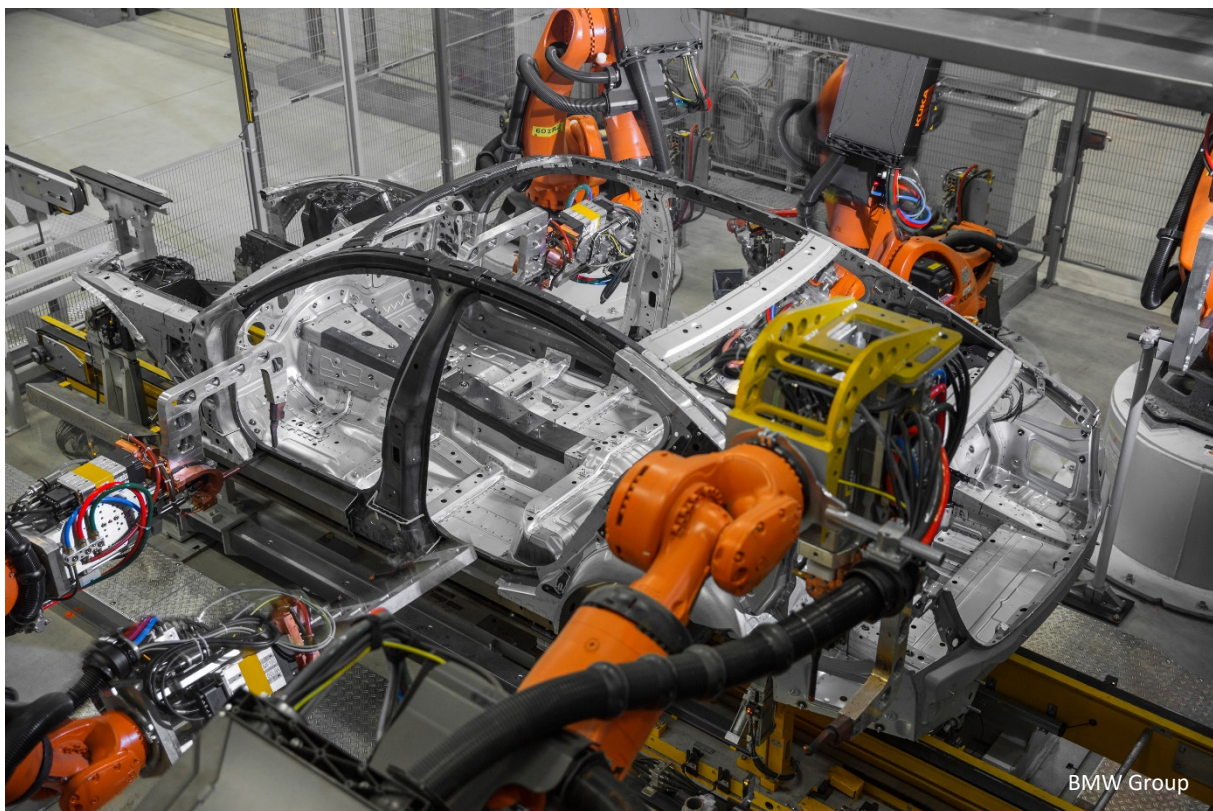


VDMA-Leitfaden Technologien im Hybridleichtbau

25 Technologiesteckbriefe zu Fertigungs- und Fügeverfahren



<https://lightweight.vdma.org>

VDMA-Arbeitsgemeinschaft Hybride Leichtbau Technologien

VDMA-Leitfaden: Technologien im Hybridleichtbau

25 Technologiesteckbriefe zu Fertigungs- und Fügeverfahren

Die Arbeitsgemeinschaft Hybride Leichtbau Technologien im VDMA befasst sich mit den Produktionsprozessen hybrider Leichtbaukomponenten und -systeme unter Verwendung von Faserverbundwerkstoffen und Metallen. Neben den Anbietern aus Maschinen- und Anlagenbau entlang der Wertschöpfungskette wirken unter den über 200 Mitgliedern Anwender, Zulieferer und Forschungsinstitute mit.

Als große Herausforderung gilt die Weiterentwicklung und Kombination verschiedener Leichtbauwerkstoffe im automatisierten Serienprozess zu wirtschaftlichen Bauteilen und Endprodukten mit verbesserter Funktion. Dies lässt sich entweder durch produktionsintegrierte Hybridisierung oder anschließendes Fügen von Einzelkomponenten zu einem hybriden Gesamtsystem erreichen. Als Basis zum Stand der Technik haben AG-Mitglieder aus dem Arbeitskreis Technologie und Prozesse in 25 Technologiesteckbriefen die Herstell- und Fügeverfahren im hybriden Leichtbau beschrieben.

Der Leitfaden soll Interessenten einen schnellen Überblick zu den gängigen Verfahren geben und ist daher im Detaillierungsgrad bewusst begrenzt. Auf zwei Seiten wird jede Technologie beschrieben und anhand einer Prinzipskizze verdeutlicht. Prozessrandbedingungen und -parameter der Methode werden mit Hinweis auf die Einsatzgrenzen näher erläutert. Angaben zu möglichen Materialkombinationen, Recyclingfähigkeit und Anwendungsbeispielen geben eine Einschätzung zum Einsatzgebiet des jeweiligen Verfahrens.

Zum Einstieg sind in einer Gesamtmatrix die Werkstoffkombinationen in ihrem Anwendungspotenzial grob bewertet und den geeigneten Fertigungs- und Fügeverfahren nach Nummern zugeordnet. Am Ende des Leitfadens finden sich die Autoren der Technologiesteckbriefe als Ansprechpartner mit Mail-Adresse bei weitergehenden inhaltlichen Fragen. Zur jeweiligen Steckbriefnummer ist dort zusätzlich weiterführende Literatur aufgeführt. Technologieanbieter aus dem Maschinen- und Anlagenbau zur Produktion von Composite-Bauteilen lassen sich leicht im Herstellernachweis www.composite-arena.com recherchieren. Die Homepage <http://lightweight.vdma.org> informiert über die Arbeitsgemeinschaft Hybride Leichtbau Technologien insgesamt.

Mit dem Leitfaden möchten wir zum Verständnis und Einsatz hybrider Leichtbautechnologien beitragen. Wir bedanken uns bei allen Autoren und Mitwirkenden, die zur Zusammenstellung beigetragen haben. Die Sammlung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und soll abhängig von den technologischen Weiterentwicklungen bei Bedarf aktualisiert werden. Alle Nutzer sind daher aufgerufen, sich jederzeit mit Anregungen an der Fortschreibung zu beteiligen. Besonders freuen wir uns über das Interesse von Unternehmen und Forschungseinrichtungen an der Mitarbeit in unserer Arbeitsgemeinschaft. Sprechen Sie uns an!

Dr. Walter Begemann (walter.begemann@vdma.org)

VDMA-Arbeitsgemeinschaft Hybride Leichtbau Technologien

Frankfurt am Main, Februar 2018

<u>Vorwort</u>	1
<u>Inhaltsübersicht</u>	2
<u>Übersichtsmatrix Hybride Werkstoffkombinationen: Bewertung des Anwendungspotenzials und Zuordnung geeigneter Fertigungs- und Fügetechnologien</u>	4
<u>Technologiesteckbriefe</u>	5
1 Einpressen, Anpressen	5
1.1 Verschrauben	5
2 Urformen	7
2.1 Druckgießen	7
2.2 Spritzgießen	9
2.3 GMT-Formpressen	11
2.4 Harzinjektionsverfahren	13
2.5 Additive Verfahren	15
3 Umformen	17
3.1 Niet- und Bolzenverbindungen	17
3.1.1 Stanz-/Nietbolzen, Stanz-/Nietmutter	17
3.1.2 Voll- Stanznietsystem	19
3.1.3 Einpresstechnik	21
3.1.4 Halbhohlstanznieten	23
3.2 Clinchen / Durchsetzfügen	25
3.3 Thermomechanische Fügeverfahren	27
3.4 Organoblechumformung	29
4 Schweißen	31
4.1 Schmelzschweißverfahren	31
4.1.1 Strahlbasiertes Schmelzschweißen	31
4.1.2 Lichtbogenbasiertes Schmelzschweißen	33
4.2 Pressschweißverfahren	35
4.2.1 Ultraschallschweißen	35

4.2.2	Vibrationsschweißen	37
4.2.3	Rührreibschweißen	39
4.2.4	Widerstandsschweißen	41
4.3	Thermisches Pressfügen	43
4.4	Induktionsschweißen von Faser-Kunststoff-Verbunden	45
5	Löten	47
5.1	Laserlöten	47
6	Kleben	49
6.1	Chemisch härtende Klebstoffe	51
6.2	Physikalisch abbindende Klebsysteme	53
	<u>Ansprechpartner und Literaturhinweise zu Technologiesteckbriefen</u>	55
	<u>Impressum</u>	63

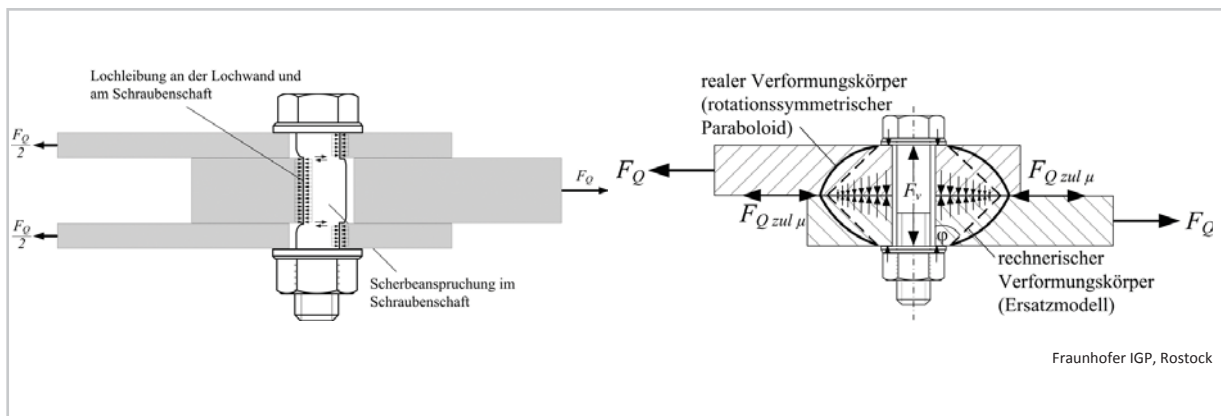
Hybride Werkstoffkombinationen: Bewertung des Anwendungspotenzials und Zuordnung geeigneter Fertigungs- und Fügetechnologien

(Nummern der Technolgiesteckbriefe gemäß Inhaltsverzeichnis)

	Stahl	Aluminium inkl. MMC	Magnesium inkl. MMC	Titan	Keramik inkl. CMC, Beton	Duroplast inkl. CFK, GFK, NFK	Thermoplast inkl. CFK, GFK, NFK	Holz	Fertigungs- bzw. Fügetechnologien
Stahl	1.1, 2.5, 3.1.1, 3.1.3, 3.1.4, 3.2, 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 5.1, 6 ++	1.1, 2.1, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.2, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 5.1, 6	1.1, 2.1, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 6	1.1, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 6	1.1, 3.1.3, 6	1.1, 2.4, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 6	1.1, 2.2, 2.3, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.3, 3.4, 4.3, 4.4, 6	1.1, 3.1.3, 6	
Aluminium inkl. MMC	++	1.1, 2.1, 2.5, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.2, 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 6 ++	1.1, 2.1, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 6	1.1, 2.1, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 6	1.1, 3.1.3, 6	1.1, 2.4, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 6	1.1, 2.2, 2.3, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.3, 3.4, 4.3, 4.4, 6	1.1, 3.1.3, 6	
Magnesium inkl. MMC	-	+	1.1, 2.1, 2.5, 3.1.1, 3.1.2, 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 6 ++	3.1.1, 3.1.2, 6	6	1.1, 2.4, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 6	2.2, 2.3, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.3, 3.4, 4.3, 4.4, 6	6	
Titan	-	+	-	1.1, 2.5, 3.1.1, 3.1.2, 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 6 ++	3.1.3, 6	2.4, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 6	2.2, 2.3, 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.3, 3.4, 4.3, 4.4, 6	6	
Keramik inkl. CMC, Beton	++	-	-	-	6 +	2.4, 3.1.3, 6	1.1, 3.1.3, 4.3, 6	1.1, 6	
Duroplast inkl. CFK, GFK, NFK	++	++	+	+	+	2.4, 3.1.2, 3.1.3, 6 ++	1.1, 3.1.2, 3.1.3, 4.4, 6	1.1, 2.4, 3.1.3, 6	
Thermoplast inkl. CFK, GFK, NFK	++	++	+	+	+	-	2.2, 2.3, 2.5, 3.1.2, 3.1.3, 3.4, 4.1.1, 4.2.3, 4.2.3, 4.4, 4.2.4, 6 ++	1.1, 3.1.3, 6	
Holz	+	+	-	-	-	++	+	1.1, 4.3, 6 ++	
Grobbeurteilung des Anwendungspotenzials: ++ viele etablierte Anwendungen + wenige Anwendungen - selten bis unüblich									

Technologiebezeichnung: 1.1 Verschrauben

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Die geschraubte Verbindung wird stets dann eingesetzt, wenn aus logistischen Gründen oder zum Zwecke der Reparatur und Instandsetzung Bauteile oder Baugruppen wieder gelöst werden sollen. Die Tragwirkung der geschraubten Verbindung kann mithilfe zweier Wirkprinzipien erreicht werden. Im Maschinenbau wird der überwiegende Anteil der Verschraubungen als hochfest vorgespannte Schraubverbindung ausgeführt. Als Wirkprinzip wird mithilfe der eingebrachten Vorspannkraft und der Haftreibung ein Reibschluss in der Scherfuge aktiviert. Bei querkraftbeanspruchten Schraubverbindungen unterbindet der Reibschluss eine Relativbewegung (Schlupf) der Fügeteile. Solange dieser Reibschluss aufrecht erhalten bleibt (Gleitkraft, Grenzgleitkraft), liegen außerordentlich verformungsarme und ermüdungssichere Verbindungen vor. Wird die Verschraubung infolge einer Axialkraft beansprucht, verhindert die Vorspannkraft ein Klaffen der Trennfugen. In diesem Beanspruchungsfall wird hierdurch ebenso die Ermüdungsfestigkeit des gekerbten Konstruktionselementes Schraube sichergestellt. Als zusätzliche Beanspruchung erfährt die Schraube ausschließlich einen kleinen Anteil der betrieblichen Axialkraft (Schraubenzusatzkraft). Neben der Aufrechterhaltung des Reibschlusses kann auch unter weiteren Zielstellungen vorgespannt werden. Dazu zählen das Verhindern von Spaltkorrosion, die Sicherung gegen selbsttätiges Losdrehen, eine Dichtfunktion oder ein Gebrauchstauglichkeitskriterium, wie beispielsweise das Verhindern von Klappern. Neben der reibschlüssigen Tragwirkung kann eine Schraubverbindung auch als sogenannte Scher-/Lochleibungsverbindung ausgeführt sein, wobei als Wirkprinzip der Formschluss greift. Der Formschluss wird durch Anlage des Schraubenbolzens an die Lochwandung des Fügeteils erreicht. Die Tragwirkung ist dann mit einer Bolzenverbindung vergleichbar. Aufgrund der Beanspruchungen sind solche Ausführungen bei Lastumkehr, geringen Randabständen oder großem Lochspiel nicht zu empfehlen.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Die Randbedingungen an den Schraubprozess sind wesentlich robuster als beispielweise beim Schweißen oder Kleben. Dennoch sind Prozessparameter zu überwachen und zu steuern. Je nach Verschraubungsfall und gewähltem Anziehverfahren sind Steuer- und Überwachungsgrößen festzulegen. Hierzu zählen das Anziehdrehmoment, der Drehwinkel sowie die Reibfenster (Gesamt-, Gewinde- und Unterkopfreibung), um die Qualitätsanforderungen zu erreichen. Darüber hinaus sind eine Vielzahl an Anziehverfahren für Verschraubungen durchführbar, wobei das drehmomentgesteuerte Anziehen immer noch am häufigsten angewandt wird. Das Schrauben besitzt seine Einsatzgrenzen mitunter bei der einseitigen Zugänglichkeit, wenn Fügebauteile kleiner Dicke oder sehr hohe/niedrige Festigkeiten (Durchgangsloch, Gewinde) vorliegen. Die Recyclingfähigkeit ist aufgrund der Lösbarkeit gegeben.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Die Bandbreite der durch Schrauben fügbar Werkstoffe ist sehr breit und reicht von Metallen wie Stahl, Aluminium, Magnesium und Titan über Thermo- und Duroplaste bis hin zum Holz. Die Keramiken sind aufgrund ihrer hohen Festigkeit, Härte und Spannungsempfindlichkeit für Verschraubungen weniger geeignet. Die verschraubbaren Werkstoffkombinationen werden unter anderem begrenzt durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten oder einer kleinen Grenzflächenpressung. Darüber hinaus geht bei faserverstärkten Kunststoffen das Schrauben im Allgemeinen mit einer Zerstörung der Faser einher.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Die Herstellung lösbarer und nahezu zerstörungsfreier Verbindungen wird branchenübergreifend nachgefragt. Ein wesentlicher Anteil geschraubter Verbindungen geht auf die Automobilindustrie zurück. Begonnen bei der Verschraubung an Antriebskomponenten (Motor, Getriebe, Differential, Kupplung, Radaufhängung, Rad) über Verschraubungen von Anbauteilen an der Karosserie (Wasserpumpe, Lichtmaschine usw.) bis zu verschraubten Bauteilen im Interieur (Armaturen, Verkleidungen) sind vielfältigste Fügeaufgaben durch Verschraubungen gelöst. Allerdings setzt auch der Nutz- und Schienenfahrzeugbau sowie der Schiff-, Anlagen- und Gerätebau Verschraubungen umfangreich ein. Besondere Bedeutung erlangt das Schrauben auch für Anwendungen im Gebiet der erneuerbaren Energien und im bauaufsichtlich geregelten Bereich.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Es können nicht alle Materialien mit allen Druckgusslegierungen zu einem nutzbringenden Hybrid verbunden werden. Durch den Verarbeitungsprozess von Metallschmelzen im Druckgießverfahren muss geprüft werden, ob das Bauteil als Hybrid zum um-, hinter- oder angießen definierbar ist unter der Berücksichtigung folgender physikalischer Faktoren: Schmelztemperatur, Gießdrücke, Gießgeschwindigkeiten, Wärmeausdehnungskoeffizienten, Wärmeleitung, Volumen der Hybridanteile, Positionierung, Fixierung und Abdichtung des Einlegers. Der Druckguss (Metall) ist gegenüber dem Spritzguss (Kunststoff) besser in Puncto „Recycling“. Die Angüsse sowie die Ausschussteile können in der Regel direkt wieder „In-house“ recycelt werden.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Nichteisenmetalle, Kunststoffe sowie alle anderen Materialien haben ihre Vor- als auch Nachteile.

Durch die Herstellung von Hybriden können die einzelnen Eigenschaften ergänzt werden, um eine Funktionsintegration, eine Gewichtsreduzierung oder Kostenreduzierung herbeizuführen.

Etablierte Anwendungen sind Hybride aus Nichteisenmetallen und Stahl. Anhaltende Trends im Leichtbau treiben Kombinationen aus Leichtmetallen voran. Umspritzte Metallteile mit Kunststoff sind üblich, dagegen stellt Kunststoff umgossen mit Metall eine Herausforderung dar. Faser- und partikelverstärkte Druckgusslegierungen finden Anwendungen. Materialien wie Holz, Glas oder Salze können im Druckgießverfahren umgossen werden.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Die Ressourcen unserer Erde sind endlich und langfristig wird nur das System erfolgreich sein können, das mit diesen schonend umgeht. Ideal wäre der Wechsel von der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft.

