

VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 16

Ressourceneffizienz der Fügeverfahren



September 2016

Kurzanalyse Nr. 16: Ressourceneffizienz der Fügeverfahren

Autoren:

Kerstin Drechsler (VDI ZRE)

Stefan Kirmes (VDI ZRE)

Wir danken Herrn Dr.-Ing. Matthias Harsch, Geschäftsführer der LCS Life Cycle Simulation GmbH, für seine fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30-27 59 506-0

Fax +49 30-27 59 506-30

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Titelbild: motorradcbr - Fotolia.com

Druck: Bonifatius GmbH, Karl-Schurz-Straße 26, 33100 Paderborn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 16

Ressourceneffizienz der Fügeverfahren

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS	4
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	5
1 EINLEITUNG	6
2 FÜGEVERFAHREN	9
2.1 Übersicht	9
2.2 Besondere Bedeutung des Fügens im Kontext einer Ressourceneffizienzbetrachtung	13
3 RESSOURCENEFFIZIENZMASSNAHMEN BEIM FÜGEN	17
3.1 Prozessbezogene Maßnahmen	17
3.1.1 Auswahl alternativer Fügeverfahren	20
3.1.2 Optimierung bestehender Fügeverfahren	20
3.1.3 Optimierung vor- und nachgelagerter Prozesse	23
3.2 Produktbezogene Maßnahmen	24
3.3 Anwendungsrestriktionen	30
4 BEISPIELE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ BEIM FÜGEN	32
4.1 Thermische Fügeverfahren	32
4.1.1 High-Speed-WIG-Brenner	32
4.1.2 Laserstrahlschweißen mit reduzierter Laserleistung	33
4.1.3 Laserfügen von Rohrgläsern für Solarkollektoren	34
4.1.4 Schmalband-Umform-Laserschweißen ersetzt Stanzen	35
4.1.5 Methoden zur Bewertung der Ressourceneffizienz von thermischen Fügeverfahren	36
4.2 Mechanische Fügeverfahren	37
4.2.1 Optimiertes elektrisches Schrauben	37
4.2.2 Schrauben schnell automatisch zuführen	38
4.2.3 Optimierte Geometrie des Gewindeauslaufs	39
4.2.4 Knickbauchen	39

4.2.5	Hochgeschwindigkeitsfügen	42
4.2.6	Clinchen	43
4.3	Chemische Fügeverfahren	44
4.3.1	Buchbinden durch effizientes Kleben	44
4.3.2	Karosserieleichtbau mittels Klebetechnik	45
4.3.3	Weitere Ressourceneffizienzaspekte beim Kleben	46
4.4	Hybride Fügeverfahren	49
4.5	Prozessperipherie und übergeordnete Maßnahmen	52
4.5.1	Gewichtsoptimierte Gestaltung der Vorrichtungsrahmen	52
4.5.2	System zur automatischen Justage von Vorrichtungen	53
4.5.3	Greifer mit Mikroventilen	54
4.5.4	Qualitätssicherung durch vernetzte Informationssysteme	54
5	FAZIT	56
6	WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN	58
	LITERATURVERZEICHNIS	59

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580	10
Abbildung 2: Ressourceneffizienz beim Fügen	16
Abbildung 3: Prozessbezogene Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz von Fügeverfahren	19
Abbildung 4: Produktbezogene Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz von Fügeverfahren	25
Abbildung 5: Anwendungsbeispiele Knickbauchen	40
Abbildung 6: Messergebnisse zum Energieverbrauch des Hochgeschwindigkeitsfügens	42
Abbildung 7: Schnittansicht Falzklebeverbindung	50

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Wirtschaftszweige, in denen für einen großen Anteil der Unternehmen Fügeverfahren einen relevanten Abschnitt des Produktionsprozesses darstellen	7
Tabelle 2:	Einteilung der Fügeverfahren nach Hauptwirkenergie mit Beispielen	12

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BVT	Beste Verfügbare Techniken
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DV	Datenverarbeitung
EFB	Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung
EoL	End of Life
ERP	Enterprise Resource Planning
FEM	Finite Elemente Methode
IHU	Innenhochdruck-Umformen
IWU	Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
MAG	Metall-Aktiv-Gas
MID	Moulded Interconnect Devices
MIG	Metall-Inert-Gas
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WIG	Wolfram-Inert-Gas

1 EINLEITUNG

Der effiziente und schonende Einsatz natürlicher Ressourcen leistet einen Beitrag zum Umweltschutz und zu mehr Nachhaltigkeit. Gleichzeitig können durch den Ansatz der Ressourceneffizienzsteigerung strategische Wettbewerbsvorteile erzielt werden.¹ Die Auswahl geeigneter Fügeverfahren und deren Optimierung bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten, Ressourceneffizienzpotenziale zu erschließen.

Das Fügen ist als ein Verfahren definiert, durch das zwei oder mehrere Körper dauerhaft fest miteinander verbunden werden.² Es kann durch unterschiedliche Verfahren wie Schweißen, Kleben, Nieten oder Verschrauben realisiert werden.

Da es kaum ein technisches Produkt gibt, das ohne Fügeverfahren bzw. Montageprozess gefertigt wird, bildet das Fügen ein zentrales Fertigungsverfahren in vielen Branchen. So können acht Wirtschaftszweige identifiziert werden, in denen Fügen einen wichtigen Produktionsprozess darstellt (Tabelle 1). Diese acht Wirtschaftszweige umfassen rund 18.150 Unternehmen, wovon rund 9.840 Unternehmen 50 bis 999 Mitarbeiter haben.³

¹ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 2.

² Vgl. DIN 8580:2003-09.

³ Vgl. Statistisches Bundesamt (2013), S. 17 – 20.

Tabelle 1: Wirtschaftszweige, in denen für einen großen Anteil der Unternehmen Fügeverfahren einen relevanten Abschnitt des Produktionsprozesses darstellen⁴

Klassifikation der Wirtschaftszweige	Anzahl der Mitarbeiter					
	1 - 49	50 - 99	100 - 249	250 - 499	500 - 999	Summe
Herstellung von (H. v.) Metallerzeugnissen*	2.183	995	605	165	65	4.013
H. v. DV-Geräten, elektron. u. optischen Erzeugnissen	800	441	390	144	55	1.830
H. v. elektrischer Ausrüstung	875	541	459	187	95	2.157
Maschinenbau	2.448	1.495	1.297	557	216	6.013
H. v. Kraftwagen u. Kraftwagenteilen	384	262	301	165	110	1.222
Sonstiger Fahrzeugbau	108	58	58	38	22	284
H. v. Möbeln	519	247	202	52	12	1.032
H. v. sonstigen Waren	987	325	202	58	21	1.593
Summe	8.304	4.364	3.514	1.366	596	18.144

* ohne 25.5, 25.6, 25.94, da in diesen Wirtschaftszweigen typischerweise nicht gefügt wird

Die Komplexität des Produktes hat einen wesentlichen Einfluss auf die Fertigungstiefe und damit den Anteil der Montage an der gesamten Durchlaufzeit.⁵ Im Bereich des Maschinen- und Fahrzeugbaus beispielsweise liegt dieser Anteil bei bis zu 50%.⁶ Auch der Material- und Energieverbrauch, der durch die Füge-technologie verursacht wird, ist erheblich. So kann z. B. in der Automobilindustrie der Energiebedarf des Fügens bis zu 30 % des Gesamtenergiebedarfs einer Fertigung ausmachen.⁷ Es lohnt sich daher in jedem Fall, Ressourceneffizienzpotenziale zu identifizieren und zu realisieren.

Bei der Betrachtung der Ressourceneffizienz der Fügeverfahren muss in vielen Fällen nicht nur der Herstellungsprozess, sondern der gesamte Produktlebensweg berücksichtigt werden. So kann die Ressourceneffizienz in der Nutzungsphase beispielsweise durch das Ermöglichen der Reparierbarkeit und zum Produktlebensende durch eine Demontierbarkeit der Bauteile gesteigert werden.

⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt (2013), S. 17 - 20.

⁵ Vgl. Eversheim, W. (1996), S. 124.

⁶ Vgl. BMBF (2012), S. 24.

⁷ Vgl. Neugebauer, R. (2014), S. 675.

In dieser Kurzanalyse werden zu Beginn die verschiedenen Verfahren und Technologien kurz beschrieben und die besondere Bedeutung des Fügens im Kontext einer Ressourceneffizienzbetrachtung näher beleuchtet. Daran anschließend werden einerseits die Möglichkeiten der Ressourceneffizienzsteigerung im Produktlebensweg durch die geeignete Auswahl von Fügeverfahren diskutiert und andererseits verschiedene Wege zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz im Prozess aufgezeigt. Einen wichtigen Teil dieser Kurzanalyse stellt schließlich die ausführliche Diskussion ausgewählter Beispiele zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim Fügen dar. Im Fazit werden die wichtigsten Erkenntnisse abschließend zusammengefasst und Hinweise auf weitere Informationsquellen zum Thema gegeben.

2 FÜGEVERFAHREN

Soll ein Produkt aus mehr als einem Bauteil bestehen, ist die Anwendung eines Fügeverfahrens zur Herstellung dieses Produktes bzw. dieser Baugruppe unumgänglich. Beim Verbinden der Einzelteile zu einem Produkt bzw. zu einer Baugruppe kann auch zusätzlich ein Fügematerial bzw. Hilfsmittel zum Einsatz kommen.⁸

2.1 Übersicht

Das Fügen stellt eine wesentliche Operation der Montage dar. Neben den sekundären Vorgängen bei der Montage, wie zum Beispiel Handhaben, Kontrollieren, Justieren, bewirkt das Fügen den aktiven Fertigungsfortschritt am Werkstück.⁹

Entsprechend der Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580¹⁰ gehören neun Verfahrensgruppen zu der Fertigungsverfahrenshauptgruppe „Fügen“, die in der DIN 8593¹¹ weiter spezifiziert werden (Abbildung 1).

⁸ Vgl. Barthelmes, H. (2013), S. 191.

⁹ Vgl. Matthes, K.- J. und Schneider, W. (2012).

¹⁰ DIN 8580:2003-09

¹¹ DIN 8593-0:2003-09

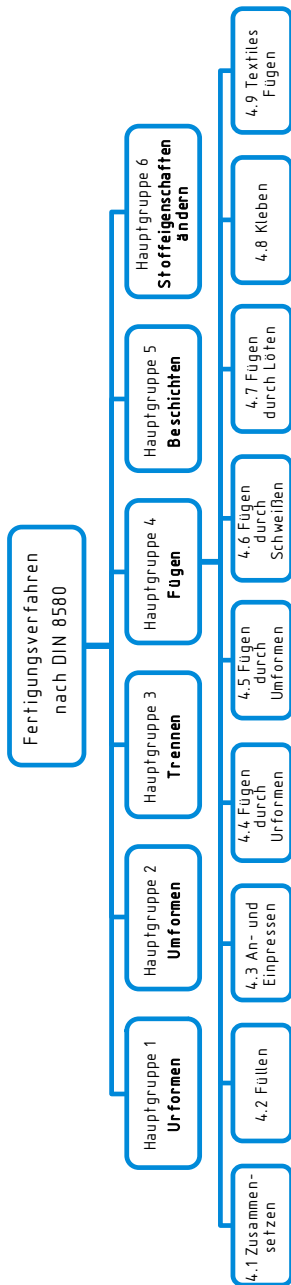


Abbildung 1: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Das charakterisierende Merkmal des „Zusammenhalt-Vermehrens“ kann also durch die unterschiedlichsten Fügeverfahren realisiert werden, für die in der Regel spezielle Anlagen oder Werkzeuge, wie zum Beispiel Klebe-, Schweiß- und Lötanlagen benötigt werden. Die Auswahl der Verfahren definiert, welche Maschinen und Anlagen in der Fertigungsprozesskette zum Einsatz kommen.

Die Fügeverfahren können nach ihrer Hauptwirkenergie eingeteilt werden (Tabelle 2). Dies gibt bereits erste Hinweise auf Optimierungsansätze. Bei Fügeverfahren, bei denen beispielsweise vorrangig thermische Energie wirkt, kann die Ressourceneffizienz durch eine Reduzierung des Energieverbrauchs (z. B. durch geringes oder kürzeres Erhitzen) gesteigert werden. Wenn die Verbindung durch chemische Energie erwirkt wird, ist die Erhöhung der Ressourceneffizienz beispielsweise durch eine Verringerung der Klebstoffmenge, bei gleicher Festigkeit der Fügeverbindung möglich.

Tabelle 2: Einteilung der Fügeverfahren nach Hauptwirkenergie mit Beispielen

		Hauptwirkenergie		
		Chemische Energie	Thermische Energie	Mechanische Energie
Fügeverfahrensgruppen nach DIN 8593	4.1 Zusammen- setzen			Einhängen Einrenken
	4.2 Füllen			Einfüllen Tränken
	4.3 An- und Einpressen			Schrauben Verkeilen
	4.4 Fügen durch Urformen		Ausgießen Einbetten	
	4.5 Fügen durch Umformen			Bördeln, Falzen Nieten
	4.6 Fügen durch Schweißen		Press-Verbindungsschweißen (z. B. Reibschweißen) Schmelz-Verbindungsschweißen (z. B. Lichtbogenschweißen)	
	4.7 Fügen durch Löten		Weichlöten Hartlöten	
	4.8 Kleben	Reaktionskleben		
	4.9 Textiles Fügen			Nähen Flechten

Thermische Fügeverfahren

Beim thermischen Fügen können zwei Einzelteile durch lokales Aufschmelzen der Werkstücke bzw. von Fügehilfsstoff mittels thermisch induzierten Stoffschlusses miteinander verbunden werden. Die thermische Energie wird dabei durch Lichtbogentechnik, Strahltechnik, Widerstandserwärmung oder Hochfrequenztechnik in eine Fügestelle eingebracht.¹²

Mechanische Fügeverfahren

Bei mechanischen Fügeverfahren kommt es zu einem Kraft- und Formschluss zwischen den Einzelteilen.¹³ Dabei werden mittelbare Verbindungen mit Verbindungselementen wie Nieten, Schrauben, Stiften, Spreizringen etc. oder unmittelbare Verbindungen wie das Verklammern und Ver-

¹² Vgl. VDI ZRE (2015), S. 78.

¹³ Vgl. Beyer, U. (2011).

pressen von Oberflächen der Bauteile unterschieden.¹⁴ Beispielsweise wird beim Clinchen ein gleichzeitiger Loch- und Bördelprozess durchgeführt. Auf diese Weise wird die Verbindung ohne zusätzliches Element ausschließlich durch Umformung der Bleche an der Fügestelle erzeugt¹⁵. Dieses Verfahren ermöglicht somit das sortenreine Recycling von Bauteilen.

