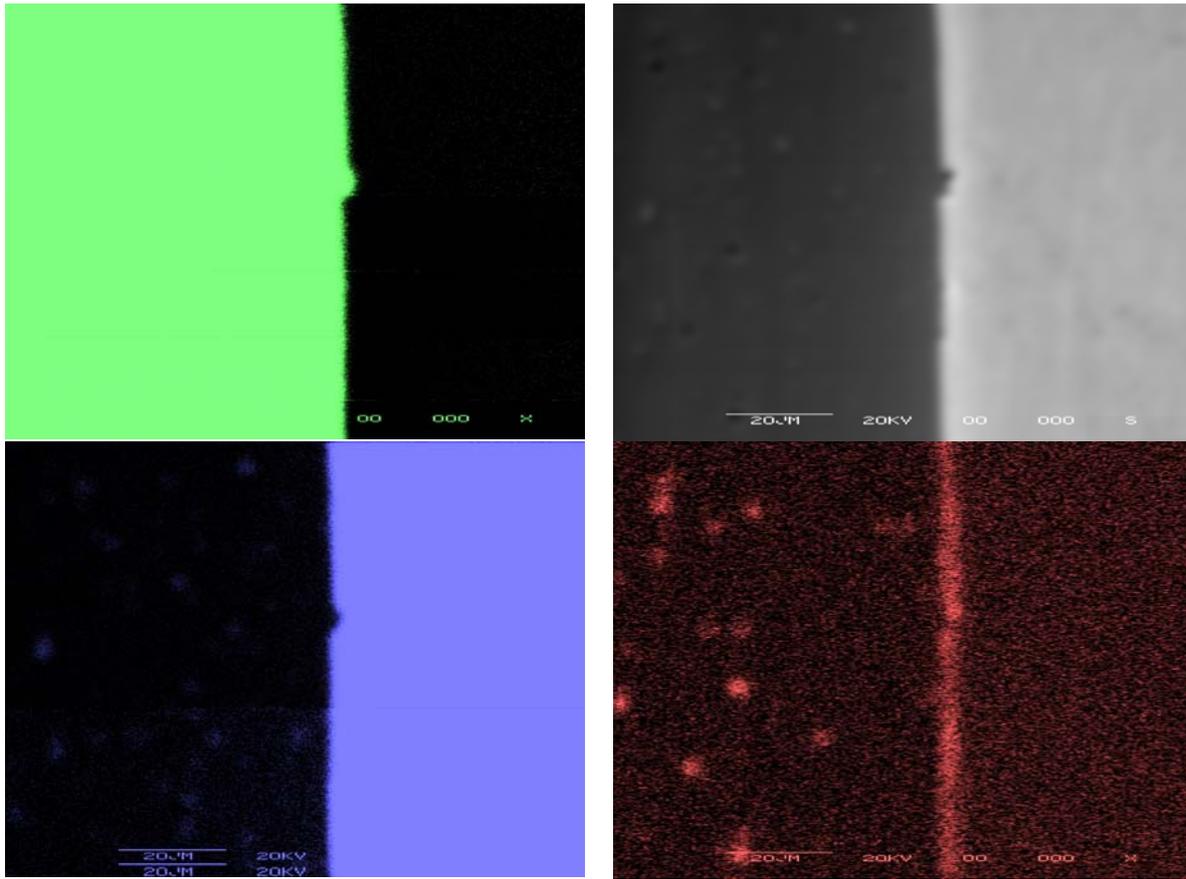
Anhang - Bild 4: Im selben Bildausschnitt mit dem WDX-Spektrometer ermittelte Verteilungen der Röntgenfluoreszenz des O



Anhang - Bild 5: Im selben Bildausschnitt mit dem WDX-Spektrometer ermittelte Verteilungen der Röntgenfluoreszenz des Al



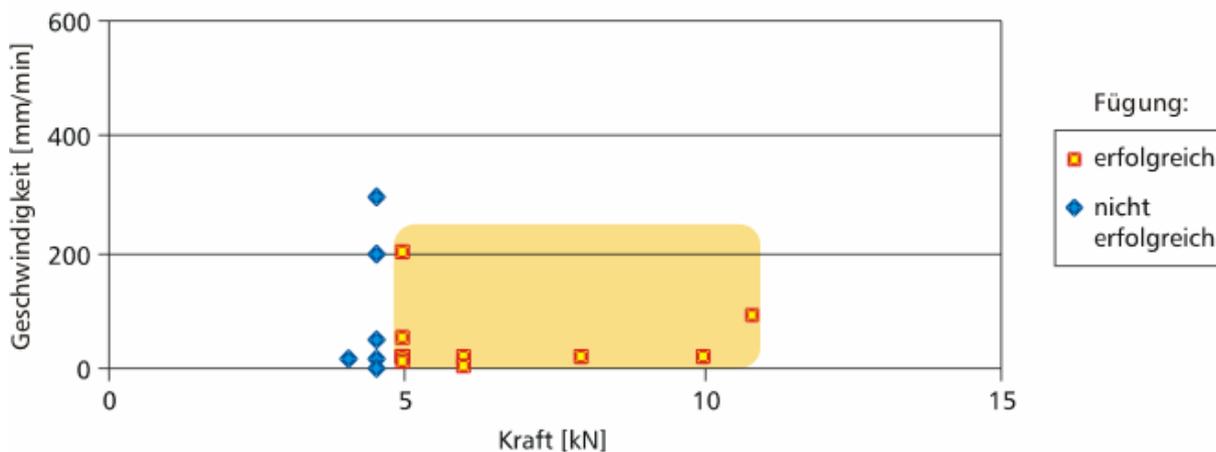
Anhang - Bild 6: Im selben Bildausschnitt mit dem WDX-Spektrometer ermittelte Verteilungen der Röntgenfluoreszenz des Fe