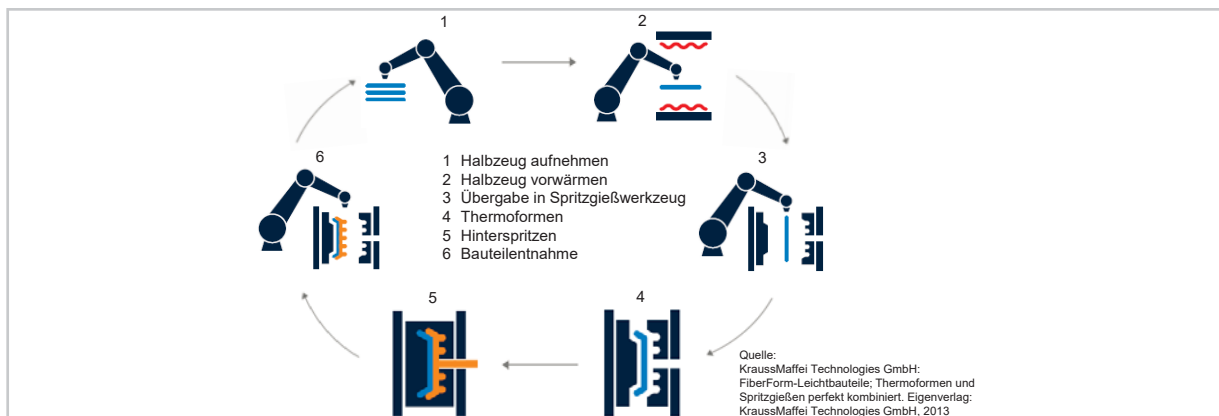
Daher bilden die Leichtmetalle eine zukunftsorientierte Materialgruppe.

Aufgrund dieser Tatsache wird die Entwicklung der Hybridbauteile auf Basis eines Leichtmetalles in den Fokus rücken.

Klassische Anwendungen finden sich unter anderem in der Branche von: Automobil, Luftfahrt, Elektronik, Design, Maschinenbau, Fördertechnik

Technologiebezeichnung: 2.2 Spritzgießen mit werkzeugintegrierten Verstärkungskomponenten

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Die technologische Entwicklung des Spritzgießverfahrens zur Herstellung hybrider Bauteile mit metallischen oder faserverstärkten Komponenten beruht auf der Hinterspritztechnik. Das Grundprinzip beruht auf dem Einlegen des Oberflächenmaterials in das geöffnete Spritzgießwerkzeug. Dort wird es mittels mechanischer Haltelemente oder Vakuumunterstützung gehalten. Nach dem Schließen des Werkzeuges wird das eingelegte Verstärkungsmaterial hinterspritzt und verbindet sich durch Stoffschluss, bei hinterspritzten Textilien auch durch mikromechanische Verklammerung, mit dem Spritzgießkunststoff.

Prozesskombinationen sehen auch das Umformen oder Thermoformen von metallischen oder thermoplastischen textilverstärkten Einlegern (sogenannten Organoblechen) vor. Mit der Schließbewegung des in der Werkzeugtrennebene platzierten metallischen Einlegers oder vorgewärmten thermoplastischen Prepregs erfolgt das Umformen, bzw. Thermoformen. Mit dem sich anschließenden Hinterspritzen des Einlegers werden dann Versteifungselemente wie Rippen oder Wabenstrukturen, sowie weitere Funktionselemente ausgeformt.

Für die Integration und Verarbeitung textiler Verstärkungsstrukturen in Spritzgießprozesse müssen vor allem aus werkzeugtechnischer Sicht konstruktive und technologische Maßnahmen ergriffen werden (Fixierungsmaßnahmen für die Einleger, Einlegerpositionierung in Bezug auf Anguss- und Auswerferanordnung, Zuordnung von Kern und Gesenk zur Düsen- und Auswerferseite unter Berücksichtigung von unterschiedlichem Schwindungsverhalten).

Notwendige Peripherie sind Temperiersysteme für kavitätsnahe Formwerkzeugtemperierung, externe Vorwärmeinrichtung für die Verstärkungseinleger, sowie Handlingsysteme zur Übergabe der Einleger in das Werkzeug und zur Bauteilentnahme.



Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Eine der wesentlichen Prozessrandbedingungen ist die stoff- und formschlüssige Verbindung der Einleger mit dem angespritzten Kunststoff. Wesentliche Maßnahmen zur Verbesserung der Verbundhaftung sind: Nutzung gleicher Grundpolymere im Organoblech und Spritzgießkunststoff, Kurzfaserverstärkung des Spritzgießkunststoffes zum Angleichen der Wärmeausdehnungskoeffizienten, Vorwärmung des Organoblechs zur Verringerung der Temperaturgradienten, Ausbildung von zusätzlichen formschlüssigen Verbindungselementen durch Durchbrüche und Hinterschnitte im Einleger.

Die Recyclingfähigkeit ist bei Nutzung von Thermoplasten in Verbindung mit Metallen und Faserverstärkung generell gegeben.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

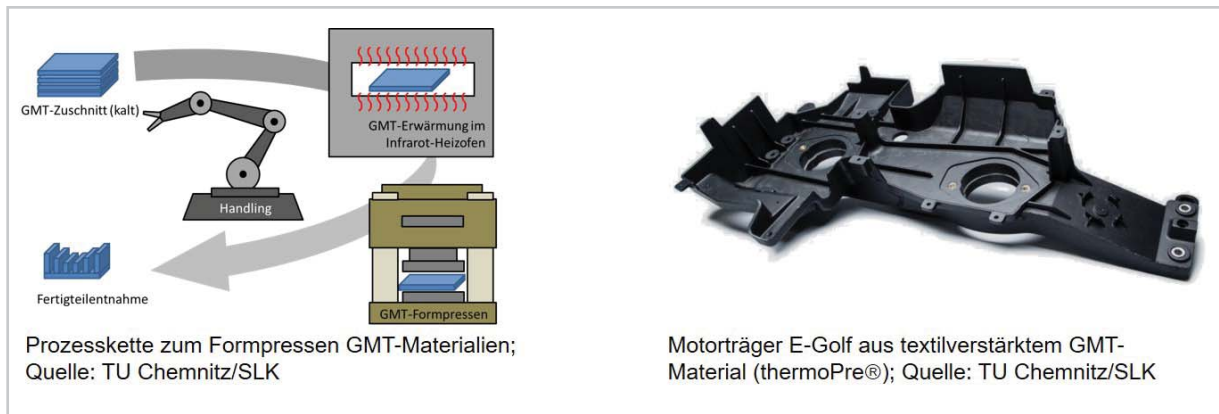
Typischerweise kommen aufgrund der notwendigen Steifigkeit und Wärmeformbeständigkeit, sowie der besseren Anbindung an Karosseriestähle bzw. Aluminiumlegierungen, polare Kunststoffe wie PA6 sowohl für die thermoplastischen Prepregs, als auch den Spritzgießkunststoff zum Einsatz. Generell verbessert die Verwendung von Voll-Kunststoff-Hybriden mit gleicher Polymermatrix die stoffschlüssige Verbundhaftung. Typische Kunststoffe sind neben PA6 und PA6.6 auch PP und ABS mit und ohne Glasfaserverstärkung. Als Einleger kommen neben Aluminium und Stahllegierungen thermoplastische Prepregs (Organobleche) auf Gewebe- oder Gelegebasis mit PA und PP als Matrix zum Einsatz. Selten auch auf Basis von PEI oder PEEK für Hochleistungsanwendungen.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Aufgrund der geringen Zykluszeiten und hohen Automatisierung ist das Spritzgießen generell für den hybriden Leichtbau im Automobilbau interessant. Die hohen investiven Maßnahmen in die Anlagentechnik sowie das Formwerkzeug amortisieren sich auch nur bei hohen Stückzahlen. In Serienanwendungen sind Frontends, Türmodule oder Bremspedale zu finden. Eine technologische Variante liegt hierzu mit der Kombination von Spritzgießen und Innenhochdruckumformung (IHU) vor. Diese Technik wird z. B. zur Herstellung von Cockpit-Querträgern in PKW genutzt.

Technologiebezeichnung: 2.3 Verpressen von faserverstärkten Thermoplasten

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Beim Verpressen von faserverstärkten Thermoplasten kommen thermoplastisch vorimprägnierte faserverstärkte Halbzeuge als Plattenware zum Einsatz, die als endkonturnahe Halbzeugzuschnitte in einer Heizstation bis über den Schmelzbereich erwärmt werden. Über ein Handlingsystem wird das aufgeschmolzene Halbzeug in das Presswerkzeug übergeben, indem unter Druck bei niedrigeren Temperaturen (unterhalb des Schmelzpunktes) das Material konsolidiert wird. Im Pressprozess fließt der faserverstärkte Thermoplast in die Ausformungen der Kavität und bildet so das Formteil ab. Nach dessen Abkühlen wird das Bauteil entnommen und besäumt.

Der Prozess erlaubt die Verarbeitung von langen Fasern als GMT-Material (Glass Mat Thermoplastic), bzw. von endlosen Fasern als Organoblech, wodurch erheblich höhere Steifigkeiten, Festigkeiten und Schlagzähigkeiten im Vergleich zu kurzfaserverstärkten Thermoplasten erreicht werden.

Neben der vergleichsweise einfachen Prozessauslegung bei reduzierten Werkzeugkosten im Vergleich zum Spritzgießen ist das Verfahren bereits bei geringen Stückzahlen wirtschaftlich. Darüber hinaus erlaubt die Technologie einen hohen Automatisierungsgrad beim Zuschneiden, Vorwärmen und Einbringen in die Form.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Für den Einsatz von metallischen Einlegern als Lasteinleitungselement sind einerseits Werkzeugkonzepte zur Positionierung und Fixierung umzusetzen und andererseits die stoff- und formschlüssige Verbindung der Einleger mit dem konsolidierten faserverstärkten Thermoplast-Material erforderlich. Wird der GMT-Prozess in Kombination mit Organoblechen eingesetzt, so sind Maßnahmen zur Verbesserung der Verbundhaftung zu realisieren. Darunter zählen insbesondere das Vorwärmen des Organoblechs zur Verringerung der Temperaturgradienten, die Nutzung gleicher Grundpolymere im Organoblech/GMT-Verbund, sowie die Ausbildung von zusätzlichen formschlüssigen Verbindungselementen durch Durchbrüche und Hinterschnitte im Einleger.

Die Recyclingfähigkeit ist bei Nutzung von Thermoplasten in Verbindung mit Metallen und Faserverstärkung generell gegeben.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Typischerweise kommen beim GMT-Pressverfahren klassische Polymere wie das Polypropylen mit Langfaserverstärkung zum Einsatz. Da derartige Leichtbaustrukturen prozessbedingt geringe Faservolumenanteile aufweisen, können diese lediglich geringe mechanische Lasten aufnehmen und weiterleiten. Für eine verbesserte Lastübertragung werden Krafteinleitungselemente in Form von metallischen Inserts genutzt.

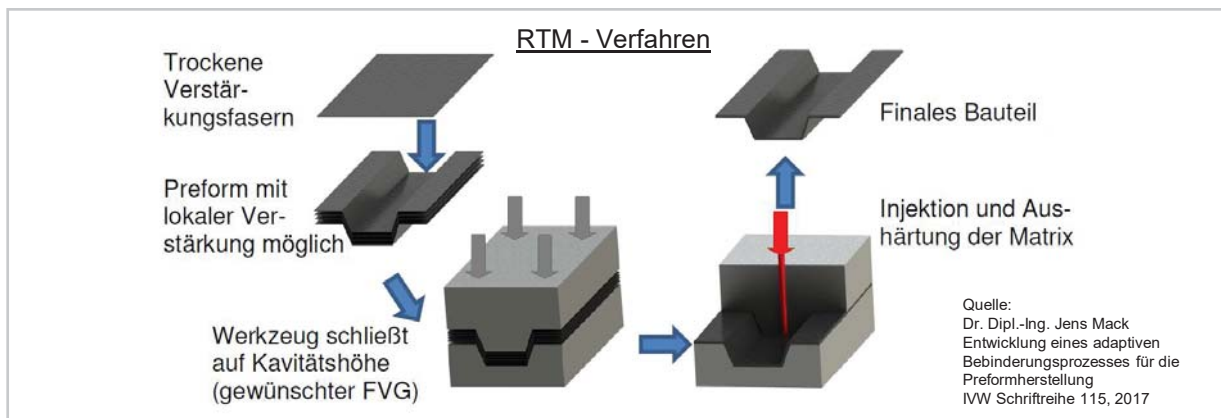
Darüber hinaus finden bereits endlosfaserverstärkte Thermoplastmatten in Kombination mit dem GMT-Verfahren Anwendung. So werden die sog. Organobleche als Decklagen mit der GMT-Masse als Zwischenschicht presstechnisch konsolidiert, wodurch das gefertigte Formteil im Vergleich zur klassischen GMT-Komponente höhere mechanische Eigenschaften aufweist.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

GMT ist weit verbreitet in Automobilanwendungen wie Unterbodenabschirmungen, Sitzstrukturen und Front-Ends. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades bei moderaten Investitions- und Materialkosten ist das GMT-Verfahren für den hybriden Leichtbau im Automobilbau interessant.

Technologiebezeichnung: 2.4 Harzinjektionsverfahren; RTM - Resin Transfer Molding und VARI - Vacuum Assisted Resin Infusion

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Beim VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion)-Verfahren wird über einen Vorformling (auch Preform genannt), der bereits in einem Werkzeug platziert ist, ein definierter Lagenaufbau aus den Hilfsstoffen Abreisgewebe, Fließmedium, Loch- und Vakuumfolie drapiert. Durch das Anlegen eines Vakuums zwischen Werkzeug und Vakuumfolie wird der Vorformling durch den Umgebungsdruck kompaktiert.

Beim Resin Transfer Molding (RTM) wird das Werkzeug nach dem Einlegen der Preform geschlossen. Die Preform wird durch das Werkzeug auf die finale Bauteildicke kompaktiert. Zusätzliches Verbrauchsmaterial wie beim VARI-Verfahren ist nicht erforderlich.

Durch eine Mischanlage wird das Harz-Härter-Gemisch, gegebenenfalls unter Einsatz eines Katalysators, vorbereitet. Beim VARI-Verfahren wird das Harzgemisch durch das anliegende Vakuum eingesaugt und in die Preform infiltriert. Beim RTM-Verfahren erfolgt die Imprägnierung der Preform durch eine Druckinjektion des Harzgemisches in das Werkzeug. Die Imprägnierung der Preform erfolgt in beiden Fällen in der Regel „in-plane“, also in der Ebene der Verstärkungsfasern und über die Bauteillänge. Um das Harz-Härter Gemisch definiert auszuhärten, kann das Werkzeug nach vollständiger Imprägnierung höher temperiert werden.

Durch das VARI-Verfahren können sehr gute Oberflächen des Bauteils erzeugt werden. Das RTM-Verfahren eignet sich besonders für Bauteile, die mit engen Geometrietoleranzen gefertigt werden sollen. Durch das RTM-Verfahren sind komplexe Bauteile mit einem geringen bis mittleren Investitionsaufwand in der Serienfertigung herstellbar.

Durch Near-Net-Shape-Preforms werden Nacharbeiten an den Bauteilen reduziert oder können gänzlich entfallen. Preforms tragen dazu bei, dass die Prozesszeit durch eine schnelle Beschickung der Werkzeuge verkürzt werden kann. Beachtet werden sollte bei der Near-Net-Shape-Fertigung, dass das damit verbundene Preforming sehr aufwendig sein kann und bei einer Kostenbetrachtung nicht vernachlässigt werden darf.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Die maßgeblichen Parameter welche die Prozesszeit beeinflussen sind die Geometrie des Bauteils, wie dieses infiltriert wird und wie schnell das Werkzeug temperiert werden kann. Weitere Einflussfaktoren sind die Tränkbarkeit (Permeabilität) der Preform und das verwendete Matrixmaterial (Prozessviskosität). Der Matrixwerkstoff wird im Wesentlichen durch den späteren Einsatzzweck bestimmt. In der Automobilindustrie ist es Stand der Technik, dass die Matrizes binnen fünf Minuten aushärten. Im Luftfahrtsektor kann die Reaktionszeit bei mehreren Stunden liegen.

Das RTM-Verfahren lässt sich sehr gut automatisieren. Durch die Notwendigkeit eines Werkzeugs, einer Presse und einer Infusionsanlage sind die Investitionskosten im Vergleich zum VARI-Verfahren höher.

Die Recyclingfähigkeit ist abhängig von den eingesetzten Werkstoffen und deren Trennbarkeit.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Als Matrixsystem kommen primär Reaktionsharzsysteme zum Einsatz. Die am häufigsten verwendeten sind Epoxidharze und Vinylesterharze. Reaktive Thermoplaste nehmen eine besondere und untergeordnete Rolle ein, da sie zu einem thermoplastischen Werkstoff polymerisieren.

Die Wahl der Verstärkungsfasern kann beliebig erfolgen. Zum Einsatz kommen Glas-, Kohlenstoff-, Natur- oder Aramidfasern.

Es können nahezu alle flächigen Textilhalbzeuge, wie Gelege oder Gewebe, verarbeitet werden. Zudem können Textilstrukturen wie Geflechte oder Gewirke infiltriert werden. Eine Integration von Einlegern, z.B. Metallinserts, ist bei dieser Technologie Stand der Technik.

Um die Biege- und Beulsteifigkeit zu verbessern, können Schaumstoff-, Sandwich- oder Balsaholzkerne in die Struktur, und als Anbindungspunkte Metallinserts integriert werden.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Im Automobilbereich findet das RTM-Verfahren zur Herstellung von Strukturbauteilen bereits seit Jahren Anwendung. So werden unter anderem Fahrgastzellen oder Chassis im RTM-Verfahren hergestellt.

Ein Beispiel für den Einsatz von FKV im Sport- und Freizeitbereich sind im RTM-Schlauchblasverfahren hergestellte Fahrradrahmen. Der Rahmen wird auf speziell entwickelte Kerne geflochten und anschließend im RTM-Verfahren injiziert. Anwendungsbeispiele für das VARI-Verfahren sind die Rotorblattherstellung für Windkraftanlagen oder aus der Transportbranche Zugverkleidungen. Weitere Anwenderbranchen sind Maschinenbau, Infrastruktur, Marine oder Prototypenbau.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Zur additiven Fertigung von Bauteilen sind gültige Prozessparameter notwendig. Je nach Verfahren handelt es sich dabei unter anderem um Leistung, Scangeschwindigkeit, Bindereintrag, Abstand der Scanvektoren und Schichtdicke. Diese sind stark vom eingesetzten Werkstoff abhängig. Bei der Verarbeitung von mehreren Werkstoffen müssen daher die Parametersätze für beide Werkstoffe bekannt sein. Zudem kommt es im Übergangsbereich zu einem Materialmix, der eine Anpassung der Parameter erfordert. Die Parameter sind dabei sowohl vom Materialübergang (Material A → B oder Material B → A) als auch vom geometrischen Übergang (in x-y- oder in z-Richtung) abhängig.