Chemische Fügeverfahren

Materialien wie höchstfeste Stähle, die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe (Multi-Material-Design oder Mischbauweise) oder vorbeschichtete Halbzeuge erfordern Fügeverfahren, bei deren Einsatz die Werkstoffeigenschaften erhalten bleiben. Hierfür eignet sich das chemische Fügen, bei dem zwei Einzelteile durch Kleben der Werkstücke flächig miteinander verbunden werden. Im Gegensatz zum Schrauben, Nieten oder Schweißen verlieren die gefügten Werkstoffe beim Kleben ihre speziellen Werkstoffeigenschaften nicht, da sie nach dem Fügen keine Wärmeeinflusszone aufweisen oder nicht durch hineingebohrte Löcher geschwächt wurden.^{16, 17}

Hybridverfahren

Jedes Fügeverfahren hat Vor- und Nachteile. Zur Verringerung oder Vermeidung der Nachteile können jedoch verschiedene Fügetechniken miteinander kombiniert werden. Insbesondere die Klebtechnik ist mit den meisten anderen Fügeverfahren kombinierbar. Zu den sogenannten Hybridverfahren gehören beispielweise die folgenden Verfahrenskombinationen: Nieten/Kleben, Schrauben/Kleben, Clinchen/Kleben, Punktschweißen/Kleben.¹⁸

2.2 Besondere Bedeutung des Fügens im Kontext einer Ressourceneffizienz Betrachtung

Den Fügeverfahren und der Montagetechnik kommt in der industriellen Produktion eine besondere Bedeutung zu. Zum einen gibt es kaum monoli-

¹⁴ Vgl. Matthes, K.- J. und Schneider, W. (2012), S. 16.

¹⁵ Vgl. Beyer, U. (2011).

¹⁶ Vgl. Produktion Magazin (2015), S. 32.

¹⁷ Vgl. Fuchslocher, G. (2014).

¹⁸ Vgl. Fuchslocher, G. (2014).

tische Produkte, zum anderen entstehen komplexe Produkte oft erst durch das Fügen von fertigungstechnisch einfach herzustellenden Bauteilen (Endmontage)¹⁹.

Im Folgenden werden wesentliche Technologien und Prozesse bezüglich der Ressourceneffizienz sowie technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen kurz erläutert. Dabei hat die Auswahl des jeweils zur Anwendung kommenden Fügeverfahrens einen großen Einfluss auf die Ressourceneffizienz der Prozesse und Produkte.

Energie- und Materialverbrauch des Fügeverfahrens

Der Energie- und Materialverbrauch ist für die meisten Technologien vergleichsweise eindeutig abbildbar.²⁰ Dadurch, dass bei Fügeoperationen selbst meist wenig oder kein Abfallmaterial entsteht, ist das Materialeinsparpotenzial innerhalb einer Füge-technologie im Wesentlichen auf den Einsatz der Betriebs- und Hilfsstoffe bzw. Fügehilfsmittel begrenzt.²¹ Der Bedarf für diese Stoffe bzw. Hilfsmittel liefert somit Ansatzpunkte zur Verbesserung der Ressourceneffizienz im jeweiligen Fügeverfahren. Des Weiteren muss der Ressourcenaufwand der für den Fügevorgang notwendigen Anlagentechnik im Zusammenhang mit der Stückzahl betrachtet werden. Im Vergleich zum Kleben, Schrauben oder Nieten sind beispielsweise für das Laser- oder Elektronenstrahlschweißen umfangreichere Ressourcen allein für die Anlagenherstellung notwendig²².

Energie- und Materialverbrauch entlang des Produktlebenswegs

Weitaus größere Ressourceneffizienzpotenziale bietet das Fügen, wenn nicht die Technologie allein, sondern der gesamte Lebensweg der Produkte betrachtet wird.²³ So hat z. B. die Auswahl des Fügeverfahrens maßgeblichen Einfluss auf die Wiederverwendung und -verwertung von Produkten, Komponenten und einzelnen Materialien am Ende des Produktlebens-

¹⁹ Vgl. Matthes, K.- J. und Schneider, W. (2012).

²⁰ Vgl. Neugebauer, R. (2014), S. 677.

²¹ Vgl. VDI ZRE (2015), S. 80.

²² Vgl. Neugebauer, R. (2014), S. 680.

²³ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 2.

wegs.²⁴ Optimierungen sind daher unbedingt im Zusammenhang des gesamten Lebensweges zu betrachten, da die direkten und indirekten Auswirkungen der Wahl der Füge­technologie auf vor- und nachgelagerte Prozessschritte sehr komplex sind.²⁵ Jeder Anwendungsfall muss diesbezüglich individuell analysiert werden. Eine Untersuchung der Ressourceneffizienz im gesamten Lebensweg (Lebensweganalyse) kann zur Vermeidung lokaler Verbesserungen auf Kosten der Gesamteffizienz beitragen.²⁶

Technische und wirtschaftliche Randbedingungen

Aus den unterschiedlichen Phasen des Lebensweges (Rohmaterialherstellung, Produktherstellung, Nutzung, Verwertung/Beseitigung) eines gefügten Produktes leiten sich in der Regel viele Anforderungen an die Fügeverbindung ab (z. B. Festigkeit, Demontierbarkeit, Material der Fügepartner), welche wiederum weitere spezifische Anforderungen an das zu wählende Fügeverfahren definieren. Diese wechselseitigen Anforderungen zwischen dem Fügeverfahren und der Fügeverbindung sollten für alle Phasen des Lebensweges berücksichtigt werden²⁷. In Abbildung 2 ist in Anlehnung an die VDI Richtlinie 4800 Blatt 1 die Abhängigkeit der Verbindungseigenschaften und der dafür notwendigen Ressourcen im Fügeprozess als Verhältnisgleichung dargestellt.

²⁴ Vgl. VDI ZRE (2015), S. 80.

²⁵ Vgl. Neugebauer, R. (2014), S. 677.

²⁶ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 20.

²⁷ Vgl. Matthes, K.-J. und Schneider, W. (2012), S. 15 f.

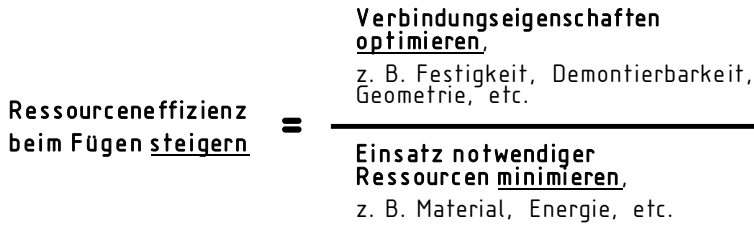


Abbildung 2: Ressourceneffizienz beim Fügen²⁸

Alle technischen Randbedingungen werden zusätzlich von wirtschaftlichen Faktoren beeinflusst. Art und Umfang der Handhabe-, Vorrichtungs- und Spanntechnologien sind beispielsweise von der zu fertigenden Stückzahl abhängig. Alle spezifischen Einflüsse sind von der Auswahl der Fügeprozesse bis zur Auslegung der kompletten Anlagenstruktur für jeden Anwendungsfall individuell zu berücksichtigen.²⁹

²⁸ In Anlehnung an VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 12.

²⁹ Vgl. Feldmann, K.; Schöpfer, V. und Spur, G. (2014), S. 20.

3 RESSOURCENEFFIZIENZMASSNAHMEN BEIM FÜGEN

Die Ressourceneffizienz eines Produkts oder Prozesses ist gemäß VDI Richtlinie 4800 Blatt 1³⁰ das Verhältnis eines bestimmten Nutzens zum dafür nötigen Aufwand. Der Aufwand stellt dabei den Einsatz natürlicher Ressourcen dar. Der Nutzen kann ein Produkt, eine Funktion oder das Ergebnis eines Prozesses sein.

Wie für jeden technischen Prozess gibt es auch bei den Fügeverfahren vielfältige Maßnahmen, die Material- und Energieeffizienz zu steigern. Dabei kann man zwischen prozess- und produktbezogenen Maßnahmen differenzieren. Die Identifizierung möglicher Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz basiert auf einer umfangreichen Literaturrecherche und orientiert sich darüber hinaus an der VDI Richtlinie 4800 Blatt 1³¹. Im konkreten Anwendungsfall können aus den aufgeführten Maßnahmen die jeweils passende(n) aufgegriffen und ggf. individuell angepasst werden. Dabei sind die Auswirkungen auf den gesamten Lebensweg zu berücksichtigen.

Ergänzend zu den in Kapitel 3.1 und 3.2 aufgeführten Maßnahmen werden in Kapitel 4 unterschiedlichste Praxisbeispiele beschrieben, um weitere Anregungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim Fügen zu geben.

3.1 Prozessbezogene Maßnahmen

Bei den sogenannten prozessbezogenen Maßnahmen geht es um Möglichkeiten zur Ressourceneffizienzsteigerung, die direkt im Herstellungsprozess realisiert werden. Dabei werden Fertigungsabläufe oder Maschinen im Hinblick auf den Material- und Energieverbrauch effizienter gestaltet. In Abbildung 3 ist ein Entscheidungsbaum zum Vorgehen bei der Umsetzung prozessbezogener Maßnahmen dargestellt: Als erstes sollte geprüft werden, ob ein alternatives Verfahren ressourceneffizienter ist. Ist das bestehende Fügeverfahren im Vergleich zu anderen schon ressourceneffizient oder verhindern technische Anforderungen einen Verfahrenswechsel, bieten die

³⁰ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 5.

³¹ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

Bereiche Teilehandhabung, Prozesstechnik und Fügehilfsstoffe Möglichkeiten, Maßnahmen zur Ressourceneffizienzsteigerung durchzuführen. Für eine übergreifende Ressourceneffizienzsteigerung sollten dann ebenso vor- und nachgelagerte Prozesse wie die Bauteilvorbereitung und Logistik einbezogen werden.

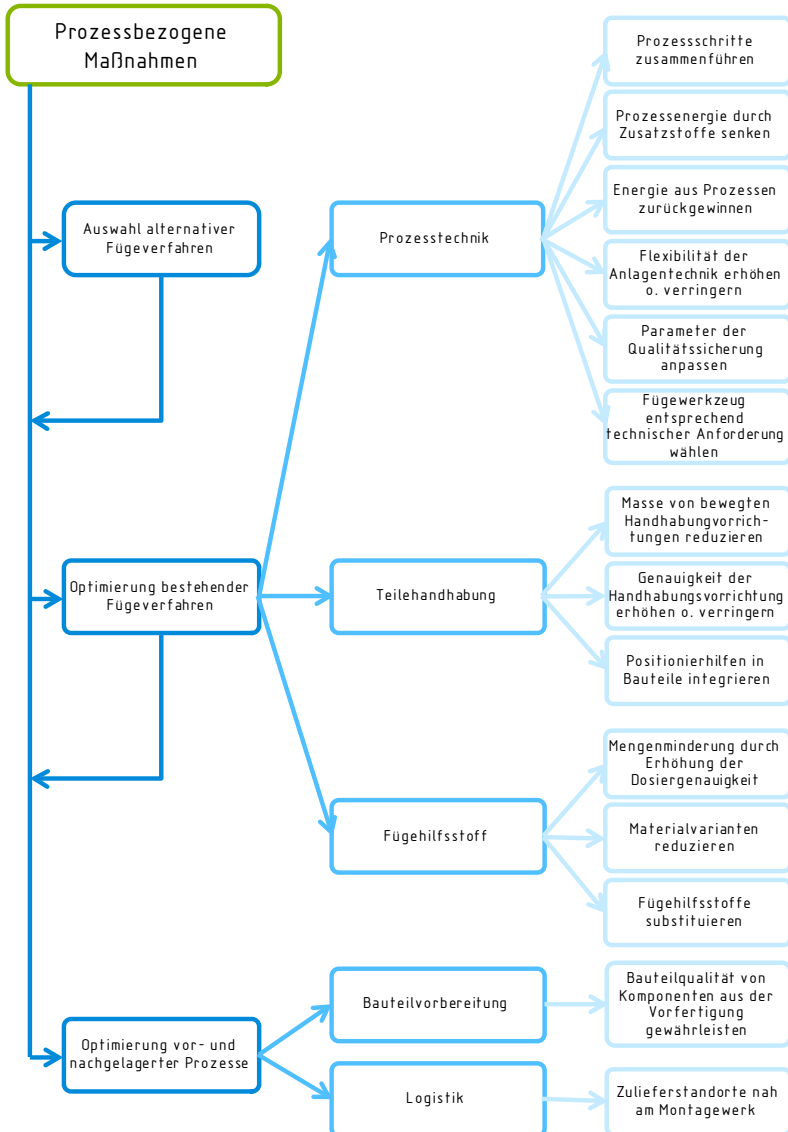


Abbildung 3: Prozessbezogene Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz von Fügeverfahren

3.1.1 Auswahl alternativer Fügeverfahren

Zur Steigerung der Ressourceneffizienz eines Fügeverfahrens kann es zielführend sein, ein alternatives Verfahren anzuwenden. Bei der Auswahl des für das jeweilige zu fügende Produkt effizientesten Fügeverfahrens müssen die verschiedenen Fügetechnologien im Kontext der Randbedingungen einer Fertigung und der Anforderungen an das gefügte Bauteil betrachtet werden³² (vgl. Kapitel 2.2). Eine Festlegung hinsichtlich des Fügeverfahrens lässt sich aus den geforderten Produkteigenschaften ableiten und grenzt die Auswahlmöglichkeiten ein. Bei der Auswahl eines alternativen Fügeverfahrens muss berücksichtigt werden, dass dieses vielfältige Auswirkungen auf andere Prozesse und Einflussfaktoren haben kann.

3.1.2 Optimierung bestehender Fügeverfahren

Kann durch die Auswahl eines alternativen Fügeverfahrens keine Steigerung der Ressourceneffizienz erzielt werden oder verhindern technische Anforderungen einen Wechsel des Verfahrens, sollte eine Optimierung des bestehenden Fügeverfahrens geprüft werden. Hierfür stehen verschiedene Ansatzpunkte und Maßnahmen zur Verfügung:

Prozesstechnik

- **Prozessschritte zusammenführen:** Die Zusammenführung von Prozessschritten kann zur Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen. Werden z. B. selbstschneidende Schrauben verwendet, kann der Prozessschritt des Bohrens und somit dafür notwendige Werkzeuge und Energie eingespart werden.
- **Prozessenergie durch Zusatzstoffe senken:** Der bei thermischen Fügeverfahren notwendige Wärmeeintrag kann in Form elektrischer, mechanischer oder chemischer Energie zum Einsatz kommen. Eine Reduktion des Energieeinsatzes kann dabei unter anderem durch die Senkung der Prozesstemperatur erreicht werden. Dies kann mittels Zusatzstoffen, die bei niedrigeren Temperaturen schmelzen als herkömmliche Zusätze, erreicht werden.

³² Vgl. Neugebauer, R. (2014), S. 683.