Anhang - Bild 7: REM- und WDX- Untersuchungen

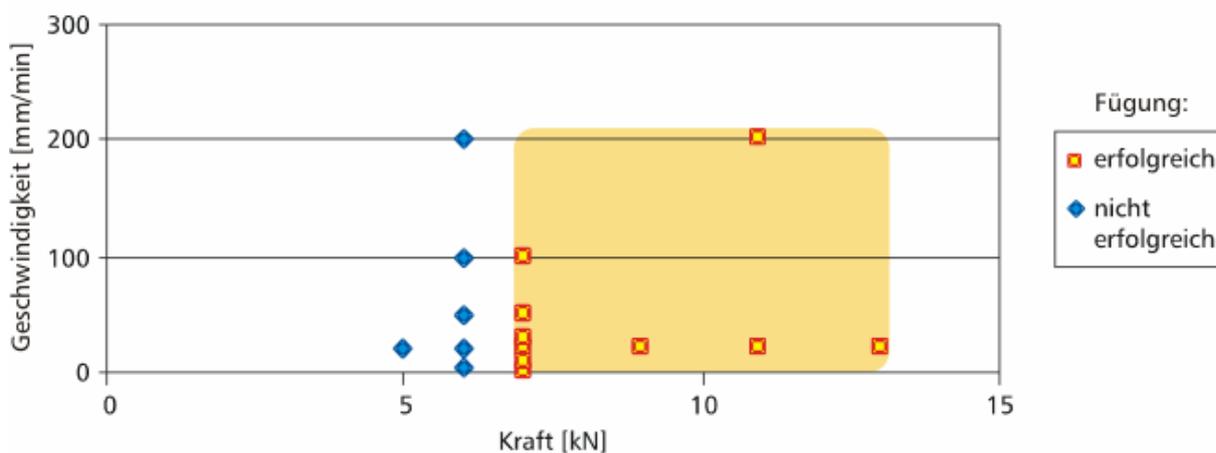
Prozessfenster für die Herstellung von Kaltpressschweißverbindungen auf der Universalprüfmaschine ZWICK, Typ 1486

Material 1:	AlMgMn4,5	Breite: 2,0mm	Stärke: 2,0mm
Material 2:	FeP04	Breite: 2,0mm	Stärke: 1,5mm
Breite der Finne:	3,0mm		
Anordnung 1:	Al / Fe		
Anordnung 2:	Fe / Al		



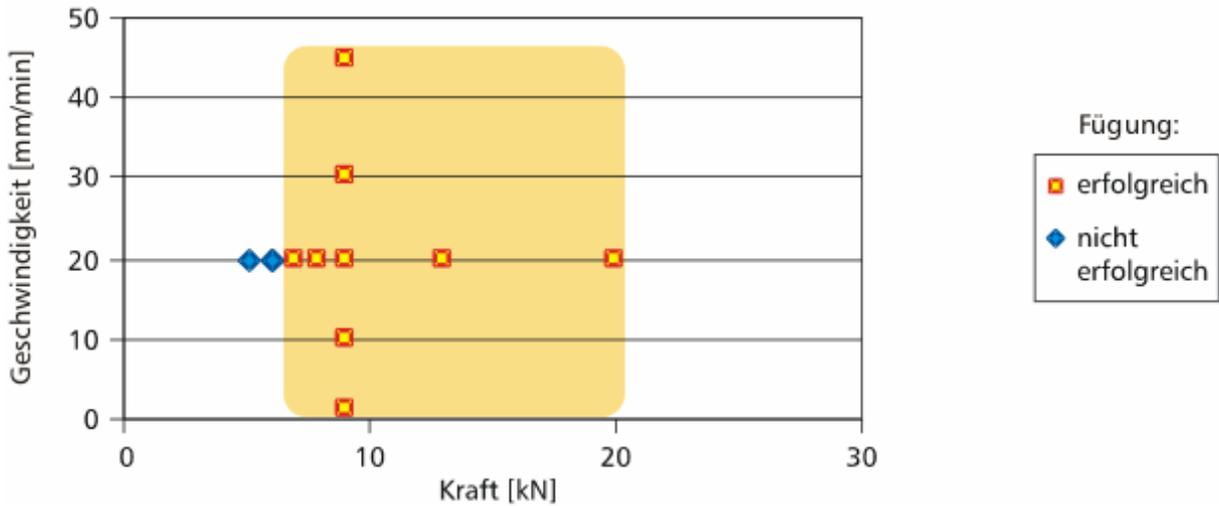
Anhang - Bild 8: Prozessfenster für 2 mm breite Proben

Material 1:	AlMgMn4,5	Breite: 3,0mm	Stärke: 2,0mm
Material 2:	FeP04	Breite: 3,0mm	Stärke: 1,5mm
Breite der Finne:	3,0mm		
Anordnung 1:	Al / Fe		
Anordnung 2:	Fe / Al		



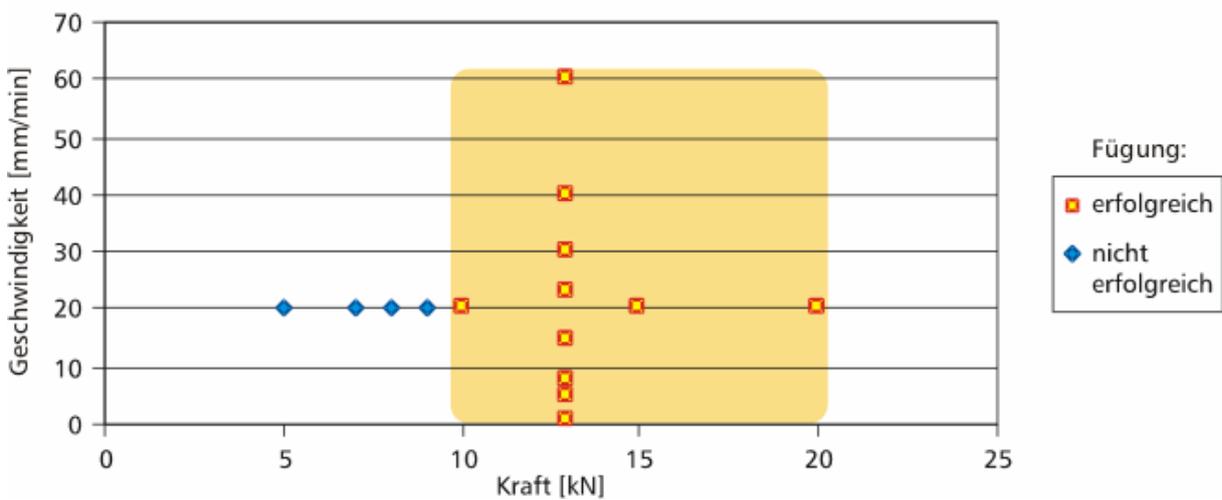
Anhang - Bild 9: Prozessfenster für 3 mm breite Proben

Material 1:	AlMgMn4,5	Breite: 4,0mm	Stärke: 2,0mm
Material 2:	FeP04	Breite: 4,0mm	Stärke: 1,5mm
Breite der Finne:	3,0mm		
Anordnung 1:	Al / Fe		
Anordnung 2:	Fe / Al		



Anhang - Bild 10: Prozessfenster für 4 mm breite Proben

Material 1:	AlMgMn4,5	Breite: 6,0mm	Stärke: 2,0mm
Material 2:	FeP04	Breite: 6,0mm	Stärke: 1,5mm
Breite der Finne:	3,0mm		
Anordnung 1:	Al / Fe		
Anordnung 2:	Fe / Al		



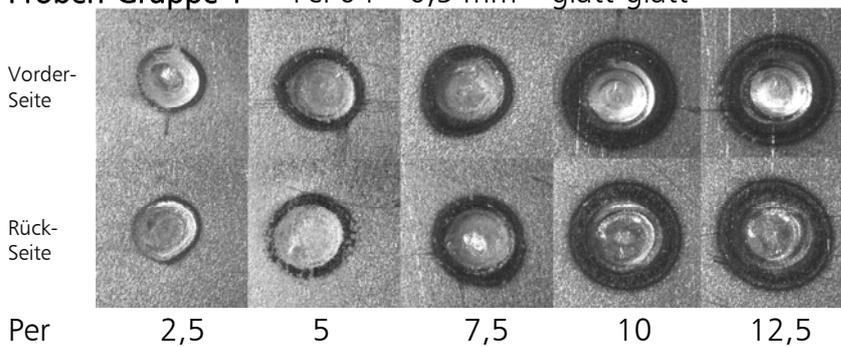
Anhang - Bild 11: Prozessfenster für 6 mm breite Proben

Beurteilung der Qualität der Schweißpunkte

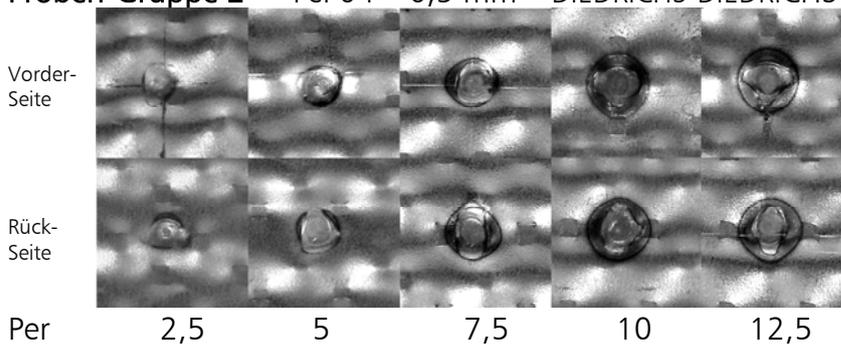
Unterteilung in verschiedene Struktur-Kombinationen

Proben-Nr.	Material	Dicke [mm]	Elektrodenkraft [daN]	Struktur 1	Struktur 2
1	FeP04	0,5	60	Glatt	Glatt
2	FeP04	0,5	60	DIEDRICHS	DIEDRICHS
3	FeP04	0,5	60	PWO	PWO
4	FeP04	0,5	60	Glatt	DIEDRICHS
5	FeP04	0,5	60	Glatt	PWO
6	FeP04	0,5	60	DIEDRICHS	PWO
7	FeP04	0,7	75	Glatt	Glatt
8	FeP04	0,7	75	Glatt	DIEDRICHS
9	FeP04	0,7	75	DIEDRICHS	DIEDRICHS

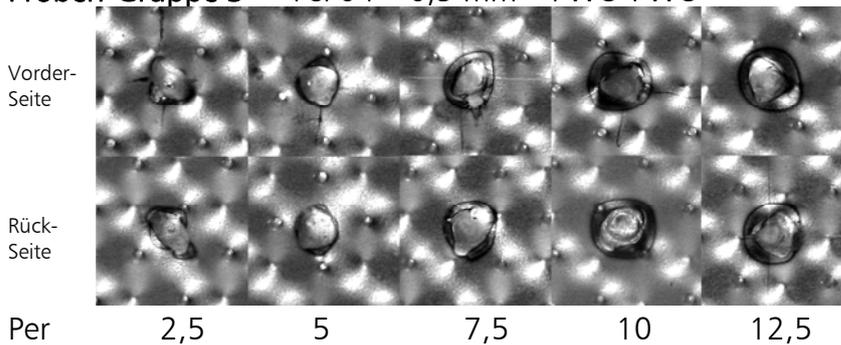
Proben-Gruppe 1 FeP04 – 0,5 mm – glatt-glatt



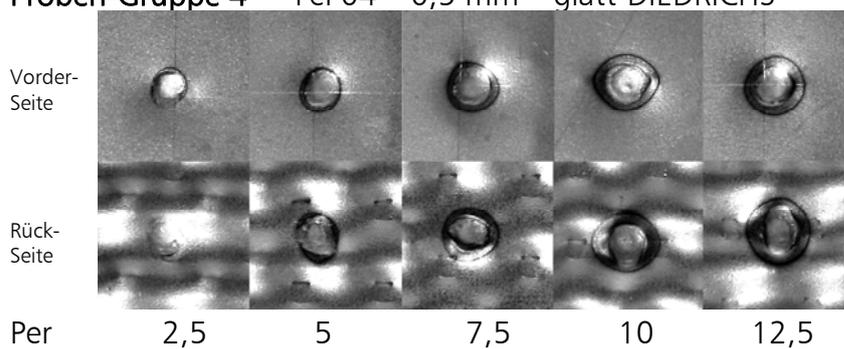
Proben-Gruppe 2 FeP04 – 0,5 mm – DIEDRICHS-DIEDRICHS



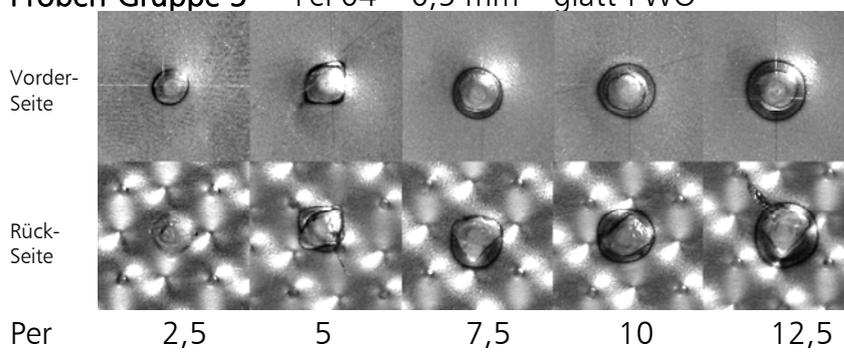
Proben-Gruppe 3 FeP04 – 0,5 mm – PWO-PWO



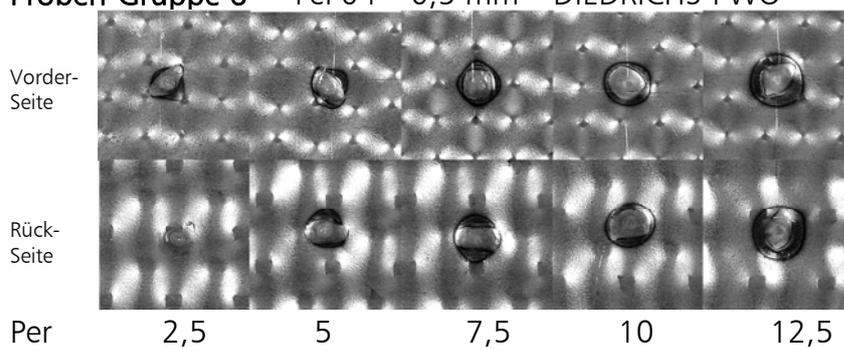
Proben-Gruppe 4 FeP04 – 0,5 mm – glatt-DIEDRICHS



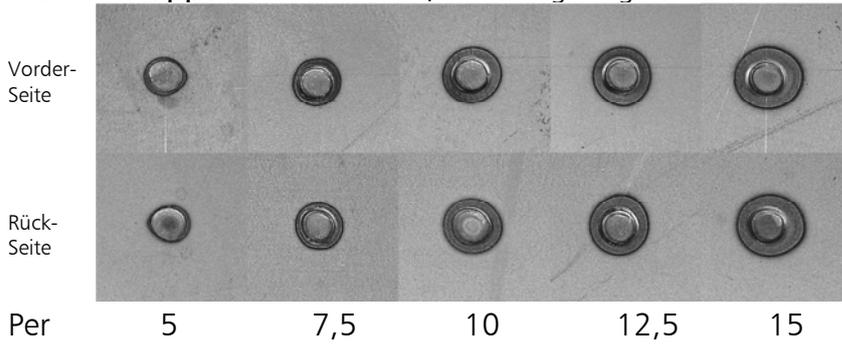
Proben-Gruppe 5 FeP04 – 0,5 mm – glatt-PWO



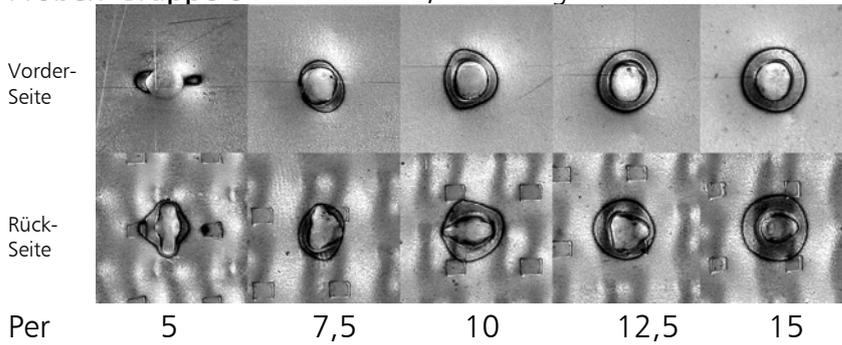
Proben-Gruppe 6 FeP04 – 0,5 mm – DIEDRICHS-PWO



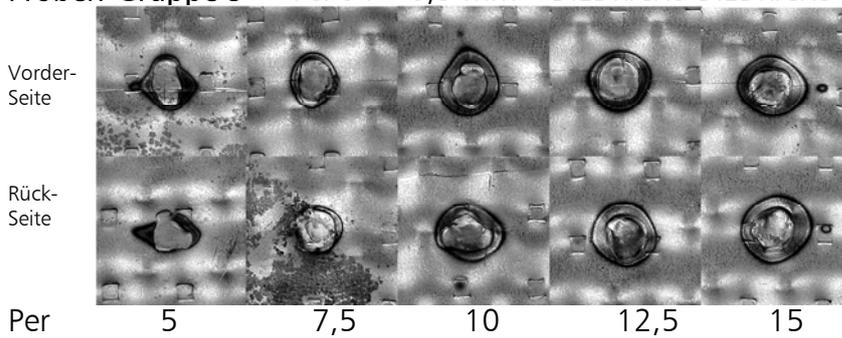
Proben-Gruppe 7 FeP04 – 0,7 mm – glatt-glatt



Proben-Gruppe 8 FeP04 – 0,7 mm – glatt-DIEDRICHS



Proben-Gruppe 9 FeP04 – 0,5 mm – DIEDRICHS-DIEDRICHS



Typenschild der Punktschweißzange TECNA 7901

≠ mm	C CYCLES	ØEL mm	F daN	L mm	PUNTI SPOT / H
0.6+0.6	4	3.5	60	125	500
0.8+0.8	7	4	75	125	340
1+1	16	4.5	90	125	250
1.5+1.5	35	5	100	125	120
2+2	60	6	120	125	60
1.5+1.5	50	5	62	250*	120
1+1	30	4.5	45	350*	250
1+1	50	4.5	35	500*	280

7901	ITEM ART.
95/461	YEAR ANNO/N.
380 V	50 Hz
2	KVA 50% CONVENTIONAL POWER POTENZA CONVENZIONALE
11	KVA MAX POWER POTENZA MASSIMA
7400	A SHORT CIRCUIT CURRENT CORRENTE DI C. C.
125	daN ELECTRODES FORCE FORZA AGLI ELETTRODI

USARE CON PRESA DI TERRA
THIS APPLIANCE MUST BE EARTHED

Tabellen aller Messwerte des Zugversuches

ZB-Nr.	Ø 1 [mm]	Ø 2 [mm]	Δ Ø [mm]	F _{max} [N]
--------	-------------	-------------	-------------	-------------------------

1. 1 I	3,5	3,0	3,3	1691,69
1. 1 II	3,5	3,0	3,3	1691,21
1. 1 III	3,5	3,0	3,3	1721,61
Durchschnittswerte			3,3	1701,5
1. 2 I	4,0	3,5	3,8	1863,55
1. 2 II	4,0	3,5	3,8	1833,23
1. 2 III	4,0	3,5	3,8	1818,70
Durchschnittswerte			3,8	1838,5
1. 3 I	4,0	4,0	4,0	1914,93
1. 3 II	3,8	4,2	4,0	1931,20
1. 3 III	4,0	4,0	4,0	1963,57
Durchschnittswerte			4,0	1936,6
1. 4 I	4,5	4,5	4,5	2183,43
1. 4 II	4,5	4,5	4,5	2183,73
1. 4 III	4,5	4,5	4,5	2137,94
Durchschnittswerte			4,5	2168,4
1. 5 I	5,0	5,0	5,0	2243,60
1. 5 II	4,6	5,1	4,9	2209,80
1. 5 III	4,6	4,9	4,8	2169,75
Durchschnittswerte			4,9	2207,7

ZB-Nr.	Ø 1 [mm]	Ø 2 [mm]	Δ Ø [mm]	F _{max} [N]
--------	-------------	-------------	-------------	-------------------------

2. 1 I	3,0	3,0	3,0	1543,99
2. 1 II	3,0	3,0	3,0	1621,65
2. 1 III	3,0	3,0	3,0	1635,25
Durchschnittswerte			3,0	1600,3
2. 2 I	3,5	3,0	3,3	1754,25
2. 2 II	3,5	3,0	3,3	1867,09
2. 2 III	3,5	3,2	3,4	1757,98
Durchschnittswerte			3,3	1793,1
2. 3 I	4,0	3,5	3,8	1910,19
2. 3 II	4,0	3,5	3,8	1978,26
2. 3 III	4,0	3,5	3,8	1925,85
Durchschnittswerte			3,8	1938,1
2. 4 I	4,0	4,0	4,0	2256,96
2. 4 II	4,0	4,0	4,0	2228,56
2. 4 III	4,0	3,5	3,8	2068,24
Durchschnittswerte			3,9	2184,6
2. 5 I	4,0	3,5	3,8	2076,68
2. 5 II	4,0	3,5	3,8	2028,34
2. 5 III	4,0	3,8	3,9	2146,46
Durchschnittswerte			3,8	2083,8

3. 1 I	3,5	3,0	3,3	1691,95
3. 1 II	3,5	3,0	3,3	1673,37
3. 1 III	3,3	3,0	3,2	1633,44
Durchschnittswerte			3,2	1666,3
3. 2 I	3,5	3,5	3,5	1850,11
3. 2 II	3,5	3,7	3,6	1881,20
3. 2 III	3,5	3,5	3,5	1952,71
Durchschnittswerte			3,5	1894,7
3. 3 I	4,0	3,5	3,8	2023,57
3. 3 II	4,0	3,5	3,8	1947,65
3. 3 III	3,8	3,8	3,8	2030,02
Durchschnittswerte			3,8	2000,4
3. 4 I	4,0	3,6	3,8	2136,39
3. 4 II	4,1	3,6	3,9	2036,40
3. 4 III	4,0	3,6	3,8	2010,90
Durchschnittswerte			3,8	2061,2
3. 5 I	4,0	4,0	4,0	2104,24
3. 5 II	4,5	3,5	4,0	2062,79
3. 5 III	4,0	4,0	4,0	2176,11
Durchschnittswerte			4,0	2114,4

4. 1 I	3,0	3,0	3,0	1579,75
4. 1 II	3,0	3,0	3,0	1487,58
4. 1 III	3,0	3,0	3,0	1560,26
Durchschnittswerte			3,0	1542,5
4. 2 I	3,5	3,5	3,5	1728,00
4. 2 II	3,5	3,5	3,5	1712,45
4. 2 III	3,5	3,5	3,5	1731,35
Durchschnittswerte			3,5	1723,9
4. 3 I	4,0	3,5	3,8	1856,85
4. 3 II	4,0	3,5	3,8	1896,19
4. 3 III	4,0	3,5	3,8	1895,90
Durchschnittswerte			3,8	1883,0
4. 4 I	4,0	4,0	4,0	2025,36
4. 4 II	4,0	4,0	4,0	1998,02
4. 4 III	4,0	4,0	4,0	2022,22
Durchschnittswerte			4,0	2015,2
4. 5 I	4,0	4,0	4,0	2077,48
4. 5 II	4,0	4,0	4,0	2012,23
4. 5 III	4,0	4,0	4,0	2014,20
Durchschnittswerte			4,0	2034,6

5. 1 I	3,0	2,8	2,9	1540,80
5. 1 II	3,5	2,5	3,0	1516,79
5. 1 III	3,6	2,4	3,0	1468,76
Durchschnittswerte	3,0	1508,8		
5. 2 I	3,5	3,5	3,5	1732,66
5. 2 II	3,8	3,2	3,5	1764,84
5. 2 III	3,5	3,5	3,5	1735,99
Durchschnittswerte	3,5	1744,5		
5. 3 I	4,0	3,5	3,8	1868,92
5. 3 II	4,0	3,5	3,8	1873,70
5. 3 III	4,0	3,5	3,8	1882,51
Durchschnittswerte	3,8	1875,0		
5. 4 I	4,0	3,8	3,9	1959,31
5. 4 II	4,0	3,5	3,8	1917,91
5. 4 III	4,0	3,7	3,9	1998,95
Durchschnittswerte	3,8	1958,7		
5. 5 I	4,0	4,0	4,0	2028,31
5. 5 II	4,0	4,0	4,0	1986,52
5. 5 III	4,0	4,0	4,0	1988,75
Durchschnittswerte	4,0	2001,2		

6. 1 I	3,0	3,0	3,0	1567,21
6. 1 II	3,0	2,5	2,8	1447,76
6. 1 III	3,5	3,0	3,2	1608,90
Durchschnittswerte	3,0	1541,3		
6. 2 I	3,5	3,0	3,3	1766,49
6. 2 II	3,5	3,0	3,3	1754,62
6. 2 III	3,4	2,9	3,2	1686,95
Durchschnittswerte	3,2	1736,0		
6. 3 I	3,8	3,3	3,6	1898,77
6. 3 II	3,8	3,5	3,7	1918,07
6. 3 III	4,0	3,4	3,7	1871,33
Durchschnittswerte	3,6	1896,1		
6. 4 I	4,0	3,5	3,8	1931,30
6. 4 II	4,0	4,0	4,0	2057,75
6. 4 III	4,0	3,7	3,9	2014,42
Durchschnittswerte	3,9	2001,2		
6. 5 I	4,5	3,5	4,0	2128,89
6. 5 II	4,0	4,0	4,0	2046,25
6. 5 III	4,2	3,7	4,0	2064,22
Durchschnittswerte	4,0	2079,8		

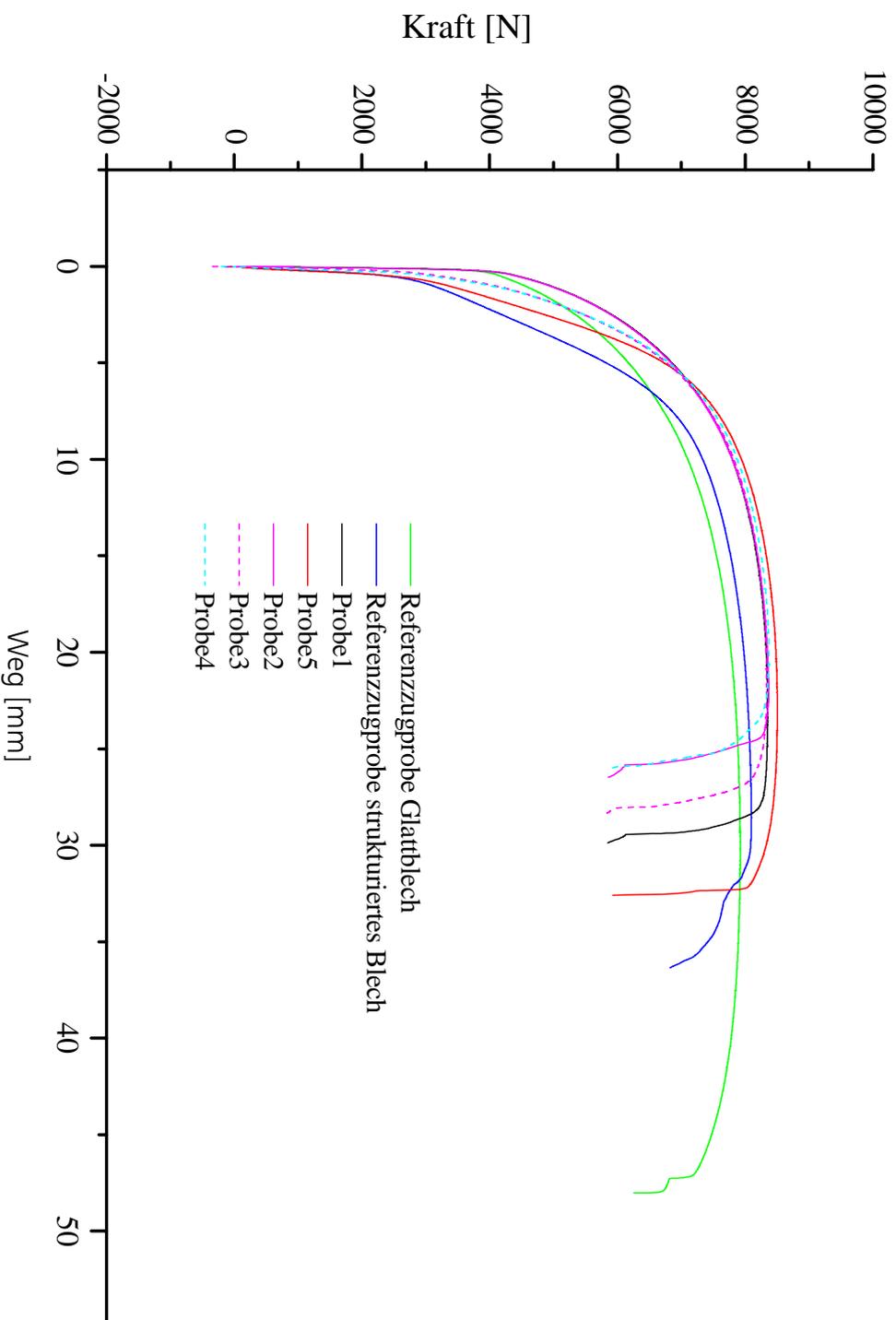
7. 1 I	4,0	3,4	3,7	2685,75
7. 1 II	4,1	3,2	3,7	2715,40
7. 1 III	4,2	3,3	3,8	2772,80
Durchschnittswerte	3,7	2724,7		
7. 2 I	3,8	3,3	3,6	2967,85
7. 2 II	4,5	3,3	3,9	3037,52
7. 2 III	4,6	3,4	4,0	3075,42
Durchschnittswerte	3,8	3026,9		
7. 3 I	4,5	3,5	4,0	3307,37
7. 3 II	4,8	3,5	4,2	3304,87
7. 3 III	3,8	3,6	3,7	3220,75
Durchschnittswerte	4,0	3277,7		
7. 4 I	4,3	3,7	4,0	3340,30
7. 4 II	4,1	3,9	4,0	3492,87
7. 4 III	4,6	4,0	4,3	3417,40
Durchschnittswerte	4,1	3416,9		
7. 5 I	4,8	3,5	4,2	3489,41
7. 5 II	4,8	3,3	4,1	3464,52
7. 5 III	5,1	4,5	4,8	3564,29
Durchschnittswerte	4,3	3506,1		

8. 1 I	3,8	3,5	3,7	2345,77
8. 1 II	4,6	3,1	3,9	2495,26
8. 1 III	4,1	3,5	3,8	2364,96
Durchschnittswerte	3,8	2402,0		
8. 2 I	4,0	4,0	4,0	3027,88
8. 2 II	4,0	3,7	3,9	2993,03
8. 2 III	4,0	3,5	3,8	2918,36
Durchschnittswerte	3,9	2979,8		
8. 3 I	4,0	4,0	4,0	3118,28
8. 3 II	4,0	3,8	3,9	3119,70
8. 3 III	4,5	3,6	4,1	3230,71
Durchschnittswerte	4,0	3156,2		
8. 4 I	4,5	4,0	4,3	3292,12
8. 4 II	4,5	4,0	4,3	3260,84
8. 4 III	4,5	4,5	4,5	3325,66
Durchschnittswerte	4,3	3292,9		
8. 5 I	4,5	4,5	4,5	3439,31
8. 5 II	4,8	4,5	4,7	3496,94
8. 5 III	5,0	4,6	4,8	3504,34
Durchschnittswerte	4,7	3480,2		

9. 1 I	3,5	3,0	3,3	2700,95
9. 1 II	3,5	3,5	3,5	2384,02
9. 1 III	3,5	3,2	3,4	2691,71
Durchschnittswerte	3,3			2696,3
9. 2 I	4,0	3,0	3,5	3148,79
9. 2 II	3,9	3,3	3,6	3105,16
9. 2 III	4,0	3,2	3,6	3113,76
Durchschnittswerte	3,6			3122,6
9. 3 I	4,0	3,7	3,9	3389,42
9. 3 II	4,0	3,4	3,7	3225,75
9. 3 III	4,0	3,5	3,8	3252,88
Durchschnittswerte	3,8			3289,4
9. 4 I	4,5	3,5	4,0	3362,19
9. 4 II	4,5	3,9	4,2	3384,44
9. 4 III	5,0	3,4	4,2	3371,66
Durchschnittswerte	4,1			3372,8
9. 5 I	4,0	4,0	4,0	3411,97
9. 5 II	4,0	4,0	4,0	3415,72
9. 5 III	4,3	4,3	4,3	3493,35
Durchschnittswerte	4,1			3440,3

Auch erste Ergebnisse zum zweischnittigen Fügen mit strukturierten Feinblechen liegen vor.

Zweischnitiges Punktschweißen



Anhang - Bild 14: Zweischnitiges Punktschweißen strukturierter Feinbleche
Anlage

Ergebnisse der Probenreihe A1- A3

Geklebt mit Sikaflex -252

Versuchsreihe	Formelzeichen	Einheit	Wert		
			A1	A2	A3
Anzahl der Proben	-	-	10	9	10
Durchschnittliche Kraft	F	[N]	969,00	467,778	625,00
Durchschnittliche Bruchspannung	τ_B	[N/mm ²]	1,938	0,936	1,234
Standardabweichung	s	[N/mm ²]	0,308	0,156	0,482
Variationskoeffizient	v	-	0,159	0,167	0,391
Prüfgeschwindigkeit	v	[mm/min.]	5	5	5

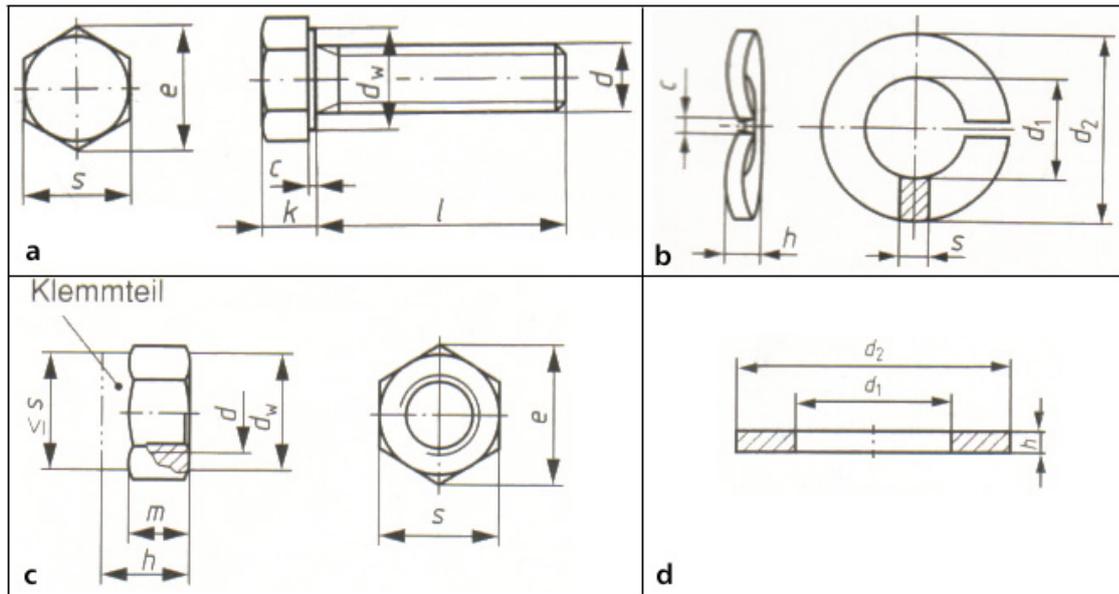
Anhang - Tabelle 1: Ergebnisse für Sikaflex -252

Ergebnisse der Probenreihe B1 - B3

Geklebt mit Terokal 221

Versuchsreihe	Formelzeichen	Einheit	Wert		
			B1	B2	B3
Anzahl der Proben	-	-	10	10	10
Durchschnittliche Kraft	F	[N]	3464,049	2574,778	2139,384
Durchschnittliche Bruchspannung	τ_B	[N/mm ²]	8,660	6,437	5,348
Standardabweichung	s	[N/mm ²]	2,245	1,037	1,154
Variationskoeffizient	v	-	0,259	0,161	0,216
Prüfgeschwindigkeit	v	[mm/min.]	50	50	50

Anhang - Tabelle 2: Ergebnisse für Terokal 221



Anhang - Bild 15: Maße an a- Sechskantschraube, b- Federring, c- Mutter, d- Scheibe
Volumen- und Bauraumberechnung der Sechskantschraubverbindung

$$\underline{\text{Schraubenkopf}} : V_1 = A \cdot (k - c) = 0,649e^2 \cdot (k - c)$$

$$V_1 = 0649 \cdot 11,05^2 \text{ mm}^2 \cdot (4,15 \text{ mm} - 0,5 \text{ mm}) = \underline{\underline{289,24 \text{ mm}^3}}$$

$$\underline{\text{Schaft}} : V_2 = A_1 \cdot c + A_2 \cdot l = \frac{\pi}{4} d_w^2 \cdot c + \frac{\pi}{4} d^2 \cdot l$$

$$V_2 = \frac{\pi}{4} \cdot 8,88^2 \text{ mm}^2 \cdot 0,5 \text{ mm} + \frac{\pi}{4} \cdot 6^2 \text{ mm}^2 \cdot 16 \text{ mm} = \underline{\underline{483,35 \text{ mm}^3}}$$

$$\underline{\text{Federring}} : V_3 = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \cdot s$$

$$V_3 = \frac{\pi}{4} (11,8^2 - 6,1^2) \text{ mm}^2 \cdot 1,3 \text{ mm} = \underline{\underline{104,17 \text{ mm}^3}}$$

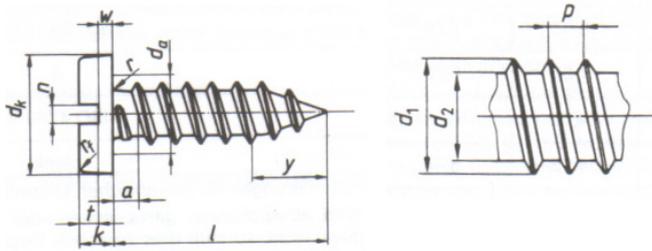
$$\underline{\text{Scheibe}} : V_4 = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \cdot h$$

$$V_4 = \frac{\pi}{4} (12^2 - 6,4^2) \text{ mm}^2 \cdot 1,8 \text{ mm} = \underline{\underline{145,67 \text{ mm}^3}}$$

$$\underline{\text{Mutter}} : V_5 = (0,649e^2 - \frac{\pi}{4} d^2) m$$

$$V_5 = \left(0649 \cdot 11,05^2 - \frac{\pi}{4} \cdot 6^2 \right) \text{ mm}^2 \cdot 5,2 \text{ mm} = \underline{\underline{265,05 \text{ mm}^3}}$$

In der folgenden Berechnung erfolgt die Bestimmung der Teilvolumina der Blechschraube.

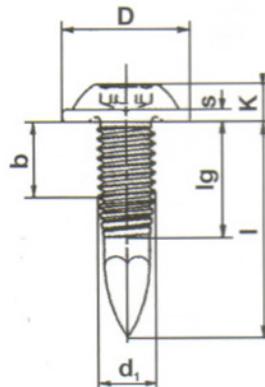


Anhang - Bild 16: Maße an der Flachkopf – Blechschraube

$$\underline{\text{Schraubenkopf}} : V_1 = \frac{\pi}{4} d_k^2 \cdot k = \frac{\pi}{4} 11,3^2 \text{ mm}^2 \cdot 3,15 \text{ mm} = \underline{\underline{315,9 \text{ mm}^3}}$$

$$\underline{\text{Schaft}} : V_2 = \frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot l = \frac{\pi}{4} 6,03^2 \text{ mm}^2 \cdot 16 \text{ mm} = \underline{\underline{456,92 \text{ mm}^3}}$$

Die Volumenbestimmung der EJOT FDS® - Schraube ist nachstehend aufgeführt.



Anhang - Bild 17: Maße an der EJOT FDS® - Schraube

Bei der Berechnung wird der Radius am Kopf und die Spitze am Schaft nicht berücksichtigt. Die Volumenberechnung erfolgt anhand der Zylinderformel mit den Werten der Schraube, die die einhüllenden Zylinder um Schaft und Kopf definieren.

$$\underline{\text{Schraubenkopf}} : V_1 = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot s = \frac{\pi}{4} 14,0^2 \text{ mm}^2 \cdot 4,2 \text{ mm} = \underline{\underline{646,54 \text{ mm}^3}}$$

$$\underline{\text{Schaft}} : V_2 = \frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot l = \frac{\pi}{4} \cdot 6,0^2 \text{ mm}^2 \cdot 20 \text{ mm} = \underline{\underline{565,49 \text{ mm}^3}}$$

Schraubentyp	Bezeichnung	Verbindungsraum
	MS	Schraubenkopf: 289,24mm ³ Schaft: 483,35mm ³ Federring: 104,17mm ³ Scheibe: 145,67mm ³ Mutter: 265,05mm ³ GESAMT: 1287,48mm ³
	BS	Schraubenkopf: 315,9mm ³ Schaft: 456,92mm ³ GESAMT: 772,82mm ³
	FDS	Schraubenkopf: 646,54mm ³ Schaft: 565,49mm ³ GESAMT: 1212,03mm ³

Anhang - Tabelle 3: Vergleich der Schraubenbauräume