Grundsätzlich ist das Pulver bei den Pulverbettverfahren wiederverwendbar. Derzeit sind aber keine industriellen Siebstationen vorhanden, die zusätzlich in der Lage sind, nach Werkstoff zu trennen.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

In der Verfahrensgruppe Werkstoffextrusion können bereits heute eine Vielzahl an Thermoplasten gemeinsam verarbeitet werden. Ähnlich verhält es sich mit metallischen Werkstoffkombinationen bei Verfahren der gerichteten Energieeinbringung. Beim pulverbettbasierten Schmelzen ist die Multimaterialverarbeitung noch Bestandteil der Forschung. Infolge der selektiven Verfestigung kommt es zur lokalen Wärmeausdehnung über den elastischen Bereich hinaus und der anschließenden Abkühlung. Um Werkstoffe gemeinsam zu verarbeiten, müssen daher ähnliche Werkstoffeigenschaften vorliegen. Dies betrifft vor allem den Wärmeausdehnungskoeffizient. Grundsätzlich sind sämtliche Werkstoffkombinationen denkbar, die diese Voraussetzung erfüllen. Derzeit gemeinsam verarbeitet werden CCZ und 1.20709 sowie 1.2767. Weitere Kombinationen sind Aluminium und Magnesium.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Klassische Felder sind die Luft- und Raumfahrtindustrie, sowie Anwendungen in der Medizintechnik. In den letzten Jahren werden additive Fertigungsverfahren jedoch vermehrt branchenübergreifend eingesetzt.

Technologiebezeichnung: 3.1.1 Stanz-/Nietbolzen, Stanz-/Nietmutter

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Die technologische Entwicklung der Stanz- und Nitelemente eignen sich vor allem für den Einsatz in Werkstoffen wie Stahl, Edelstahl, Aluminium unter anderem. Die Stanzelemente werden selbststanzend in den Bauteilwerkstoffen eingebracht und nach dem Durchstanzen der Bauteile im Bauteilwerkstoff so verformt, dass eine formschlüssige Verbindung entsteht. Die Geometrie der Stanzelemente sorgt für ausreichend Verdreh- und Ausdrückfestigkeit. Die Funktionselemente sind verliersicher eingebracht, die Mutter kann beidseitig beansprucht werden. Gleiche und ähnliche Elemente können auch genietet werden. Für Nitelemente sind Aufnahmebohrungen und gegebenenfalls auch Sichen im Bauteilwerkstoff erforderlich. Auch hier wird eine formschlüssige Verbindung erzeugt. Der gute Formschluss bewirkt eine hervorragende Leitfähigkeit zwischen Bauteilwerkstoff und Bolzen, sodass ein Stanz- /Nietbolzen sich auch als Massebolzen eignet. Alle Elemente können mit einem sehr hohen Automatisierungsgrad verarbeitet werden (Folgeverbundwerkzeug).

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Die Stanzelemente sollten immer härter als der Bauteilwerkstoff sein, damit das Funktionselement den Bauteilwerkstoff durchstanzen kann. Entsprechend ist eine ausreichende Verarbeitungskraft erforderlich. Ein ausreichender Randabstand ist wegen eines eventuellen Aufbauchens des Bauteilwerkstoffes zu beachten. Nietelemente können auch in Werkstoffen eingesetzt werden, die härter als das Nietelement sind. Alle Funktionselemente gibt es in unterschiedlichen Festigkeitsklassen und mit verschiedenen Oberflächen. Somit gibt es keine Probleme mit Korrosion.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

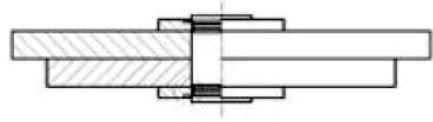
Einsatz finden die Funktionselemente in Werkstoffen wie z.B. Stahl, Edelstahl, Aluminium. Bauteilwerkstoff und Verbindungselement sollten korrosionsstabil sein.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Der Anwendungsbereich liegt vor allem im Automobilbau aber auch im Lüftungsbau und der weißen Ware.

Technologiebezeichnung: 3.1.2 Voll-Stanznietsystem

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Quelle: PROFIL Verbindungstechnik GmbH

Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Die technologische Entwicklung des Stanznietsystems eignet sich zum Verbinden von z.B. Faserverbundwerkstoffen (CFK/GFK) oder auch anderen Werkstoffen, die selbststanzend zu verbinden sind. Für die Funktion sind zwei Scheiben mit je einer Bohrung und einem zylindrischem Stift mit Rillen erforderlich. Die obere Scheibe übernimmt durch Druck die Niederhalterfunktion auf die Bauteile, die untere Scheibe wird zum Verriegeln benötigt.

Der zylindrische Niet wird selbststanzend durch die Bauteile gedrückt. Dabei wird der Niet im oberen Bereich deformiert und bildet so den Nietkopf. Nachdem der Stanzprozess beendet ist, wird durch Druck auf die obere Scheibe Material der unteren Scheibe in die Rillen des zylindrischen Nietes gedrückt. Dazu ist eine Matrize mit ringförmiger Erhebung erforderlich. Die Stanzbutzen werden durch die Matrize abgeführt.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Das Nietsystem ist immer härter als der zu verbindende Werkstoff. Die Nietlänge ist der Materialdicke angepasst. Es ist immer darauf zu achten, dass Bauteilwerkstoff und Nietwerkstoff nicht zur Korrosion führen. Eventuell muss abgedichtet werden. Geometrische Gegebenheiten des Bauteils in Bezug auf die Nietgeometrie müssen beachtet werden.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Es können alle Materialkombinationen verbunden werden, die der Niet durchstanzen kann. Dies können Werkstoffe, wie z.B. Faserverbundwerkstoff (CFK/GFK), Aluminium, Magnesium und Stahl in unterschiedlicher Kombination sein. Es sollte jedoch bei den unterschiedlichen Werkstoffkombinationen auf die jeweiligen Wärmeausdehnungskoeffizienten geachtet werden. Auch kann Klebstoff zwischen den Bauteilwerkstoffen die Verbindungsqualität beeinflussen.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Anwendungsbereiche findet man unter anderem im Automobilbereich, wo durch Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe Gewicht eingespart werden kann. Hier findet man Materialien wie z.B. Stahl, Aluminium, Magnesium und Faserverbundwerkstoff, die nur schwer miteinander zu verbinden sind. Auch bei anderen Industriebereichen mit ähnlicher Anforderung kann das Nietsystem verwendet werden.

Technologiebezeichnung: 3.1.3 Einpresstechnik

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Bildrechte: PennEngineering® Fastening Systems

Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Die Einpresstechnik eignet sich vorrangig für zähe (duktile) Bauteilwerkstoffe mit ausreichenden Fließigenschaften, wie z.B. Stahl, Aluminium oder Edelstahl. Die Härte der Einpresselemente (z.B. Gewindeträger wie Bolzen, Muttern, Abstandsbuchsen, sonstige Funktionselemente) ist in der Regel immer um eine definierte Differenz größer als die der Bauteile, in welche die Elemente montiert werden. Durch plan-paralleles Verpressen verformt das Element mittels seiner speziellen Geometrie in Verbindung mit der höheren Härte das Grundmaterial des Bauteils, wobei durch Kaltumformung eine kraft-/ formschlüssige Verbindung zwischen Verbindungselement und Bauteil hergestellt wird. Bei der Einpresstechnik handelt es sich somit um ein kaltes, mechanisches Fügeverfahren ohne Temperatureintrag in die Fügezone. Durch diese Technologie können dünnwandige Bauteile (z.B. aus Feinblech) mit robusten, tragfähigen Gewinden versehen werden, sowie der Einsatz von losen Verbindungselementen minimiert werden. Neben einem zylindrischen Vorloch, welches durch Stanzen, Bohren/Fräsen oder Laserschneiden hergestellt werden kann, ist keine spezielle Vorbereitung der Bauteile erforderlich. Die Unterseite des Bauteils wird nicht verformt und bleibt eben.

Die Einpresstechnik ist im Vergleich zu anderen Fügeverfahren (z.B. thermische Verfahren) sehr energieeffizient. Zudem kann die Montage der Einpresselemente mittels der sogenannten "Indie-Technologie" direkt in den Stanz-/ Umformprozess integriert werden. Hierbei werden die Elemente durch entsprechende Zuführsysteme und Setzköpfe direkt im Stanzwerkzeug (Folgeverbund-/ Transferwerkzeug) eingebracht, wodurch eine nachträgliche Montage entfällt. Alternativ können Einpresselemente aber auch durch nachgeschaltete Prozesse mittels einfachen Verarbeitungsgeräten/Pressen montiert werden. Je nach Anwendungsfall und Stückzahlen sind somit unterschiedliche Automatisierungsgrade und damit eine wirtschaftliche Fertigung der Bauteile / Baugruppen möglich.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Wichtige Konstruktionsparameter bei der Auswahl des geeigneten Einpress-elementes sind neben der maximalen Bauteilhärte, die minimale Bauteildicke, sowie der Abstand des Elementes zur Bauteilkante. Für die Montage muss eine ausreichende Einpresskraft aufgebracht werden, um die spezielle Verdrängungs-geometrie der Elemente vollständig in das Bauteil einzudrücken. Für eine gute Performance (hohe Haltekräfte, geringe Streuung) sollte das Einpressen der Elemente stets kraftgesteuert erfolgen. In der Regel ist eine zweiseitige Zugänglichkeit der Montagestelle zur Abstützung der Einpresskraft erforderlich. Einpresselemente können je nach Anwendung aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellt werden (z.B. Kohlenstoffstähle, Edelstähle, Aluminium) und je nach Korrosionsanforderungen mit entsprechenden Oberflächenbeschichtungen versehen werden.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Sind die Funktionselemente in einen Bauteil verarbeitet, können weitere Bauteile (z.B. aus anderen Werkstoffen) daran befestigt werden. Alternativ gibt es auch gewindelose Elemente, mit denen unterschiedliche Werkstoffe direkt miteinander verbunden werden können. Damit eignet sich die Einpresstechnik als mechanisches Fügeverfahren sehr gut für Mischbaukonstruktionen, in denen unterschiedliche Werkstoffe miteinander gefügt werden müssen. Es ist jedoch darauf zu achten, dass sich die verschiedenen Werkstoffe korrosionstechnisch nicht negativ beeinflussen.

Mittels des neuen VariMount®-Adapters (Seite 20, mittleres Bild) lassen sich die unterschiedlichsten Einpresselemente ebenfalls in spröde Werkstoffe wie Kunststoffe, Faserverbundwerkstoffe, Gußwerkstoffe, usw. durch Anschrauben, Nieten, Umspritzen, Einlaminiere, Kleben, usw. integrieren.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

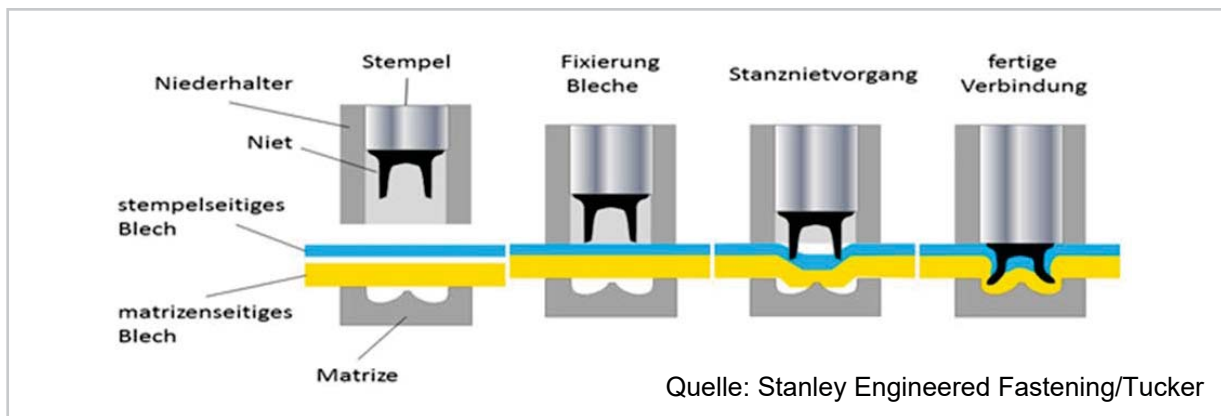
Die Einpresstechnik kommt in sämtlichen Industriebereichen zum Einsatz, in denen Bauteile aus Stahl, Feinblech, Edelstahl, Aluminium und Buntmetallen (Kupfer, Messing, Bronze) hergestellt werden. Ausgangsmaterial sind in der Regel gewalzte Bleche und Strangpressprofile.

Branchen:

Elektronik, Energietechnik, Automobiltechnik und Transport, Luft- und Raumfahrt, Maschinen- und Anlagenbau, Gehäusebau, Feinmechanik, Medizintechnik, Weiße Ware und weitere.

Technologiebezeichnung: 3.1.4 Halbhohlstanznieten

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Zu Beginn werden die zu fügenden Blechteile im ersten Prozessschritt positioniert und mit Hilfe des Niederhalters fixiert. Im nächsten Schritt, dem Stanzvorgang, wird das Fügeelement (Niet) zunächst vom Stempel durch das obere Blech gedrückt. Dabei wirkt der Niet als Einweg-Schneidstempel. Unmittelbar anschließend in einem ununterbrochenen Fügevorgang treibt der Stempel den Niet weiter in die matrizenseitige Blechlage. Dabei wird der Niet mithilfe der Matrize und dem matrizenseitigen Blech so plastisch verformt, dass der Niet spreizt und einen Hinterschnitt in der unteren Blechlage und somit eine tragfähige Verbindung ausbildet.

Der Niet muss also sowohl ausreichend hart zum Durchstanzen des stempelseitigen Fügeteils sein wie auch ausreichend duktil (weich), um die entsprechende Verspreizung im matrizenseitigen Füge teil zu gewährleisten. Da das matrizenseitige Füge teil nicht durchstanzt, sondern lediglich umgeformt wird und stets eine gewisse Materialstärke erhalten bleibt, ergibt sich von der Matrize seite her eine mediendichte Verbindung. Durch die wärme arme – „kalte“ – Fügetechnologie werden die Eigenschaften der Bleche im Gegensatz zum Schweißen nicht verändert. Diese Technologie kommt ohne Vorlochoperation aus und erfordert eine zweiseitige Zugänglichkeit. Das Verfahren ist nach DIN 8593 in die Fertigungsverfahren Fügen Teil 5, Fügen durch Umformen, eingeteilt [DIN8593-5].

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Grundsätzlich gibt es beim Halbhohlstanznieten die folgende bevorzugte Fügerichtung:

- vom härteren in das weichere Blech,
- vom dünneren in das dickere Blech.

Aktuell liegt die obere Einsatzgrenze des stempelseitigen Blechs bei 1600 Mpa und bei 800 Mpa für das matrizenseitige Blech.

Der Halbhohlstanzniet kann lediglich einmal verwendet werden.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

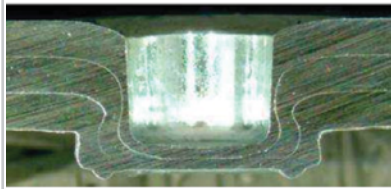
Das Halbhohlstanznieten ist für Kombinationen verschiedener Materialien prädestiniert. Daher findet es in Karosserie-Leichtbaustrukturen breite Anwendung. Es werden nach dem Stand der Technik mit dem Halbhohlstanznieten insbesondere Aluminium-, Stahl- und Kunststoffwerkstoffe und deren Kombinationen gefügt. Dabei wird das Halbhohlstanznieten häufig in Kombination mit dem Kleben verwendet (Hybridfügen). Es können sowohl zwei- wie auch mehrlagige Verbindungen gefügt werden.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Das Halbhohlstanznieten findet in der Automobilindustrie Anwendung. Dort wird es als Füge-technologie im Karosseriebau eingesetzt, wenn Leichtbauwerkstoffe, wie z.B. Aluminium, verwendet werden. Das Halbhohlstanznieten gewinnt im Zuge des Leichtbautrends im Automobilbau weltweit zunehmend Bedeutung.

Technologiebezeichnung: 3.2 Clinchen

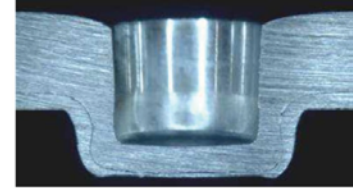
Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



1,0 mm DX51
1,0 mm DX51
1,0 mm DX51



1,0 mm Al
1,0 mm Aisi 304



3,0 mm St
0,7 mm St

Quelle: **TOX** PRESSOTECHNIK

Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Das Clinchen (Durchsetzfügen) zählt nach Einteilung in der DIN 8593-5 zu den Fertigungsverfahren „Fügen durch Umformen“. Dabei können mehrere Fügeteile, die überlappend angeordnet sind, miteinander verbunden werden. Üblich sind hierbei zwei- bis dreilagige Werkstoffkombinationen. Die wichtigste Grundvoraussetzung zum Einsatz des Clinchens ist eine genügend große Umformbarkeit der Werkstoffe. Die Fügeteile werden mit einem Niederhalter (stempelseitig wirkend) auf der Matrize fixiert, wobei gleichzeitig ein Stempel die Werkstoffe lokal durchsetzt und durch Stauchen ausdünt. Durch eine spezielle Formgebung der Clinchwerkzeuge entsteht in den Fügeteilen eine druckknopfähnliche Verbindung außerhalb der ursprünglichen Blechebene. Hierfür ist eine zweiseitige Zugänglichkeit zur Fügestelle zu gewährleisten. Die Fügeteile werden nicht durchtrennt und sind nach dem Verbinden mediendicht (Ausnahmen bilden Sonderverfahrensvarianten). Die entstandene Fügeverbindung beruht auf den Prinzipien des Form- und Kraftschlusses. Bei weichen Nichteisenmetallen können aufgrund der beim Fügen lokal auftretenden hohen Drücke Kaltverschweißungen entstehen. Um ein Anhaften solcher Werkstoffe an den Clinchwerkzeugen zu vermeiden, werden neben verschiedensten Beschichtungssystemen auf den Stempeln und Matrizen über spezielle Sprühdüsen auch Schmierstoffe auf die Blechoberfläche aufgetragen. Die Schmiermedien sind in den meisten Fällen selbstverflüchtigend. Neben der guten Automatisierbarkeit ist das Verfahren mittels Prozessüberwachung inline gut kontrollierbar. Clinchen ist ein hocheffizientes und wirtschaftliches Fügeverfahren, da es gänzlich ohne zusätzliche Verbindungselemente wie Schrauben oder Niete auskommt und über eine kurze Taktzeit verfügt. Zusätzlich ist keinerlei Erwärmung der Fügeteile notwendig. Deshalb bleibt die Oberflächenveredelung der Werkstoffe intakt.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Werkstoffe, die über eine Bruchdehnung $A_{80} \geq 12\%$ (prozentuale Längenänderung bis ein Werkstoff plastisch versagt/reißt), ein Streck- oder Dehngrenzenverhältnis (maximale Festigkeit eines Werkstoffes bei elastischen Verhalten) $R_{p0,2}/e/R_m \leq 0,7$, sowie eine Zugfestigkeit von $R_m \leq 600 \text{ N/mm}^2$ (maximale Festigkeit eines Werkstoffes bei Versagen/Riß) verfügen, sind gut clinchgeeignet. Werden die zu fügenden Werkstoffe spröder oder weisen eine höhere Festigkeit auf, sind die Werkstoffe bedingt clinchgeeignet. Vorverformungen des Grundwerkstoffs an der Fügestelle können die Clincheignung beeinflussen. Die Vorzugsfügerichtung ist von dick in dünn und von hart in weich. Das Clinchen ist ferner gut mit dem Kleben kombinierbar, weshalb es ebenfalls für moderne Leicht-/Mischbauanwendungen zunehmend eingesetzt wird.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