- **Energie aus Prozessen zurückgewinnen:** Bei der Verwendung energieintensiver Prozesse, wie z. B. Schweißen, oder Prozessen, in denen Füge Teile erwärmt und wieder abgekühlt werden müssen, wie z. B. Aufschumpfen, kann die Ressourceneffizienz durch Rückgewinnung der Prozessenergie erhöht werden. Die für Schweißabgase notwendige Absaugung kann zum Wärmetausch genutzt werden. Werden Bauteile für den Fügevorgang erwärmt und anschließend wieder abgekühlt, kann dem Kühlmedium Wärme entzogen werden.

- **Flexibilität der Anlagentechnik:** Je nach Anzahl der zu fügenden Produktvarianten beeinflusst die Flexibilität der Anlage deren Ressourceneffizienz.
 - Eine Anlagentechnik mit einer hohen Flexibilität ermöglicht es, mehrere Produktvarianten auf einer Anlage zu fügen und zusätzliche Anlagenteile einzusparen. Hinsichtlich Material- und Energieeffizienz der Anlage müssen dann aber meist Kompromisse eingegangen werden, z. B. führt das Anfahren nach einem Typenwechsel zu Anfahr ausschüssen.

 - Wird das Fügen mehrerer Produktvarianten über unterschiedliche Anlagenteile realisiert, bieten die individuellen Anlagenteile meist ein hohes Optimierungspotenzial hinsichtlich Material- und Energieverbräuchen. Demgegenüber stehen z. B. der Material- und Energieaufwand für den Bau der Anlagenteile und energetische Stand-by-Verluste.

- **Parameter der Qualitätssicherung anpassen:** Ausschussminimierung und eine Reduzierung von Nacharbeit können durch eine optimale Qualitätssicherung erreicht werden. Dafür ist zunächst eine Bestimmung geeigneter Prozessparameter mit dem Fokus auf die Maßhaltigkeit der gesamten Baugruppe notwendig.³³ Eine Festlegung von Prüfmethode innerhalb des Fertigungsprozesses (Definition von Prüfintervallen, -merkmalen, -dokumenten) ermöglicht dann eine Senkung der Aus-

³³ Vgl. Fraunhofer IWU (2016).

schussquote bzw. eine Erhöhung der Gutteilanzahl und somit eine Reduktion von Materialverlusten.³⁴

- **Fügewerkzeug entsprechend technischer Anforderung wählen:** Die Qualität und die Zuverlässigkeit der Fügeprozesse hängen auch von der Funktionsweise und Steifigkeit der eingesetzten Werkzeuge ab. Beispielsweise weist bei der Gestaltung von Schraubwerkzeugen der Einsatz elektrisch angetriebener Einheiten mit der Möglichkeit der besseren Regelung eine höhere Qualität auf als pneumatisch angetriebene Einheiten.³⁵

Teilehandhabung

- **Masse der Handhabungsvorrichtung reduzieren:** Eine Maßnahme zur Einsparung von Energie und Material bei der Handhabung von Füge­teilen ist die Reduktion der Masse der Handhabungsvorrichtung(en). So werden bei einer dem Belastungsfall angepassten Dimensionierung bewegter Vorrichtungen (z. B. Roboterarm, Robotergreifer) gegenüber einer Überdimensionierung Material (in der Herstellung) und Energie (in der Nutzungsphase) eingespart.
- **Genauigkeit der Handhabungsvorrichtung:** Durch die Anpassung der Genauigkeit der Handhabungsvorrichtung kann eine Steigerung der Material- bzw. Energieeffizienz erreicht werden. Folgende Möglichkeiten können zielführend sein:
 - Eine Erhöhung der Genauigkeit der Handhabungsvorrichtung reduziert fehlerhafte Fügeverbindungen, Nacharbeit oder Ausschuss und spart somit Material ein. Demgegenüber kann ein höherer Energieaufwand für zusätzliche Sensorik zum genauen Positionieren der Füge­teile notwendig sein.

³⁴ Vgl. VDI ZRE (2015), S. 84.

³⁵ Vgl. Feldmann, K.; Schöpfer, V. und Spur, G. (2014), S. 17.

- In manchen Fällen wird die Genauigkeit der Handhabungsvorrichtung nicht benötigt. Infolgedessen können Sensorik und Energie eingespart werden.
- **Positionierhilfen in Bauteile integrieren:** Durch die Integration von Positionierhilfen, wie z. B. Stift-Bohrungs-Kombinationen, kann mitunter auf eine externe Positionierhilfe verzichtet werden. Die Entscheidung hinsichtlich externer oder integrierter Positionierhilfen wird von der Stückzahl beeinflusst. Je geringer die Stückzahl, desto eher ergeben integrierte Positionierhilfen die ressourceneffizientere Variante.

Fügehilfsstoff

- **Mengenminderung durch Erhöhung der Dosiergenauigkeit:** Durch exaktes Dosieren - beispielsweise von Kleber - wird eine Verringerung der Einsatzmenge von Hilfsstoffen erreicht.
- **Materialvarianten reduzieren:** Eine Reduktion der Anzahl der zur Anwendung kommenden Hilfsstoffe führt zu einem reduzierten Aufwand für Lagerung, Materialvorbereitung und dafür notwendige Anlagen³⁶ und somit zu einer Einsparung von Ressourcen.
- **Fügehilfsstoffe substituieren:** Es sollte die Möglichkeit geprüft werden, ob alternative Fügehilfsstoffe verfügbar sind, die weniger Energie für ihre Verarbeitung benötigen oder auf Basis erneuerbarer Rohstoffe hergestellt werden. So kann z. B. geprüft werden, ob Klebstoffe auf Wasserbasis die Anforderungen der Fügeverbindung ebenso erfüllen wie Klebstoffe auf Lösemittelbasis.

3.1.3 Optimierung vor- und nachgelagerter Prozesse

Neben dem eigentlichen Fügeprozess sollten für eine umfängliche Steigerung der Ressourceneffizienz auch vor- und nachgelagerte Prozesse auf Verbesserungspotenzial geprüft werden. Vor allem in den Bereichen Bau-

³⁶ Vgl. VDI ZRE (2015), S. 84.

teilverbereitung und Logistik können Optimierungen vorgenommen werden.

Bauteilvorbereitung

- **Bauteilqualität von Komponenten aus der Vorfertigung gewährleisten:** Komponenten aus der Vorfertigung mit ihren geometrischen und technologischen Eigenheiten und spezifischen Qualitätsmerkmalen nehmen einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität des Füge- und Montageprozesses. Geringe Deformationen bei Kunststoffteilen durch Verzug oder unerwartete Grathöhen bei Blechteilen können zu höheren Fehler- und Ausschussraten in der Montage führen. Eine Eingangskontrolle der zu fügenden Einzelteile bzw. eine unterstützende optische und taktile Sensorik in den kritischen Zuführstrecken sichert den Füge- und Montageprozess.

Logistik

- **Anpassung der Zulieferstandorte zum Montagewerk:** Die Positionierung der Montagewerke in den global verteilten Märkten beeinflusst die Ressourceneffizienz der Füge- und Montageprozesse. Der Aufwand für die Verteilung und Logistik der zu fügenden Einzelteile muss bei der Betrachtung der Ressourceneffizienz mit berücksichtigt werden. Diese Abwägung hängt eng mit Entscheidungen in der Produktentwicklung zusammen, beispielsweise im Sinne der klassischen Entscheidungsfrage zur Make-or-Buy-Problematik bei funktionsintegrierten Komponenten.

3.2 Produktbezogene Maßnahmen

Die Vielfalt der Anforderungen an einen material- und energieeffizienten Fügeprozess lässt sich nicht allein durch Prozessoptimierung und intelligente Montagelösungen realisieren. Bei sogenannten produktbezogenen Maßnahmen spielt das Zusammenwirken der fertigungs- und montagegerechten Produktgestaltung und des Prozesses eine bedeutende Rolle.

Bei den in Abbildung 4 dargestellten produktbezogenen Maßnahmen handelt es sich um diejenigen, die durch eine Modifizierung der Bauteile bzw. des Produktes zu einer Senkung des Material- und Energieverbrauches führen. Diese Ressourceneinsparung kann sich in unterschiedlichen Pha-

sen des Lebensweges auswirken (vgl. Kapitel 2.2). Leichtbaumaßnahmen adressieren beispielsweise in der Regel die Nutzungsphase, während eine fertigungs- und montagegerechte Produktgestaltung vorrangig Energie- und Materialeinsparungen in der Herstellungsprozesskette zum Ziel haben.

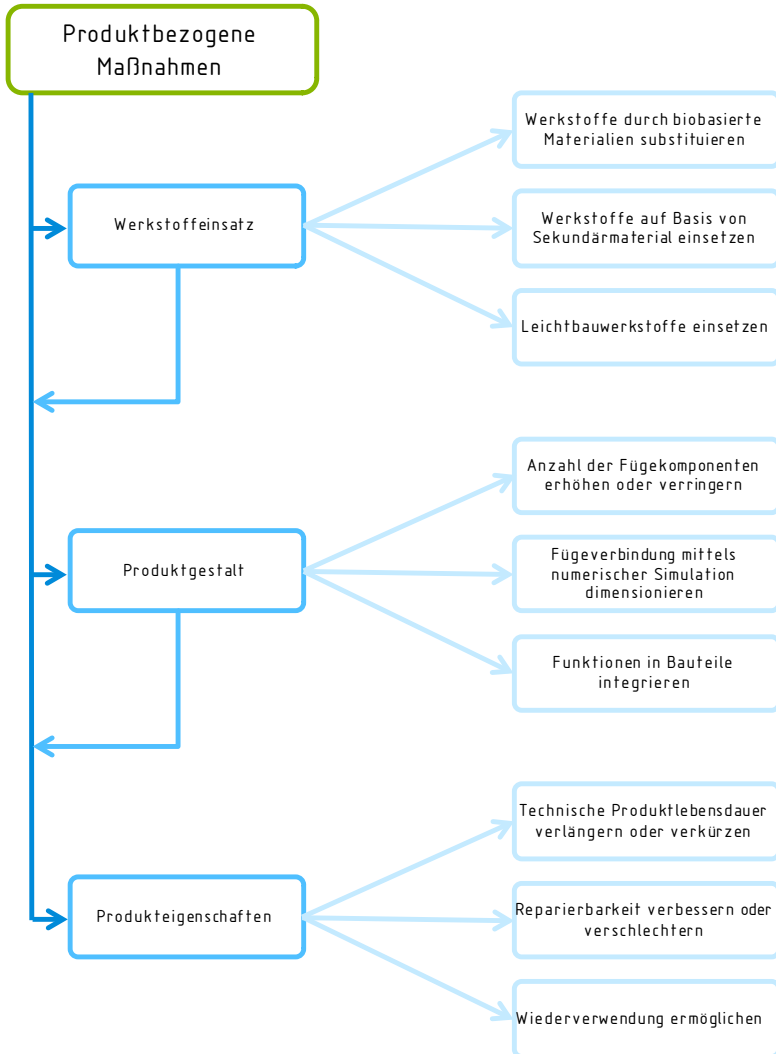


Abbildung 4: Produktbezogene Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz von Fügeverfahren

Je eher im Produktentwicklungsprozess eine Ressourceneffizienzmaßnahme ergriffen wird, desto größer ist in der Regel deren Wirkung. Dabei werden Entscheidungen über Funktion, Wirkprinzip, Gestalt und Werkstoffe getroffen und somit Fertigungsverfahren oder Recyclingprozesse festgelegt.³⁷ Folglich wird dabei schon über einen Großteil der Herstellungskosten und des Ressourceneinsatzes entschieden.³⁸ Im Folgenden werden verschiedene produktbezogene Maßnahmen und deren Auswirkung auf die Ressourceneffizienz diskutiert:

Werkstoffeinsatz

- **Werkstoffe durch biobasierte Materialien substituieren:** Der Einsatz ressourceneffizienterer Materialien kann z. B. durch die Beachtung möglichst umweltschonender Rohstoffförderung und ressourceneffizienter Vorproduktionen, wie oftmals bei biobasierten Materialien, realisiert werden. Biobasierte Materialien können meist wie konventionelle Materialien verarbeitet werden, z. B. auch durch Kleben oder Schweißen.³⁹
- **Werkstoffe auf Basis von Sekundärrohstoff einsetzen:** Durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen kann die Ressourceneffizienz der Vorkette des eigentlichen Fügeverfahrens erhöht werden.⁴⁰ Der Einsatz von Sekundärrohstoffen kann im zu fügenden Produkt oder in den Fügehilfsstoffen erfolgen. Beispiele für etablierte Sekundärrohstoffe sind Stahl, Aluminium oder Thermoplaste.
- **Leichtbauwerkstoffe einsetzen:** Effiziente und werkstoffgerechte Füge-technologien sind maßgeblich für den innovativen Leichtbau mit seiner Material- und Gewichtseinsparung und die daraus resultierende Ressourceneinsparung während der Nutzungsphase. Für die ganzheitliche Bewertung der Ressourceneffizienz von Leichtbaumaßnahmen beim Fügen sind insbesondere der Energieverbrauch von in der Vorkette einge-

³⁷ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 18.

³⁸ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 18.

³⁹ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 37.

⁴⁰ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 14.

setzten Materialien und die Möglichkeit der Wiederverwertung der Materialien am Ende des Produktlebens von Bedeutung.⁴¹

Produktgestalt

- **Anzahl der Fügekomponenten:** Es sollte geprüft werden, ob im Sinne der Ressourceneffizienz die Notwendigkeit des Fügens vermieden werden kann oder herbeigeführt werden sollte:
 - In manchen Fällen kann die Ressourceneffizienz gesteigert werden, wenn es gelingt, ein bisher gefügtes Produkt aus einem Bauteil herzustellen und das Fügen zu vermeiden. Häufig ergibt sich durch einen reduzierten Fügeumfang auch ein Wegfall eines Fertigungsschrittes und somit eine Ressourcenersparnis.
 - In anderen Fällen kann die Ressourceneffizienz gesteigert werden, wenn ein Produkt, das bisher als monolithisches Produkt in einem anderen Fertigungsverfahren hergestellt wurde, stattdessen gefügt wird. Denkbar hierfür wäre z. B. anstelle eines aus dem Vollen gefrästen Produktes, bei dem viel Zerspanungsvolumen anfällt, ein aus zwei endabmessungsnah hergestellten Einzelteilen zu fügendes Produkt.

In beiden Fällen sollte der Lebensweggedanke (vgl. Kapitel 2.2) mit berücksichtigt und die Ressourceneffizienzanalyse nicht allein auf die Herstellungsphase reduziert werden.

- **Fügeverbindung mittels numerischer Simulationen dimensionieren:** Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim Fügen stellt die numerische Prozesssimulation dar. Mittels Simulationen sind genaue Beanspruchungsanalysen bzw. Lebensdauervorhersagen für Fügeverbindungen möglich. Die technischen Spezifikationen der Fügeverbindung können dadurch entsprechend der Produktlebensdauer ausgelegt werden. Eine montagerechten Produktgestaltung und Fügeabläufen können simuliert und damit die Fehlerquote im Prozess reduziert werden. Darüber hinaus kann durch den Einsatz von Simulati-

⁴¹ Vgl. VDI ZRE (2013a), S. 47.

onen mitunter auch auf die ressourcenaufwändige Herstellung von Prototypen verzichtet werden.

- **Funktionen in Bauteile integrieren:** Die Substitution mechanischer durch elektronische Funktionsträger stellt eine weitere Maßnahme für Ressourceneffizienz dar. Mit diesem Ansatz kann eine Funktionsintegration auf kleinerem Bauraum und somit ein reduziertes Montagevolumen erreicht werden.⁴² Anspruchsvolle Montageaufgaben mit zuvor aufwendig hergestellten mechanischen Bauteilen können somit reduziert werden oder teilweise sogar entfallen.⁴³ Darüber hinaus lassen sich beispielsweise durch den direkten Aufbau elektronischer Funktionen auf ein Gehäuseteil (Moulded Interconnect Devices (MID)) Vorteile bei der Prozessgestaltung und Prozessoptimierung generieren.⁴⁴ Jedoch ist für die Herstellung und Verwertung elektronischer Funktionsträger gegenüber mechanischen Funktionsträgern meist ein höherer Ressourcenaufwand notwendig.

Produkteigenschaften

- **Technische Produktlebensdauer:** Die Produktlebensdauer hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Ressourceneffizienz eines Produktes. Dabei können je nach Anwendungsfall zwei Strategien zielführend sein:
 - Eine Verlängerung der Produktlebensdauer wird durch die Auswahl von Fügeverfahren erreicht, die z. B. keine Spannungen aufgrund lokaler Hitze zur Folge haben, die eine verbesserte Festigkeit des Produktes bieten oder hohen Anforderungen an Korrosionsbeständigkeit, Dichtigkeit, Optik, Maßhaltigkeit gerecht werden. Fügeverbindungen mit diesen Eigenschaften sind mit einem erhöhten Ressourcenaufwand in der Herstellung verbunden und amortisieren sich erst über eine längere Produktlebensdauer.

⁴² Vgl. Feldmann, K.; Schöpfer, V. und Spur, G. (2014), S. 4.

⁴³ Vgl. Feldmann, K.; Schöpfer, V. und Spur, G. (2014), S. 7.

⁴⁴ Vgl. Feldmann, K.; Schöpfer, V. und Spur, G. (2014), S. 18.

- Eine gesteigerte Ressourceneffizienz durch eine Verkürzung der Produktlebensdauer sollte dann in Betracht gezogen werden, wenn das gefügte Produkt einem schnellen technologischen Wandel unterliegt und erwartet wird, dass das Nachfolgeprodukt eine viel höhere Effizienz aufweist. Wenn diese Voraussetzungen vorliegen, können die Fügeverbindungen mit weniger Ressourcenaufwand für eine verkürzte Produktlebensdauer ausgelegt werden.
- **Reparierbarkeit:** Die Reparierbarkeit eines Produktes ermöglicht eine Verlängerung der Nutzungsdauer durch den Austausch von Komponenten, die gegenüber anderen Komponenten stärker abgenutzt oder verschlissen sind.
 - Eine Verbesserung der Reparierbarkeit kann durch lösbare Fügeverbindungen am Produkt erreicht werden. So lassen sich Komponenten des Produktes besser erreichen oder austauschen. Eine Erhöhung der Anzahl an Fügeverbindungen ist meist mit einem größeren Ressourcenaufwand verbunden.
 - Bei Produkten, die einem schnellen technischen Wandel und großen Innovationsprüngen unterliegen, kann meist darauf verzichtet werden, über einen höheren Ressourcenaufwand Reparierbarkeit herbeizuführen.
- **Wiederverwendung ermöglichen:** Für eine Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung von Komponenten und Materialien im Produktkreislauf ist der Aspekt des „End of Life“ (EoL) bzw. der Demontage bereits bei der Produktentwicklung und Werkstoffauswahl zu berücksichtigen. Die Bedeutung einer späteren Wiederverwendung der Einzelteile kann eine maßgebliche Rolle spielen, wenn es um die Wahl zwischen lösba- ren und nicht lösba- ren Verbindungen geht.⁴⁵ Somit stellt in einem ganzheitlichen Ansatz die gemeinsame Betrachtung der Prozessoptimie-

⁴⁵ Vgl. Feldmann, K.; Schöpper, V. und Spur, G. (2014), S. 17.

rung von Montage- und Demontagevorgängen einen wichtigen Aspekt bei der Auswahl der einzusetzenden Füge Technologien dar.⁴⁶

3.3 Anwendungsrestriktionen

Für jede der genannten Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim Fügen müssen für den jeweiligen konkreten Anwendungsfall unterschiedliche technische und wirtschaftliche Randbedingungen berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2.2). Dafür können die in der folgenden Übersicht zusammengestellten Anwendungsrestriktionen zum Einsatz kommen. In der Regel handelt es sich um harte Kriterien, sodass eine Beantwortung mit „ja“ oder „nein“ erfolgen kann.

Die Anwendungsrestriktionen wurden u. a. aus den Anforderungen an die Füge Technologien und die Produkteigenschaften, die als Zielgrößen zueinander definiert sind, abgeleitet (vgl. Abbildung 2, Kapitel 2.2). Die Anwendungsrestriktionen geben einen ersten Anhaltspunkt, ob sich durch Effizienzmaßnahmen in einer Phase des Produktlebensweges an anderer Stelle im Lebensweg Nachteile ergeben.

Anwendungsrestriktionen für Effizienzmaßnahmen

(1) Ist die Effizienzmaßnahme für die zu produzierende Stückzahl geeignet?

Fügeverfahren, die beispielsweise eine umfangreiche und/oder unflexible Anlagentechnik erfordern und stattdessen weniger Fügehilfsstoffe verbrauchen, können für hohe Stückzahlen effizient sein, bei kleinen Stückzahlen hingegen ineffizient.

(2) Ist Demontage/Reparierbarkeit eine Anforderung an das Produkt?

Ist als Produkteigenschaft Demontierbarkeit/Reparierbarkeit gefordert, sollte das Fügeverfahren eine lösbare Verbindung hervorbringen.

⁴⁶ Vgl. Feldmann, K.; Schöpfer, V. und Spur, G. (2014), S. 5.

(3) Wird die erforderliche Festigkeit erreicht?

Die Effizienzmaßnahme sollte dahingehend geprüft werden, ob die Produkteigenschaften hinsichtlich der geforderten Festigkeit erfüllt werden.

(4) Kann die gewünschte Geometrie gefertigt werden?

Nicht alle Geometrien der gefügten Bauteile können mit allen Fügeverfahren dargestellt bzw. gefertigt werden (Zugänglichkeit für das Fügewerkzeug⁴⁷ etc.). Mögliche Fertigungstoleranzen beeinflussen ebenfalls die Wahl des Fügeverfahrens⁴⁸ und führen ggf. zu Anwendungsrestriktionen einzelner Effizienzmaßnahmen.

(5) Werden alle Materialanforderungen erfüllt?

Die Materialeigenschaften sollten alle Anforderungen an die geforderten Produkteigenschaften und den Fügeprozess erfüllen (Fügbareit der Werkstoffe).

(6) Übersteigt der Ressourcenaufwand vor- oder nachgelagerter Prozesse die lokale Ressourceneinsparung der Maßnahme?

Um lokale Optima mit einer geringeren Gesamtressourceneffizienz zu vermeiden, ist eine Untersuchung der Ressourceneffizienz im gesamten Lebensweg erforderlich.⁴⁹

Werden aus Materialeffizienzgründen andere Materialien (z. B. andere Fügehilfsstoffe) eingesetzt, sollte beispielsweise der Energieverbrauch des Fügeprozesses mit dem neuen Fügehilfsstoff und auch der Energieverbrauch bei der Herstellung des Fügehilfsstoffes berücksichtigt werden.

Wird der Einsatz von Verfahrensergänzungen (z. B. der Einsatz von zusätzlichen Prüfverfahren) notwendig, muss geprüft werden, ob die primären Einsparungen der Effizienzmaßnahme durch den Ressourceneinsatz für die Verfahrensergänzung nicht aufgezehrt werden.

⁴⁷ Vgl. Fahrenwaldt, H. J.; Twrdek, J. und Schuler V. (2014), S. 441.

⁴⁸ Vgl. Fahrenwaldt, H. J.; Twrdek, J. und Schuler V. (2014), S. 441.

⁴⁹ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 21.

4 BEISPIELE ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ BEIM FÜGEN

In diesem Kapitel wird eine Auswahl unterschiedlicher Beispiele zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim Fügen vorgestellt und diskutiert. Dabei werden insbesondere die Vor- und Nachteile einzelner Verfahren im Hinblick auf typische Anwendungsfelder und Produkte beleuchtet. Die jeweils relevanten Maßnahmen und die zu beachtenden Anwendungsrestriktionen werden am Ende jedes Beispiels aufgelistet.

4.1 Thermische Fügeverfahren

Wie in Kapitel 2.1 ausgeführt, bieten thermische Fügeverfahren insbesondere Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energieverbrauchs. Häufig werden diese Maßnahmen jedoch nicht losgelöst von Materialeffizienzmaßnahmen durchgeführt. Energieeffizienzmaßnahmen bringen häufig neben der Energieeinsparung auch eine Materialeinsparung mit sich.

4.1.1 High-Speed-WIG-Brenner

In einem durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Entwicklungsprojekt wurde die Produktivität des Wolfram-Inert-Gas-Schweißens (WIG-Schweißens) durch die Umsetzung eines „High-Speed-WIG-Brenners“ erhöht. Dabei wurde die Schweißgeschwindigkeit erheblich gesteigert und somit der Gasverbrauch pro Zeiteinheit und auch der absolute Verbrauch für eine Schweißaufgabe gesenkt. Beispielsweise macht die Schweißzeit beim Stichlochschiessen eines 6 mm dicken Bleches nur noch etwa 30 % der WIG-Schweißzeit aus.⁵⁰

Zusätzlich kann auch der Verbrauch an Zusatzwerkstoffen um etwa 70 bis 80 % reduziert werden, da im Gegensatz zum WIG-Schweißen lediglich der die Nahtunterwölbung ausmachende Teil der V-Naht mit Zusatzwerkstoff aufgefüllt wird. Außerdem entfällt durch den Einsatz des „High-Speed-WIG-Brenners“ die aufwendige V-Nahtvorbereitung. Die vorhandenen Vorteile des WIG-Schweißens - geringe Nacharbeit durch relativ geringe Wärme-

⁵⁰ Vgl. DBU (2004).

einbringung bei einer sehr guten Schmelzbad-Abdeckung, ein ruhiger, nahezu spritzfreier Schweißprozess und eine dementsprechend gute Nahtoberfläche - bleiben erhalten. Sie können durch den „High-Speed-WIG-Brenner“ um Material- und Energieeinsparungen ergänzt werden. Der „High-Speed-WIG-Brenner“ wird aus Standardteilen der WIG-Brenner hergestellt und lediglich um eine zusätzliche Gasführung und Befestigung für die Zentrumsgasdüse ergänzt. Somit ist der Investitionsmehraufwand im Vergleich zu dem herkömmlichen WIG-Brenner gering. Das „High-Speed-WIG-Brennen“ kann somit eine ressourceneffiziente Alternative zum Lichtbogenschweißverfahren - insbesondere zu dem Metall-Inert-Gas (MIG)- oder Metall-Aktiv-Gas (MAG)-Schweißen - ergeben.⁵¹

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Prozesstechnik: Senkung des Gasverbrauches durch Steigerung der Schweißgeschwindigkeit beim Wolfram-Inert-Gas-Schweißen
- Fügehilfsstoff: Verringerung der Einsatzmenge von Zusatzwerkstoffen

4.1.2 Laserstrahlschweißen mit reduzierter Laserleistung

Im Rahmen der Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ (InnoCaT) konnte ein Qualitätsmanagementprojekt zur Realisierung einer optimierten Einschweißtiefe nach der Devise „nur so viel wie nötig“ umgesetzt werden. Durch den Einsatz eines Sensorsystems und zusätzlicher Beleuchtung zur Qualitätssicherung wurde eine präzise Prozessbeobachtung realisiert. Neben der Qualitätskontrolle kann dadurch in Echtzeit die nötige Laserleistung in Abhängigkeit des erfassten Prozesszustandes berechnet werden. Auf diese Weise wird eine optimierte Einschweißtiefe realisiert und durch die minimierte Laserleistung werden bis zu 50 % Energie eingespart.^{52, 53}

⁵¹ Vgl. DBU (2004).

⁵² Vgl. Fraunhofer IWU (2012), S. 8.

⁵³ Vgl. Fraunhofer IWU (2013), S. 76 f.

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Prozesstechnik: Einsatz von Sensorik zur Regulierung der Einschweißtiefe

4.1.3 Laserfügen von Rohrgläsern für Solarkollektoren

Als wesentlicher Bestandteil von Solarthermieranlagen sparen Solarröhrenkollektoren während ihres Produktlebens bereits große Mengen natürlicher Ressourcen ein. Um auch den Energieaufwand bei der Herstellung der Kollektoren zu verringern, wurden im Projekt „Laserfügen von Rohrgläsern für Solarkollektoren“ (LaFueSol) die produktionstechnische Substitution des Gasbrenners durch ein individuelles Laserfügen von Rohrgläsern und die Entwicklung einer temperaturfeldbasierten Prozessregelung für den Einsatz in einem vollautomatischen Maschinensystem untersucht. Auf diese Weise sollten die Nachteile des herkömmlichen Verfahrens – hohe energetische Verluste, chemischer Einfluss auf das Glas, geringe Reproduzierbarkeit der Fügeprozesse und Strahlenbelastung für das Anlagenbedienpersonal – eliminiert werden.⁵⁴

Das Projektergebnis bestand darin, dass die Prozesszeiten beim laserbasierten Fügen gegenüber der Verwendung eines Gasbrenners signifikant kürzer waren. Die Prozesszeiten konnten – in Abhängigkeit von der Rohrglasgeometrie – um 62 bis 82 % gesenkt werden. Die Energieeinsparungen betragen zwischen 27 bis 72 %. Ferner konnte auch die Qualität der Solarthermiegläser verbessert werden, da beim laserbasierten Erwärmen von Rohrglas eine symmetrische und damit bessere Spannungsverteilung realisiert wird. Somit kommt es zu keiner chemischen Beeinflussung des Glases.⁵⁵

⁵⁴ Vgl. Effizienzfabrik (2010).

⁵⁵ Vgl. Effizienzfabrik (2010).

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Prozesstechnik: Verkürzung der Prozesszeit auf 62 bis 82 % bei Energieeinsparung von 27 bis 72 % durch Substitution von Fügen mittels Gasbrenner durch Laserfügen
- Prozesstechnik: Verbesserung der Produktqualität durch symmetrische Spannungsverteilung

4.1.4 Schmalband-Umform-Laserschweißen ersetzt Stanzen

Beim konventionellen Stanzprozess zur Herstellung von Metallringen werden aus einem breiten Stahlband die Metallringe ausgestanzt. Die Stanzreste führen zu einer erheblichen Menge an Abfallmaterial.

In einem neuen Verfahren, dem sogenannten Schmalband-Umform-Laserschweißen, konnte der Materialnutzungsgrad auf annähernd 100 % gesteigert werden. Das Ausgangsmaterial wird als Schmalband über Rollbiegeeinheiten gerollt, per Laser abgetrennt und anschließend vom gleichen Laser direkt zu Ringen verschweißt. Anschließend werden die Blechringe vollautomatisch gebördelt, profiliert und gefast. Durch den Einsatz dieser verfahrenstechnischen Innovation fallen keine Stanzabfälle mehr an und der Materialeinsatz konnte somit um durchschnittlich 73 % im Vergleich zum konventionellen Stanzprozess reduziert werden. Das entspricht einer jährlichen Einsparung von 1.800 t Stahl und damit 2.700 t CO₂-Emissionen pro Schmalband-Umform-Laserschweiß-Anlage in diesem Beispiel. Darüber hinaus wird der CO₂-Ausstoß durch weniger Waren- und Abfalltransporte weiter gesenkt.⁵⁶

Produktbezogene Maßnahmen

- Produktgestalt: Reduktion des Materialeinsatzes bei der Herstellung von Metallringen um 73 % durch Umformen und Fügen mittels Laser anstelle des Stanzens von Bandmaterial

⁵⁶ Vgl. Freudenberg (2012).

4.1.5 Methoden zur Bewertung der Ressourceneffizienz von thermischen Fügeverfahren

Im Rahmen des Verbundprojektes „ENERWELD - Effiziente thermische Fügeverfahren“ zum BMBF-Förderschwerpunkt „Ressourceneffizienz in der Produktion“ werden Material- und Energieeinsparmöglichkeiten aufgrund einer ganzheitlichen Bewertung und Optimierung der Prozessketten demonstriert.⁵⁷

Kleinere Betrachtungen im Bereich der Schweißtechnik liefern oft nur relative Ergebnisse. Außerdem fallen die Einsparpotenziale innerhalb eines Verfahrens eher gering aus, da die Prozesse bereits sehr ausgereift sind. Beispielsweise haben beim Lichtbogenschweißen die Anlagentechnik, Produktivität und Prozesssicherheit sowie die Vielfalt der einsetzbaren Zusatzwerkstoffe bereits einen hohen technologischen Stand erreicht.⁵⁸ Daher werden bei dem ganzheitlichen Bewertungssystem nicht nur die einzelnen Fügeprozesse betrachtet, sondern der gesamte Wertschöpfungszyklus im Hinblick auf mögliche Effizienzsteigerungen bewertet. Zusätzlich werden die Systemgrenzen des Bewertungsraumes auf die vor- und nachgelagerten Prozessschritte und Verbindungseigenschaften erweitert.^{59, 60} Hierbei werden neben den eingesetzten Werkstoffen auch die Verbräuche von Schutzgas, elektrischer Energie und anderen Hilfsstoffen bewertet. Zusätzlich werden beispielsweise der Vorbereitungsaufwand (z. B. für Spannvorrichtungen und Nahtvorbereitung) und der Nachbereitungsaufwand (z. B. Entfernen von Spritzern) berücksichtigt.⁶¹ Diese ganzheitliche Betrachtung der Produktionsabläufe sorgt für mehr Transparenz und eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Technologien.

Im Rahmen des Projektes wurde das Softwaretool „WiRe“ als Bewertungswerkzeug entwickelt. Damit können vorhandene Fertigungsverfahren analysiert und alternative Prozessketten im Voraus geplant werden. Folgende

⁵⁷ Vgl. Goecke, S. (2012).

⁵⁸ Vgl. VDI ZRE (2013b), S. 57.

⁵⁹ Vgl. Fraunhofer IWU (2012), S. 3.

⁶⁰ Vgl. Fraunhofer IWU (2013), S. 64.

⁶¹ Vgl. Goecke, S. (2012).

Schlussfolgerungen konnten durch den Einsatz des Softwaretools gezogen werden:

- Die beim stoffschlüssigen Fügen eingebrachte Energie verringert sich durch den Einsatz hochfester, aber niedrigschmelzender Zusatzstoffe.
- Der thermische Wirkungsgrad der Fügeverfahren lässt sich durch niedrigere Schmelzbadvolumina und höhere Prozessgeschwindigkeiten steigern.

Eine praxisnahe Validierung dieser Ergebnisse bestätigte, dass die Grenzen der etablierten Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen auf ganze Prozessketten erweitert werden müssen. Nur so können Technologiealternativen für die Produktion in Hinblick auf ihren Energie- und Materialbedarf bewertet und verglichen werden.⁶²

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Prozesstechnik: Planung und Analyse von Prozessketten der Füge-technik durch Softwaretools

4.2 Mechanische Fügeverfahren

In diesem Unterkapitel werden einerseits Beispiele aufgeführt, bei denen durch eine Optimierung des Fügeverfahrens bzw. der Fügehilfsmittel eine Ressourceneffizienzsteigerung erreicht wird (Kapitel 4.2.1 - 4.2.3). Andererseits werden auch Beispiele aufgezeigt, bei denen durch die Substitution thermischer Fügeverfahren durch mechanische Fügeverfahren Ressourcen eingespart werden (Kapitel 4.2.4 - 4.2.6).

4.2.1 Optimiertes elektrisches Schrauben

Als eine der häufigsten Füge-techniken in der industriellen Serienfertigung birgt die Verschraubung ein beachtliches Effizienzpotenzial. Beispielsweise kann durch den Einsatz eines ergonomischen Handschraubers der Verschraubungsprozess optimiert und dabei der Ausschuss durch eine optima-

⁶² Vgl. Effizienzfabrik (2012).

le Abstimmung von Werkstück, Schraube, Drehmoment und Drehwinkel minimiert werden. Darüber hinaus haben moderne Schrauber die Möglichkeit, eine große Anzahl von Schraubprogrammen zu speichern. Diese können dann z. B. per Barcodescanner einem bestimmten Werkstück zugeordnet werden. Auf diese Weise können mehrere Druckluftschrauber und die dafür benötigte Peripherie ersetzt werden. Im Vergleich zur Drucklufttechnik können so bis zu 95 % Energie eingespart werden.^{63, 64}

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- **Prozesstechnik:** Einsparung von bis zu 95 % Energie durch Substitution mehrerer Druckluftschrauber durch einen elektrischen Schrauber

4.2.2 Schrauben schnell automatisch zuführen

Bei der Zuführung von Schrauben kann die Ausschussrate durch technische Sauberkeit und entsprechende Anforderungen reduziert werden. Dabei gilt es zu verhindern, dass Partikel und Metallstaub mit dem Schraubenschüttgut in den Zuführtopf gelangen oder dort durch Vibration oder Aneinanderreiben der Schrauben entstehen. Bei der Auswahl des Schraubenzuführsystems sollte vermieden werden, dass einzelne Schrauben im Vergleich zu anderen Schrauben über einen längeren Zeitraum im Umlauf sind, da dies ihre Qualität stark vermindern würde. Zuführsysteme, die auf Vibration und Sortierluft verzichten und bei denen stattdessen ein Förderband zum Einsatz kommt, sind daher zu bevorzugen.⁶⁵ Ferner bietet auch die Schraubenpositionierung Potenzial zur Ausschussminimierung, da verkeilte Schrauben zu einem Bandstillstand führen oder die Qualität und Prozesssicherheit mindern könnten.

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- **Teilehandhabung:** Nutzung von Zuführsystemen auf Förderbandbasis

⁶³ Vgl. ke NEXT (2013a).

⁶⁴ Vgl. bbr (2014).

⁶⁵ Vgl. Produktion (2015), S. 38.

4.2.3 Optimierte Geometrie des Gewindeauslaufs

Winkelfehler in der Schraubenpositionierung bei ihrer Zuführung können zu einer versetzten Platzierung ins Bauteil und zu einem anschließenden Verkanten führen, was Beschädigungen oder eine Zerstörung des Aufnahmegewindes zur Folge hätte. Produktionsausfälle und teilweise erhebliche Nachbearbeitungskosten wären die Konsequenz. Neben optimierten Zuführsystemen liegt eine weitere Lösung in der Geometrie des Gewindeauslaufs. Bei solchen Gewinden ist der Außendurchmesser der schmaleren Schraubenspitze bei konstanter Gewindesteigung kleiner als der Kerndurchmesser des Muttergewindes. Das beim Eindrehen der Schraube entstehende Moment richtet die Schraube und die Mutter dann linear zueinander aus und eine fehlerhafte Verschraubung wird somit verhindert. Die dadurch geringere Ausschussquote spart Material und Energie.⁶⁶

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Fügehilfsstoff: Vermeidung von Winkelfehlern bei Schraubenpositionierung durch optimierten Gewindeauslauf

4.2.4 Knickbauchen

Das „Fügen durch Knickbauchen“ ist nach DIN 8593-5 dem „Fügen durch Umformen“ zuzuordnen.⁶⁷ Bei diesem mechanischen Fügeverfahren wird ein rotationsymmetrisches Bauteil (in der Regel ein Rohrabschnitt) in das Loch eines Bleches gesteckt und anschließend derart geweitet, dass zwischen zwei gebildeten Knicken eine unlösbare Verbindung entsteht⁶⁸ (vgl. Abbildung 5).

⁶⁶ Vgl. ke NEXT (2013b).

⁶⁷ Vgl. DIN 8593-5:2003-09

⁶⁸ Vgl. EFB-Merkblatt (2015).



Abbildung 5: Anwendungsbeispiele Knickbauchen⁶⁹

Auf diese Weise lassen sich Rohre - ohne Einsatz von zusätzlichem Füge- material oder Hilfsmitteln - dauerhaft mit Blechen verbinden. Das Verfah- ren hat somit das Potenzial, beispielsweise komplexe Schweißprozesse zu ersetzen. Darüber hinaus kann das Fügen durch Knickbauchen zum Bei- spiel beim Fixieren von Kugellagern genutzt werden und damit Nutmut- tern und andere Lösungen ersetzen. Mögliche weitere Anwendungen fin- den sich in vielen Bereichen der metallverarbeitenden Industrie, z. B. in der Rohr- und Blechverarbeitung oder bei Automobilzulieferern. Anwen- dungsbeispiele können Verbindungen von Rohren und flächigen Bauteilen wie Achslenkern und anderen Fahrwerkskomponenten sein.⁷⁰

Das Fügen durch Knickbauchen ermöglicht die Herstellung innovativer Produkte, insbesondere solcher, die aus nicht schweißgeeigneten Werkstof- fen bestehen. Durch das Knickbauchen können verschiedene Materialien und Blechdicken gefügt sowie Mischverbindungen (z. B. Stahl/Aluminium, Kunststoff/Metall) hergestellt werden.⁷¹ Mischverbindungen kommen bei Leichtbaustrukturen immer häufiger zur Anwendung. Somit gewinnt auch das Fügen durch Knickbauchen für den Leichtbau an Bedeutung. Des Wei- teren können unerwünschte Materialeigenschaftsveränderungen an der Füge- stelle und Verzug verhindert werden, da - im Gegensatz zum Schwei- ßen - keine Wärmeeinbringung erfolgt. Dadurch können beispielsweise die Qualität und die Produktlebensdauer und somit wiederum die Ressour- ceneffizienz erhöht werden. Allerdings müssen Maßnahmen zum Korrosi- onsschutz beachtet werden (z. B. Lackieren), die ihrerseits weitere Res- sourcen in Form von Material und Energie verbrauchen.

⁶⁹ Grützner, P. (2014).

⁷⁰ Vgl. Nördinger, S. (2015e).

⁷¹ Vgl. EFB-Merkblatt (2015).

Die Wahl des Knickbauchens als alternatives Fügeverfahren hat also sowohl produkt- als auch prozessbezogene Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz. Die Ressourceneffizienz des Herstellungsprozesses wird gesteigert, indem zusätzliches Fügematerial (Schweißelektrode) oder Hilfsmittel (z. B. Nutmutter) und das damit verbundene zusätzliche Handhabung eingespart werden können. Je nach Komplexität des Produktes können sich unter Umständen auch die Anforderungen an die Prozessperipherie (z. B. Wegfall des energieintensiven Schweißprozesses und Verzicht auf Schweißroboter) so gestalten, dass eine weniger energie- und materialintensive Prozessperipherie für das Knickbauchen notwendig ist. Darüber hinaus können in der Regel die erreichbaren Taktzeiten reduziert werden.⁷²

Ob eine Substitution beispielsweise des Schweißens durch das Knickbauchen unter Ressourceneffizienz-Gesichtspunkten sinnvoll ist oder nicht, muss jedoch immer für das spezifische Produkt geprüft werden. Berücksichtigt werden sollten dabei beispielsweise Stückzahlen sowie vor- und nachgelagerte Prozesse. Sind weitere Schweißoperationen am selben Bauteil vorgesehen, ist tendenziell davon auszugehen, dass es ressourceneffizienter ist, die dann ohnehin vorhandenen Anlagen zum Schweißen zu nutzen.

Auswahl alternativer Fügeverfahren

- Substitution von Schweißen durch Knickbauchen
- Prozesstechnik: Reduktion des Energieeinsatzes pro Fügeäquivalent
- Fügehilfsstoffe: Wegfall von Fügehilfsstoffen

Produktbezogene Maßnahmen

- Werkstoff: Fügen unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe ermöglicht

⁷² Vgl. Nördinger, S. (2015e).

4.2.5 Hochgeschwindigkeitsfügen

Beim Hochgeschwindigkeitsfügen, einem „kalten“ Fügeverfahren, wird der Werkstoff nicht aufgeschmolzen, sondern plastisch umgeformt. Das bringt mehrere Vorteile mit sich. Zum einen können damit Mischverbindungen (z. B. Stahl/Aluminium) und somit Leichtbaustrukturen realisiert werden, die in einem reduzierten Energiebedarf während der Nutzungsphase des Produktes resultieren. Andererseits kann dadurch, dass neben dem energieintensiven Aufwärmen auch die Absaugung und Kühlung entfallen, bereits im Herstellungsprozess Energie gespart werden.^{73, 74} Mit der Entwicklung eines „kalten“ vorlochfreien Fügeverfahrens für höchstfeste Stähle konnte im Rahmen der Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ (InnoCaT) eine Reduzierung des Energieverbrauchs pro gesetztem Fügeelement um bis zu 75 % erreicht werden (vgl. Abbildung 6).

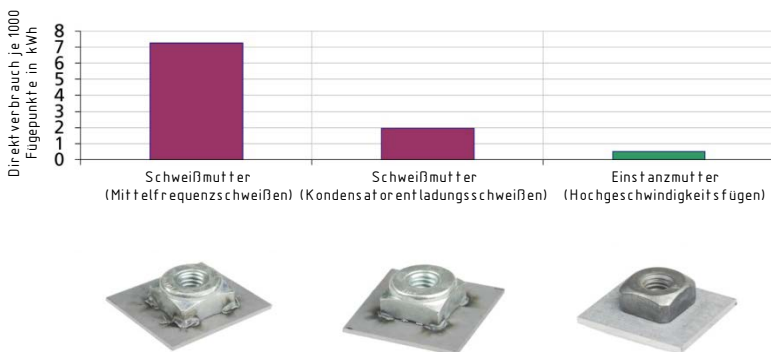


Abbildung 6: Messergebnisse zum Energieverbrauch des Hochgeschwindigkeitsfügens (Muttergröße M6, Blech 22MnB5 s=1,5 mm)⁷⁵

Die Gesamtlösung des Projektes umfasst die Neuentwicklungen der Muttergeometrie und elektromechanischer Antriebe, die Elementzuführung

⁷³ Vgl. Fraunhofer IWU (2012), S. 9.

⁷⁴ Vgl. Fraunhofer IWU (2013), S. 74.

⁷⁵ Vgl. Fraunhofer IWU (2013), S. 75.

sowie die Integration der Einzelkomponenten in eine Fügeanlagenkonstruktion.^{76, 77}

Auswahl alternativer Fügeverfahren

- Substitution von Schweißen durch Hochgeschwindigkeitsfügen
- Prozesstechnik: Reduktion des Energieeinsatzes pro Fügeäquivalent
- Fügehilfsstoffe: Wegfall von Fügehilfsstoffen

Optimierung vor- und nachgelagerter Prozesse

- Bauteilvorbereitung: Wegfall der Bauteilerwärmung und -kühlung

Produktbezogene Maßnahmen

- Werkstoff: ermöglicht Fügen unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe

4.2.6 Clinchen

Das Clinchen - auch Durchsetzfügen genannt - kann das Punktschweißen oder Nieten ersetzen und bietet eine besonders wirtschaftliche Alternative zum thermischen Fügen. Die Verbindung wird ohne zusätzliches Element oder Zusatzwerkstoffe durch lokale Kaltumformung der Bleche an der Fügestelle erzeugt. Außerdem wird kein Vorlochvorgang benötigt, was Ressourcen für entsprechende Anlagen sowie deren Wartung und Betrieb spart. Ein weiterer Vorteil des Clinchens liegt darin, dass aufgrund fehlender Kerbwirkung und nicht vorhandener Wärmeeinflusszone die Dauerfestigkeit höher als bei Punktschweißverbindungen ist, was bei den Anforderungen an das gefügte Produkt relevant sein kann. Ferner können auch verschiedenartige Materialien und/oder beschichtete Bleche gefügt werden.⁷⁸

⁷⁶ Vgl. Fraunhofer IWU (2012), S. 9.

⁷⁷ Vgl. Fraunhofer IWU (2013), S. 75.

⁷⁸ Vgl. Higgelke, R. (2014).

Auswahl alternativer Fügeverfahren

- Substitution von Schweißen oder Nieten durch Clinchen
- Prozesstechnik: Reduktion des Energieeinsatzes pro Fügeäquivalent
- Fügehilfsstoffe: Wegfall von Fügehilfsstoffen

Optimierung vor- und nachgelagerter Prozesse

- Bauteilvorbereitung: Wegfall des Vorlochprozesses (Nieten)

Produktbezogene Maßnahmen

- Werkstoff: ermöglicht Fügen unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe

4.3 Chemische Fügeverfahren

Die folgenden drei Beispiele zeigen unterschiedliche Ansätze und Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim Kleben und durch den Einsatz von Klebtechnik.

4.3.1 Buchbinden durch effizientes Kleben

Möglichkeiten zur Reduzierung des Energieverbrauchs beim konventionellen Buchbinden durch Kleben wurden im Rahmen eines Projektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) untersucht und im Sinne einer ganzheitlichen Optimierung zusammen mit weiteren Maßnahmen umgesetzt. Als Alternative für den bisher eingesetzten Heißleim wurde ein Kaltleim auf Dispersionsbasis (wasserbasierte lösemittelfreie Kleber) entwickelt. Durch Wegfall des Aufschmelzens des Schmelzklebers wird eine Reduktion des Energieeinsatzes und damit verbundener Emissionen erreicht.⁷⁹ Ergänzend wurde eine Dosier- und Auftragseinheit entwickelt, die die Klebstoffmenge und deren Auftragung automatisch an Format und Dicke der zu bindenden Druckerzeugnisse anpasst. Mit Hilfe eines Prototyps einer neuen Bindeanlage konnte durch die Verwendung des Kaltleims gegenüber dem konventionellen Heißleim in diesem Projekt eine Reduzierung des Energieverbrauchs um 130 kWh pro Tag erreicht werden. Dar-

⁷⁹ Vgl. VDI ZRE (2015), S. 84.

über hinaus konnte durch die Integration der sogenannten Trockenbeileimung in eine bestehende Produktionsanlage für Faserplatten der Bindemittelsatz um 10 % reduziert werden. Die getätigten Investitionen und die damit erreichten Ressourceneinsparungen stehen derzeit in keinem wirtschaftlichen Verhältnis. Allerdings wäre ohne diese Anlage die Installation eines Bio-Abgaswäschers zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte notwendig gewesen.⁸⁰

Darüber hinaus wurden zur Vermeidung von Energieverlusten der Kompressor verlegt sowie eine Erneuerung der Sammelleitung und eine Anpassung dieser an den Volumenstrom durchgeführt. Dadurch wurde eine Reduktion des Druckluftniveaus und somit eine zusätzliche Einsparung elektrischer Energie erreicht.⁸¹

Für eine vollständige Bewertung des Ressourceneffizienzpotenzials dieser Maßnahmen wäre eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus erforderlich. Die Herstellung der unterschiedlichen Leimsysteme und ihrer chemischen Bestandteile muss dabei genauso berücksichtigt werden wie die Reinigungsanforderungen an die unterschiedlichen Applikationstypen.

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Fügehilfsstoff: Mengenminderung des Klebstoffes durch produktspezifische Dosierung
- Fügehilfsstoff: Reduktion des Energieverbrauchs pro Fügeäquivalent durch Substitution von Heißleim auf Lösemittelbasis durch Kaltleim auf Dispersionsbasis

4.3.2 Karosserieleichtbau mittels Klebetechnik

Die klassischen thermischen und mechanischen Fügeverfahren stoßen bei dem für den Leichtbau meist erforderlichen Materialmix häufig an ihre Grenzen, wohingegen das Kleben einige Vorteile für das Multi-Material-

⁸⁰ Vgl. VDI ZRE (2015), S. 82 f.

⁸¹ Vgl. VDI ZRE (2015), S. 84.

Design bietet.⁸² Klebeverbindungen gewinnen dank der günstigen Betriebslastenverteilung und des Korrosionsschutzes bei Mischverbindungen immer stärker an Bedeutung und stellen eine Alternative zum Schrauben und Schweißen, Klipsen, Klemmen, Nieten etc. dar.⁸³

Im Karosseriebau beispielsweise sind bei einem konsequenten Einsatz der Klebetechnik Einsparungen von bis zu 20 % des Strukturgewichtes erreichbar. Bei einem Mittelklassewagen mit etwa 300 kg Rohkarosserie entspricht das einer Material- und Gewichtseinsparung von ca. 60 kg. Vor dem Hintergrund, dass in der Zukunft immer mehr geklebte Karosserien aus Stahlblech oder auch aus Aluminium auf dem Markt erscheinen werden, muss auch die Reparaturtechnologie weiterentwickelt werden.⁸⁴

Auswahl alternativer Fügeverfahren

- Substitution thermischer und mechanischer Fügeverfahren im Karosseriebau durch Kleben

Produktbezogene Maßnahmen

- Werkstoff: ermöglicht Fügen unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe

4.3.3 Weitere Ressourceneffizienz Aspekte beim Kleben

Oft existiert für eine Fügeaufgabe eine Lösung aus dem Bereich der Klebetechnik, die Beständigkeit gegen mechanische Belastungen, Widerstandsfähigkeit gegen eingesetzte Betriebsmittel, Gewichtsreduktion zur Verbesserung der Energieeffizienz oder auch die Schonung von Oberflächen gewährleistet⁸⁵. Darüber hinaus bieten Klebefilme bzw. strukturelles Kleben Designfreiheit auch für Klebungen auf kleinsten Flächen⁸⁶ und bieten Vorteile, wenn eine schnelle, einfache und prozesssichere Handhabung gefordert ist. Bei den meisten modernen Klebstoffen bzw. Strukturklebstoffen kann beispielsweise meist ohne die ressourcenintensive Oberflächenvor-

⁸² Vgl. Brockmann, W.; Geiß P. L.; Klingen, J.; Schröder K. B. (2005), Kap. 8.2.2.1.

⁸³ Vgl. Fraunhofer IWU (2015).

⁸⁴ Vgl. Brockmann, W.; Geiß P. L.; Klingen, J.; Schröder K. B. (2005).

⁸⁵ Vgl. Nördinger, S. (2015f).

⁸⁶ Vgl. Nördinger, S. (2015a).

behandlung geklebt werden.⁸⁷ Doppelseitige Acrylic-Foam-Klebebänder zum Beispiel können selbst auf schwierig zu verklebenden Kunststoffen verwendet werden. Durch die beidseitige Verankerung kann sogar Prozessflexibilität für ein anschließendes Erstellen von Stanzteilen gewährleistet werden. Auch positive Nebeneffekte wie das Ausgleichen von Unebenheiten sowie zusätzliche Dichtfunktionen und Dämmwirkung etc. können erreicht werden.⁸⁸

Das Sicherstellen einer hochpräzisen Dosierung – auch von Kleinstmengen – stellt einen entscheidenden Aspekt für einen ressourcenschonenden Einsatz der Klebtechnik dar. Für die Auftrags- bzw. Klebeleistung ist eine gute und exakte Temperierung der Kleber beim Transport von den Vorratsbehältern zur Applikationsdüse ausschlaggebend.⁸⁹ Verstopfte Schläuche oder Auftragsdüsen sowie Ablagerungen am Tankboden müssen vermieden werden. Für einen sachgemäßen und ressourcenschonenden Umgang mit Klebstoffen (Vermeidung des Abfallvolumens von Klebstoffen sowie der Reinigungs- und Vorbehandlungsmittel) sind eine gute Schulung und Sensibilisierung der Mitarbeiter unabdingbar. Für die entstehende Abfallmenge ist nicht der Automatisierungsgrad, sondern die Applikationstechnik entscheidend.⁹⁰ Darüber hinaus unterstützen auch moderne Dosieranlagen mit Begleitheizung, bei denen die elektrischen Heizelemente mittels integrierter Steuer- und Regeltechnik für eine optimale Temperaturabstimmung sorgen, den ressourcenschonenden Einsatz der Klebtechnik. Die Flexibilität der Heizelemente, insbesondere der Heizschläuche, ist notwendig, damit der Klebstoffauftrag zusammen mit Robotern präzise und effizient eingesetzt werden kann.⁹¹ Ergänzend hat die Reduzierung der zur Anwendung kommenden Klebstoffe weniger Klebstoffwechsel zur Folge und mindert somit den Arbeitsaufwand zum Vorrichten der Anlagen.⁹²

⁸⁷ Vgl. Brockmann, W.; Geiß P. L.; Klingen, J.; Schröder K. B. (2005).

⁸⁸ Vgl. Nördinger, S. (2015f).

⁸⁹ Vgl. Nördinger, S. (2015b).

⁹⁰ Vgl. Nunge, S.; Peters, N.; Rentz, O. (2002).

⁹¹ Vgl. Nördinger, S. (2015b).

⁹² Vgl. VDI ZRE (2015), S. 84.

Neben der Kunststoff- und Automobilbranche werden Klebstoffe ebenso in Buchbindereien, Möbelfertigungen und der Verpackungsindustrie eingesetzt.⁹³ Auch in der Produktion von Dünnschichtzellen für Photovoltaik wird die Klebtechnik verwendet und leistet dabei einen Beitrag zur Umsetzung von CO₂-Emissionsminderungszielen. Vor dem Hintergrund der kontinuierlich ansteigenden Nachfrage an Klebstoffen, der sich möglicherweise daraus entwickelnden Versorgungsengpässe und damit einhergehenden steigenden Rohstoffbeschaffungskosten wird derzeit an Umformulierungen der Rezepturen sowie an der Beschaffung alternativer Rohstoffe für Klebstoffe geforscht.⁹⁴ Ein Beispiel für eine Klebstoffalternative zeigt die Anwendung eines Verfahrens zur pneumatischen Trockenbeimung im großtechnischen Maßstab. Auf diese Weise kann die Nassbeimung durch die ökologisch verträglichere Trockenbeimung und Reduzierung von Formaldehydemissionen und Reduzierung des Bindemittleinsatzes (Leim) ersetzt werden.⁹⁵

Besteht die Anforderung von Demontage/Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung von Komponenten, ist Folgendes zu berücksichtigen: Geklebte Verbindungen sind i. d. R. nicht lösbar. Eine einfache Entklebung ist bis heute nicht gelungen. Allerdings erfolgen meist Hybridklebungen (vgl. Kapitel 4.4) und eine einfache Demontage der beispielsweise genieteten oder geschweißten Produkte ist ohnehin nicht möglich. Im Fall von geklebten Karosserieteilen werden diese am Ende der Lebensdauer geschreddert und die Stahlpellets im Elektroofen recycelt, wobei noch anhaftende Klebstoffreste für diesen Prozess problemlos sind.⁹⁶

⁹³ Vgl. Nördinger, S. (2015b).

⁹⁴ Vgl. Produktion Magazin (2015), S. 32.

⁹⁵ Vgl. VDI ZRE (2015), S. 84.

⁹⁶ Vgl. Brockmann, W.; Geiß P. L.; Klingen, J.; Schröder K. B. (2005).

Optimierung vor- und nachgelagerter Prozesse

- Fügehilfsstoff: Mengenreduktion durch Dosieranlagen mit integrierter Steuer- und Regelungstechnik und Nutzung des Mitarbeiterpotenzials
- Bauteilvorbereitung: Wegfall von Oberflächenbehandlung der Fügebauteile durch Strukturklebstoffe

4.4 Hybride Fügeverfahren

Die insbesondere im Leichtbau oft eingesetzten Verbundwerkstoffe bringen besondere Anforderungen mit sich. Manche Anforderungen an das zu fügende Produkt und den Fügeprozess lassen sich nur durch die Kombination unterschiedlicher Fügeverfahren in einem Prozess erfüllen.⁹⁷ Beispielsweise ist beim punktförmigen Fügen von Verbundwerkstoffen, bei denen ein Vorloch notwendig ist (z. B. beim Schrauben oder Nieten mit Vorloch), zu berücksichtigen, dass beim Stanzen die Faserschichten durch Delamination geschädigt werden. Dies führt zu einer geringeren Stabilität der Verbundwerkstoffe. Verfahren wie Bohren und Wasserstrahlschneiden können das Stanzen ersetzen, sind aber aufwendige Verfahren und fordern ggf. mehr Ressourcen. Verfahrenskombinationen (Hybridfügetechnik), wie z. B. die Kombination aus Kleben und Nieten für punktförmige Fügeverbindungen oder das Falzkleben (vgl. Abbildung 7), bieten daher für manche Einsatzfälle sinnvolle Alternativen.⁹⁸

⁹⁷ Vgl. Produktion Magazin (2015), S. 32.

⁹⁸ Vgl. Nördinger, S. (2015d).

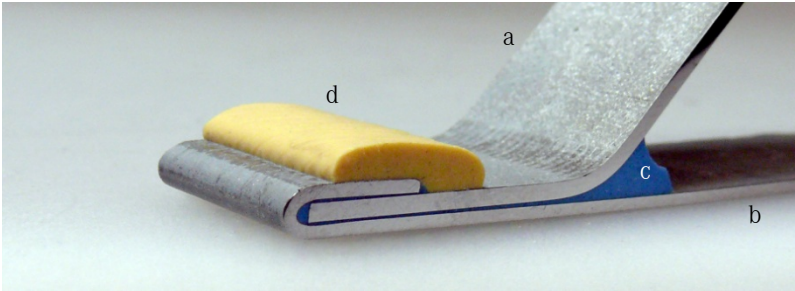


Abbildung 7: Schnittansicht Falzklebeverbindung (a: Innenteil, b: Außenteil, c: Falzklebstoff, d: Nahtabdichtung)⁹⁹

Werkzeuge und Verfahrensparameter der konventionellen mechanischen Fügeprozesse und des Klebens können jedoch aufgrund von Wechselwirkungen zwischen diesen Fügeverfahren nicht immer vollständig auf die entsprechende Verfahrenskombination übertragen werden.¹⁰⁰ Daher besteht eine Forschungsaufgabe in der Evaluierung des Einflusses relevanter Prozessparameter (wie z. B. Klebstoffviskosität und Fügegeschwindigkeit) sowie in der Prozessbetrachtung und -verbesserung. Struktur- und Strömungssimulationen sowie experimentelle Parameterstudien helfen, diese Untersuchungen unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette durchzuführen und daraus ein detailliertes Prozessverständnis in Bezug auf eine qualitätssichere Fertigung abzuleiten.^{101, 102}

Eine vom Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik entwickelte Autotür belegt konkret das Ressourceneffizienzpotenzial des Hybridfügens im Leichtbau. Durch den Einsatz verschiedener Werkstoffe (Stahl, Aluminium, Kunststoff) und Verfahren wie das Innenhochdruck-Umformen-(IHU)-Fügen und -Kleben können komplexe Baugruppen reali-

⁹⁹ Fraunhofer IWU (2015).

¹⁰⁰ Vgl. Fraunhofer IWU (2015).

¹⁰¹ Vgl. Fraunhofer IWU (2015).

¹⁰² Vgl. Fraunhofer IWU (2016).

siert und gegenüber der herkömmlichen Konstruktion eine Gewichtsreduzierung von ca. 15 % erreicht werden.¹⁰³

Auch im Fahrzeugbau wird durch den Einsatz carbonfaserverstärkter Strukturbauteile, die hybrid gefügt werden, Leichtbau realisiert. Dabei wurden bei einem großen deutschen Automobilhersteller entlang der gesamten Prozesskette relevante Aspekte beachtet.

Die zu fügenden Bauteile verfügen bereits über komplexe Geometrien, sodass der Fügeumfang deutlich reduziert wird. Schon in der Bauteilherstellung werden dafür Gewindeeinsätze, sogenannte Inserts, in die Gewebestruktur laminiert. Zusätzlich kommen kaltaushärtende Strukturklebstoffe zum Einsatz. Für weniger beanspruchte Montagebauteile werden Klebebolzen eingesetzt, die im Tragverhalten Schweißbolzen ähnlich sind. Für das Kleben von carbonfaserverstärkten Strukturbauteilen werden die Oberflächeneigenschaften der Bauteile berücksichtigt.¹⁰⁴ Gegenüber nachträglich in die Strukturbauteile eingesetzten Gewindebolzen können durch Hybridfügen Bearbeitungsschritte eingespart werden. So entfallen beispielsweise das Bohren eines Vorlochs und das anschließende Versiegeln der angebrochenen Kanten.

Beim Fügen von carbonfaserverstärkten Bauteilen ist auf Korrosionsgefahr zu achten. Die elektrisch leitenden Kohlefasern können zum Fügepartner Metall eine Potenzialdifferenz entwickeln. Gerät die Baugruppe während ihrer Lebensdauer in Kontakt mit einem Elektrolyt, führt dies zu Korrosion.¹⁰⁵

Produktbezogene Maßnahmen

- Produktgestalt: Reduktion des Fügeumfangs durch komplexe Bauteilgeometrie

¹⁰³ Vgl. Scheffler, S. (2015).

¹⁰⁴ Vgl. Nördinger, S. (2015d).

¹⁰⁵ Vgl. Nördinger, S. (2015d).

4.5 Prozessperipherie und übergeordnete Maßnahmen

Ausschussminimierung sowie Bauteilpositionierung und -justage sind zwei Schwerpunkte, die in den folgenden Beispielen aufgegriffen werden.

4.5.1 Gewichtsoptimierte Gestaltung der Vorrichtungsrahmen

Für eine exakte Geometrie der Baugruppen kommen häufig - insbesondere in der Automobilproduktion - sogenannte Vorrichtungen oder Vorrichtungsrahmen zum Einsatz. Diese gewährleisten eine wiederholgenaue Positionierung der zu fügenden Bauteile zueinander. Eine wiederholgenaue und exakte Bauteilpositionierung hat wesentlichen Einfluss auf den Ausschussanteil eines Füge- bzw. Montageprozesses und trägt somit zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei.

Darüber hinaus führt eine gewichtsoptimierte Gestaltung der Vorrichtungsrahmen dazu, dass diese material- und energieeffizient eingesetzt werden. Das niedrige Gewicht und die daraus resultierende geringere zu beschleunigende Masse führen zu einer abnehmenden Belastung der Roboterachsen, was die Auswahl eines kleineren Robotertyps, der weniger Energie verbraucht, ermöglichen kann.

Im Rahmen der Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ (InnoCaT) konnte ein solcher sogenannter negativer Schneeballeffekt¹⁰⁶ für einen in der Praxis verwendeten Vorrichtungsrahmen erreicht werden. Mit Hilfe einer Topologieoptimierung und einer nachfolgenden gießtechnischen Betrachtung und Optimierung für die betroffenen Teilsysteme konnte eine Gewichtseinsparung von bis zu 37 % erzielt werden. Durch diese Gewichtsreduzierung des Betriebsmittels konnte der entsprechende Roboter um eine Klasse kleiner ausgelegt und eine Energieeinsparung am Roboter von bis zu 10 % realisiert werden. In Anbetracht dieses Erfolgs sollen weitere Vorrichtungsrahmen und Baugruppen der Karosseriebaulinie einer gewichtsoptimierten Gestaltung unterzogen werden. Ziel ist, dass in Summe

¹⁰⁶ Vgl. Steinhilper, R.; Rieg, F. (2012), S. 466.

eine signifikante Energieeinsparung durch den Einsatz von Robotertypen, die weniger Antriebsenergie benötigen, realisiert wird.^{107,108}

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Teilehandhabung: 10 % Energieeinsparung bei Handhabungsrobotern durch gewichtsoptimierte Gestaltung eines Vorrichtungsr Rahmens

4.5.2 System zur automatischen Justage von Vorrichtungen

In dem Verbundvorhaben „Green Carbody Technologies“ (InnoCaT) zum energie- und ressourceneffizienten Karosseriebau im Lebenszyklus wurde ein energieeffizientes System zur automatischen Justage von Vorrichtungen für den Karosseriebau entwickelt. Dieses System soll den manuellen Justageprozess ersetzen.

Bei dem neuen mechanisierten Justageprozess handelt es sich um modular einsetzbare Verstellmechanismen, welche die Spannungspunkte flexibel verstellen können. Der Antrieb dafür wird nur im Justagefall bestromt, was zu Energieeinsparungen von 5 % pro Bauteil führt. Einen effizienten Ansatz stellt dabei auch die Verwendung von Standardkomponenten als Verstellmodule dar. Darüber hinaus wird durch den automatisierten Prozess die Wiederholgenauigkeit gesteigert und somit eine Reduzierung von Nacharbeit und Ausschuss erreicht, was in Energie- und Materialeinsparung resultiert. Bei dem Einsatz der beschriebenen automatischen Justage kann entsprechend der Definition eines Standardautomobilwerkes in der Türenfertigungslinie die Nacharbeit um 50 % gesenkt und somit 1 t CO₂ pro Jahr vermieden werden.¹⁰⁹

Darüber hinaus wird durch eine automatische Dokumentation der Justageparameter die Reproduzierbarkeit der Justagevorgänge und somit die Ausschussminimierung unterstützt.

¹⁰⁷ Vgl. Fraunhofer IWU (2012), S. 5.

¹⁰⁸ Vgl. Fraunhofer IWU (2013), S. 72.

¹⁰⁹ Vgl. Fraunhofer IWU (2012), S. 4.

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Teilehandhabung: 5 % Energieeinsparung durch Bestromung einer Handhabungsvorrichtung nur im Justagefall

4.5.3 Greifer mit Mikroventilen

Im Rahmen eines blue competence-Projektes des VDMA wurde an pneumatischen Greifmodulen in der Montageautomation eine dezentrale Ansteuerung unmittelbar am Aktor realisiert. Ziel war es, den großen Teil der Druckluft, der ungenutzt in der Zuleitung verloren geht, zu reduzieren und somit den Energieverbrauch zu minimieren und zugleich die Taktzeiten zu verkürzen.

Durch den Einsatz miniaturisierter Pneumatikventile, die unmittelbar in den Greifer integriert werden können, konnte der Druckluftverbrauch um bis zu 90 % verringert werden. Durch die im Vergleich zu zentral angeordneten Steuerelementen enorm verkürzten Leitungswege bietet die dezentrale pneumatische Ansteuerung auch noch einen weiteren Vorteil: Das Ansprechverhalten der Aktoren wird beschleunigt und somit eine höhere Produktivität erreicht.¹¹⁰

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Teilehandhabung: Verringerung des Druckluftverbrauchs eines pneumatischen Greifmoduls eines Montageautomaten um 90 % durch in den Greifer integrierte Pneumatikventile

4.5.4 Qualitätssicherung durch vernetzte Informationssysteme

Es gibt unterschiedliche Maßnahmen, die auf vernetzten elektronischen Informationssystemen (Montage 4.0) basieren und die Qualität der Prozesse deutlich erhöhen können. Beispielsweise können durch Visualisierung Fehler minimiert werden, indem der Montagearbeiter auf einem Display

¹¹⁰ Vgl. Blue Competence (2014).

am Montageplatz alle wichtigen Informationen zu den Bauteilen und den Arbeitsschritten für die Montage erhält. Unterstützend kann ein sogenanntes „Pick-by-Light-System“ eingesetzt werden, das die zu verbauenden Teile in ihren jeweiligen Fächern mittels optischer Signale markiert. Zusätzlich erkennt ein Sensor das Eingreifen des Mitarbeiters und bestätigt somit die Entnahme des korrekten Bauteils. Durch das Scannen von Barcodes auf Bauteilen und von Objektleisten vor Montagebeginn und im Montageverlauf wird der Montageprozess gesichert und mit dem Enterprise-Resource-Planning- (ERP-)System abgeglichen. Die Nachbestellung von Material erfolgt automatisiert durch das Scannen von Kanban-Karten am Behälter. Durch diese bedarfsgerechte Materialbereitstellung mittels Kanban werden geringere Bestände und weniger Kapital in der Produktion gebunden, die Supply Chain insgesamt beruhigt und Ressourcen geschont.¹¹¹

Auch eine Integration der Qualitätssicherung (zu definierten Prüfmerkmalen und -intervallen) in ein vernetztes elektronisches Informationssystem bringt Effizienzvorteile mit sich.¹¹² Eine frühzeitige Ermittlung der Montageinhalte und -zeiten bietet eine Möglichkeit zur effizienten Gestaltung der Prozesse. Dazu werden bereits vorhandene Produkt- und Prozessdaten mit Daten aus den Informationssystemen der Produktentstehung und -herstellung neu verknüpft und verarbeitet. Auf das daraus resultierende Wissen können Planer aller Phasen der Produktentstehung zugreifen. Beispielsweise können mit Hilfe darauf basierender Simulationen der Montage- und Fügeprozesse Zugänglichkeits- und Kollisionsbetrachtungen durchgeführt werden.

Optimierung bestehender Fügeverfahren

- Prozesstechnik: Unterstützung des Mitarbeiters beim Fügevorgang durch Industrie-4.0-Technologien, z. B. visuelle Unterstützung bei der Teilwahl, den automatisierten Lagersystemen und der Optimierung der Prozessabläufe mittels erfasster Daten

¹¹¹ Vgl. Nördinger (2015c).

¹¹² Vgl. VDI ZRE (2015), S. 84.

5 FAZIT

Das Spektrum der verfügbaren und sich in der Entwicklung befindlichen Fügeverfahren ist sehr breit, sodass grundsätzlich eine große Auswahl an Füge Technologien besteht. Jede Fügeaufgabe ist jedoch sehr spezifisch in ihren Anforderungen, was aus technischer Sicht zu einer Eingrenzung der für den jeweiligen Anwendungsfall zur Verfügung stehenden Technologien führt. Bei der weiteren Auswahl müssen daher einerseits unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen der Erfüllung der prozess- und produktbezogenen Anforderungen und andererseits der Steigerung der Ressourceneffizienz beachtet werden.

Aus den in Kapitel 3 ausgeführten Betrachtungen und Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz von Fügeverfahren und den in Kapitel 4 aufgeführten Beispielen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die Entscheidung für ein bestimmtes Fügeverfahren (bzw. zur Optimierung eines Fügeverfahrens) ist abhängig von dem jeweiligen Anwendungsfall und der zu fügenden Baugruppe mit all ihren Anforderungen an die Verbindungseigenschaften. Dabei können prozess- und produktbezogene Maßnahmen sinnvoll sein. Je nach Maßnahme ist eine Betrachtung des gesamten Lebensweges bzgl. der Auswirkung auf die Ressourceneffizienz durchzuführen.
- Häufig wird nicht nur eine Maßnahme zur Steigerung der Ressourceneffizienz ergriffen. Im Sinne der ganzheitlichen Optimierung erfordert eine konkrete Effizienzmaßnahme oft eine weitere ergänzende Maßnahme zur erfolgreichen oder optimalen Steigerung der Ressourceneffizienz. Das trifft insbesondere auf Maßnahmen zu, bei denen eine Füge Technologie durch eine andere ersetzt wird (Substitution).
- Die Wahl einer Füge Technologie bzw. die Entscheidung für eine Maßnahme zur Steigerung der Ressourceneffizienz ist auch hinsichtlich eventueller Anwendungsrestriktionen zu überprüfen. Diese ergeben sich aus den komplexen Wechselwirkungen der Anforderungen an die Prozess- und Verbindungseigenschaften einer Füge Technologie und müssen daher einzelfallspezifisch geklärt werden.

Die Auswahl der geeigneten Fügeverfahren hat einen Einfluss auf die Fertigungsprozesskette und häufig auch auf alle Phasen des Produktlebensweges. Daher müssen die Wechselwirkungen des Fügeverfahrens auf vor- und nachgelagerte Prozessschritte analysiert und unter Ressourceneffizienzgesichtspunkten bewertet werden. Da die Auswahl eines Fügeverfahrens den Ressourcenbedarf eines Produkts erheblich beeinflusst, stellen sie einen wichtigen Einflussfaktor auf dessen Ressourceneffizienz dar. Daher können entsprechende Effizienzmaßnahmen einen wichtigen Beitrag zur Kostensenkung und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens leisten. Damit geht eine entsprechende Verringerung der Umweltauswirkungen einher. Entsprechende Anstrengungen lohnen sich daher ökonomisch wie ökologisch.

6 WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

Eine systematische Herangehensweise und Wissensaufbereitung unterstützen dabei, Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz der Fügeverfahren zu identifizieren. Diese Kurzanalyse liefert dafür Hinweise und Anregungen und bildet durch diesen Wissenstransfer eine Grundlage, diese Maßnahmen auch in die Praxis umzusetzen.

Neben dieser Kurzanalyse wurden für das „Fügen“ ein Ressourcencheck und eine Prozessketten-systematisierung erstellt, die online unter www.ressource-deutschland.de zugänglich sind.

Die vom VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE) zur Verfügung gestellten Ressourcenchecks sind umfangreiche Checklisten. Sie umfassen themenspezifische Maßnahmen, Werkzeuge, Methoden und Beispiele zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Betrieb. Die Ressourcenchecks sind darüber hinaus für unterschiedliche Fertigungsverfahren verfügbar und haben die Aufgabe, für wesentliche Themenschwerpunkte der Ressourceneffizienz zu sensibilisieren.

Eine weitere Informationsmöglichkeit stellen die Systematisierungen von Ressourceneffizienzmaßnahmen mittels Prozessketten dar. Prozessketten-systematisierungen verfolgen das Ziel, kompakte und branchenrelevante Informationen bereitzustellen. Die Prozessketten demonstrieren für jeden Prozessschritt Gute-Praxis-Beispiele und Beste Verfügbare Techniken (BVT) zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Das VDI ZRE hat Prozessketten für unterschiedliche Fertigungsverfahren entwickelt.

LITERATURVERZEICHNIS

Barthelmes, H. (2013): Handbuch Industrial Engineering: Vom Markt zum Produkt. Carl Hanser Fachbuchverlag Hanser, München, ISBN 978-3-446-427800-8.

bbr (2014): Gut verschraubt [online]. Bänder, Bleche, Rohre, Henrich Publikationen GmbH, 02/2014 [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.bbr.de//index.cfm?pid=1459&pk=141673#.VqHcg0Ybitd

Beyer, U. (2011): Herstellung eines Metall-Kunststoff-Verbundes mit der Flach-Clinch-Technologie. Verlag Meisenbach GmbH, Bamberg, [abgerufen am: 23. Feb. 2016] auch verfügbar als PDF unter: www.umformtechnik.net/binary_data/117301_utfscience_0111_hfcv_v004.pdf

Blue Competence (2014): Greifer mit Mikroventilen senken Energieverbrauch und Taktzeit [online]. Blue Competence ist eine Initiative des Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), 03/2014 [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.bluecompetence.net/documents/1848986/2098176/Schunk%201%20_Greifer%20mit%20Mikroventilen.pdf/d5f0261c-2ca0-4516-ab2d-15cbb24ef205

BMBF (2012): Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Forschung für Produktion, Dienstleistung und Arbeit, Innovative Produkte effizient entwickeln „Forschung für die Produktion von morgen“ Projektportraits. Bonn, [abgerufen am: 08. Mrz. 2016] auch verfügbar als PDF unter: www.bmbf.de/pub/forschung_fuer_production_von_morgen_projekte.pdf

Brockmann, W.; Geiß P. L.; Klingen, J. und Schröder K. B. (2005): Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, ISBN 978-3-527-31091-3.

DBU (2004): Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Projektdatenbank, Produktionsintegrierter Umweltschutz beim Schweißen von Feinblechen und Kleinteilen durch Entwicklung eines High-Speed-WIG-Brenners mit geregelter Drahtzuführung über neuartigen Planetenantrieb [online]. Osnabrück, [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.dbu.de/projekt_20470/01_db_2409.html

DIN 8580:2003-09: Deutsches Institut für Normung e. V., Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 8593-5:2003-09: Deutsches Institut für Normung e. V., Fertigungsverfahren Fügen - Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

EFB-Merkblatt (2015): Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.: EFB-Merkblatt Nr. 3530: Fügen durch Knickbauchen nach außen. EFB, Hannover.

Effizienzfabrik (2010): LaFueSol – Laserfügen von Rohrgläsern für Solar Kollektoren [online]. Effizienzfabrik - Innovationsplattform Ressourceneffizienz in der Produktion. Eine gemeinsame Initiative von BMBF und VDMA [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.effizienzfabrik.de/%20de/projekte/neue-technologien-detail/lafuesol/538/

Effizienzfabrik (2012): Effizienzwerkzeuge für die Produktion: „BEATool“ und „WiRe“ [online]. Effizienzfabrik - Innovationsplattform Ressourceneffizienz in der Produktion. Eine gemeinsame Initiative von BMBF und VDMA, 17. Sep. 2012 [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.effizienzfabrik.de/de/aktuelles-presse/effizienzwerkzeuge-fuer-die-produktion-%E2%80%9Ebeatool%E2%80%9C-und-%E2%80%9Ewire%E2%80%9C/844/

Eversheim, W. (1996): Organisation in der Produktionstechnik, Band 1: Grundlagen. Ausgabe 3, Springer-Verlag, Heidelberg, ISBN 3642877370.

Fahrenwaldt, H. J.; Twrdek, J. und Schuler V. (2014): Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. Ausgabe 5, Springer-Verlag, Wiesbaden, ISBN 987-3-658-03140-4.

Feldmann, K.; Schöpfer, V. und Spur, G. (2014): Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren, Handbuch der Fertigungstechnik, Carl Hanser Fachbuchverlag Hanser, München, ISBN 978-3-446-42827-0.

Fraunhofer IWU (2012): Fortschrittsbericht: Verbundvorhaben InnoCaT4, Energie- und ressourceneffizienter Karosseriebau im Lebenszyklus, Innovationsallianz Green Carbody Technologies - InnoCaT ®. Ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt vom BMBF im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“. Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz.

Fraunhofer IWU (2013): Ergebnisbroschüre: Innovationsallianz Green Carbody Technologies – InnoCaT ®. Ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt vom BMBF im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“. Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz.

Fraunhofer IWU (2015): Mechanische Füge­technik, Abteilung Mechanisches Fügen. Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz, [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar als PDF unter:

www.iwu.fraunhofer.de/content/dam/iwu/de/documents/Broschueren/IWU-KB-Mechanische-Fuegetechnik.pdf

Fraunhofer IWU (2016): Hybridfügen – Verfahrenskombinationen für eigenschaftsoptimierte Verbindungen [online]. Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.iwu.fraunhofer.de/de/geschaefts-felder/karosserien_zellstrukturen/hybridfuegen.html

Freudenberg (2012): Freudenberg Sealing Technologies gewinnt Innovationspreis für Klima und Umwelt (IKU) [online]. Freudenberg & Co. KG, 18. Jan. 2012 [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.freudenberg.com/de/Presse/Pressemittelungen/Seiten/Unternehmen-sgruppe-ausgezeichnet.aspx

Fuchslocher, G. (2014): Interview, Fraunhofer-Experte Groß: „Füge­technik des 21. Jahrhunderts“ [online]. verlag moderne industrie GmbH, 17. Sept. 2014 [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.automobil-produktion.de/2014/09/fraunhofer-experte-gross-fuegetechnik-des-21-jahrhunderts

Glitz, R.; Malanowski, N.; Stahl-Rolf, S. und Vogt, M. (2015): Kurzstudie: Bestandsaufnahme Leichtbau in Deutschland. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, [abgerufen am: 08. Mrz. 2016] auch verfügbar als PDF unter: www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/bestandsaufnahme-leichtbau-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf

Goecke, S. (2012): Energieeffizienz bei thermischen Fügeverfahren - Gestaltung und Bewertung von Prozessketten (ENERWELD) [online]. Verbundprojekt, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=2724.

Grütznert, P. (2014): Prozessentwicklung für das Fügen durch Knickbauschen (Forschungsberichte Leichtbau), Taschenbuch, 1. Auflage, Winter Industries GmbH, ISBN 3866246161.

Higgelke, R. (2014): Flexibles Blechverbindungsverfahren: Clinchen statt Löten und Schweißen [online]. Weka Fachmedien GmbH, 7. Mai 2014 [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.elektroniknet.de/e-mechanik-passive/verbindungstechnik/artikel/108544/

ke NEXT (2013a): Prozesssicher verschrauben und dabei Kosten sparen [online]. Magazin für den Maschinen- und Anlagenbau, verlag moderne industrie GmbH, 8. Aug. 2013 [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.ke-next.de/technik/werkstoffe-verbindungstechnik/prozesssicher-verschrauben-und-dabei-kosten-sparen-dank-neuer-rexroth-baureihe-119.html

ke NEXT (2013b): Prozesssicheres Verschrauben [online]. Magazin für den Maschinen- und Anlagenbau, verlag moderne industrie GmbH, 10. Apr. 2013 [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.ke-next.de/technik/werkstoffe-verbindungstechnik/prozesssicheres-verschrauben-103.html

Matthes, K.-J. und Schneider, W. (2012): Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. Carl Hanser Fachbuchverlag Hanser, München, ISBN 978-3-446-42073-1.

Neugebauer, R. (2014): Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. Carl Hanser Fachbuchverlag Hanser, München, ISBN 978-3-446-43008-2.

Nördinger, S. (2015a): Klebefilme mit hoher Haftkraft. Produktion - Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie, verlag moderne industrie GmbH, Landsberg, 01. Jul. 2015, Nr. 27.

Nördinger, S. (2015b): Komplettlösung für Dosieranlagen. Produktion – Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie, verlag moderne industrie GmbH, Landsberg, 30. Sep. 2015, Nr. 40.

Nördinger, S. (2015c): So funktioniert Montage 4.0. Produktion – Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie, verlag moderne industrie GmbH, Landsberg, 30. Sep. 2015, Nr. 40.

Nördinger, S. (2015d): Verbundwerkstoffe: So klappt die feste Bindung. Produktion – Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie, verlag moderne industrie GmbH, Landsberg, 9. Sep. 2015, Nr. 37.

Nördinger, S. (2015e): Verfahren birgt hohes Potenzial: Knickbauchen – die unterschätzte (Füge)technik [online]. verlag moderne industrie GmbH, 19. Aug. 2015 [abgerufen am: 27. Jan. 2016], verfügbar unter: www.produktion.de/trends-innovationen/knickbauchen-die-unterschaetzte-fuegetechnik-108.html

Nördinger, S. (2015f): Vielseitige Füge­lösungen für die Industrie. Produktion – Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie, verlag moderne industrie GmbH, Landsberg, 30. Sep. 2015, Nr. 40.

Nördinger, S.; Weinzierl, S. (2015): Laser im Tiefflug. Produktion – Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie, verlag moderne industrie GmbH, Landsberg, 13. Mai 2015, Nr. 20.

Nunge, S.; Peters, N. und Rentz, O. (2002): Bericht über Beste Verfügbare Techniken (BVT) im Bereich der Lack- und Klebstoffverarbeitung in Deutschland - Teilband II Klebstoffverarbeitung, Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) Universität Karlsruhe, [abgerufen am: 27. Jan. 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3220.pdf

Produktion (2015): Schrauben schnell automatisch zuführen. Produktion – Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie, Messe-Special Motek, verlag moderne industrie GmbH, Landsberg, 30. Sep. 2015, Nr. 40.

Produktion Magazin (2015): Messführer Motek 2015/Bondexpo Ausgabe 5/2015, verlag moderne industrie GmbH, Landsberg.

Scheffler, S. (2015): Hybrid-Autotür [online]. Fraunhofer-Allianz autoMO-BILproduktion, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz, [abgerufen am: 08. Mrz. 2016] verfügbar unter: www.automobil.fraunhofer.de/content/dam/automobil/de/documents/Technologietaeager/Karosserie/Mg-Tuer&Hybrid-tuer.pdf

Statistisches Bundesamt (2013): Produzierendes Gewerbe - Betriebe, Tätige Personen und Umsatz des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden nach Beschäftigtengrößtenklassen. Fachserie 4, Reihe 4.1.2, Wiesbaden, [abgerufen am: 08. Mrz. 2016] auch verfügbar als PDF unter: www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/BetriebeTaetigePersonen2040412137004.pdf?__blob=publicationFile

Steinhilper, R. und Rieg, F. (2012): Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Fachbuchverlag Hanser, München, ISBN 978-3-446-43000-6.

Thielen, M. (2015): Biokunststoffe. 2. Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, [abgerufen am: 08. Mrz. 2016], auch verfügbar als PDF unter: www.mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/brosch.biokunststoffe-web-v01.pdf

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI Richtlinie: VDI 4800 Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI ZRE (2013a): VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 3, Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien. Erstellt von VDI Technologiezentrum GmbH, [abgerufen am: 08. Mrz. 2016] auch verfügbar als PDF unter: www.ressourcen-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf

VDI ZRE (2013b): VDI ZRE Publikationen: Studien, Analyse von Potenzialen der Material- und Energieeffizienz in ausgewählten Branchen der Metall verarbeitenden Industrie. Erstellt von ITCL GmbH und TU Berlin, [abgerufen am: 08. Mrz. 2016] auch verfügbar als PDF unter: www.ressourcen-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Studie_ee_web.pdf

VDI ZRE (2015): VDI ZRE Publikationen: Studien, Analytische Untersuchung zur Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe. Erstellt von Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), [abgerufen am: 08. Mrz. 2016] auch verfügbar als PDF unter: www.ressourcen-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/VDI-ZRE_Analytische_Untersuchung_zur_Ressourceneffizienz_im_verarbeitenden_Gewerbe.pdf

Weinzierl, S. (2015): Leicht bauen mit Laser. Produktion - Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie, verlag moderne industrie GmbH, Landsberg, 10. Jun 2015, Nr. 24.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-27 59 506-0
Fax +49 30-27 59 506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE