



Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn,
Mario Kehrer, Simon Dünwald, Dennis Badura,
Maximilian Terren und Thilo Röth

Heutzutage ist die Flexibilität und Anpassung von Produktionssystemen in Abhängigkeit von der Stückzahl ein zunehmend wichtiger Bestandteil im Herstellungsprozess. Insbesondere der Trend zu neuen Antriebstechnologien und der Wandel weg vom klassischen

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn (✉) · M. Kehrer

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de; m.kehrer@pem.rwth-aachen.de

S. Dünwald

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: s.duennwald@pem.rwth-aachen.de

D. Badura

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: d.badura@pem.rwth-aachen.de

M. Terren

Projektleiter, Fensterbau Mersch, Sankt-Vith, Belgien

T. Röth

Geschäftsführer, ACA-Invest GmbH, Aachen, Deutschland

E-Mail: roeth@fh-aachen.de

Verbrennungsmotor zielen auf zunächst kleinserielle oder prototypische Produktionsmengen. Dabei sind niedrige Herstellungskosten seitens der industriellen Produzenten wünschenswert. Herstellungsverfahren gleicher Komponenten können aus wirtschaftlicher Sicht je nach Losgröße stark variieren. Ein Verfahren für Großserien eignet sich keinesfalls für eine Prototypenproduktion. Zudem führen die heutigen Entwicklungen zu produktspezifischen Anforderungen, die mit den Standard-Produktionsverfahren nicht effizient realisierbar sind. In Verbindung mit „Industrie 4.0“-Ansätzen wird eine flexiblere Produktionsplanung mit den entsprechend optimalen Herstellungsverfahren erwartet.¹ Dabei treten als Fertigungsverfahren im Automobilbereich die Kunststoff- und die Metall-Teileproduktionen in den Vordergrund. Die Wahl des richtigen Herstellungsverfahrens erfordert eine effiziente Bewertung der Produktionsmenge. Das Hauptaugenmerk liegt dabei zunächst bei der Produktionsplanung auf der Außenhautkomponente und ihrer Stückzahl, woraufhin die weiterführenden Kostenbilanzierungen für ein bestimmtes Szenario folgen. Daraus ergibt sich eine angepasste Produktionsplanung, die es erlaubt, eine Aussage über ein geeignetes Herstellungsverfahren zu treffen. Im Fokus der Kunststoff-Teileproduktionen stehen in Abhängigkeit von der Stückzahl das Handlaminieren, das Thermoformen, das Spritzgießen und das SMC-Pressen. Die metallischen Verarbeitungswerkstoffe erfordern ebenfalls eine Analyse des Herstellungsszenarios für die Komponentenproduktion, weil hier eine vielfältige Auswahl von Verarbeitungstechniken zur Verfügung steht. Von besonderer Relevanz sind die Baugruppen Vierkant-Hohlprofil, Stirnwand, Space-Frame-Knoten und Federbeinaufnahmen. Neben dem eigentlichen Herstellungsverfahren liegt im Fügen von Außenhaut und Karosserie eine weitere Herausforderung. Die wesentlichen Anforderungen – so wie die Verbindung von Elementen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften – bedürfen verschiedener Lösungen. Automobilhersteller streben dabei unter anderem Gewichtsreduktionen bei gleichzeitig hoher Leistungsfähigkeit an, was zu weiteren Eingrenzungen führt. Das Fügen von Außenhaut und Karosserie benötigt somit Verfahren, die über die etablierten Methoden wie Laserschweißen und Widerstandsschweißen hinausgehen. Auf ebendiese – beispielsweise Kleben, Löten und mechanische Verfahren – wird im vorliegenden Kapitel ebenfalls näher eingegangen. Ein Fokus liegt dabei auf der Produktion von Elektromobilmfahrzeugen und deren Fügemethoden.

13.1 Stückzahlsspezifische Produktionsverfahren der Außenhautkomponenten

Im Zuge des Aufschwungs der Elektromobilität haben sich viele neue Fahrzeughersteller und Start-up-Unternehmen gegründet. Aufgrund der geringen Stückzahl der produzierten Fahrzeuge haben prototypische Produktionsverfahren der Außenhautkomponenten eine Daseinsberechtigung, um die (Werkzeug-)Kosten möglichst gering zu halten. Im

¹Vgl. Russack und Jerrentrup 2019, S. 6.

Folgenden sollen daher die technischen Fertigungsverfahren entlang definierter Außenhautkomponenten beleuchtet werden.

Um einen effizienten Ablauf der Herstellung gewichtsoptimierter, einzelner Fahrzeugkomponenten zu schaffen, sind Produktionsverfahren vorzusehen, die der zugrundeliegenden jährlichen Bedarfsmenge an Teilen angemessen sind. Beginnend bei Verfahren für prototypische Produktionsmengen bis hin zu industriellen Großserien kann die Prozesstechnologie bei der Herstellung gleicher Komponenten erheblich schwanken. Um herauszufinden, welche Produktionstechnologie idealerweise für eine definierte jährliche Menge von Werkstücken genutzt werden sollte, kann daher die zu erwartende Stückzahl einer Außenhautkomponente – etwa in Bezug auf die Absatzprognose eines Elektrofahrzeugs, das diese Komponente nutzt – herangezogen werden. Im Zuge der Beschaffung eines passenden Herstellungsprozesses sollten dann anlagenseitige Anschaffungskosten, Energie- und Emissionsaufwände sowie Modularität und Flexibilität des Prozesses insbesondere bei stückzahlabhängigen Schwankungen und technologischen Weiterentwicklungen, Rüstzeiten sowie Wartungs- und Betriebskosten für das vorab definierte Szenario der Produktion bilanziert werden. Auch die Fragen nach dem Grad der Automatisierung und der Digitalisierung des Prozesses und die damit verbundenen Investitionen haben in den vergangenen Jahren abermals erheblich an Bedeutung bei der Erörterung eines geeigneten Produktionsverfahrens gewonnen.^{2,3}

Im Folgenden werden daher die stückzahlspezifischen Produktionsverfahren zur Herstellung der Außenhaut eines Elektrofahrzeug-Vorderwagens kurz vorgestellt:

13.1.1 Stückzahlabhängige Produktionsverfahren auf Basis von Kunststoffwerkstoffen

Beim Verarbeitungswerkstoff Kunststoff sind die Verfahren Handlaminieren, Thermoformen, Spritzgießen und SMC-Pressen gängige Produktionstechniken industriell hergestellter Außenhautkomponenten. Die vorgestellten Verfahren unterscheiden sich dabei deutlich in ihrer Eignung in Bezug auf die Stückzahlabhängigkeit der Komponentenproduktion. Abb. 13.1 zeigt eine Gegenüberstellung dieser Herstellungsverfahren für unterschiedliche Mengen von Kunststoffteilen.

Für eine Produktion von bis zu 220 Komponenten eines Kunststoffteils pro Jahr stellt das Handlaminieren die wirtschaftlichste Produktionsmethode dar. Stückzahlen im Bereich von 220 bis 67.000 sind mit Hilfe des Thermoformens herzustellen. Zwischen 67.000 und 110.000 sollten die Karosseriekomponenten mittels Spritzgießverfahren gefertigt werden. Ab einer Stückzahl von 110.000 bis 190.000 Teilen werden die Komponenten auf verschiedenen Produktionsanlagen hergestellt. Stoßfänger werden dabei mit Hilfe des

²Vgl. Kampker et al. 2018.

³Vgl. ten Hompel et al. 2020.

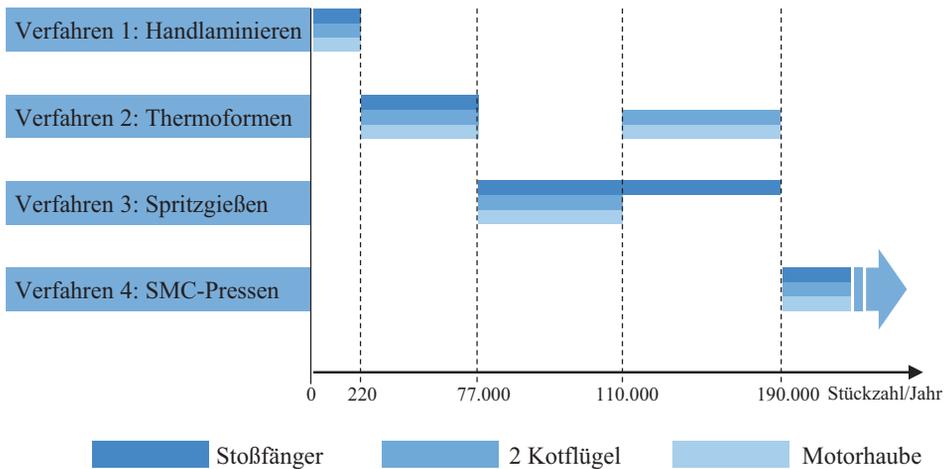


Abb. 13.1 Stückzahloptimierte Kunststoff-Teileproduktion. (Vgl. Kampker et al. 2018)

Spritzgießverfahrens und Kotflügel sowie Motorhauben mit dem Thermoformverfahren gefertigt. Ab 190.000 Werkstücken pro Jahr bietet es sich für alle hier benannten Außenhautkomponenten an, auf die Technik des SMC-Pressens zurückzugreifen.⁴

13.1.2 Die technischen Verfahren der Kunststoff-Teileproduktion in der Übersicht

Handlaminiere

Das Handlaminiere stellt das älteste Herstellungsverfahren für die Verarbeitung von glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) dar. Die Methode wird manuell umgesetzt, indem Harz mit definiert gelegten Textilglasverstärkungen – etwa Matten, Gewebe – zumeist in eine Negativform gegeben wird. Durch die Reaktion von dem im Harz enthaltenen Bindemittel und Härter kommt es zur Aushärtung des Kunststoffwerkstücks. Insbesondere für prototypische Anwendungen sowie Klein- und Spezialserien in der Elektromobilität zeichnet sich das Handlaminiere durch die relativ geringen Investitions- und Werkzeugaufwände aus.^{5,6,7}

Thermoformen

Das Thermo- oder Warmformen ist ein Verarbeitungsverfahren, das auf einer hitzebedingten Umformung sogenannter thermoplastischer Kunststoffe basiert. Durch die Unterstützung eines anliegenden Vakuums oder von Druckluft wird das auf die Umformtemperatur

⁴Vgl. Kampker et al. 2018.

⁵Vgl. Kampker et al. 2018.

⁶Vgl. ten Hompel et al. 2020.

⁷Vgl. Bonnet 2016.

vorgewärmte Werkstück mittels einer entsprechenden Form – ähnlich dem metallischen Tiefziehprozess – auf definierte Dimensionen gezogen. Dabei nimmt die ursprüngliche Dicke des Werkstücks ab, da es zu einer Flächenausdehnung ohne Materialnachschiebung kommt. Um die korrekten Materialstärken an allen Stellen des Werkstücks zu gewährleisten, müssen das Rohvolumen sowie die Fließfähigkeit des Kunststoffes im erarbeiteten thermoplastischen Verfahrensschritt vorab exakt bestimmt werden. Das Thermoformen zeichnet sich durch geringe Fixkosten aus, die sich im Wesentlichen aus den Investitionskosten der Maschinen und Werkzeuge zusammensetzen. Das Verfahren eignet sich für mittlere bis – je nach Komponentenkomplexität – hohe Stückzahlen von Werkteilen pro Jahr.^{8,9}

Spritzgießen

Zur Herstellung von Kunststoffelementen kann auch das sogenannte Spritzgießen genutzt werden. Hierzu wird zumeist ein Kunststoffgranulat geschmolzen und unter Hochdruck in eine Werkzeugform eingeführt. Der Hohlraum oder auch als Kavität bezeichnete Zwischenraum der Spritzgussform definiert die Form des späteren Kunststoffwerkstücks. Das in der Kavität in seiner finalen Form wiedererstarrende Werkstück kann hiernach entnommen werden. Gegebenenfalls abstehende Kanten, meist im Bereich der die Form befüllenden Zugänge, können im Anschluss nachgearbeitet werden. Das Spritzgießen eignet sich gut für mittlere bis große Produktionsmengen von längerfristig gleichbleibenden Bauteilen und kann nahezu vollautomatisiert betrieben werden. Eines der bekanntesten Produkte dieser Herstellungsart ist beispielsweise der Lego-Block. Wegen der hohen Investitionskosten für die metallischen Formwerkzeuge ist das Verfahren bei regelmäßigen geometrischen Veränderungen am Bauteil jedoch zumeist ungeeignet.^{10,11}

SMC-Pressen

Beim „Sheet-Molding-Compound“ (SMC)-Pressen werden zumeist teigartige Halbzeugmatten aus duroplastischen Reaktionsharzen und Glasfasern zur Herstellung eines Kunststoffwerkstücks genutzt. Die vorgefertigten SMC-Matten sind vor dem eigentlichen Pressverfahren so vorbereitet, dass sie unter Druck mit Hilfe metallischer Formwerkzeuge unter Fließpressen zum fertigen Bauteil verarbeitet werden können. Da die Investition in die Anlagentechnik des Verfahrens relativ hoch ist, wird der Prozess erst bei hohen Stückzahlen wirtschaftlich. Dabei profitiert das Verfahren jedoch davon, dass relativ komplexe Strukturen sowie Zusatzapplikationen an einem Werkstück bereits in einem Arbeitsschritt umgesetzt werden können, was die Herstellungszeit für das einzelne Werkstück verringert. Außerdem zeichnet sich das Verfahren durch einen hohen Automatisierungsgrad aus.^{12,13}

⁸Vgl. Kampker et al. 2018.

⁹Vgl. Bonnet 2016.

¹⁰Vgl. Kampker et al. 2018.

¹¹Vgl. Bonnet 2016.

¹²Vgl. Kampker et al. 2018.

¹³Vgl. Bonnet 2016.

13.1.3 Stückzahlabhängige Produktionsverfahren auf Basis von Metallen

Ebenso wie bei der Verarbeitung von Fahrzeugkomponenten aus Kunststoff sind auch bei der Verarbeitung von metallischen Ausgangsstoffen zu finalen Werkstücken verschiedene stückzahlabhängige Produktionsverfahren industriell etabliert. Auch hier muss die Wahl der geeigneten Produktionstechnik auf das geplante Herstellungsszenario abgestimmt sein.

Im Folgenden sollen dazu die Baugruppen Vierkant-Hohlprofil, Stirnwand, Space-Frame-Knoten und Federbeinaufnahmen nach ihren gängigen Herstellungsprozessen vorgestellt werden.

13.1.4 Vierkant-Hohlprofil-Herstellung

Abb. 13.2 zeigt die gängigen Herstellungsverfahren für die mengenabhängige Produktion von Vierkant-Hohlprofilen.

Vierkant-Hohlprofile werden beim elektrischen Fahrzeug beispielsweise als Seitenaufprallschutz genutzt und bestehen meist aus Stahl oder Aluminium. Für den Werkstoff Stahl hat sich bis zu einer Stückzahl von 160.000 Teilen im Jahr mit einer Länge von 1 m das Gesenkbiegeverfahren als wirtschaftlich herausgestellt. Ab 160.000 Teilen pro Jahr wird bei Stahl dann meist das Profilwalzverfahren genutzt. Bei Aluminium bietet es sich ab einer Produktionsmenge von 800.000 Werkstücken pro Jahr an, das Strangpressverfahren zu nutzen.¹⁴

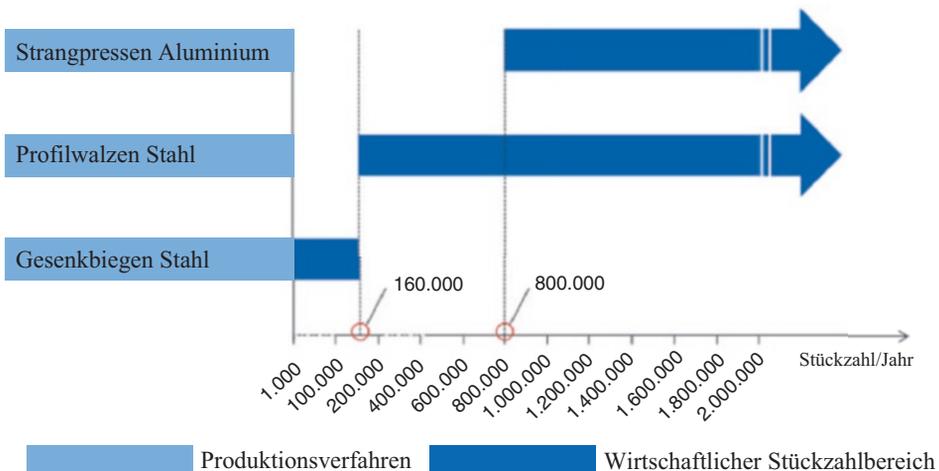


Abb. 13.2 Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm von Vierkant-Hohlprofilen. (Vgl. Kampker et al. 2018)

¹⁴Vgl. Kampker et al. 2018.

13.1.5 Die technischen Verfahren der Vierkant-Hohlprofil-Herstellung in der Übersicht

Gesenkbiegen

Gesenkbiegen, ebenso wie das Freibiegen, gehören zu den am häufigsten eingesetzten Biegeverfahren für metallische Werkstoffe. Das Gesenkbiegen ist dabei fest mit dem Freibiegen verbunden, da dem Gesenkbiegen stets eine Phase des Freibiegens vorangeht. Beim umformenden Prozess wird das zu verbiegende Blech in ein entsprechendes Gesenk eingelegt. Danach bringt ein Stempel eine definierte lokale Kraft von oben auf das Blech auf, sodass das Werkstück in das Gesenk gedrückt wird. Dadurch kommt es zu einer definierten Verformung.

Mit Hilfe des Gesenkbiegens lassen sich auf diese Weise beispielsweise U-Profile herstellen. Um daraus im Anschluss ein Vierkant-Hohlprofil zu produzieren, ist immer ein weiterer Verarbeitungsschritt notwendig, in dem die beiden Halbzeuge miteinander zum fertigen Produkt verschweißt werden. Diese Faktoren machen das Verfahren einerseits günstig und flexibel, zeigen andererseits jedoch Schwächen, wenn große Mengen von Werkstücken produziert werden sollen.^{15,16}

Profilwalzen

Das Profilwalzen ist eine untergeordnete Rubrik des Walzens. Das Verfahren basiert auf einer durch die Werkzeuge (Walzen) druckbedingten Verformung des Werkstücks. Durch die Kombination mehrerer Walzen und eines sogenannten Dorns, der das Walzgut zur Mitte hin durchdringt, können schon beim Profilwalzen runde Rohre und auch Vierkantrohre hergestellt werden. Abb. 13.3 zeigt die exemplarische Herstellung eines Rohres im Mannesmann-Verfahren.

Das Verfahren, das eine erhöhte Maschinenkomplexität aufweist, ermöglicht durch Vereinzeln des aus der Umformmaschine laufenden Endlos-Werkstücks einen deutlich erhöhten Produktionsdurchsatz. Im Gegensatz zum Gesenkbiegen muss bei diesem Fertigungsverfahren nur noch eine Verschweißung – statt zwei – zur Herstellung eines Vierkant-Hohlprofils umgesetzt werden.^{17,18}

Strangpressen

In einer weiteren Variante zur Herstellung eines Vierkant-Hohlprofils, beispielsweise aus Aluminium, kann das Verfahren des Strangpressens zum Einsatz kommen. Dabei wird ein aufgeheizter Metallblock, der auf diese Weise bessere Fließigenschaften erhält, mit

¹⁵Vgl. Kampker et al. 2018.

¹⁶Vgl. Bonten 2020.

¹⁷Vgl. Kampker et al. 2018.

¹⁸Vgl. Siegert 2015.

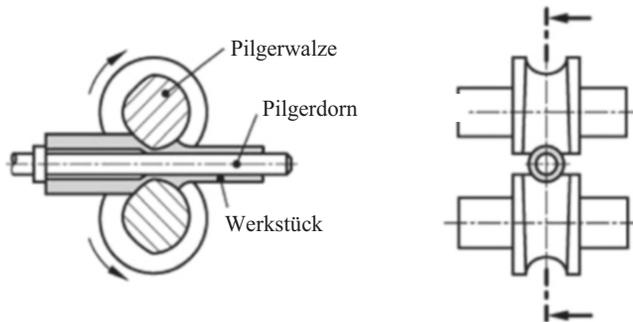
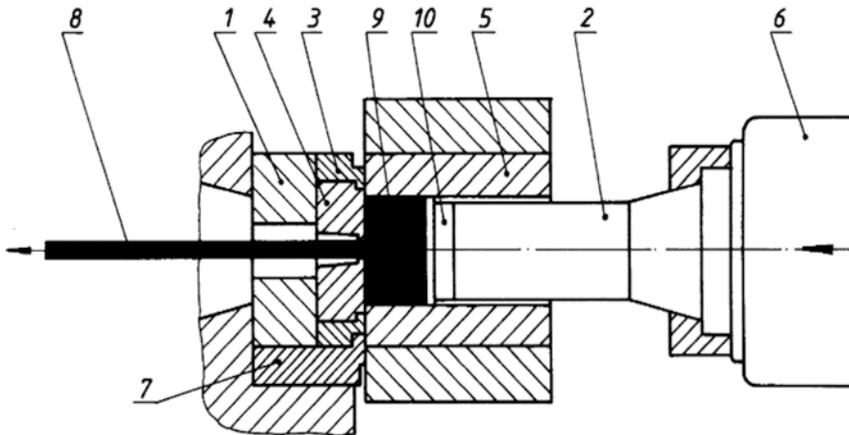


Abb. 13.3 Pilgerschrittwalzen zum Erzeugen nahtloser Rohre (Mannesmann-Verfahren). (Vgl. Siegert 2015)



Prinzip des direkten Vollstrangpressens. 1 Druckplatte, 2 Stempel, 3 Werkzeugträger, 4 Matrize, 5 Rezipient, 6 Plunger, 7 Schieber, 8 Profilstrang, 9 Block, 10 Pressscheibe

Abb. 13.4 Direktes Vollstrangpressen. (Vgl. Dietrich 2018)

hohem Druck und definierter Geschwindigkeit durch eine besonders gehärtete und widerstandsfähige Matrize – meist eine Flachmatrize – gepresst (siehe Abb. 13.4). Ergebnis dieses Vorgehens ist ein geradliniges Endlosprofil, das nur noch auf die gewünschte Länge vereinzelt werden muss. Das Verfahren ist besonders geschwindigkeitseffizient und eignet sich somit für größte Stückzahlen in der Herstellung elektrischer Fahrzeugmodelle.^{19,20}

¹⁹Vgl. Kampker et al. 2018.

²⁰Vgl. Dietrich 2018.

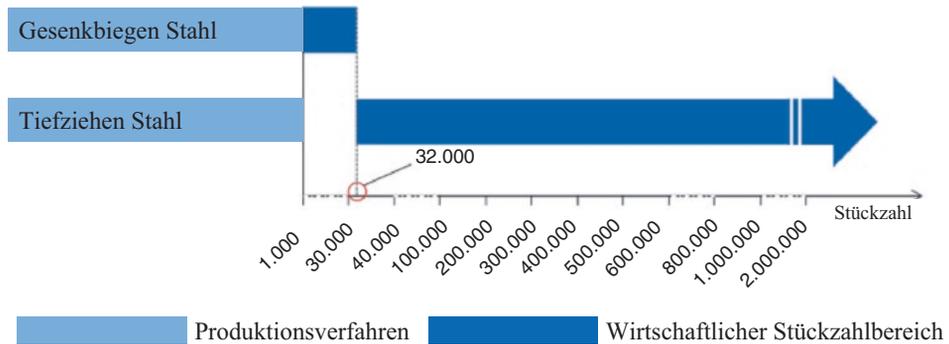


Abb. 13.5 Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm von Stirnwänden. (Vgl. Kampker et al. 2018)

Stirnwand-Herstellung

Abb. 13.5 zeigt die Fertigung einer Stirnwand durch die Verfahren des Gesenkbiegens und des Tiefziehens für Stahl.

Zu erkennen ist, dass bei der Produktion von Stirnwänden, die auch beim elektrischen Fahrzeug von Bedeutung bleiben, bei einer jährlichen Teilmenge von bis zu 32.000 Stück das Verfahren des Gesenkbiegens zu bevorzugen ist. Wenn die Produktionsmengen diesen Wert überschreiten, ist das Tiefziehverfahren sinnvoll.

13.1.6 Das technische Tiefziehen für die Stirnwandproduktion

Das metallurgische Tiefziehverfahren ist grob vergleichbar mit der bereits vorgestellten Technik des Thermoformens. Das Verfahren gilt als eines der wichtigsten zur Umformung von Blechen und bildet die Grundlage zur Massenfertigung verschiedener metallischer Werkstücke. Das Tiefziehen bildet dabei ein Zugdruckumformen eines entsprechenden Blechs. Technisch betrachtet wird beim Tiefziehen ein Ausgangsblech in eine nach unten hin geöffnete Halterung eingesetzt und von einem Ziehring sowie einem Niederhalter mit definiertem Widerstand festgedrückt. Mittels eines Stempels, der von oben auf das Werkstück drückt, wird das Blech in eine definierte Form gezogen (Abb. 13.6). Dabei nimmt die Dicke des Werkstücks ab, und es kann bei sehr starken oder falsch berechneten Verformungen zur Rissbildung im Blech und an besonders dünnwandigen Stellen im Muster kommen. Das Verfahren bietet die Möglichkeit, automatisiert und relativ schnell zu produzieren.^{21,22}

²¹Vgl. Kampker et al. 2018.

²²Vgl. Dietrich 2018.

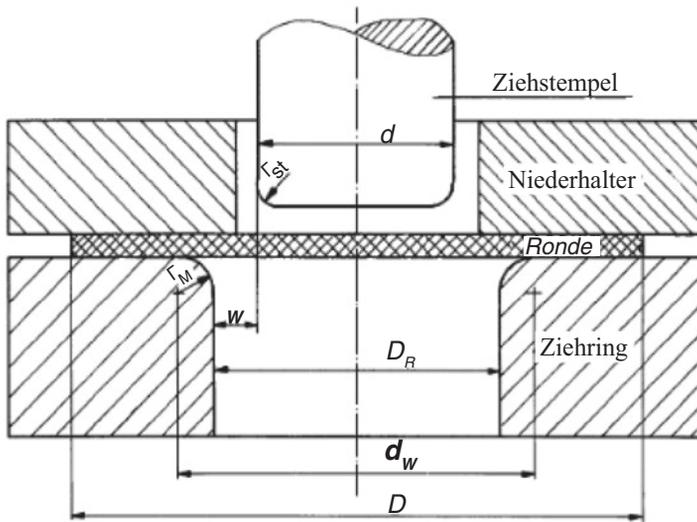


Abb. 13.6 Tiefziehvorrichtung. (Vgl. Dietrich 2018)

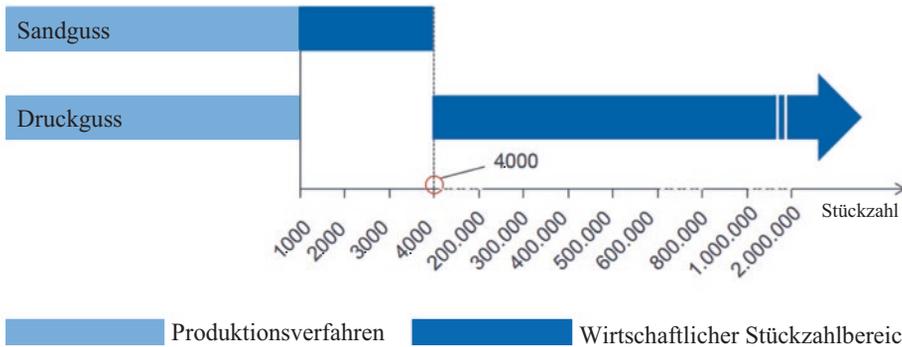


Abb. 13.7 Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm von Space-Frame-Knoten. (Vgl. Kampker et al. 2018)

13.1.7 Space-Frame-Knoten-Herstellung

Abb. 13.7 zeigt die Herstellung von Space-Frame-Knoten durch die Verarbeitungsprozesse des Sand- und des Druckgusses.

In Abb. 13.7 ist zu erkennen, dass bis zu einer Produktionsmenge von 4000 Teilen im Jahr an Space-Frame-Knoten das Sandgussverfahren zu bevorzugen ist. Erst ab einer jährlichen Produktionsmenge von mehr als 4000 wird das Druckgussverfahren wirtschaftlicher.

13.1.8 Die technischen Verfahren der Space-Frame-Knoten-Herstellung in der Übersicht

Sandguss

Der Sandguss ist ein Verfahren der Gießereitechnik, das sich besonders gut eignet, wenn mit relativ geringem Werkzeugaufwand Gussteile gefertigt werden sollen. Da die Methode technologische Weiterentwicklungen von Bauteildimensionen relativ aufwandsarm unterstützt, ist sie in der Automobilindustrie weitverbreitet. Um ein Werkstück im Sandgussverfahren herzustellen, wird zunächst eine spezielle, hitzebeständige Sandmischung angerührt. Im Anschluss wird der Sand meist durch ein positives Muster, das den Maßen des späteren Bauteils entspricht, zu einer sogenannten Negativ-Form gepresst. In die fertige Form wird dann die metallische Schmelze gegeben, die sich in der Gussform verteilt und nach Abkühlung das fertige Bauteil ergibt. Abschließend wird die Sandform vom Bauteil abgeschlagen, das gegebenenfalls noch nachbereitet – beispielsweise entgratet – wird und dann für die Anwendung im Fahrzeug nutzbar ist.^{23,24}

Druckguss

Das zumeist mit einem aufwendigeren Prozessablauf und Werkzeug betriebene Druckgussverfahren eignet sich – wegen des investitionsintensiveren Prozesses – zur Herstellung größerer Produktionschargen. Beim Druckgussverfahren wird die Schmelze in eine Gießkammer eingeführt. Danach wird das flüssige Metall durch einen Kolben unter hohem Druck in das zweiteilige Werkzeug gepresst, wo es erstarrt. Das Verfahren ist im Vergleich zum Sandguss deutlich schneller und bringt einen geringeren Nacharbeitsaufwand am fertigen Bauteil mit sich. Der Druckguss bietet außerdem hohe Bauteilfestigkeit, hohe Qualität und die Möglichkeit zur Herstellung komplexer und detailreicher Oberflächen.^{25,26}

13.1.9 Herstellung der Federbeinaufnahme

Abb. 13.8 gewährt einen Einblick in die Herstellungsoptionen für die Federbeinaufnahme.

Unter wirtschaftlichen Standpunkten ist bei der Produktion von Federbeinaufnahmen bis zu einer Stückzahl von 4500 Teilen pro Jahr das CNC-Fräsen als Herstellungsverfahren zu bevorzugen. Erst ab einer jährlichen Produktionsmenge von mehr als 4500 Werkstücken pro Jahr sollte auf das Druckgussverfahren zurückgegriffen werden.

²³ Vgl. Kampker et al. 2018.

²⁴ Vgl. Fritz und Schulze 2015.

²⁵ Vgl. Kampker et al. 2018.

²⁶ Vgl. Fritz und Schulze 2015.

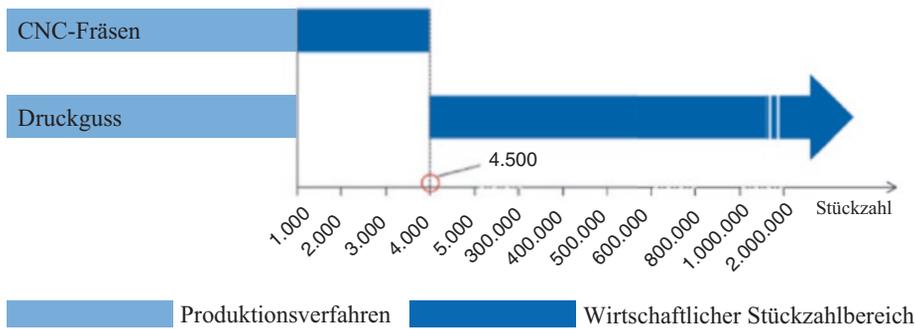


Abb. 13.8 Stückzahloptimiertes Produktionsverfahren zur Federbeinaufnahme. (Vgl. Kampker et al. 2018)

13.1.10 CNC-Fräsen als Herstellungsverfahren in der Übersicht

Beim Fräsen wird eine Relativbewegung zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug erzielt. Dies geschieht durch eine kreisförmige Schnittbewegung zu einer senkrecht oder schräg zur Drehachse des Werkzeugs verlaufenden Vorschubbewegung. Diese Vorschubbewegung kann sowohl vom Werkzeug als auch vom Werkstück sowie von beiden kombiniert ausgeführt werden. Der Vorschub- und die Wirkrichtungswinkel sind zeitlich veränderlich. Eine Fräsmaschine hat mindestens drei geradlinige Vorschubachsen. Diese Achsen werden simultan und abhängig voneinander gesteuert, wodurch sich beliebige Bahnen mit dem Werkzeug auf dem Werkstück fahren lassen (Bahnsteuerung). Zusätzlich zu den Vorschubachsen besitzen moderne Fräsmaschinen noch zwei Drehachsen, mit denen der Drehvektor der Fräsachse auf jedem Punkt der Bahn eine beliebige Richtung annehmen kann. Das Werkstück wird dafür meist aus einem metallischen Rohmaterial oder Halbzeug durch das definierte materialabtragende Verfahren produziert (Abb. 13.9).²⁷

Beim „Computer-Numerical-Control“ (CNC)-Fräsen wird mittels einer computergestützten Steuerungstechnik, in die ein vorab definiertes Werkstückendmuster programmiert wurde, über einen meist vollautomatisiert bewegten Fräsaufsatz ein Werkstück hergestellt. Im Gegensatz zu Fräsoperationen, die durch einen Handwerker gesteuert werden, ist ein automatisiert arbeitendes Fräsverfahren meist schneller und präziser in der Ausführung. Aufgrund der Tatsache, dass Fräsen einen großen Materialaufwand mit sich bringt, ist das Verfahren bei größeren Produktionsmengen eher ungeeignet.^{28,29}

²⁷ Vgl. Fastermann 2016.

²⁸ Vgl. Kampker et al. 2018.

²⁹ Vgl. Steck 2019.

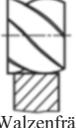
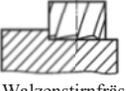
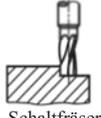
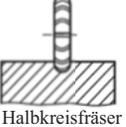
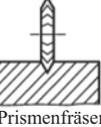
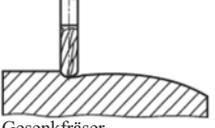
Fräsertyp	Wirkprofil	Wirkfläche	Beispiele
1 Umfangs- (walzen-) fräser	werkstück- ungebunden	Umfangs- fläche kreis- zylindrisch	 Walzenfräser
2 Stirn- fräser	werkstück- ungebunden	Seite (-Stirn)- und Umfangs- flächen	 Walzenstirnfräser  Schaltfräser  Messerkopf
3 Profil- fräser	werkstück- gebunden	Profilfläche	 Halbkreisfräser  Prismenfräser  Scheibenfräser
4 Form- fräser	werkstück- ungebunden	Formfläche beliebig	 Gesenkfräser

Abb. 13.9 Fräsverfahren nach DIN 8589-3. (Vgl. Fritz 2018)

13.1.11 Weitere stückzahlabhängige Produktionsverfahren

3-D-Druck

Der 3-D-Druck ist ein Fertigungsverfahren zur schnellen und – im Verhältnis zu vielen anderen Verfahren – preisgünstigen Herstellung von Modellen, Mustern, Prototypen, Werkzeugen und Endprodukten. Grundlage für den Druck sind 3-D-CAD-Modelle. Wichtig ist dabei, dass es sich um ein Volumenmodell handelt, bei dem sämtliche Dimensionen – Höhe, Breite und Tiefe – definiert sind. 3-D-Druck wird als „*generatives Fertigungsverfahren*“ bezeichnet. Das bedeutet, dass die Fertigung direkt auf Basis der rechnerinternen Datenmodelle erfolgt. Oft ist auch von „*Rapid Prototyping*“ oder „*Additive Manufacturing*“ die Rede, wenn es um 3-D-Druck geht. Viele Herstellungsverfahren, beispielsweise das Fräsen, entfernen Material beim Bau des Objekts. Sie sind deshalb *subtraktive Herstellungsverfahren*. Beim 3-D-Druck wird das Stück aus vorher flüssigem oder pulverartigem Material im Schichtbauverfahren geschaffen. Damit ist der 3-D-Druck ein *additives Herstellungsverfahren*, woher sich die englische Bezeichnung des „*Additive Manufacturing*“ – *additive Fertigung* – für die Technologie erklärt: Das Material wird Schicht für Schicht zu einem Objekt aufgebaut. Dadurch sind nahezu beliebige Formen möglich. Hinterschneidungen oder Ausformbarkeit wie beim Spritzguss müssen bei der Konstruktion nicht berücksichtigt werden. Die Materialien, aus denen der Baukörper ent-

steht, sind unterschiedlich. Außer Kunststoffen sind auch Metalle oder Papier möglich. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass die Schichten entweder durch Verkleben oder Verschweißen auf die vorhergehende Schicht aufgebracht werden. Bei zahlreichen Technologien wird überschüssiges Baumaterial wiederverwendet. Oftmals müssen 3-D-gedruckte Bauteile jedoch noch nachbearbeitet werden. Je nach Geometrie des Bauteils werden Stützstrukturen mit eingebaut, die herausgebrochen werden müssen, wonach die Bruchstellen zu glätten sind.³⁰

13.2 Fügen von Außenhaut und Karosserie

In Diskussion um eine möglichst effektive Art der Fortbewegung hat die Karosserie eines batterieelektrischen Fahrzeugs wichtigen Einfluss auf die Gesamteffektivität des Autos. Von wesentlicher Bedeutung ist dabei, dass die Karosserie möglichst leicht sowie dennoch leistungsfähig und sicher ist, um dadurch Gewicht am Gesamtfahrzeug einzusparen und die elektrische Reichweite zu erhöhen. Gelingt das, werden nicht nur Strecken zwischen zwei Ladepunkten erweitert, sondern es bietet sich auch die Möglichkeit, die Batteriespeicherkapazität im Fahrzeug zu reduzieren. Dadurch wird das Auto abermals leichter sowie günstiger in der Produktion und letztlich auch in der Anschaffung für die Nutzenden.

Im Bereich der Automobilkarosserie werden daher verschiedene Lösungsansätze zur Gewichtsreduktion verfolgt. Dazu zählen der Einsatz von hoch- und höchstfestem Stahl zur Reduzierung der Blechdicken im Vergleich zu konventionellem Stahl, die Verwendung von Leichtbauwerkstoffen geringerer Dichte – etwa Aluminium oder Kunststoff – sowie das Konzept der Mischbauweise. Im Bereich der Fahrzeugaußenhaut wird das Prinzip des Leichtbaus, ähnlich wie bei der Karosserie, durch den Einsatz von Stahlwerkstoffen mit höherer Festigkeit und geringerer Blechdicke oder von Leichtbauwerkstoffen – insbesondere Kunststoff – realisiert. Daraus resultiert eine Vielzahl fügetechnisch anspruchsvoller Aufgaben, bei der verschiedene Werkstoffe miteinander verbunden werden müssen. Diese Aufgabe erschwert sich dadurch, dass unterschiedliche Materialeigenschaften bei der Verbindung von Elementen zu berücksichtigen sind. Etablierte Verfahren wie das Laser- und/oder das Widerstandsschweißen lassen sich deswegen nicht immer ohne Weiteres anwenden. Die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien wie beispielsweise Stahl, Aluminium oder Kunststoff variieren teilweise deutlich. Um unterschiedliche Werkstoffe trotzdem miteinander verbinden zu können, haben sich deswegen weitere Schweißverfahren, aber auch Kleben, Löten oder mechanische Verfahren als Fügetechniken etabliert.

Im Folgenden werden diejenigen Verfahren beleuchtet, die sich vor allem im Elektrofahrzeugbau durchgesetzt haben und heute zum Fügen von Außenhaut und Karosseriekomponenten zum Einsatz kommen. Dazu zählen das Widerstandspunktschweißen, das

³⁰Vgl. Fastermann 2016.

Laserstrahlschweißen, die Klebtechnik, das Rührreißschweißen und mechanische Fügeverfahren wie das Durchsetzfügen oder das Verbinden mit Funktionselementen, unter anderem Nieten und Schrauben.³¹

13.2.1 Schweißverfahren zum Fügen von Außenhaut und Karosserie

Widerstandspunktschweißen

Charakteristisch für das sogenannte Widerstandspunktschweißen ist es, dass die zum Verschweißen von zwei metallischen Werkstücken benötigte Prozesswärme durch eine Widerstandserwärmung – induziert durch eine Stromquelle – erreicht wird. Dazu werden zwei zu verschweißende Werkstücke zwischen zwei Punktschweißelektroden platziert. Ein Stromstoß erwärmt die Verbindungsstelle durch den elektrischen Widerstand so hoch, dass die metallischen Elemente miteinander verbunden werden. Dazu werden vorab die meist aus Kupfer gefertigten Elektroden mit einer Kraft von mehreren kN auf die Schweißstelle gepresst, bevor Ströme von bis zu 60 kA die Metalle durch Verschweißung zusammenfügen.

Das Verfahren eignet sich insbesondere für das Schweißen von dünnen Stahlblechen. Aluminium und Kupfer sind ebenfalls schweißbar, allerdings kann es dabei zu einem erhöhten Elektrodenverschleiß kommen. Das Widerstandspunktschweißen ist aufgrund seiner hohen Prozessgeschwindigkeit, der hervorragenden Automatisierbarkeit und der hohen Wirtschaftlichkeit derzeit ein dominierendes Fügeverfahren in der automobilien Karosseriefertigung.^{32,33}

Laserschweißen

Basis des Laserstrahlschweißens ist ein hochenergetischer Lichtstrahl – der Laserstrahl. Dabei handelt es sich um kohärentes monochromatisches Licht, das sich aufgrund seiner geringen Divergenz zur Übertragung über vergleichsweise lange Strecken eignet und eine hohe Leistungsdichte besitzt. Die Wellenlänge des erzeugten Lichts hängt unmittelbar mit der Art der Strahlerzeugung zusammen. Dazu kommen entweder CO₂-, Nd:YAG- oder Diodenlaserstrahlquellen zum Einsatz. Die Übertragung des Laserlichts wird entweder über Spiegel – beim CO₂-Laser – oder über lichtleitende, flexible Fasern – beim Nd:YAG- und Diodenlaser – realisiert. Zum Schweißen wird der Laserstrahl über eine Optik auf dem Werkstück fokussiert, um dadurch die benötigte Energiedichte zu erhalten. Die Energieeinbringung in das Werkstück basiert auf der Absorption des Laserstrahls durch den Bauteilwerkstoff, wobei der Absorptionsgrad je nach Werkstoff und Wellenlänge des Laserstrahls stark variiert. Zu den Vorteilen des Laserstrahlschweißens zählen der Umstand,

³¹ Vgl. Kampker et al. 2018.

³² Vgl. Kampker et al. 2018.

³³ Vgl. Fahrenwaldt et al. 2009.

dass damit fast alle metallischen Werkstoffe gefügt werden können, sowie sehr hohe erreichbare Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/min, die vergleichsweise geringe Streckenenergie und die lediglich einseitig benötigte Zugänglichkeit zur Fügestelle. Nachteilig sind der hohe Investitionsaufwand in die Schweißanlage und benötigte Sicherheitseinrichtungen, hohe Betriebskosten, ein geringer Wirkungsgrad bei Strahlerzeugung und Energieeinkopplung sowie die hohen Anforderungen an die Bauteilvorbereitung und -positionierung.^{34,35}

Rührreibschweißen

Das Verfahren des Rührreibschweißens („Friction Stir Welding“ – FSW) ist ein vergleichsweise junges Schweißverfahren mit einem enormen Anwendungspotenzial. Die Einbringung der zum Schweißen notwendigen Prozesswärme wird alleine über die Reibung des Werkzeugs, bestehend aus Stift und Schulter, auf dem und im Werkstück realisiert. Dadurch wird das zu fügende Material plastifiziert und durch die Rotation des Werkzeugs verrührt. Ein Aufschmelzen der Füge­teile findet dabei nicht statt, sodass keine Umwandlung der flüssigen in die feste Phase erfolgt. Die Bildung von spröden intermetallischen Phasen wird durch diese Tatsache weitestgehend vermieden. Daraus ergibt sich unter anderem die hervorragende Eignung zum Fügen von Mischverbindungen und das damit verbundene Leichtbaupotenzial.³⁶

13.2.2 Weitere Verfahren zum Fügen von Außenhaut und Karosserie

Kleben

Das starke Bestreben zum Leichtbau als wesentlichen Grundansatz der Elektromobilität führt dazu, dass neben metallischen Werkstoffen auch Kunststoffe verarbeitet werden. Während diese Stoffe auf der einen Seite Vorteile durch Leichtigkeit bringen, scheiden sie auf der anderen Seite oftmals für die gängigen metallverarbeitenden Verfahren – insbesondere das Schweißen – aus. Daher werden alternative Füge­techniken benötigt. Ein wesentlicher Ansatz zum Fügen von Elementen, die nicht zum Verschweißen geeignet sind, ist das Kleben. Bei diesem Verfahren werden zwei Werkstückoberflächen durch einen Klebstoff mittels Flächenhaftung an den Bauteilen und durch die innere Steifigkeit des Klebstoffs miteinander verbunden. Dabei besteht die Möglichkeit, dass die Bauteiloberfläche und der Klebstoff für die Anforderungen an der definierten Klebestelle speziell vorbereitet werden. Die zugrundeliegenden Kräfte werden „Adhäsion“ und „Kohäsion“ genannt. Die Adhäsion wirkt zwischen Klebstoff und Füge­teil, die Kohäsi-

³⁴ Vgl. Kampker et al. 2018.

³⁵ Vgl. Fahrenwaldt et al. 2009.

³⁶ Vgl. Kampker et al. 2018.

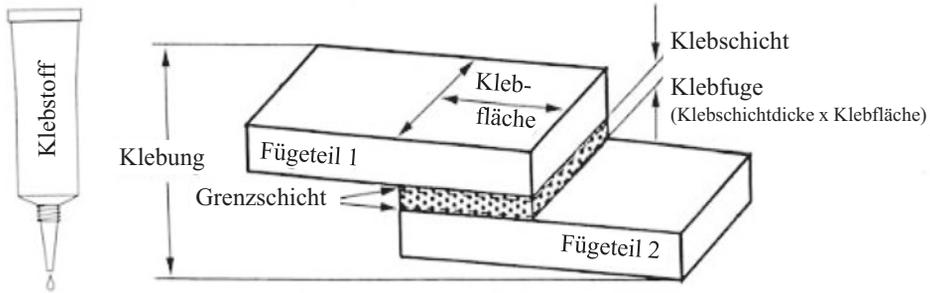


Abb. 13.10 Schematische Darstellung einer Klebestelle. (Vgl. Habenicht 2012)

on stellt die innere Festigkeit des Klebstoffs in sich dar. Häufig eingesetzte Klebstoffe im Automobilbau sind ein- und zweikomponentige Epoxidharze beziehungsweise Polyurethanklebstoffe (Abb. 13.10).^{37,38}

Mechanisches Fügen

Mechanische Fügeverfahren werden überall dort eingesetzt, wo die zu fügenden Bauteile thermisch nicht stark belastet werden dürfen oder aufgrund ihrer Materialcharakteristik nicht mit den herkömmlichen Schweißverfahren gefügt werden können. Im Bereich des Fügens von Aluminiumkarosserien haben mechanische Fügeverfahren das Widerstandspunktschweißen weitestgehend abgelöst, weil es dabei zu hohem Elektrodenverschleiß und damit zu geringen Elektrodenstandzeiten kommt. Als mechanische Fügeverfahren werden beispielsweise Schrauben, Nieten, Bolzen oder das Durchsetzfügen (Clinchen, Toxen) eingesetzt. Die mechanischen Fügeverfahren sind hinsichtlich der eingesetzten Funktionselemente und der Bauteilvorbereitung zu unterscheiden. Schrauben oder Blindniete erfordern zum Beispiel ein vorgefertigtes Durchgangsloch für das Funktionselement. Bei selbstschneidenden Funktionselementen wie Bolzen kann auf die Fügeteilvorbereitung verzichtet werden. Das Durchsetzfügen basiert auf der Umformung der Fügepartner. Dabei wird kein zusätzliches Funktionselement verwendet; auch eine Bauteilvorbereitung ist nicht erforderlich.³⁹

13.2.3 Verfahren zum Fügen von elektrischen Komponenten

Für elektrisch betriebene Fahrzeuge rückt neben den bewährten Verbindungen in Karosserie und Außenhaut auch die Verbindung von elektrischen Kontakten in den Fokus der

³⁷Vgl. Kampker et al. 2018.

³⁸Vgl. Presz und Cacko 2016.

³⁹Vgl. Kampker et al. 2018.

Fügetechnik. Diese müssen nicht nur über sehr gute und dauerhafte mechanische Festigkeit verfügen, sondern auch eine dauerhaft niederohmige Stromleitung garantieren. Aufgrund seiner besonders guten elektrischen Leitfähigkeit wird Kupfer für elektrische Kontakte eingesetzt. Dieser Werkstoff wird vermehrt mit Aluminium kombiniert oder sogar ganz durch Aluminium substituiert, um Kosten- und Gewichtsvorteile zu nutzen. Häufig sind demnach Kupfer-Kupfer- und Aluminium-Aluminium-Verbindungen sowie mit steigender Nachfrage auch Kupfer-Aluminium-Verbindungen in elektrischen Kontakten zu finden. Den Ansprüchen von Fügeverbindungen gleicher Werkstoffart werden bekannte Fügeverfahren gerecht. Wärmearme Fügeverfahren kommen vor allem dort zum Einsatz, wo Mischverbindungen aus Kupfer und Aluminium erforderlich werden. Dabei bestehen aufgrund unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften besondere Herausforderungen für eine mechanisch stabile und elektrisch leitfähige Schweißverbindung. Berücksichtigt werden müssen große Unterschiede für Schmelztemperaturen, Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit ebenso wie die ausgeprägte Bildung intermetallischer spröder Phasen in Schmelzschweißverbindungen. Als Standard haben sich Verfahren wie Ultraschallschweißen, Widerstandsschweißen und Laserstrahlschweißen zum Fügen in der Elektronik und Feinwerktechnik etabliert, aber auch das Löten und neuartige Technologien wie das Micro-Clinching kommen zum Einsatz.

Ultraschallschweißen

Das Ultraschallschweißen kann als eine Kombination von Reib- und Kaltpressschweißen betrachtet werden. Dabei werden die zwei sich überlappenden Füge Teile zwischen einem festen Amboss und der sogenannten Sonotrode – ein schwingendes Werkzeug – zusammengepresst. Die Sonotrode überträgt Schwingungen von 20 bis 64 kHz auf die Füge Teile. Durch die sich daraus ergebende Reibung und unter dem Druck der Anpressung werden die Bauteile miteinander verschweißt.^{40,41}

Widerstandsschweißen

Beim Widerstandsschweißen erfolgt die Verbindungsherstellung durch Aufbringung äußerer Kräfte, die zusammen mit dem eingebrachten Schweißstrom die erforderlichen Kontakt- und Werkstoffwiderstände ausbilden. Die Einstellung der Schweißparameter „Zeit“ (Vorhalte-, Schweiß- und Nachhaltezeit), „Schweißstrom“ und „Elektrodenkraft“ erfordern vor allem bei Werkstoffen wie Aluminium und Kupfer die Berücksichtigung der spezifischen Werkstoffeigenschaften. Im Vergleich zu Stahlschweißungen müssen der Schweißstrom heraufgesetzt und die Schweißkraft sowie die Schweißzeit reduziert werden. Durch eine geeignete Prozessparametrierung gelingt es für Aluminium-Kupfer-Verbindungen – insbesondere im Dünoblechbereich – und für elektrische Kontakte, die Bildung intermetallischer Phasen gering zu halten beziehungsweise gänzlich zu vermeiden.

⁴⁰Vgl. Kampker et al. 2018.

⁴¹Vgl. Habenicht 2012.

Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen findet vielfältige Anwendung, so auch in der Elektronik und Feinwerktechnik. Die Bandbreite der mit dem Laser zu verschweißenden Werkstoffe reicht von unlegiertem und niedriglegiertem Stahl bis hin zu hochwertigen Titan- und Nickelbasislegierungen. Aluminium und Kupfer bereiten aufgrund ihrer thermophysikalischen Materialeigenschaften Probleme bei der Energieeinkopplung und der Prozessstabilität. Mit entsprechender Prozessgestaltung und unter Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Erfordernisse lassen sich gute Mischverbindungen schweißen. Das Schweißen von Kupfer stellt aufgrund der Strahlabsorption eine besondere Herausforderung dar. Gute Ergebnisse lassen sich bereits durch Schweißen mit grünem Laserlicht erzielen (siehe Abb. 13.11). Da für Mischverbindungen aus Aluminium und Kupfer vor allem wärmearme Verfahren oder solche mit präzise definierbarer Energieeinbringung erfolgversprechend sind, werden Füge Technologien wie Rührreibschweißen und Elektronenstrahlschweißen für diese Anwendungsgebiete immer interessanter. In diesem Zusammenhang existierten zahlreiche Forschungsvorhaben.

Micro-Clinching

Insbesondere bei der Verbindung von Batterieschweißstellen hat sich gezeigt, dass die vorhandenen Füge Techniken aufgrund ihrer Prozessabläufe nicht immer ein Optimum der Füge Technik zwischen stromableitendem Medium und Batterie darstellen. Infolgedessen hat sich in den vergangenen Jahren auch die Technologie zum Fügen von elektrischen Batteriebauteilen und kleinen Bauteilen entwickelt und sich das Verfahren des Micro-Clinchings als Technologiealternative herausgestellt. Dabei werden zwei aufeinanderliegende Metallbleche gemeinsam in eine definierte starre Form gepresst. Durch den Pressvorgang, der durch beide Metalle geht, beginnen die Werkstoffe, sich durch eine gegenseitige Überlappung zu verbinden. Rein durch die Verformung sind die beiden Werkstücke an der Verbindungstelle nun nahezu miteinander verschmolzen und besitzen

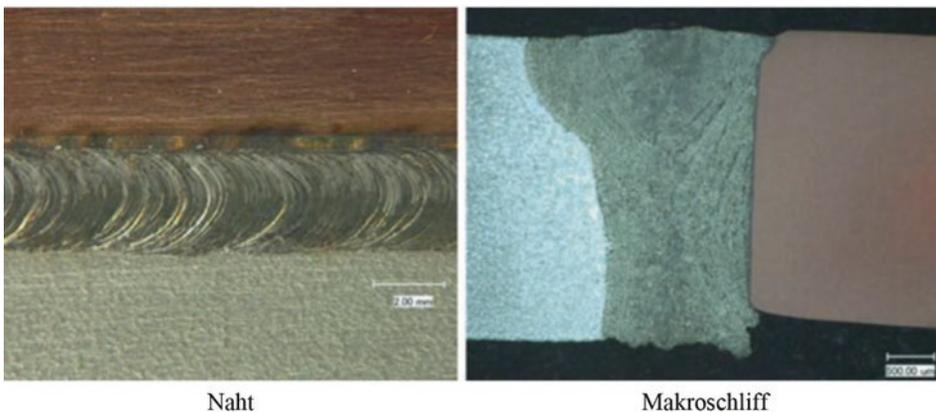


Abb. 13.11 Al-Cu-Verbindung, laserstrahlgeschweißt [ISF RWTH Aachen]

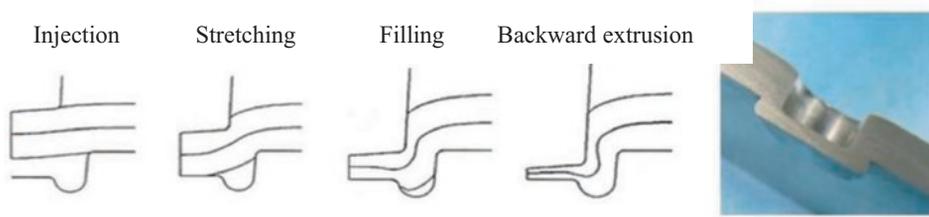


Abb. 13.12 Phasen des Clinching-Prozesses und eine exemplarische Verbindung. (Vgl. Presz und Cacko 2016)

eine relativ feste sowie stromschlüssige Verbindung. Abb. 13.12 zeigt, wie sich durch vier definierte Arbeitsschritte des Verfahrens – „Injection“, „Stretching“, „Filling“ und „Backward Extrusion“ – die Micro-Clinching-Verbindung schaffen lässt.^{42,43}

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

- Bonnet, M.:** *Kunststofftechnik. Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele* (Lehrbuch). 3., überarbeitete und erweiterte Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- Bonten, C.:** *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen* (Hanser eLibrary). 3., aktualisierte Auflage Aufl. München: Hanser, 2020
- Dietrich, J. (Hrsg.):** *Praxis der Umformtechnik. Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V; Twrdek, J; Wittel, H.:** *Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. 3. Auflage Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009
- Fastermann, P.:** *3D-Drucken. Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert* (Technik im Fokus). 2., aktualisierte Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016
- Fritz, A. H. (Hrsg.):** *Fertigungstechnik*. Springer-Lehrbuch. 12., neu bearbeitete und ergänzte Auflage Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Fritz, A. H; Schulze, G.:** *Fertigungstechnik*. 11. Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015
- Habenicht, G.:** *Kleben – erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie*. 6. Auflage Aufl.: Vieweg+Teubner, 2012
- Hompel, M. ten; Bauernhansl, T; Vogel-Heuser, B.:** *Handbuch Industrie 4.0. Band 3: Logistik*. 3. Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020
- Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.):** *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Presz, W; Cacko, R.:** *Initial Micro-Clinching Analysis*. In: *Journal of Manufacturing Technologies* 2016, Nr. Vol. 41, No 2/2016Nr., S. 29–33

⁴²Vgl. Kampker et al. 2018.

⁴³Vgl. Presz und Cacko 2016.

- Russack, T; Jerrentrup, R. (Hrsg.):** *Ausgewählte Verfahren zur Optimierung des Ressourceneinsatzes und Flexibilisierung in der Fertigung*, Essen: MA Akademie Verlagsund Druck-Gesellschaft mbH, 2019
- Siegert, K.:** *Blechumformung. Verfahren, Werkzeuge und Maschinen* (VDI-Buch Ser). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin/Heidelberg, 2015
- Steck, R.:** *CNC-Fräsen für Maker. Baue, programmiere und steuere deine DIY-Fräse* (Hanser eLibrary). München: Hanser, 2019

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