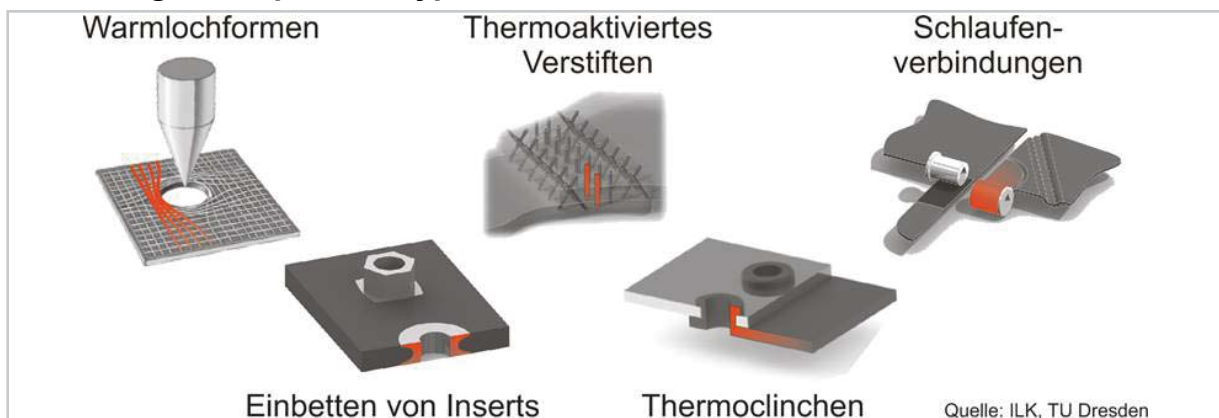
Die Fügetechnik Clinchen ermöglicht das Verbinden nicht nur gleichartiger, sondern vor allem auch artverschiedener Werkstoffe. Die Vielfalt der möglichen metallischen Materialkombinationen wird im Wesentlichen durch die mechanischen Eigenschaften der Fügeteilwerkstoffe, bzw. deren Dickenverhältnis begrenzt. Herstellbare Fügeverbindungen sind Kombinationen aus Stahl/Stahl; Stahl/Aluminium; Aluminium/Aluminium; Kupfer/Kupfer; Kupfer/Aluminium; Edelstahl/Edelstahl; Edelstahl/Stahl; Edelstahl/Aluminium. Zusätzlich gibt es Anwendungen mit Kombinationen aus Stahl/Stahl-Sandwichwerkstoffen. Das Clinchen von faserverstärkten Kunststoffverbunden ist zurzeit Gegenstand der Forschung.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Anwendungsbereiche findet man unter anderem im Automobilbau. Dies können Materialien wie z.B. Stahl/Stahl; Stahl/Aluminium; Aluminium/Aluminium sein. Im Anwendungsgebiet der weißen Ware sind Kombinationen aus Edelstahl/Edelstahl; Edelstahl/Stahl; Stahl/Stahl geläufig. In der Elektroindustrie treten häufig Verbindungen wie: Kupfer/Kupfer; Kupfer/Aluminium auf.

Technologiebezeichnung: 3.3 Thermomechanische Fügeverfahren

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Als thermomechanische Fügeverfahren sollen hier insbesondere neuartige Füge-systeme für thermoplastische Faserverbundstrukturen (z.B. sogenannte Organobleche) betrachtet werden.

Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix bieten aufgrund eines hohen Automatisierungsgrades und kurzen Zykluszeiten bei der Verarbeitung ein hohes Potential für die Serienfertigung von Leichtbaustrukturen. Charakteristische Werkstoffeigenschaften sind Warmformbarkeit und Schweißbarkeit. Für die effiziente und automatisierte Fertigung hochfester Verbindungen werden aktuell angepasste Füge-technologien entwickelt, die diese spezifischen Eigenschaften gezielt ausnutzen. Unter anderem wird hierbei die Integration von Fügeverfahren in etablierte Prozessketten angestrebt, etwa durch Zusammenführung von Bauteilfertigungs- und Montageprozessen.

Beispiele für aktuelle Forschungsinhalte zu Füge-technologien, welche speziell für diese Werkstoffgruppe entwickelt wurden, sind etwa warmgeformte Bolzenlöcher, Thermoclinchen, thermoaktiviertes Verstiften und CF-Widerstandsschweißen. In obiger Abbildung ist exemplarisch der Prozessablauf für den Thermoclinch-Prozess dargestellt. Die am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1640 entwickelte Technologie eignet sich insbesondere zur Verbindung von Organoblechen mit metallischen Strukturen und ist dabei besonders faserverbundgerecht, da eine Schädigung der Fasern entgegen z.B. Bohren weitestgehend vermieden wird.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Wesentliche Prozessrandbedingungen sind etwa das Temperaturverhalten des thermoplastischen Werkstoffs, sowie dessen Fließverhalten im erwärmten Zustand.

Aufgrund der geringen Fügekräfte sind diese Verfahren meist mit geringem Werkzeugaufwand realisierbar.

Die Recyclingfähigkeit ist bei Nutzung von Thermoplasten in Verbindung mit Metallen und Faserverstärkung generell gegeben.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

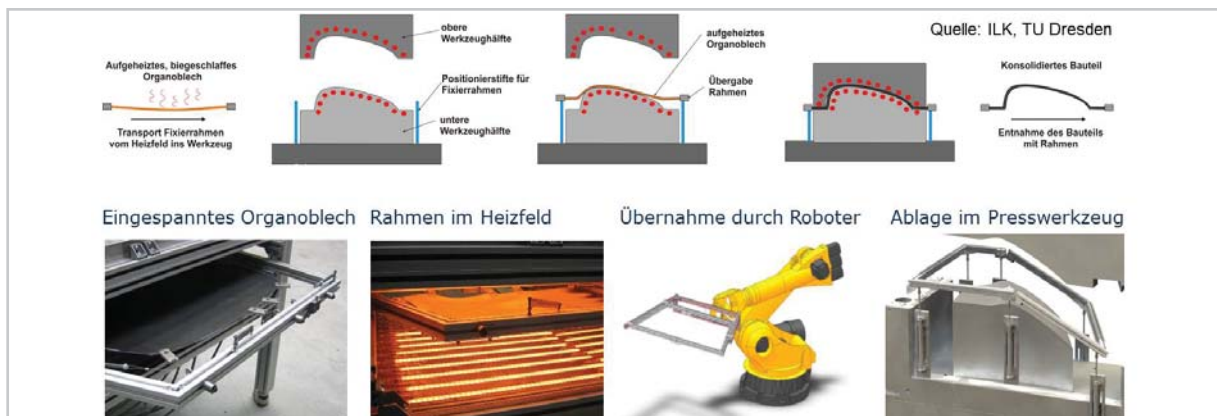
Wie obige Abbildung zeigt, können Materialkombinationen von Thermoplastverbunden mit Metallen wie etwa Stahl oder Aluminium realisiert werden. Anstelle von Metall kann der zweite Fügepartner weiterhin auch aus einem zu Fügepartner 1 verschiedenen Kunststoff, aus Keramik oder etwa auch aus einem Naturstoff, z.B. Holz, sein.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Aufgrund der geringen Zykluszeiten und hohen Automatisierbarkeit sind derartige Prozesse generell für den hybriden Leichtbau, etwa im Automobilbau, interessant. Die Technologien befinden sich aktuell noch an der Schwelle zur Industrialisierung, werden aber zukünftig in Multi-Material-Anwendungen verstärkt Anwendung finden.

Technologiebezeichnung: 3.4 Organoblechumformung

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Sogenannte Organobleche sind flächige, vorkonsolidierte thermoplastische Halbzeuge mit textiler Endlosfaserverstärkung. Als Matrixwerkstoff sind etwa thermoplastische Kunststoffe wie PA, PP, PET oder auch PEEK für Hochleistungsanwendungen üblich. Die textile Verstärkung besteht meist aus einer oder mehreren Gewebelagen, kann aber z.B. auch als Gelege oder Gestrick ausgeführt sein. Die Herstellung von Organoblechen erfolgt in der Regel kontinuierlich auf einer Doppelbandpresse.

Für die presstechnische Verarbeitung von Organoblechen ist in obiger Abbildung ein üblicher Weg dargestellt. Zunächst erfolgt das flächige Vorheizen des Organobleches in einem Infrarot-Strahlungsfeld, bis die Thermoplastmatrix über ihre Schmelztemperatur erwärmt ist. Das Organoblech befindet sich dabei in einem Fixierrahmen, der z.B. von einem Handlingroboter geführt wird.

Nach Übergabe des vorgewärmten Halbzeuges an eine Schnellhubpresse erfolgt die presstechnische Verarbeitung in einem zweiteiligen Formwerkzeug, welches konstant unterhalb der Schmelztemperatur des Thermoplastwerkstoffes temperiert ist. Somit setzt unmittelbar nach der Umformung auch die Bauteilkonsolidierung ein, was sehr schnelle Taktzeiten von unter einer Minute ermöglicht.

Am Prozessende erfolgt die Bauteilentnahme, so dass im Anschluss gegebenenfalls besäumt, bzw. weiterverarbeitet werden kann.

Zur Herstellung hybrider Bauteile erfolgt die Organoblechverarbeitung zunehmend nicht als alleiniger Prozess, sondern oft zeitgleich z.B. mit der Umformung, bzw. Anformung, metallischer Bleche und Einleger im gleichen Werkzeug. Üblich ist auch die parallele Umformung von extrudierten LFT(Langfaserthermoplast)-Pressmassen etwa für eine Rippenverstärkung. Wahlweise kann auch eine weitere Kontur über ein mit dem Presswerkzeug kombiniertes Spritzgussaggregat erfolgen.



Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Eine der wesentlichen Prozessrandbedingungen ist die stoff- und formschlüssige Verbindung der Einleger mit dem angespritzten Kunststoff. Wesentliche Maßnahmen zur Verbesserung der Verbundhaftung sind: Nutzung gleicher Grundpolymere im Organoblech und LFT-, bzw. Spritzgießkunststoff, Ausbildung von zusätzlichen formschlüssigen Verbindungselementen durch Durchbrüche und Hinterschnitte im Einleger.

Die Recyclingfähigkeit ist bei Nutzung von Thermoplasten in Verbindung mit Metallen und Faserverstärkung generell gegeben.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Typische Organobleche besitzen eine Matrix aus thermoplastischem Kunststoff wie z.B. PA oder PP, für Hochleistungsanwendungen z.B. auch PEEK. Die textile Verstärkung besteht meist aus Glasfasern oder Kohlenstofffasern; auch Naturfasern werden zunehmend eingesetzt.

Angeformte LFT- oder Spritzgussmassen sollten den identischen thermoplastischen Matrixwerkstoff wie das Organoblech aufweisen.

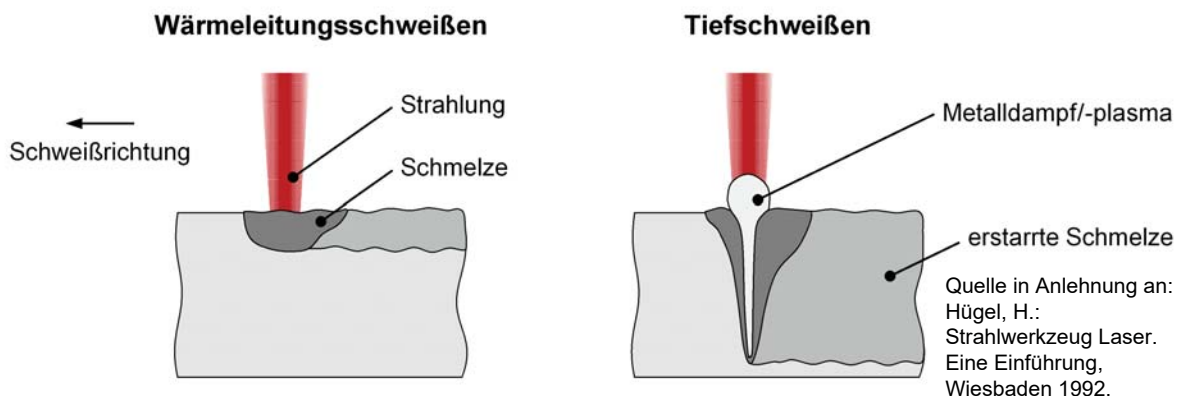
Bei der prozessimmanenten Verbindung mit metallischen Blechen und Einlegern ist auf eine entsprechende Oberflächenbehandlung (Reinigen, Strahlen, Beschichten etc.) zur Sicherstellung der Verbundhaftung zu achten.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Aufgrund der geringen Zykluszeiten und hohen Automatisierbarkeit sind derartige Pressprozesse generell für den hybriden Leichtbau im Automobilbau interessant. Der hohe Invest in Anlagentechnik und Formwerkzeug amortisieren sich in der Regel nur bei hohen Stückzahlen. Serienanwendungen finden sich bereits im Fahrzeuginterieur etwa in Sitzstrukturen, Türmodulen und Verkleidungen.

Technologiebezeichnung: 4.1.1 Strahlbasiertes Schmelzschweißen

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Bei strahlbasierten Schmelzschweißverfahren erfolgt der Wärmeeintrag durch eine fokussierte Strahlung, die im Grundwerkstoff absorbiert wird und diesen dadurch aufschmilzt. Die Energie wird dabei üblicherweise in Form von Laser- oder Elektronenstrahlung bereitgestellt.

Beim Laserstrahlschweißen wird zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffs elektromagnetische Strahlung eingesetzt, wobei das Wellenlängenspektrum kommerziell erhältlicher Systeme sich von ultravioletter über optische bis hin zu infraroter Strahlung erstreckt. Beim Elektronenstrahlschweißen wird die Energie in Form von hochbeschleunigten und gebündelten Elektronen bereitgestellt. Im Gegensatz zur Laserstrahlung ist für die Erzeugung und Ablenkung des Elektronenstrahls üblicherweise ein Hochvakuum erforderlich.

Strahlschweißverfahren können durch zwei charakteristische Prozessregime beschrieben werden. Im wärmeleitungsdominierten Prozessregime (siehe Abbildung links) wird die Energie oberflächennah absorbiert und in erster Linie durch Konduktion in den Werkstoff abgeleitet. Die Prozesscharakteristika resultieren typischerweise in einer geschlossenen und regelmäßigen Nahtoberfläche. Übersteigt die Intensität die Tiefschweißschwelle, wird lokal Werkstoff verdampft und es bildet sich eine Kapillare aus (s. Abbildung rechts). Infolge von Mehrfachreflexionen innerhalb der Kapillare wird ein größerer Teil der Strahlung absorbiert, wodurch die Prozesseffizienz verglichen mit dem wärmeleitungsdominierten Regime zunimmt. Dadurch können Aspektverhältnisse (Verhältnis der Schweißnahttiefe zu -breite) von deutlich größer als 1 erzielt werden. Aufgrund der daraus resultierenden höheren Schmelzbaddynamik können im tiefschweißdominierten Regime Prozessinstabilitäten auftreten, die etwa in einer rauhen Nahtoberfläche, in Schweißspritzern oder in Prozessporen münden.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Der Laserstrahlschweißprozess wird wesentlich durch die Strahleigenschaften bestimmt. Wichtige Größen sind die Laserleistung, der Fokusbereich, die Rayleigh-Länge (Fokuslänge) und die Betriebsart (kontinuierlich oder gepulst). Wird ein Scannersystem zur Strahlablenkung eingesetzt, stehen weitere Freiheitsgrade für die Prozessführung zur Verfügung, etwa durch eine überlagerte Oszillationsbewegung. Entscheidenden Einfluss nimmt zudem der Absorptionsgrad, der unter anderem von der Wellenlänge und dem Werkstoff abhängig ist. Beim Elektronenstrahlschweißen nimmt das für die Strahlerzeugung notwendige Hochvakuum wesentlichen Einfluss. Daneben ist für das Verhältnis der Nahttiefe zur Nahtbreite die Beschleunigungsspannung ein wesentlicher Prozessparameter. Für den Einsatz ist eine mit zunehmender Beschleunigungsspannung wachsende Röntgenstrahlung zu beachten.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Für das strahlbasierte Fügen eignen sich in der Regel alle schmelzschweißbaren Metalle, insbesondere die Werkstoffe Titan, Magnesium, Aluminium und Stahl (plus deren Legierungen). Mischverbindungen zwischen diesen Werkstoffgruppen sind denkbar, erfordern jedoch meist Zusatzmaßnahmen, wie z.B. eine adaptierte Prozessführung, eine angepasste Strahlform oder den Einsatz von Zusatzwerkstoff. Gängiger sind Mischverbindungen von Legierungen innerhalb der Werkstoffgruppen.

Mittels Laserstrahlung können zudem Thermoplaste gefügt werden. Dabei ist eine Kompatibilität der Kunststoffe hinsichtlich der Polarität von großer Bedeutung. Die hohen Leistungsdichten beim Elektronenstrahlschweißen ermöglichen die Bearbeitung hochschmelzender Metalle, das Hochvakuum zudem die Bearbeitung reaktiver Metalle. Ferner können Graphit und Keramiken gefügt werden.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

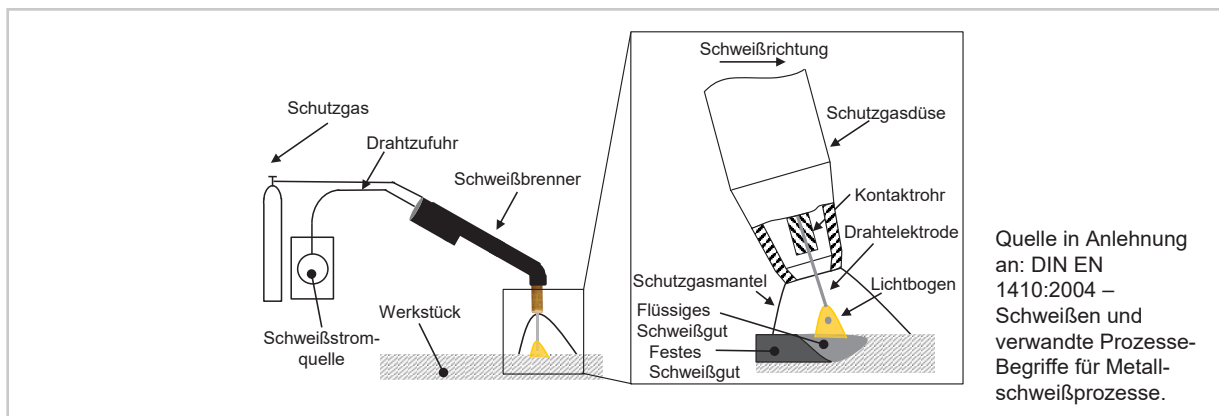
Aufgrund einer hohen Produktivität, einer guten Automatisierbarkeit und einer hohen Flexibilität hinsichtlich der Gestaltung der Fügestelle finden strahlbasierte Schweißverfahren eine hohe industrielle Anwendung.

Laserstrahlschweißen hat sich zu einem etablierten Verfahren entwickelt und wird beispielsweise im Automobilbau, in der Luft- und Raumfahrtindustrie sowie im allgemeinen Maschinenbau vielfältig eingesetzt.

Das Elektronenstrahlschweißen eignet sich aufgrund der guten Fokussierbarkeit und Ablenkbarkeit der Strahlung insbesondere für das Präzisionsschweißen empfindlicher Kleinkomponenten, für das Fügen hochschmelzender Metalle sowie für Anwendungen im Dickblechbereich (für Wandstärken von mehr als 300 mm bei Aluminiumlegierungen).

Technologiebezeichnung: 4.1.2 Lichtbogenbasiertes Schmelzschiessen

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Beim Lichtbogenschweißen liefert ein elektrischer Lichtbogen, der zwischen einer Elektrode und dem Grundwerkstoff brennt, die zum Aufschmelzen erforderliche Energie. Die Elektrode kann hierbei abschmelzend sein und als Zusatzwerkstoff agieren oder nicht abschmelzend sein. Der Lichtbogen entsteht durch das Anlegen einer Spannung über die Schweißstromquelle. Für den Zündvorgang ist in der Regel eine Annäherung von Elektrode und Grundwerkstoff erforderlich. Durch den Lichtbogen wird der Stromkreis geschlossen, ein Kurzschluss entsteht. Die charakteristischen Temperaturen beim Lichtbogenschweißen überschreiten die Schmelztemperaturen der meisten Metalle deutlich. Die wichtigsten Verfahren sind das Lichtbogenhandschweißen, das Schutzgasschweißen mit zahlreichen Verfahrensvarianten und das Unterpulver-Schweißen. Bei einer abschmelzenden Elektrode (z.B. Lichtbogenhandschweißen und Metallschutzgasschweißen) bildet sich an der Elektrodenspitze ein Schmelztropfen, welcher kurzzeitig eine Verbindung zwischen der Elektrode und dem Grundwerkstoff herstellt. Sobald der Schmelztropfen abreißt, wird der Lichtbogen erneut gezündet und der Vorgang beginnt von Neuem.

Die abschmelzenden Elektroden für das Lichtbogenhandschweißen bestehen aus einem metallischen Kern und einer Umhüllung (z.B. Kalk-, Flussspat, Quarz, Metalloxide, etc.). Die Umhüllung schmilzt ebenfalls ab und verdampft teilweise, wobei hauptsächlich Schlacke und Schutzgase entstehen. Diese dienen vor allem dem Schutz der Schmelze vor chemischen Reaktionen mit der Umgebung. Die abschmelzenden Elektroden für das Metallschutzgasschweißen besitzen in der Regel keine Umhüllung, wodurch die Verwendung eines zusätzlichen Schutzgases erforderlich ist. Die metallischen Elektroden dienen dabei als Zusatzwerkstoff. Die nicht abschmelzenden Elektroden (z.B. Wolfram-Inertgas-Schweißen) müssen aufgrund der hohen Temperaturen durch ein inertes Schutzgas vor Oxidation geschützt werden.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Beim Lichtbogenschweißen sind – abhängig vom Verfahren – eine Vielzahl von unterschiedlichen Parametern von Relevanz. Diese umfassen u.a. den Schweißstrom, die Schweißspannung, die Lichtbogenlänge oder, sofern vorhanden, die Art des Schutzgases bzw. die Art und zugeführte Menge an Schweißzusatzwerkstoff. Grundsätzlich werden, je nach Werkstoff, sowohl Wechsel- als auch Gleichstromquellen eingesetzt.

Zur Bestimmung des Arbeitsbereichs werden Strom-Spannungs-Kennlinien der Stromquelle, die sogenannten Lichtbogenkennlinien, herangezogen. Diese geben die Abhängigkeit zwischen Strom und Spannung im Lichtbogen bei einer konstanten Lichtbogenlänge an.

Da beim lichtbogenbasierten Schmelzschweißen nur metallische Werkstoffe gefügt werden, besteht grundsätzlich eine gute Recyclingfähigkeit der Produkte.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Das Verfahrensprinzip des Lichtbogenschweißens setzt die elektrische Leitfähigkeit der Fügepartner voraus. Aufgrund dessen ist das Fügen von Duroplasten, Thermoplasten, Holz und Keramiken nicht möglich.

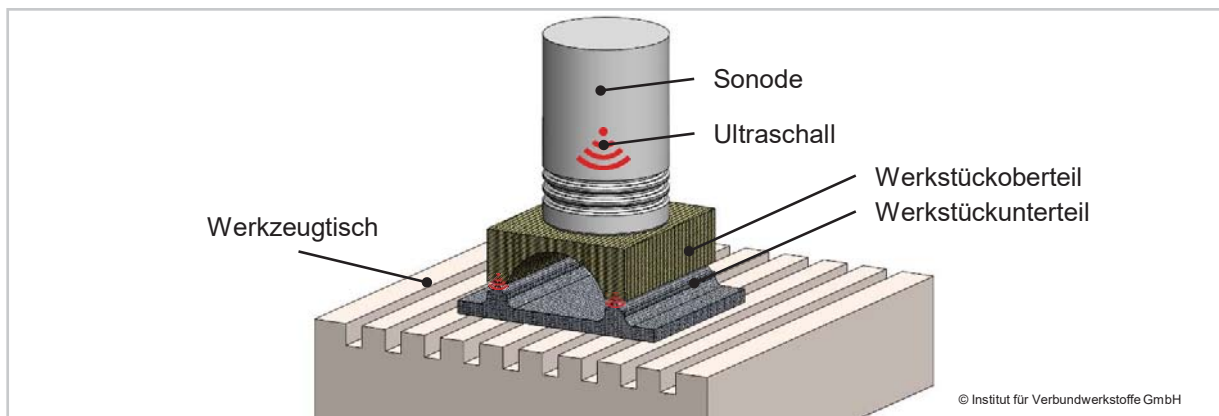
Das Lichtbogenschweißen von gleichartigen Verbindungen aus Stahl-, Aluminium- oder Titanlegierungen ist unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen und Einschränkungen der jeweiligen Legierung möglich. Beim Lichtbogenschweißen von artverschiedenen Werkstoffen entstehen häufig intermetallische Phasen, deren Entstehung durch eine geeignete Prozessführung sowie eine entsprechende Auswahl von Zusatzwerkstoffen gezielt beeinflusst werden kann. In der Regel werden nur Werkstoffe der gleichen Werkstoffgruppe, jedoch durchaus mit unterschiedlicher Legierungszusammensetzung, miteinander verschweißt.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Das Lichtbogenschweißen zählt zu den etablierten Schweißverfahren und wird daher in vielseitigen Anwendungen in unterschiedlichen Branchen eingesetzt. Dazu zählen u.a. die Transportmittelindustrie (Fahrzeug-, Schiff-, Schienenfahrzeugbau, sowie Luft- und Raumfahrtindustrie), der Stahl- und der allgemeine Maschinen-, bzw. Anlagenbau, sowie der Brücken-, Rohrleitungs-, Behälter- und Kraftwerksbau.

Technologiebezeichnung: 4.2.1 Ultraschallschweißen

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Beim Ultraschallschweißen werden hochfrequente Schwingungen im Frequenzbereich zwischen 20 und 70 kHz eingesetzt. Die Amplitude der Schwingungen liegen im Mikrometerbereich und verursachen somit mikromechanische Bewegungen zwischen den Fügepartnern. Der Energieeintrag erfolgt primär durch Grenzflächenreibung, wodurch das Ultraschallschweißen zu den Reibschweißverfahren zählt. Weitere Erwärmungsmechanismen sind eine Reflexion der Schwingungen in der Fügezone, aber auch Energieverluste im Material der Schweißpartner durch innere Molekularreibung, bzw. Hystereseverluste. Die elektrische Leistung wird durch einen Konverter in mechanische Schwingungen konvertiert. Diese Schwingungen werden auf die Sonode übertragen, die ihrerseits die gewünschte Amplitude herstellt und die Ultraschallschwingungen in die Bauteile einbringt. Die Sonode ist auf die jeweilige Ultraschallfrequenz ausgelegt und kann auf die Fügepartner in Form und Material angepasst werden. Zur Kontaktverbesserung zu den Werkstücken besitzt die Sonotrode meist eine strukturierte Oberfläche. Das Ultraschallschweißen lässt sich weiter in das Nah- und Fernfeldultraschallschweißen untergliedern. Die Unterscheidung wird anhand des Abstandes der Sonodenstirn von der Fügezone getroffen. Ist dieser Abstand größer als 6 mm dann spricht man von Fernfeldultraschallschweißen. Beim Kunststoff-Ultraschallschweißen wird im Gegensatz zum Metall-Ultraschallschweißen die Schwingung meist senkrecht zur Fügezone eingeleitet.

Ein großer Vorteil des Ultraschallschweißens ist die Wärmeerzeugung direkt in der Fügezone. Somit werden angrenzende Werkstoffbereiche seltener durch die entstehende Wärme beeinflusst.

Die Fügezonegeometrie kann statisch in Form einer Punktschweißung oder kontinuierlich mit einer sich abrollenden Sonode gestaltet sein. Für beide Varianten gilt, dass die absolute Schweißfläche aufgrund des begrenzten Energieeintrags ebenfalls stark eingeschränkt ist.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Bei Kunststoffen findet die Einleitung der Schwingungsamplitude häufig vertikal zur Fügezone statt. Wird der Kunststoff schmelzflüssig steigt der Dämpfungskoeffizient, wodurch zusätzliche Wärmeenergie in der Fügezone entsteht. Nach dem Abkühlen ist eine stoffschlüssige Verbindung entstanden.

Das Fügen von Faserkunststoffverbunden (FKV) basiert wie beim Fügen unverstärkter Kunststoffe auf dem innigen Kontakt der zu fügenden Oberflächen und anschließender Interdiffusion der Makromoleküle bei zeitgleicher Konsolidierung.

Der Schwingungseintrag bei Metallen findet horizontal zur Fügezone statt. Das physikalische Grundprinzip beim Fügen basiert auf dem plastischen Fließen der Werkstoffe was zu einem Verzahnen und Verhaken der Werkstoffe ineinander führt. Anders als bei Kunststoffen werden Metalle unterhalb der Schmelztemperatur gefügt.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Mit dem Ultraschallschweißen können thermoplastische Kunststoffe, Aluminium- und Kupferlegierungen auch untereinander gefügt werden.

Bei Kunststoffen eignen sich amorphe Thermoplaste besser als teilkristalline. Amorphe Thermoplaste verfügen über keine kristalline Struktur, die die eingebrachte Energie teilweise absorbieren würde und so die Aufheizzeit verlängert.

Das Ultraschallschweißen wurde bei einigen Studien auch zum Hybridfügen von FKV und Metallen eingesetzt und als tauglich bewertet. Um eine Verbindung der Fügepartner zueinander zu erzeugen ist häufig eine Oberflächenvorbehandlung der Metallteile erforderlich. Die Amplitude der Sonode ist in diesem Fall wie beim Metall-Ultraschallschweißen parallel zur Fügezone ausgerichtet.

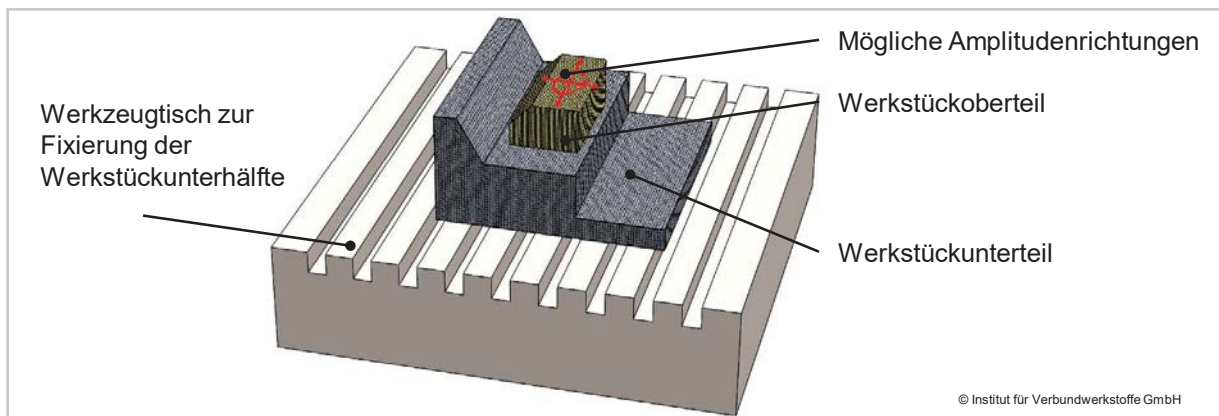
Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Das Ultraschallschweißen eignet sich insbesondere wenn kurze Prozesszeiten und eine hohe Prozesssicherheit gefragt sind. Beim Ultraschallschweißen sind keine zusätzlichen Additive oder Zusatzstoffe, wie z.B. Lösungsmittel, erforderlich. Die Schweißnahtqualität ist über den Prozess hinweg gleichbleibend gut, die Festigkeit der Verbindung reproduzierbar.

Anwendungsbeispiele von vibrationsgeschweißten Hybridverbindungen sind Fahrzeugrückleuchten, wasserdicht verschweißte PTFE Membrane, Stoßdämpfer oder angeschweißte Nippel an Spritzgussteilen.

Technologiebezeichnung: 4.2.2 Vibrationsschweißen

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Das Vibrationsschweißen ist ein in der Industrie etabliertes Verfahren zum Fügen von verschiedenen Materialkombinationen. Das Vibrationsschweißen zählt zu den Reibschweißverfahren.

Die Wärmeenergie zum Fügen der Bauteile in der Fügezone wird infolge von Friktion durch oszillierende Bewegungen der Bauteile zueinander erzeugt. Diese Bewegung kann linear, rotierend oder orbital ausgeführt werden. In der Regel geschieht dies dadurch, dass eine der zu verbindenden Werkstückhälften für einen zielgerichteten Energieeintrag steif fixiert wird, während sich die andere Werkstückhälfte bewegt. Zunächst werden die Schweißpartner in das Schweißwerkzeug eingelegt und positioniert. Auf ein aufwändiges Reinigen oder sonstige Oberflächenvorbehandlungen kann meist verzichtet werden. Danach wird der Hubtisch angehoben, bis sich die Fügeflächen berühren. Nun wird der Schweißdruck aufgebracht und die Vibrationsphase gestartet. Die durch Friktion entstehende Reibungswärme erweicht anfänglich die in Kontakt stehenden Schweißpartner in der Fügezone. Nach dem Aufschmelzen der Schweißpartner tritt neben der Reibungserwärmung auch der Effekt der inneren Erwärmung durch Materialschermung (Schererwärmung) auf. Durch den Schweißdruck werden im Fall von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) Fasern und Schmelze verdrängt und es entsteht ein sog. Schweißwulst oder Schweißaustrieb. Es entsteht ein Fügeweg, der mit entsprechenden Messaufnehmern erfasst werden kann. Nach dem Beenden der Vibration bleibt der Prozessdruck noch einige Sekunden erhalten (Haltedruck), anschließend erstarrt der Werkstoff, sodass eine stoffschlüssige Verbindung entsteht. Für kleinere Bauteile kommt häufiger das artverwandte Rotationsreibschweißen zum Einsatz. Bei mittleren bis großen Bauteilen eignet sich eher das Vibrationsschweißen. Die Hauptvorteile des Vibrationsschweißens sind hohe Produktionsraten infolge sehr kurzer Zykluszeiten. Vorteilhaft ist zudem die Möglichkeit eine große Anzahl an Komponenten simultan zu schweißen.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

In Hinblick auf die Taktzeiten ist das Vibrationsschweißen schneller als das Heizelementschweißen und langsamer als das Ultraschallschweißen. Die Frequenz mit der die Bauteile relativ zueinander bewegt werden liegt in aller Regel zwischen 80 Hz und 250 Hz. Die wichtigsten Prozessparameter sind Vibrationszeit, -amplitude, Nachwirkzeit, Schweißdruck und Nachwirkdruck. Im Vergleich von verstärkten zu unverstärkten Thermoplasten ist die Fügezeit ca. doppelt so lange und der Fügedruck doppelt so hoch.

Diese Technik eignet sich nicht zum Schweißen von unebenen Fügezonegeometrien und verursacht Faserverzerrungen / -verdrängung an der Schnittstelle. Da sich die Schwingamplitude im Bereich von Millimetern bewegt besteht eine Geometrieabhängigkeit, die sich nachteilig auswirkt.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Für den Bereich der unverstärkten oder kurzfaserverstärkten Kunststoffe handelt es sich beim Vibrationsschweißen um ein etabliertes Verfahren das für nahezu alle thermoplastischen Materialien einsetzbar ist.

Das Vibrationsschweißen von thermoplastischen FKV ist hinreichend untersucht und einsatzfähig. Die erreichbaren mechanischen Verbindungseigenschaften stellen sich sehr vorteilhaft dar, insbesondere wenn eine Durchdringung der Verstärkungsfasern der einzelnen Fügepartner erreicht werden kann.

Das hybride Vibrationsschweißen von Metallen mit thermoplastischen FKV ist noch in der Entwicklungsphase; es wurde auch hier gezeigt, dass gute Verbindungsqualitäten erreicht werden können. Bei den metallischen Fügepartnern ist jedoch eine mechanische, chemische, elektrochemische oder elektrische Oberflächenvorbehandlung erforderlich.

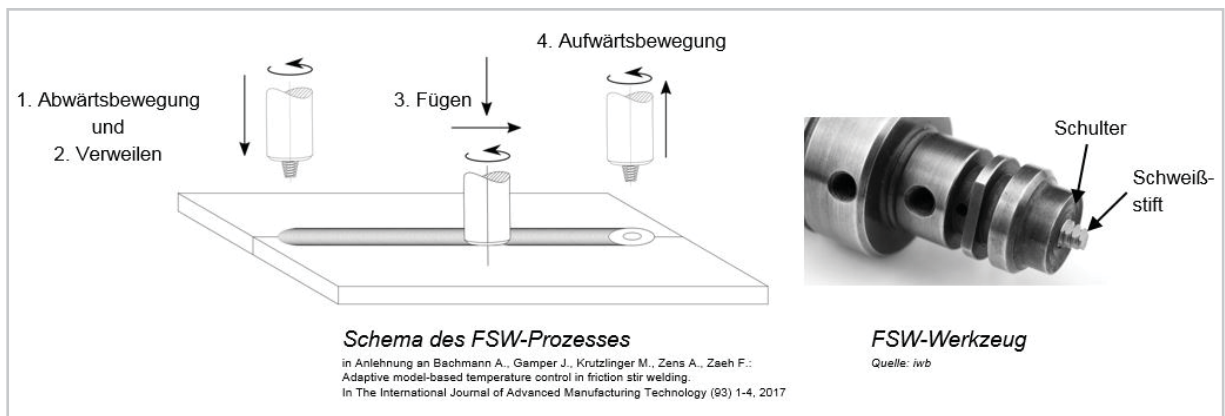
Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Das Vibrationsschweißen wird besonders in der Automobilindustrie seit Mitte der 70er Jahre als ein Standardverfahren eingesetzt. Bauteilbeispiele sind das Schweißen von Ansaugrohren, Stoßfängern und Seitenverkleidungen.

Allgemein eignet sich das Vibrationsschweißen für die Großserie. Bei vielen Anwendungen dürfen die Teile beim Fügen nicht verschmutzt werden. Da das Vibrationsschweißen lediglich einen geringen Partikelabrieb erzeugt ist es auch zur Herstellung von Hygiene- und Medizinartikeln geeignet.

Technologiebezeichnung: 4.2.3 Rührreibschweißen
(engl.: Friction Stir Welding, FSW)

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Das Rührreibschweißen ist den Pressschweißverfahren zugeordnet. Nach der gültigen Norm DIN EN ISO 25239 wird das FSW als Fügeverfahren beschrieben, bei dem durch ein rotierendes Werkzeug, das sich entlang der Schweißnaht bewegt, eine Schweißnaht durch Reibungswärme und Mischen von Werkstoff im plastischen Zustand hergestellt wird.

Die Erzeugung einer FSW-Naht lässt sich im Wesentlichen in die vier Phasen Abwärtsbewegung, Verweilen, Schweißen und Aufwärtsbewegung einteilen. Dabei wird ein typischerweise rotationssymmetrisches, verschleißbeständiges Werkzeug verwendet, das durch Schulter und Schweißstift charakterisiert ist. Zur Verbesserung des Werkstoffflusses um das Werkzeug herum werden die Schulter, bzw. der Schweißstift, meist durch Geometriemerkmale, wie z.B. ein Gewinde oder seitliche Abflachungen, profiliert.

Während der Eintauchphase wird das rotierende Werkzeug unter einer Axialkraft in das Werkstück hineingedrückt, bis die Schulter auf der Werkstückoberfläche aufliegt. Dabei wird Wärme durch Reibung und plastische Deformation des Werkstoffs generiert, wodurch dieser in der Prozesszone lokal entfestigt wird.

In der zweiten Phase verweilt das rotierende Werkzeug am Nahtanfang, wobei der entfestigte Werkstoffbereich um das Werkzeug herum größer wird. Die Verweildauer ist so zu wählen, dass der Werkstoff ausreichend entfestigt ist, bevor die Vorschubbewegung des Werkzeugs entlang der Fügelinie einsetzt.

Während des eigentlichen Schweißvorgangs wird das rotierende Werkzeug mit einer Vorschubgeschwindigkeit entlang des Fügestoßes bewegt, wodurch die Schweißnaht erzeugt wird. Der Fügeprozess findet vollständig in der festen Werkstoffphase beider Fügepartner statt, d.h. es tritt keine Schmelze auf.

Am Nahtende wird das rotierende Werkzeug entlang seiner Rotationsachse aus dem Werkstück herausgezogen. Im Werkstück verbleibt in der Regel der Negativabdruck des Werkzeugs, das sogenannte Endloch.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Wesentliche Eingangsparameter des Prozesses stellen das Bauteil, die Spanntechnik, die verwendeten Schweißparameter sowie die Werkzeugkonfiguration dar.

Neben den Eigenschaften der zu schweißenden Bauteile hat auch die zu fertigende Fügegeometrie einen großen Einfluss. Das Verfahren wird vor allem für Stumpfstoßverbindungen eingesetzt, jedoch sind auch Überlappstöße, T-Stöße und Kehlnähte möglich. Die Hauptaufgabe der Spanntechnik ist die Fixierung der Fügepartner relativ zueinander und zur Maschine, da während des Schweißprozesses hohe Prozesskräfte auftreten. Bedeutende Schweißparameter stellen die Drehzahl, die Vorschubgeschwindigkeit, der Anstellwinkel sowie die Eintauchtiefe, bzw. die Axialkraft, dar. Wesentliche Geometriemerkmale des Werkzeuges sind die Schweißstiftlänge, der Schweißstiftdurchmesser sowie der Schulterdurchmesser.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Die Norm DIN EN ISO 25239 gilt in erster Linie für das Rührreißschweißen von Aluminiumlegierungen, da diese den größten Teil der kommerziellen Anwendung des Verfahrens ausmachen. Hier können nicht nur Verbindungen zwischen zwei identischen Aluminiumlegierungen erzeugt werden, sondern auch Mischverbindungen, wie beispielsweise aus einer Aluminium-Knetlegierung und einer Aluminium-Gusslegierung.

Jedoch kann das Rührreißschweißen nicht nur für Aluminium und seine Legierungen, sondern auch für Werkstoffe mit höheren Schmelzpunkten zum Einsatz kommen. Hier sind auch Mischverbindungen elementar unterschiedlicher Werkstoffe möglich. Diese Art von Verbindungen besitzen jedoch eine geringere technologische Reife und sind noch nicht industriell verbreitet. Möglich sind hier beispielsweise Werkstoffe wie Stahl, Kupfer, Titan, Magnesium oder Kunststoffe.

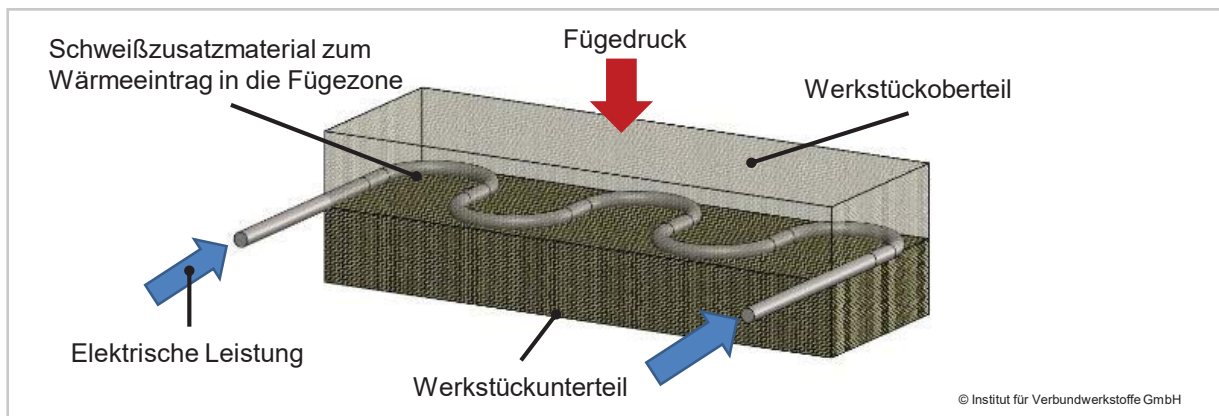
Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Das FSW wird vornehmlich an großen, ebenen Bauteilen mit ein- oder zweidimensionalen Schweißnähten eingesetzt. Anwendungen finden sich vor allem in der Transportbranche wie im Schiffsbau, im Schienenfahrzeugbau, in der Luft- und Raumfahrtindustrie sowie im Automobilbau. In anderen Branchen wie in der Medizintechnik oder in der Lebensmittelindustrie geht der Trend in Richtung von zwei- und dreidimensionalen Schweißnähten.

Als Anlagen kommen dabei vor allem Rührreißschweißanlagen zum Einsatz. Jedoch können je nach Anwendungsfall auch Anlagen ähnlich zu Fräs- oder Bearbeitungszentren oder Schwerlastroboter mit ausreichender Steifigkeit verwendet werden.

Technologiebezeichnung: 4.2.4 Widerstandsschweißen

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Das Widerstandsschweißen ist in der Metallindustrie ein etabliertes Verfahren. Bei Polymeren oder Faserkunststoffverbunden (FKV) muss in der Regel zum Schweißen ein elektrisch leitendes Schweißzusatzmaterial in der Fügezone eingesetzt werden. Das Zusatzmaterial wird von einer elektrischen Leistung durchströmt, wodurch es sich infolge von Widerstandsverlusten erwärmt. Durch die entstehende Wärme in der Fügezone schmilzt das thermoplastische Polymer bei gleichzeitig appliziertem Fügedruck. Es entsteht eine Verbindung der Bauteile durch Polymerdiffusion. Das Schweißzusatzmaterial muss entsprechend dem Anwendungsfall gewählt werden. Mögliche Zusatzmaterialien sind unter anderem Metalle oder Kohlenstofffasern, beziehungsweise Gewebe aus diesen Materialien. Da das Zusatzmaterial nach dem Schweißen in der Fügezone verbleibt, muss darauf geachtet werden, dass keine negativen Wechselwirkungen, wie etwa Korrosion, zwischen den Materialien entstehen.

Die Wärme wird durch das Zusatzmaterial direkt in der Fügezone erzeugt, so dass nur der fügezonennahe Polymeranteil aufgeschmolzen werden muss. Mit der lokalen Wärmeeinbringung können die äußeren Oberflächenqualitäten der Bauteile erhalten bleiben. Zur Vermeidung eines Kurzschlusses beim Schweißen von kohlenstofffaserverstärkten Polymeren muss das Schweißzusatzmaterial von den Kohlenstofffasern elektrisch entkoppelt sein. Dies wird durch eine zusätzliche Thermoplastfolie zwischen Schweißzusatzmaterial und Werkstück realisiert. Im Hinblick auf die Bauteilgeometrie eignet sich das Verfahren auch für große, komplexe Strukturen, die mit einer guten Verbindungsqualität kontinuierlich gefügt werden müssen. Zu beachten ist jedoch, dass der Fügedruck über die gesamte Fügezone und während des gesamten Prozessablaufs aufrechterhalten werden muss. Beim Impulswiderstandsschweißen wird die Leistung in Form von Impulsen eingebracht und ist somit energieeffizienter. Das Widerstandsschweißen ist schnell, einfach zu regeln und sauber.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Wichtige Eingangsgrößen bei dem Prozess sind der Widerstand des Schweißzusatzmaterials, die eingebrachte Leistung, die Wärmeleitfähigkeit der Fügepartner, Schweißzeit, Faserorientierung, Gestalt des Heizelements sowie der Fügedruck. Eine geeignete Prozesssteuerung zum Heizen und Kühlen der Verbindung wirkt sich positiv auf die Verbindungsqualität und somit auf die mechanische Festigkeit aus.

Die Recyclingfähigkeit der geschweißten Bauteile ist individuell abhängig von der Art der eingesetzten Werkstoffe und deren Trennbarkeit.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Das Widerstandsschweißen artgleicher Werkstoffe mit der Fähigkeit der Schmelzbildung wird primär in der Automobilindustrie und der Luftfahrt eingesetzt. Gängige Werkstoffe sind Metalle und Thermoplaste.

Das Schweißen von artfremden Thermoplasten, sowohl faserverstärkt als auch unverstärkt, wurde erfolgreich durchgeführt. In diesem Fall ist vor allem auf die Materialkompatibilität zu achten.

Das Schweißen artfremder Metalle, wie Aluminium und Kupfer, ist möglich.

Bei metallischen Hybridverbindungen mit Kunststoffen oder FKV muss besonders darauf geachtet werden, dass das Schweißzusatzmaterial in der Fügezone keinen elektrisch leitenden Kontakt zu dem Metall bildet. Um eine Anhaftung von Polymer am Metall zu gewährleisten, muss das Metall einer mechanischen oder chemischen Oberflächenvorbehandlung unterzogen werden.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

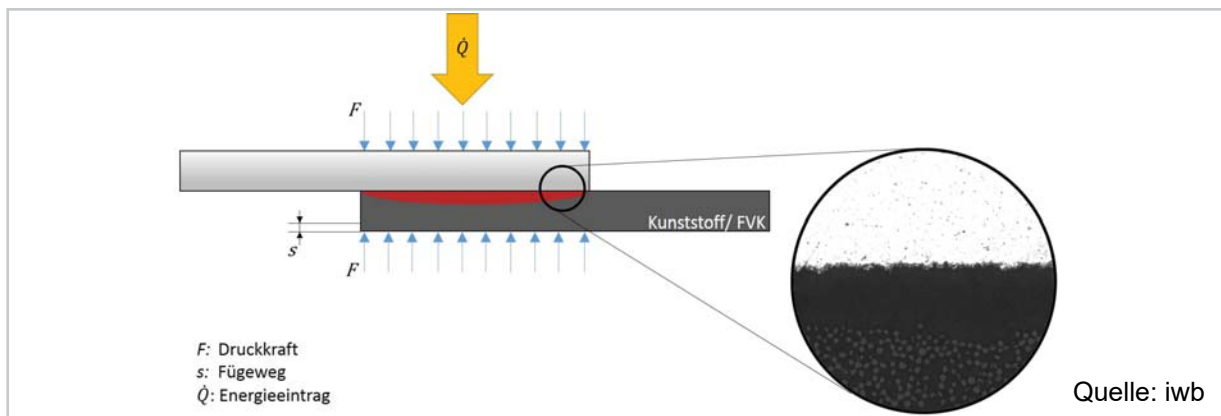
Das Widerstandsschweißen hat in der Automobilindustrie Anwendung gefunden und wird beim Schweißen von Stoßfängern und anderen Fahrzeugteilen sowie beim Schweißen von Kunststoffrohren, Behältern und medizinischen Geräten eingesetzt.

Arias und Ziegmann[1] haben durch Impulswiderstandsschweißen eine Verstärkungsrippe mit einem aerodynamischen Spoiler verbunden.

[1] Arias, M, Ziegmann, G. The impulse resistance welding: a new technique for joining advanced thermoplastic composite parts. In: 41st International SAMPE Symposium, 1996, pp. 1361–1371 Anaheim, CA, USA, 24-28 March 1996

Technologiebezeichnung: 4.3 Thermisches Pressfügen

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Die Technologie des thermischen Pressfügens eignet sich zur Herstellung unterschiedlicher hybrider Verbindungen.

Das Grundprinzip basiert auf dem Verpressen zweier Fügepartner, von denen einer durch Einwirkung von Temperatur und Druck plastifiziert und eine stoff- bzw. formschlüssige Verbindung eingeht.

Um hohe Verbindungsfestigkeiten zu erzielen, kann dem Fügeprozess eine Oberflächenvorbehandlung, z.B. durch verschiedene Strahltechniken, Laserstrukturierung, Plasma- oder Coronavorbehandlung, vorgeschaltet werden. Besonders die Anwendung von Laserstrahlung bietet dabei Vorteile hinsichtlich Flexibilität und Automatisierbarkeit.

Nach dem Erwärmen wird der Fügepartner mit der geringeren Viskosität um den Weg s in die Oberflächenstruktur des formstabileren Fügepartners gedrückt. Je nach Oberflächenbeschaffenheit des Verbundpartners kann der plastifizierte Werkstoff Strukturen und Hinterschnitte füllen und anbinden.

Die Energieeinbringung in die Fügezone kann über verschiedene physikalische Prinzipien realisiert werden. Der Stand der Technik umfasst innere Reibung (Rotation oder Ultraschall), äußere Reibung (Hochfrequenz oder Vibration), Strahlung (IR-Strahler oder Laserstrahlung), Konvektion (Warmgas), Wärmeleitung (Heizelemente oder Heizwendel) oder Induktion.

Die Haftmechanismen des Verbundes lassen sich in Abhängigkeit der Werkstoffe und deren Oberflächenbeschaffenheit auf Stoff- und Mikroformschluss zurückführen.

Zum Fügen ist eine Vorrichtung zur Energie- und Druckeinbringung, sowie zur Fixierung während des Prozesses notwendig.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Eine wesentliche Prozessrandbedingung ist die stoff- und formschlüssige Verbindung der beiden Fügepartner. Wichtige Parameter zum thermischen Fügen sind dabei der Fügedruck und die Fügetemperatur. Werkstoffseitig spielen die thermischen Eigenschaften, wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und die Verarbeitungstemperatur, aber auch die Fließeigenschaften wie die Viskosität eine maßgebliche Rolle. Die Viskosität ist abhängig von Fasergehalt, Temperatur, Druck und Schergeschwindigkeit während des Fügevorgangs. Daneben hat die Oberflächenbeschaffenheit der Fügeflächen Auswirkung auf den Wärmeübergang zwischen den Fügepartnern. Zum Fügen sind keine weiteren Hilfsstoffe, wie Haftvermittler oder Klebstoffe, nötig.

Bei Nutzung von thermoplastischen Werkstoffen in Verbindung mit Metallen ist die Recyclingfähigkeit generell gegeben.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Typischerweise kommen aufgrund des Leichtbaugedankens verschiedene Materialkombinationen in Betracht. Einerseits finden Stähle und Leichtmetalle (Aluminium, Magnesium, Titan) aufgrund der hohen Festigkeiten industrielle Anwendung. Andererseits werden Thermo- und Duroplaste, verstärkt und unverstärkt, aufgrund massespezifischer Eigenschaften eingesetzt. Thermoplast-Metall-Verbindungen sind im industriellen Umfeld bekannt, Duroplast-Metall-Verbindungen werden im universitären Umfeld erforscht. In Abhängigkeit der Werkstoffkombination sind unterschiedliche Haftmechanismen ausschlaggebend für die Verbundfestigkeit. Prinzipiell lassen sich auch Keramiken, Hölzer und Elastomere fügen. Eine industrielle Anwendung ist hierbei jedoch nicht verbreitet.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

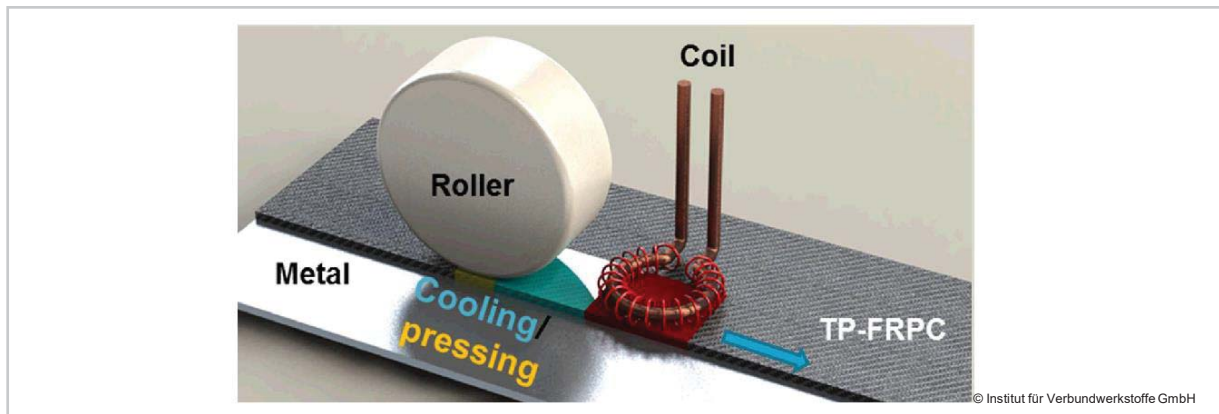
Aufgrund der geringen Zykluszeiten und der hohen Automatisierung ist das thermische Pressfügen generell für den hybriden Leichtbau im Automobil- und Flugzeugbau interessant. Hierbei ist die Werkstoffkombination aus Metall und Kunststoff von besonderem Interesse.

Aufgrund der hohen massespezifischen Steifigkeit sind Anwendungen zur Verstärkung von Strukturbauteilen denkbar.

Die Abwesenheit von Haftvermittlern oder Klebstoffen reduziert die Abhängigkeit der Prozesszeit auf das thermischen Verhalten des plastifizierenden Fügepartners.

Technologiebezeichnung: 4.4 Induktionsschweißen von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV)

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Beim Induktionsschweißen werden elektrisch leitende Werkstoffe durch elektromagnetische Wechselfelder infolge Widerstands- und im Fall von magnetischen Werkstoffen zusätzlich durch Hystereseverluste erwärmt. Beim Schweißen von Faser-Kunststoff-Verbunden sind dies entweder die Verstärkungsstruktur (Kohlenstofffasern) oder ein Schweißzusatzmaterial. Im Falle einer Hybridverbindung kann dies auch ein metallischer Schweißpartner sein. Die elektromagnetischen Wechselfelder entstehen durch eine Induktorspule, die mit einem hochfrequenten Wechselstrom beaufschlagt wird. Nach dem Aufschmelzen der thermoplastischen Matrix erfolgt das Verbinden der Fügepartner unter Druck entweder kontinuierlich oder diskontinuierlich.

Beim kontinuierlichen Fügen bewegen sich Induktor und Werkstück relativ zueinander, wodurch lange Schweißnähte realisierbar sind. Der Induktor erwärmt den induzierbaren Fügepartner. Anschließend werden die Teile kontinuierlich durch eine Anpressrolle konsolidiert. Bei diesem Prozess kann eine Oberflächenkühlung zum Einsatz kommen.

Das diskontinuierliche Induktionsschweißen ist ein quasi statischer Prozess. Der Induktor erwärmt das elektrisch leitfähige Material. Durch einen Anpressstempel wird die nötige Konsolidierungskraft auf die Fügepartner aufgebracht. Die Kraft sorgt dafür, dass die Fügepartner in innigen Kontakt kommen. Im Fall einer Oberflächenvorbehandlung, z. B. bei Hybridstrukturen, kann der schmelzflüssige Matrixanteil zusätzlich in sich bildende Kavitäten und Hinterschnitte fließen. Sollen elektrisch nicht leitende Materialien gefügt werden, können als Hilfsstoff Suszeptormaterialien (Schweißzusatzmaterialien) verwendet werden. Suszeptoren sind elektrisch leitfähige Materialien z. B. in Form eines feinen Gitters, die induktiv erwärmt werden. Platziert werden sie zwischen den zu fügenden Bauteilen, wodurch der Energieeintrag lokal in der Fügezone erreicht wird und im Fall artgleicher Thermoplaste nach dem Abkühlen ein Stoffschluss entsteht.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Die Haupteinflussfaktoren auf den Induktionsschweißprozess sind die Leistung am Induktor, der Abstand zum Material, die Induktorgeometrie, die Anpresskraft, die Kühlung, die eingesetzten Materialien und im Fall des kontinuierlichen Schweißens die Vorschubgeschwindigkeit.

Bei Hybridfügungen von Metallen mit FKV werden bei polaren Matrizes (z.B. PA6) bessere Anhaftungen erreicht als bei unpolaren (z.B. PP). Die besten Ergebnisse werden durch eine Oberflächenvorbehandlung des metallischen Fügepartners, z.B. Sandstrahlen oder Laserstrukturierung, erreicht. Hierdurch hat das Polymer die Möglichkeit in die Strukturierung zu fließen und eine formschlüssige Verbindung herzustellen. Beim Fügen von FKV mit FKV müssen die Polymere thermoplastisch sein und einen Stoffschluss ausbilden können. Das Verfahren zeichnet sich durch einen hohen Energieeintrag aus.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Prinzipiell können alle Werkstoffe induktiv gefügt werden, die elektrisch leitfähig sind und eine Schmelze bilden können. In Hinblick auf Hybridstrukturen reicht es aus, wenn jeweils ein Fügepartner eine dieser Eigenschaften besitzt.

Beispielsweise kann ein Metall induktiv erwärmt werden, wodurch der Kunststoff des zweiten Fügepartners aufschmilzt und somit eine Verbindung entsteht.

Im Fall von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) können direkt die Fasern induktiv erwärmt werden, wodurch bei einer CFK-CFK Paarung eine stoffschlüssige Verbindung zwischen dem Matrixpolymer entsteht.

Sollen zwei elektrisch nicht leitende, aber schmelzfähige, Werkstoffe miteinander gefügt werden kann als Schweißhilfsstoff ein Suszeptormaterial verwendet werden. Dieses sorgt dafür, dass in der Fügezone die nötige Temperatur erreicht wird.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

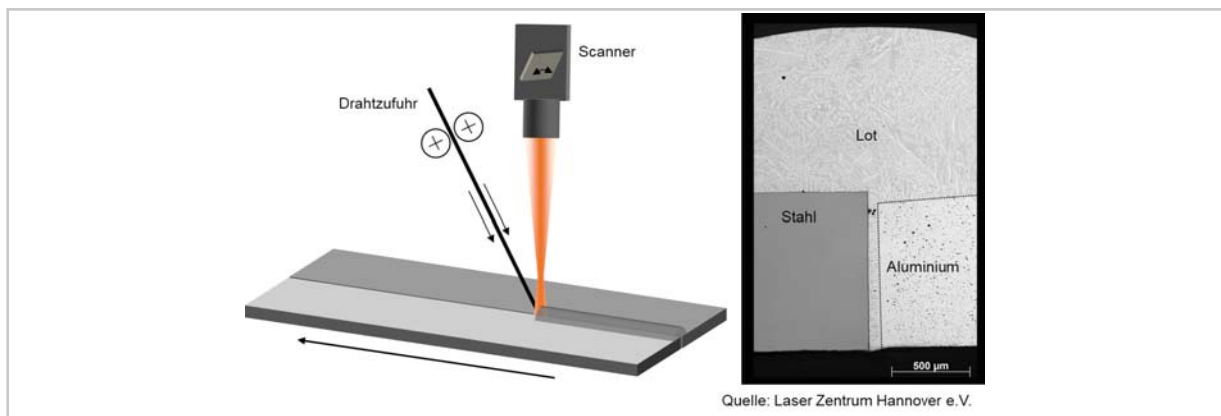
Das induktive Fügen ist beim industriellen Leichtbau noch nicht weit verbreitet, bietet aber einige Vorteile. Anders als beim Kleben oder mechanischen Fügen sind keine zusätzlichen Additive, die ggf. schädlich sind, Bohrungen die die FKV Struktur schädigen oder aufwendige Oberflächenvorbehandlungen nötig. Das induktive Fügen zeichnet sich durch geringe Investitionskosten in der Anlagentechnik und hohes Automatisierungspotential aus.

Mögliche Anwendungsbranchen sind z.B. Automobilbau, Luft- und Raumfahrt oder Sport und Freizeit.

Ein Anwendungsbeispiel aus der Luftfahrt ist die Flügelvorderkante (J-Nose) des A380. Die Teile sind alle aus kohlenstofffaserverstärktem PPS gefertigt.

Technologiebezeichnung: Laserlöten (am Beispiel von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen)

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Der Laser ist ein Werkzeug, welches sich sehr genau und lokal beschränkt einsetzen lässt. Daher lässt sich der thermische Einfluss so gering wie nötig halten. Weiterhin sind hohe Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten charakteristisch für Laserprozesse. Im Vergleich zum Laserschweißen wirkt der Lötprozess allerdings weniger lokal, es wird stark defokussiert gearbeitet. Die Strahlqualität der verwendeten Laserstrahlquelle spielt daher eine untergeordnete Rolle.

Das physikalische Prinzip des Laserlöten ist Fügen durch Diffusion, dabei entsteht keine schmelzflüssige Verbindung der Fügepartner. Die Arbeitstemperatur liegt unterhalb der Schmelztemperatur der Grundwerkstoffe, ein entsprechendes Lot wird als Zusatzmaterial benötigt. Der Laserstrahl schmilzt das Lot auf, dieses benetzt die Oberflächen und füllt den voreingestellten Spalt aufgrund der Kapillarkraft. Der Wärmeeintrag kann mit dem Einsatz einer Scanneroptik im Strahlengang, d.h. einer Oszillation des Strahls, gesteuert werden.

Das Laserlöten von Mischverbindungen dient der Substitution mehrerer Bauteile durch eine Struktur nach Art der Tailored (Hybrid) Blanks. Angestrebt wird die Anbindung von Stahl- an Aluminiumstrukturen mit dem Ziel des stofflichen Leichtbaus. Eine anschließende Umformung ist im begrenzten Rahmen möglich.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Die Benetzung aller Fügepartner muss gegebenenfalls durch den Einsatz von Flussmittel oder eine Oberflächenbehandlung ermöglicht werden. Besonders bei Al-Legierungen ist die Oxidschicht mit charakteristisch hohem Schmelzpunkt und sofortiger Neubildung zu entfernen, um die Benetzung zu ermöglichen.

Die Einstellung eines definierten Spalts auf der gesamten Länge der Verbindung ist notwendig, um die durch die Kapillarkraft bedingte Füllung des Spalts zu ermöglichen.

Die Kantenvorbereitung ist mit großer Sorgfalt vorzunehmen, da insbesondere eine Verbreiterung zu einer unzureichenden Füllung führt.

Die Besonderheit für St-Al-Mischverbindungen liegt im Gegensatz zum Schweißen in der fehlenden Durchmischung der beiden Werkstoffe. Direkter Kontakt besteht nur zwischen den Grundwerkstoffen und dem Lotwerkstoff. Dies vereinfacht das Recycling.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

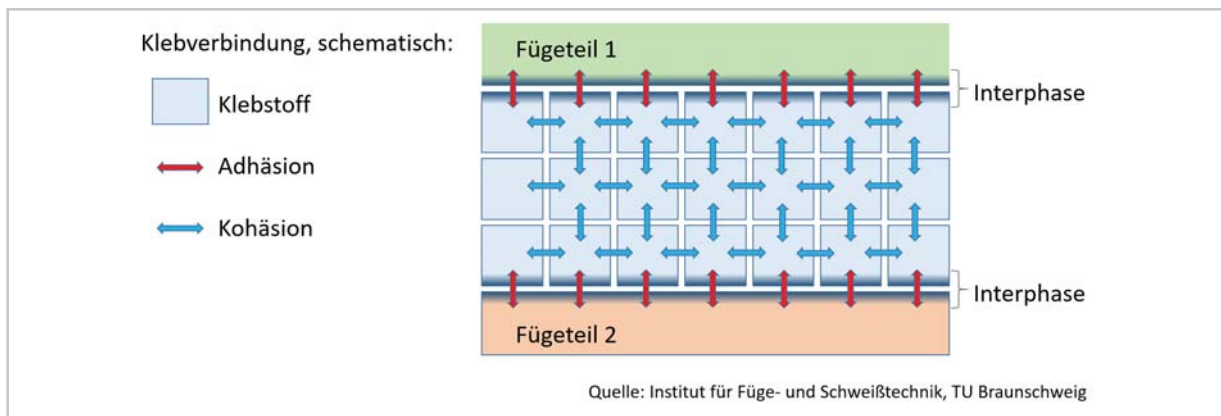
Reinverbindungen aus Stahl mit CuSi-Loten sind Stand der Technik. Eine Eignung ist für gleich- und fremdartige (Misch-)Verbindungen bei entsprechender Wahl des Lotes gegeben, besonders für wärmeempfindliche Werkstoffe (Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften durch den Wärmeintrag,...), bzw. Anwendungsfälle mit metallurgischer Problemstellung im schmelzflüssigen Kontakt (Bildung von intermetallischer Phasen (IMP), ...). Insbesondere für St-Al-Mischverbindungen sind diese IMP ein Problem, welches sich bei thermischen Fügeverfahren nicht vermeiden lässt. Da das Lötverfahren ohne eine gemeinsame Schmelze auskommt, ist der Bereich der IMP-Ausbildung auf den durch Diffusion generierten Phasensaum begrenzt. Ein allgegenwärtiges Risiko von Stahl-Aluminium-Verbindungen ist die Korrosion aufgrund der unterschiedlichen elektrochemischen Potenziale.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Anwendungsbereiche finden sich u.a. im Automobilbau, da die Verbindung von unterschiedlichen Materialien entsprechend der lokalen Anforderungen des Bauteils Gewicht einsparen kann. Die Automatisierbarkeit ist gegeben mithilfe einer kraftgesteuerten Drahtzufuhr und/oder Positioniereinheit sowie Nahtverfolgung, der optischen Strahlführung und der Möglichkeit der 3D-Roboterautomatisierung kann der Prozess weitgehend autonom ablaufen. Durch die im Vergleich zu Schweißverfahren reduzierte Festigkeit eignet sich eine lasergelötete Verbindung (Stahl-Aluminium) für Leichtbauteile, z.B. im Automobilbereich für nichttragende Sitzstrukturen (Rückenlehne). Die Dehnung ist im Vergleich zu entsprechenden geschweißten Verbindungen erwartungsgemäß aufgrund der reduzierten Ausmaße der IMP erhöht. Dies ermöglicht z.B. eine Umformung.

Technologiebezeichnung: 6 Kleben

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Das Kleben als eine der ältesten Techniken ist ein in der Industrie etabliertes Verfahren zum Verbinden gleicher oder verschiedener Werkstoffe mittels Klebstoff. Ein Klebstoff ist ein nichtmetallischer Stoff, der Fügeteile durch Oberflächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann. Weitere Einsatzgebiete von Klebstoffen sind das Abdichten und die Reparaturklebung. Klebstoffe können grob eingeteilt werden in chemisch vernetzende und physikalisch abbindende Systeme. Ungeachtet der großen Zahl an Kombinationen aus Kleb- und Fügeteilwerkstoffen sowie Anforderungsprofilen sind folgende Schritte fast allen Klebprozessen gemeinsam.

Die Fertigung einer Klebverbindung beginnt im Allgemeinen mit der Vorbereitung der Fügeteiloberflächen. Dazu gehören das Säubern, das Anpassen und das Entfetten der Fügeteile. Kommt ein zwei- oder mehrkomponentiger Klebstoff zum Einsatz, sind die Komponenten nach Vorgabe zu dosieren, zu homogenisieren und zu mischen. Vor dem Klebstoffauftrag können weitere mechanische, chemische oder physikalische Vorbehandlungen notwendig sein, z. B. Schleifen, Beizen oder die Temperierung der Fügeteile und/oder des Klebstoffes. Bei der Oberflächennachbehandlung können Primer zum Einsatz kommen, aber auch die Klimatisierung der Fügeteile kann ein Kriterium sein, um z. B. mögliche Kondensation zu vermeiden. Die Klebstoffapplikation kann manuell, ganz oder teilweise automatisch ablaufen. Zur Aushärtung des Systems kann, je nach verwendetem Klebstoff, die Zufuhr von Wärme, Licht oder Feuchtigkeit notwendig sein.

Fehler im Fertigungsprozess werden meist erst während des Gebrauchs entdeckt. Aus diesem Grund werden ständige Überwachung und/oder die Befolgung der dokumentierten Verfahrensanweisungen gefordert, um sicherzustellen, dass die festgelegten Anforderungen erfüllt werden. Diese Qualitätssicherung beginnt nicht erst in der Phase der Fertigung, sondern bereits in der Entwicklung und erstreckt sich bis in die Gebrauchsphase.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Erfolgreiches Kleben setzt klebgerechtes Konstruieren voraus, d.h. die diesem Fügeverfahren eigenen Gesetzmäßigkeiten bestimmen die konstruktive Formgebung. Dazu zählen z. B. das Bereitstellen einer ausreichenden Klebfläche und Klebschichtdicke.

In jedem einzelnen Prozessschritt des Klebens können selbst geringe Abweichungen von zuvor definierten Parametern zum Versagen der Klebverbindung im Gebrauch führen. Abhängig vom Kosten-Nutzen-Verhältnis sollten Maßnahmen zur fertigungsbegleitenden Überwachung einzelner Fertigungsschritte ergriffen werden.

Grenzen des Klebens ergeben sich aus den Eigenschaften der Klebstoffe und betreffen vor allem die thermische Belastbarkeit, Langlebigkeit, gegebenenfalls unzureichende Anfangsfestigkeit und problematische Wiederlösbarkeit.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Fast alle festen Werkstoffe lassen sich mit- oder untereinander kleben, beispielsweise Metalle (Stahl, Aluminium usw.), Kunststoffe (PVC, PC, PP usw., auch faserverstärkt oder mit Füllmaterialien), sowie Glas, Beton, Keramik, natürliche Materialien wie Holz, Stein oder Leder.

Weitere Vorteile des Klebens ergeben sich aus der Möglichkeit, neben dem Fügen weitere Funktionen zu integrieren, z. B. Abdichten, Bauteilsteifigkeit erhöhen, Schwingungen dämpfen, Wärme-/ elektrische Leitfähigkeit bzw. Isolation herstellen, Kontaktkorrosion vermeiden, Toleranzen ausgleichen.

Im Vergleich zum Nieten oder Schrauben erfolgt beim Kleben eine flächenförmige Kraftübertragung, anstelle einer punktförmigen. Es können auch wärmeempfindliche Werkstoffe mit geeigneten Klebstoffen gefügt werden, sodass ein hoher Wärmeeintrag wie beim Schweißen oder Löten entfällt.

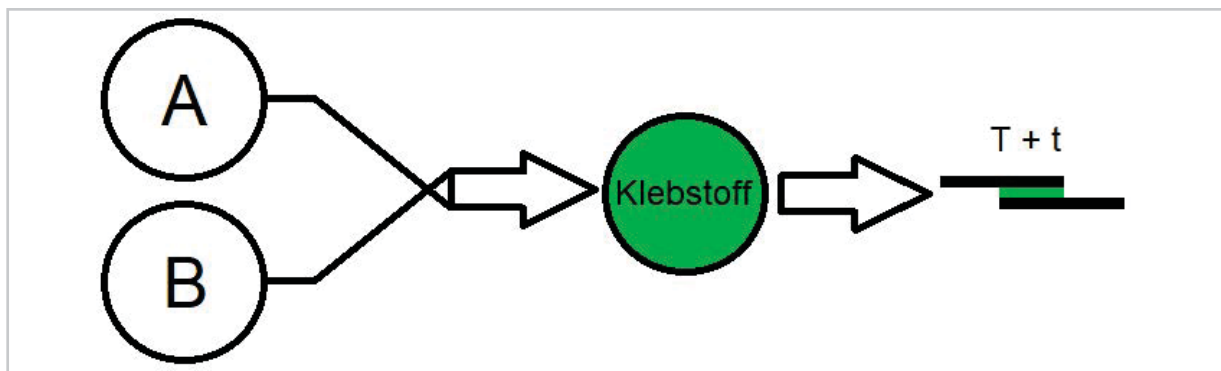
Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Aufgrund der vielfältigen Materialkombinationen und Möglichkeiten der Funktionsintegration gibt es kaum eine Branche, in der das Kleben keine Rolle spielt. Ausgewählte Beispiele sind:

- Fahrzeugbau: Kleben von Scheiben, Karosserieteilen, Verkleidungen, Beleuchtungseinrichtungen, Crashelementen
- Flugzeugbau: Verbindung zwischen Rumpf und Tragflächen
- Elektronik: SMD-Bauteile vor dem Verlöten auf Platine kleben
- Medizintechnik: Klebung optischer Bauteile mit nicht sichtbaren Klebschichten
- Medizin: Kleben von Kronen, Inlays, Verblendschalen, Wundklebung, Implantate

Technologiebezeichnung: 6.1 Chemisch härtende Klebstoffe

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Quelle:
Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig

Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Die chemisch härtenden Klebstoffe werden auch als Reaktionsklebstoffe bezeichnet. Es liegen reaktionsbereite Monomere oder Prepolymermoleküle vor, die zusammen in der Klebfuge durch Temperatur-, Feuchte- und Lichteinwirkung und einer definierten Zeit zu einem Polymer vernetzen. Reaktionsklebstoffe können aus zwei Komponenten, die miteinander vermischt werden müssen (sog. 2K-Systeme), oder Einkomponentensystemen (sog. 1K-Systeme) bestehen. In 1K-Systemen ist eine Zumischung nicht notwendig, da diese entweder bereits im Klebstoff enthalten ist, oder in der Klebstofffuge hineindiffundiert, oder aus der Fügeteiloberfläche vorgegeben ist. Weiterhin unterscheidet man zwischen kalthärtenden und warmhärtenden Systemen. Kalthärtende Systeme härten bei Raumtemperatur aus. Das bietet den Vorteil, dass der Verarbeitungsaufwand gegenüber warmhärtenden Systemen geringer ist, da keine Wärmequellen benötigt werden. Die chemische Reaktion kann auf drei unterschiedliche Arten ablaufen. Polymerisationsklebstoffe reagieren durch Zugabe eines Aktivators, indem eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung der Monomere aufgebrochen wird und sie so in einer Kettenreaktion zu einem Polymer vernetzen. Typische Vertreter der Polymerisationsklebstoffe sind Cyanacrylatklebstoffe, besser bekannt als "Sekundenkleber".

Die Polyadditionsklebstoffe entstehen durch das Verknüpfen unterschiedlicher Monomere. Dabei wandert ein Wasserstoffatom von der einen Komponente zur anderen. Typische Vertreter der Polyadditionsklebstoffe sind Epoxidharze und Polyurethane.

Die Polykondensationsklebstoffe reagieren unter Abspaltung eines einfachen Moleküls wie zum Beispiel Wasser, Säure oder einem Alkohol. Dabei ist zu beachten, dass das Nebenprodukt somit auch in der Klebschicht vorhanden ist. Daher müssen entsprechende Maßnahmen zum Abführen des Nebenprodukts getroffen werden. Typische Vertreter der Polykondensationsklebstoffe sind Silikone, Polyamide und Formaldehydkondensate.



Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Die wesentlichen Prozessrandbedingungen sind Temperatur und Zeit. In der Regel führt eine erhöhte Temperatur zu einer Verkürzung der Prozesszeit. Weiterhin müssen die Kleboberflächen vor dem Kleben entsprechend gereinigt werden, damit die Klebstoffe optimalen Halt finden. Gerade ölhaltige Substanzen und Silikone wirken negativ auf die Festigkeit der Klebverbindung. Die Stöchiometrie bei 2K-Systemen ist entscheidend für die späteren Festigkeiten und Einsatzmöglichkeiten. Für die Applikation ist auch die Einstellung der anwendungsspezifischen Viskosität sehr wichtig, um Kriechen oder Fadenzug zu vermeiden. Die Recyclingfähigkeit von chemisch härtenden Kunststoffen ist nur bedingt gegeben. Die Fügepartner lassen sich nicht ohne weiteres voneinander trennen. Ausgehärtete Klebstoffreste können dem thermischen Recyclingprozess zugeführt werden.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Mit chemisch härtenden Klebstoffen lassen sich eine Vielzahl von Materialien kleben. Es ist generell zu berücksichtigen, dass die späteren Einsatzbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur, etc.) der Klebverbindung nicht schaden. Weiterhin muss, gerade bei warmhärtenden Systemen, darauf geachtet werden, dass die Aushärtetemperatur nicht den Bauteilen schadet.

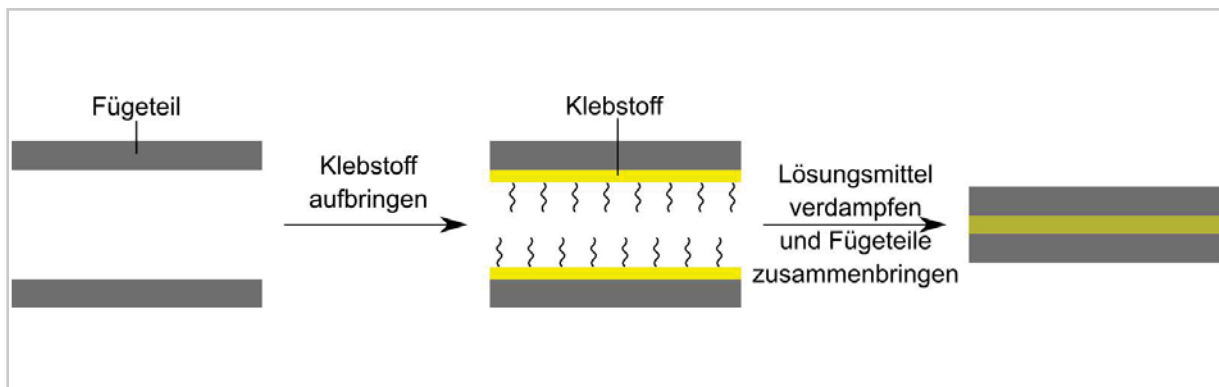
Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Chemisch härtende Klebstoffe kommen in vielen Anwendungsbereichen zum Einsatz. In der Automobilbranche werden sie z.B. zum Kleben der Scheiben eingesetzt oder auch im Interieur. Eine besondere Anwendung ist die Reparatur von Steinschlag in der Frontscheibe.

In der Faserverbundtechnik werden sie als Matrixsysteme verwendet.

Technologiebezeichnung: 6.2 Physikalisch abbindende Klebsysteme

Abbildung/ Prinzipskizze/ typisches Bauteil



Quelle: Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig

Technologiebeschreibung (Wirkprinzip, Eingliederung in Prozesskette)

Im Gegensatz zu chemisch reagierenden Klebstoffsystemen findet beim Abbinden von physikalisch abbindenden Klebstoffsystemen keine chemische Reaktion statt. Die Polymere liegen schon vollständig polymerisiert vor. Somit bestehen diese Klebstoffe grundsätzlich nur aus einer Komponente. Sie werden dabei durch erhöhte Temperaturen oder durch Lösungsmittelsysteme in einen benetzungsfähigen Zustand versetzt, oder es werden durch Druckanwendung Adhäsionskräfte erzeugt. Die Adhäsionskräfte werden dabei nur durch mechanische Verzahnung und zwischenmolekulare Bindungen erzeugt.

Die physikalisch abbindenden Klebstoffsysteme lassen sich in Schmelzklebstoffe, Haft- und Kontaktklebstoffe, Lösungsmittel- bzw. Dispersionsklebstoffe und Plastisole unterteilen. Die Lösungsmittel- und Dispersionsklebstoffe lassen sich wiederum nach ihrem Lösungsmittelgehalt in Nassklebstoffe (hoher Lösungsmittelanteil), Kontaktklebstoffe (mittlerer Lösungsmittelanteil) und Haftklebstoffe (kein Lösungsmittelanteil) unterteilen.

Für Schmelzklebstoffe werden im Allgemeinen Thermoplasten als Grundstoff verwendet. Bei Lösungsmittel- und Dispersionsklebstoffen ist das Polymer in dem Lösungsmittel/Dispersionsmedium gelöst bzw. dispergiert und bindet durch Verdampfen oder Verdunsten ab. Mögliche Basismonomere sind verschiedene Thermoplasten oder Kautschuke. Bei Lösungsmittelklebstoffen werden als Lösungsmittel Gemische aus Estern oder Ketonen mit gegebenenfalls Alkoholanteilen verwendet. Bei Dispersionsklebstoffen ist das Dispersionsmedium Wasser.

Plastisole sind Polymere dispergiert in einem Weichmacher, welche sich erst bei Temperaturzufuhr in dem Weichmacher lösen und ein einphasiges Gel bilden. Meistens wird dabei Polyvinylchlorid als Polymer verwendet.

Prozessrandbedingungen, Parameter, Einsatzgrenzen, Recyclingfähigkeit

Schmelzklebstoffe weisen eine sehr schnelle Abbindung auf. Ein weiterer Vorteil ist, dass sie keine Lösungsmittel beinhalten. Nachteile sind eine hohe Viskosität des Klebstoffs, eine geringe offene Zeit, die Wärmebelastung des Fügeteils und die geringe Wärmebeständigkeit. Wichtig bei Lösungsmittel-/Dispersionsklebstoffen ist, dass das Medium auch verdampfen kann oder vom Fügemedium aufgenommen wird. Es muss auch ein gleichmäßiger Anpressdruck der Füge Teile gewährleistet werden. Die Recyclingfähigkeit von physikalisch abbindenden Klebstoffverbindungen ist begrenzt gegeben. So können zum Beispiel Schmelzklebstoffe wieder aufgeschmolzen werden und dadurch die Füge Teile wieder getrennt werden. Plasisole werden aufgrund des Weichmacheranteils und der Salzsäurespaltung bei der thermischen Verwertung zunehmend durch Acrylat- und Epoxidplasticole ersetzt.

Mögliche Materialkombinationen mit Verweis auf Materialmatrix

Die möglichen Materialkombinationen der Füge Teile sind sehr vielfältig. So kann für fast alle Materialkombinationen ein passendes physikalisch abbindendes Klebstoffsystem gefunden werden. Es muss dabei darauf geachtet werden, dass die Füge Teile mit dem Lösungsmittel kompatibel sind (beachte Quellung und Versprödung) bzw. der entstehenden Erwärmung standhalten. Dispersionsklebstoffe sind für Metalle und Gläser ungeeignet.

Anwendungsbranchen/ Anwendungsbeispiele

Schmelzklebstoffe werden zum Beispiel beim Kleben mit Heißklebpistolen verwendet. Weiterhin werden wasserquellbare Schmelzklebstoffe für Dichtungszwecke im Rohrleitungsbau oder als Fugendichtmasse verwendet. Hauptsächlich finden sie in der Verpackungs-, Möbel-, Schuh-, Textilindustrie und Elektrotechnik Anwendung. Lösungsmittel- und Dispersionsklebstoffe werden als Haftklebstoffe in Klebbändern, selbstklebenden Etiketten und Haftnotizen verwendet. Kontaktklebstoffe hingegen werden zum Einkleben von Verkleidungen im Fahrzeugbau und in der Textil- und Lederindustrie verwendet. Plasticole werden hauptsächlich in der Automobilindustrie für das Kleben von Metallen verwendet.

Ansprechpartner und Literaturhinweise zu Technologiesteckbriefen

1.1 Verschrauben

Christian Denkert; Fraunhofer IGP Rostock; christian.denkert@igp.fraunhofer.de

Kloos, Karl-Heinz und Thomala, Wolfgang: Schraubverbindungen. Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung, Berlin 2007.

ISBN: 978-3-540 21282-9

Mönnig, Sylvia (Hg.), 2007: ICS HANDBUCH. Industrielle Schraubmontage, Iserlohn.

ISBN: 978-3933519375

2.1 Druckgießen

Helmar Dannenmann; Oskar Frech GmbH+Co.KG; dannenmann.helmar@frech.com

VDD Verband Deutscher Druckgießereien (Hg.): Druckguss aus NE-Metallen. Technische Richtlinien, Düsseldorf 2008.

Nogowizin, Boris: Theorie und Praxis des Druckgusses; Berlin 2010.

ISBN-13: 978-3-7949-0796-0

2.2 Spritzgießen

Dr. Jürgen Tröltzsch; KARL MAYER Textilmaschinenfabrik GmbH;

Juergen.Troeltzsch@karlmayer.com

Funck, Ralph und Steffens, Markus: Hybridstrukturen aus Thermoplasten. In: Kunststoffe 94, (2004), [S. 264–267].

Sherman, Lilli Manolis: The New Lightweights: Injection Molded 'Hybrid' Composites Spur Automotive Innovation. In: Plastics Technology 58 (2012), [S. 27–31].

2.3 GMT-Formpressen

Michael Heinrich; TU Chemnitz, Institut für Strukturleichtbau; michael.heinrich@mb.tu-chemnitz.de

Springer Verlag (Hg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, Wiesbaden 2013.
ISBN 978-3-658-02754-4

2.4 Harzinjektionsverfahren

Stefan Weidmann; Institut für Verbundwerkstoffe GmbH Kaiserslautern; Stefan.Weidmann@ivw.uni-kl.de

Springer Verlag (Hg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, Wiesbaden 2013.
ISBN 978-3-658-02754-4

Potter, Kevin: Resin Transfer Moulding. Springer Netherlands 1997.
ISBN: 978-94-009-0021-9

2.5 Additive Verfahren

Christian Zeller, Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften; christian.zeller@iwb.mw.tum.de

Gebhardt, Andreas: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling – Produktion, München 2016.
ISBN: 978-3-446-44539-0.

Zäh, Michael F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren, München 2006.
ISBN: 3-446-22854-3.

3.1.1 Stanz-/Nietbolzen, Stanz-/Nietmutter

Georg Donhauser; PROFIL Verbindungstechnik GmbH & Co. KG; Georg.Donhauser@profil.eu

Merkblatt DVS/EFB 3440 „Mechanisches Fügen“ (DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., EFB – Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.); DVS Media GmbH

3.1.2 Voll- Stanznietsystem

Georg Donhauser; PROFIL Verbindungstechnik GmbH & Co. KG; Georg.Donhauser@profil.eu

3.1.3 Einpresstechnik

Matthias Kreuter; PennEngineering; MKreuter@pemnet.com

Merkblatt DVS/EFB 3440 „Mechanisches Fügen“ (DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., EFB – Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.); DVS Media GmbH

3.1.4 Halbhohlstanznieten

Dr. Matthias Wissling; TUCKER GmbH STANLEY Engineered Fastening;

matthias.wissling@sbdinc.com

Hahn, O. und Klemens, U.: Fügen durch Umformen. Nieten und Durchsetzfügen. Innovative Verbindungsverfahren für die Praxis, in: Stahl-Dokumentation, Studiengesellschaft Stahlanwendung; 707 (1996), [S. 1-72].
ISBN 3-930621-56-8.

3.2 Clinchen / Durchsetzfügen

Marcus Matzke; TOX Pressotechnik GmbH & Co. KG; m.matzke@tox-de.com

Merkblatt DVS-EFB 3420 „Clinchen – Überblick“ (DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., EFB – Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.); DVS Media GmbH.

Hahn, O. und Klemens, U.: Fügen durch Umformen. Nieten und Durchsetzfügen. Innovative Verbindungsverfahren für die Praxis, in: Stahl-Dokumentation, Studiengesellschaft Stahlanwendung; 707 (1996), [S. 1-72].
ISBN 3-930621-56-8.

3.3 Thermomechanische Fügeverfahren

Dr. Thomas Heber; Leichtbau-Zentrum Sachsen; heber@lzs-dd.de

Modler, Niels und Adam, Frank: Vorlesung Verbindungstechniken. TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, 2017.

3.4 Organoblechumformung

Dr. Thomas Heber; Leichtbau-Zentrum Sachsen; heber@lzs-dd.de

Jäger, Hubert, Kupfer, Robert und Krahl, Michael: Vorlesung Technologien für thermoplastische Verbundwerkstoffe. TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, 2017.

4.1.1 Strahlbasiertes Schmelzschweißen

Christian Stadter, Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften; christian.stadter@iwb.mw.tum.de

Hügel, Helmut und Graf, Thomas: Laser in der Fertigung. Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren, Wiesbaden 2009.

ISBN: 978-3-8351-0005-3

Beyer, Eckhard: Schweißen mit Laser. Grundlagen, Berlin 1995.

ISBN: 3-540-52674-9.

Dilthey, Ulrich: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1. Schweiß- und Schneidtechnologien, Berlin 2006.

ISBN: 978-3-540-21673-5.

4.1.2 Lichtbogenbasiertes Schmelzschweißen

Andreas Bachmann, Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften; andreas.bachmann@iwb.mw.tum.de

Fahrenwaldt, Hans J.; Schuler, Volkmar und Twrdek, Jürgen: Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, Wiesbaden 2014.
ISBN: 978-3-658-03140-4.

Matthes, Klaus-Jürgen und Richter, Erhardt (Hg.): Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, München 2009.
ISBN: 978-3-446-41422-8.

4.2.1 Ultraschallschweißen

Stefan Weidmann; Institut für Verbundwerkstoffe GmbH Kaiserslautern;
Stefan.Weidmann@ivw.uni-kl.de

Grewell, D., Benatar, A., Park, J.: Plastics and Composites Welding Handbook, 2003;
ISBN: 978156990313

Yousefpour, Ali, Mehdi Hojjati und Jean-Pierre Immarigeon: Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 17—July 2004;
DOI: 10.1177/0892705704045187

4.2.2 Vibrationsschweißen

Stefan Weidmann; Institut für Verbundwerkstoffe GmbH Kaiserslautern;
Stefan.Weidmann@ivw.uni-kl.de

Grewell, David, Benatar, Avraham und Park, John (Hg.), 2003: Plastics and Composites Welding Handbook, 2003.
ISBN: 978156990313

Yousefpour, Ali, Hojjati, Mehdi und Immarigeon, Jean-Pierre: Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites, in: Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 17 (2004). DOI: 10.1177/0892705704045187

4.2.3 Rührreibschweißen

Roman Hartl, Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften; roman.hartl@iwb.mw.tum.de

Lohwasser, Daniela und Chen, Zhan: Friction stir welding. From basics to applications, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC 2010. ISBN: 978-1-84569-450-0

Völlner, Georg: Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern, München 2010. ISBN: 978-3-8316-0955-0

4.2.4 Widerstandsschweißen

Stefan Weidmann; Institut für Verbundwerkstoffe GmbH Kaiserslautern; Stefan.Weidmann@ivw.uni-kl.de

Stavrov, D. und Bersee, H.E.N.: Resistance welding of thermoplastic composites-an overview, in: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 36 (2005), [S. 39-54].

Yousefpour, Ali, Hojjati, Mehdi und Immarigeon, Jean-Pierre: Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites, in: Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 17 (2004). DOI: 10.1177/0892705704045187

4.3 Thermisches Pressfügen

Christoph Wunderling, Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften; christoph.wunderling@iwb.mw.tum.de

Baur, Erwin.; Osswald, Tim A.; Rudolph, Natalie; Brinkmann, Sigrid; Schmachtenberg, Ernst (Hg.): Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 31. Aufl., München 2013. ISBN: 978-3-446-43442-4.

Habenicht, Gerd: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen, Berlin 2009.

DOI: 10.1007/3-540-31223-4

4.4 Induktionsschweißen

Stefan Weidmann; Institut für Verbundwerkstoffe GmbH Kaiserslautern;

Stefan.Weidmann@ivw.uni-kl.de

Mitschang, Peter; Velthuis, Rudi und Didi, Mirja: Induction Spot Welding of Metal / CFRPC Hybrid Joints, 2013.

DOI: 10.1002/adem.201200273

Velthuis, Rudi : Induction Welding of Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer Composites to Metals, in: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (Hg.): IVW-Schriftenreihe; Kaiserslautern 2007.

ISBN: 978-3-934930-71-1

5.1 Laserlöten

Sarah Nothdurft; Laser Zentrum Hannover e.V.; s.nothdurft@lzh.de

Poprawe, Reinhart: Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur, Berlin 2005.

ISBN 978-3-540-26435-4

Nothdurft, Sarah; Springer, André; Kaieler, Stefan; Ross, Jonathan und Stonis, Malte: Laser Soldering and Brazing of Steel-Aluminum Sheets for Tailored Hybrid Tubes. In: Journal of Laser Applications 2 (2016).

6. Kleben

Thomas Heinig; TU Braunschweig, ifs - Institut für Füge- und Schweißtechnik; t.heinig@tu-braunschweig.de

Habenicht, Gerd: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen, Berlin 2009.

DOI: 10.1007/3-540-31223-4

Rasche, Manfred: Handbuch Klebtechnik. München 2012.

ISBN: 978-3446424029

DVS-Merkblatt 3310; (DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.)

6.1. Chemische härtende Klebstoffe

Lukas Kaempff; TU Braunschweig, ifs - Institut für Füge- und Schweißtechnik; l.kaempff@tu-braunschweig.de

Habenicht, Gerd: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen, Berlin 2009.

DOI: 10.1007/3-540-31223-4

Brockmann, Walter; Geiß, Paul L.; Klingen, Jürgen und Schröder, K. Bernhard: Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren, Weinheim 2005.

ISBN: 978-3527310913

6.2 Physikalisch abbindende Klebsysteme

Holger Deutges; TU Braunschweig, ifs - Institut für Füge- und Schweißtechnik; h.deutges@tu-braunschweig.de

Habenicht, Gerd: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen, Berlin 2009.

DOI: 10.1007/3-540-31223-4

Brockmann, Walter; Geiß, Paul L.; Klingen, Jürgen und Schröder, K. Bernhard: Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren, Weinheim 2005.

ISBN: 978-3527310913

Herausgeber:

VDMA-Arbeitsgemeinschaft Hybride Leichtbau Technologien
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main
lightweight@vdma.org
<http://lightweight.vdma.org>

Redaktion:

Dr. Walter Begemann, Kristin Weil

Copyright:

VDMA-Arbeitsgemeinschaft Hybride Leichtbau Technologien und Autoren, 2018
Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt.