

ZfP an Fahrzeugkarosserien aus Metall

Manuel Loos, 01.2011

Wie in vielen anderen hochtechnisierten Bereichen findet auch im Karosseriebau des Automobilbaus der Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren statt. Im Karosseriebau beträgt der Automatisierungsgrad heutzutage etwa 98 %, was in erster Linie aus dem Einsatz von Robotern resultiert. Diese Roboter schweißen, löten, kleben und stellen mechanische Verbindungen zwischen Blechteilen her. Der Mensch wird innerhalb der Roboterfertigung, die das Herzstück der Fertigungslinie beim Zusammenbau von Automobilkarossen bilden, teilweise zum Einlegen von zu verarbeitenden Teilen benötigt sowie zur Überwachung und Wartung der Anlagen sowie vor allem zur Prüfung der Erzeugnisse. Bei der Prüfung kommen heute vor allem zerstörungsfreie Methoden zum Einsatz, da dies die Materialkosten senkt und die Weiterverarbeitung der geprüften Erzeugnisse erlaubt. Die Forschung und Entwicklung im Automobilsektor beschäftigt sich nicht nur, wie es oftmals scheinen mag, mit dem Produkt des Automobils an sich, sondern auch mit der Produktion und deren Weiterentwicklung. Somit sind Automobilhersteller auch im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung forschend und entwickelnd tätig. Allgemein werden unter einer Karosserie die tragende Struktur sowie alle vor der Lackierung montierten Teile eines Fahrzeugs verstanden [1]. Der Karosseriebau stellt innerhalb eines Automobilwerks das Fertigungsgewerk dar, welches die Karosserie aus den tiefgezogenen Blecheinzelteilen aus dem Presswerk zusammenbaut. Neben dem Karosseriebau existieren vorgelagert das Gewerk des Presswerks sowie nachgelagert die Gewerke der Lackiererei und der Montage.

- 1 Übersicht über die Fertigungsverfahren
- 2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren
 - 2.1 Ultraschall
 - 2.2 Thermografie
 - 2.3 Triangulation
 - 2.4 Computertomographie
 - 2.5 Mikromagnetik
- 3 Zusammenfassung
- 4 Literatur
- 5 Einzelnachweise

Übersicht über die Fertigungsverfahren

Bevor auf die Prüfverfahren eingegangen wird, werden in knapper Form die Fertigungsverfahren definiert. Die angewandten Fertigungsverfahren gehören zur Fertigungsgruppe des Fügens, welches „das Zusammenbringen von Werkstücken (Bauteilen) geometrisch bestimmter fester Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff oder Verbindungselementen“ [2] darstellt. Dabei wird der Zusammenhalt jeweils örtlich geschaffen oder vermehrt. [2]

Die Fügeverfahren, die im Karosseriebau überwiegend zum Einsatz kommen, sind das Schweißen, das Löten sowie das mechanische Fügen und das Kleben.

Unter Schweißen wird das Vereinigen von Werkstoffen unter Anwendung von Wärme und (oder) Kraft ohne oder mit Schweißzusatz verstanden. Eine Erleichterung des Schweißens wird oftmals durch Schweißhilfsstoffe, z.B. Pasten oder Gas, erreicht. Schweißverbindungen sind stoffschlüssig, d.h. es wirken Adhäsions- und Kohäsionskräfte zwischen den Fügeteilen, sodass sie Verbindung unlösbar ist, also beim Lösen zerstört wird [3]. Im Karosseriebau kommen vor allem das Widerstandspunktschweißen sowie das Laserschweißen zum Einsatz.

Das Löten stellt ein thermisches Verfahren dar, bei dem Werkstoffe ebenfalls stoffschlüssig gefügt werden, wobei eine flüssige Phase durch Zugabe und Schmelzen eines Lotes oder durch Diffusion an den Grenzflächen entsteht [3]. Der Unterschied zum Schweißen besteht also im Wesentlichen darin, dass zur Verbindung von Werkstoffen beim Löten ein weiterer Stoff zugegeben wird, um die Verbindung herzustellen. Hingegen entsteht die Verbindung beim Schweißen durch das Verschmelzen der vorhandenen zu fügenden Werkstoffe selbst.

Das mechanische Fügen ist eine Untergruppe der Fügeverfahren, die sich in die Verfahren des Fügens durch Umformen, des Fügens durch Nieten und des Fügens durch Anpressen aufteilt [4]. Im Karosseriebau kommen vor allem zwei Formen häufig vor:

- Stanznieten (aus der Gruppe des Fügens durch Nieten)
- Schrauben (aus der Gruppe des Fügens durch Anpressen).

Das Fügeverfahren des Klebens kommt im Karosseriebau speziell als das Verfahren des Metallklebens vor. Dieses Verfahren erfolgt durch das Verbinden von Werkstücken durch eine dünne Kunstharzschicht (Klebstoffschicht). Die Festigkeit der Verbindung ist dabei abhängig von der Adhäsion zwischen der Klebstoffoberfläche und dem Werkstück sowie der Kohäsion des Klebstoffs selbst ^[3].

Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Im Folgenden werden die einzelnen Prüfverfahren, die nach dem Stand der Technik im Moment im Karosseriebau des Automobilbaus angewandt werden, dargestellt.

Ultraschall

Ultraschallverfahren können bei der Werkstoffprüfung von Blechen, der Prüfung von Schweißnähten sowie bei der Prüfung von mechanisch gefügten Bauteilen angewandt werden. Die umfangreichste Anwendung findet bei der Schweißnahtprüfung statt, sodass diese im Folgenden vorrangig betrachtet werden soll.

Das Ultraschallverfahren beruht auch bei der [Schweißnahtprüfung](#) auf dem einfachen Prinzip der Laufzeitmessung des Schalls. Das Werkstück wird Ultraschallwellen ausgesetzt. Ist das Werkstück fehlerfrei, so treten keine Resonanzwellen auf. Dagegen werden die ausgesandten Schallwellen an Fehler im Werkstückinneren, vor allem an Bindefehlern von Schweißnähten, reflektiert, sodass Resonanzwellen auftreten. ^[5]

Wie bei anderen Anwendungen der Ultraschalltechnik kommen entweder das Impuls-Echo-Verfahren oder das [Durchstrahlungsverfahren](#) zum Einsatz. ^[5]

Die Anwendung erfolgt bei der Schweißnahtprüfung entweder mit Phased-Array-Geräten oder mit Winkelprüfköpfen. Phased-Array-Geräte können das ausgesandte Schallbündel steuern und die Fokustiefe dynamisch verändern. Dies erleichtert die Prüfung in schwierigen Prüfbereichen und verbessert zudem die Auflösung ^[5]. Winkelprüfköpfe senden die Schallwellen in Winkeln von meist 35°, 45°, 60°, 70° und 80° aus. Der Winkel wird so gewählt, dass im Prüfgegenstand nur eine Transversalwelle entsteht ^[6]. Bei geschliffenen Schweißnähten kommen auch Senkrecht- oder Normalprüfköpfe zum Einsatz.

Bei der Prüfung durch Reflexion der Schallwelle mit einem Winkelprüfkopf lassen sich Risse und Fehler in der Schweißnaht detektieren. Die Lage des Fehlers oder des Risses wird durch den Schallweg bestimmt. Moderne Prüfgeräte zeigen die Lage des Fehlers auf dem Bildschirm anschaulich an. Das Schweißnahtsymbol einer V-Naht veranschaulicht die Lage der Fehlstelle zwischen Nahtwurzel und Decklage. Zur Ermittlung der Fehlerform muss die Schallrichtung verändert werden. Risse und Bindefehler sind ebene Reflektoren; sie geben bei senkrechter Beschallung sehr deutliche Reflexionen zurück; wird allerdings die Richtung nur gering verändert, fällt das Signal erheblich ab. Poren sowie Einschlüsse liefern aus allen Richtungen weitaus geringere Anzeigen. ^[6]

Die Vorteile der Ultraschallprüfung von Schweißnähten liegen im einfachen universellen Einsatz der Technik. Der Ablauf der Prüfung kann vollständig automatisiert werden. Die Prüfung kann über die gesamte Nahtdicke erfolgen. Nachteilig ist die teils sehr schwierige Deutung, die geschultes Personal voraussetzt. Aufgrund der geringen Anzeigen bei Lunkern und Einschlüssen ist hierbei die Deutung besonders schwer. Grundsätzlich ist immer eine Ankopplung des Prüfgeräts erforderlich. ^[6]

Thermografie

Die Thermografie findet im Karosseriebau Anwendung bei der Prüfung von geschweißten, gelöteten und geklebten Erzeugnissen.

Grundsätzlich werden aktive und passive Verfahren unterschieden. Bei der aktiven Thermografie wird der Untersuchungsgegenstand erwärmt. Im Anschluss wird die Abkühlung beobachtet. Im Rahmen der passiven Verfahren wird der natürliche Wärmestrom durch den Untersuchungsgegenstand beobachtet. ^[7]

Im Karosseriebau kommt im Moment die Impulsthermografie zum Einsatz, ein aktives Verfahren, bei dem der Prüfgegenstand durch einen kurzen Energieimpuls erwärmt wird. Hierzu kommen meist Hochenergie-Blitzlampen zum Einsatz, die die Bauteiloberfläche sehr schnell und effektiv aufheizen. ^[8]

Eine praktische Anwendung der Technik im Karosseriebau ist dass Lasernahtschweißverbindungen am Unterboden einer Karosserie zunächst mit dem Blitzkopf erwärmt werden ; danach zeichnet die Infrarot-Kamera die Temperatur des Prüfbereichs in Abhängigkeit der Zeit auf, sodass Fehlstellen detektiert werden können. Daneben ist die Anwendung auch bei widerstandspunktgeschweißten Schweißnähten sowie bei Klebeverbindungen im Einsatz. [9] Befinden sich im Bauteil Einschlüsse in Klebstoffen oder auch in Löt- und Schweißverbindungen sowie andere Fehler, führt dies in Folge der kurzfristigen Erwärmung zu einem verminderten Wärmeabfluss an der Fehlstelle, welche sich durch eine erhöhte Temperatur an der Bauteiloberfläche bemerkbar macht. [8]

Sieht man sich die Zeit- und Oberflächeninformation nach dem Blitz an der Bauteiloberfläche an, ist erkennbar, dass die Temperatur im Zeitverlauf langsamer abnimmt, sodass hier von einer Fehlstelle ausgegangen werden kann. Die Vorteile der Impulsthermografie sind vor allem die einfach verständliche bildgebende Darstellung der Messergebnisse, die Automatisierbarkeit der Anwendungen sowie die einfache Integration in industrielle Fertigungsumgebungen. Daneben lassen sich große Oberflächen sehr schnell prüfen [9]. Nachteilig bei der Impulsthermografie ist vor allem die Fehlernachweisgrenze (Fehlerdurchmesser/Fehlertiefe 1). Außerdem ist die Aussagekraft bei der Beaufschlagung mit einem Blitz oftmals sehr gering, sodass im Moment die Multiblitz-Methode erforscht und weiterentwickelt wird [8].

Triangulation

Das Prinzip der Triangulation, das im Vermessungswesen entwickelt wurde, findet heute sowohl in der Vermessungstechnik als auch in der Fertigungsmesstechnik Anwendung und kann somit auch zu den Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung gezählt werden. Vor allem in der Qualitätssicherung hat sich das Prinzip in vielen optischen Messeinrichtungen durchgesetzt.

Das Prinzip der Triangulation (lat. triangulus = Dreieck) beruht auf der Berechnung von unbekanntem Längen im Dreieck. Bei der einfachsten Variante der Triangulation in der Fertigungsmesstechnik wird mit Hilfe eines Lasers ein Bildpunkt auf den Prüfgegenstand projiziert. Das Objekt reflektiert einen Teil der Lichtenergie des Laserbildpunktes, welcher von einem Detektor (Kamera) aufgenommen wird. Die noch unbekanntem Koordinaten des Objekts werden dann mit Hilfe der bekannten Länge b und den beiden bekannten Winkeln ermittelt. [10] Mit zunehmendem Winkel zwischen Laser und Kamera steigt die Genauigkeit der Messung. Gleichzeitig ist aber zu beachten, dass bei einem großen Winkel auch größere Bereiche von nicht ebenen Objekten abgeschattet werden. Meist muss hier ein Kompromiss gefunden werden, sodass zwischen 25° und 45° liegt. Dieser Zusammenhang zwischen Beobachtungswinkel und der Messauflösung ist für alle Messverfahren, die auf der Triangulation aufbauen, typisch. [10]

Dieses Messprinzip kommt im Moment vor allem bei der Qualitätssicherung von gelöteten und geklebten Verbindungen an Karosserien zum Einsatz, wobei aber ein weitergehender Einsatz möglich ist. Am Beispiel der Türvermessung soll es exemplarisch dargestellt werden.

Die Messung erfolgt vollautomatisiert in einer Laser-Messstation. Die Tür wird an zwölf Punkten messtechnisch aufgenommen. Der Computer nimmt zur Verarbeitung alle Messdaten auf. Als Messpunkte dienen Referenzpunkte, die während des gesamten Fertigungsablaufs gleich bleiben. Zur Kalibrierung des Systems wird einmal pro Tag eine so genannte Meistertür durch das Messsystem geschickt, um Abweichungen des Systems festzustellen und auszugleichen. Anhand der zwölf Messpunkte kann der Computer mit den Daten der Meistertür im Speicher die Fertigungsgenauigkeit der Türe überprüfen und so festlegen, ob diese Tür den Qualitätskriterien genügt und in die Gesamtkarosserie eingebaut werden kann oder ob sie nachzubearbeiten ist bzw. als Ausschuss zu werten ist [11]. Wird ein von den Soll-Daten abweichendes Messergebnis festgestellt, wird eine Störung an den Anlagenfahrer gemeldet, der die Abweichung bewerten muss. So kann fortwährend im Prozess das Zusammenspiel von Anlage und Messobjekt überwacht werden. Dieses Messsystem findet neben der Türenfertigung auch in den Bereichen des Unterwagens, also der Plattform der Karosserie, umfangreiche Anwendung, wobei hier nicht selten mehr als 30 Messpunkte aufgenommen werden.

Vorteile dieses Systems sind die einfache Implementierung in den Fertigungsfluss sowie die vollständige Automatisierbarkeit der Anwendung. Allerdings ist viel Zeit für die Kalibrierung anzuwenden, da eine reine Geometrieabhängigkeit der Messung vorliegt. Ein weiterer Nachteil sind die Schwächen der optischen Aufnahme bei Verunreinigungen an den Messpunkten, die durch Spritzer von Lötungen und Schweißungen im Karosseriebau nicht unüblich sind.

Computertomographie

Die Computertomographie findet bei allen zu Beginn vorgestellten Fügeverfahren ihren Einsatz. Das Verfahren basiert auf dem Durchstrahlungsprinzip der Röntgen-Strahlen. Diese Strahlen werden beim Durchwandern eines Körpers je nach der Beschaffenheit der inneren Struktur unterschiedlich abgeschwächt; diese Information kann festgehalten werden, sodass ein zweidimensionales Bild entsteht. Allerdings geht bei der reinen Durchstrahlung von Körpern die Tiefeninformation verloren. Dieser Effekt kann dadurch kompensiert werden, dass ein Körper aus vielen verschiedenen Richtungen her durchstrahlt wird. Ausgehend von diesen Informationen kann dann das Innere eines Körpers rekonstruiert werden. Dieses Messprinzip wird als Tomographie bezeichnet. Die weitere Entwicklung, diese Information bildgebend umzusetzen, wird als Computertomographie (CT) bezeichnet. [12]

Diese Technik kommt heute in vielen Disziplinen zum Einsatz; vor allem durch medizinische Anwendungen wurde das Verfahren bekannt. Allerdings kam das Grundprinzip schon seit seiner Entdeckung in der zerstörungsfreien Prüfung zum Einsatz, als Wilhelm Conrad Röntgen sein Jagdgewehr mit Röntgenstrahlen durchleuchtete. [13]

Die dreidimensionale Computertomographie, die hier näher behandelt werden soll, basiert auf der Durchstrahlung des Körpers mit einem Fächerstrahl. Die Röntgenprojektionen, die die Abschwächungen des Strahls darstellen, werden mit einem Flachdetektor hinter dem Versuchsobjekt aufgenommen. Nach der Messung werden die vielen Aufnahmen numerisch mit Hilfe eines Computers zu einer 3-D-Geometrie rekonstruiert. In der Drehung des Messobjekts besteht der Hauptunterschied zur medizinischen CT, da sich hier das Messgerät dreht; eine Drehung des Patienten wäre schlichtweg unzumutbar. [12] [13] Da mit Hilfe von CT-Aufnahmen Dichteunterschiede innerhalb von Messkörpern abgebildet werden können, ist es ein Instrument zur Detektion von Fehlstellen und Lunkern. Des Weiteren lässt sich die Struktur insgesamt abbilden und mit Hilfe der Bilder bewerten. [12] Die Anwendung im Karosseriebau ist heute so weit fortgeschritten, dass große, voluminöse Karosserieelemente erfasst und geprüft werden. [14] Die Vorteile dieser Technik liegen in der schnellen Erfassung kompletter Bauteile und umfassender Geometrien. Aufgrund der Anknüpfung an hochentwickelte Informationstechnologie wird der Einsatz immer einfacher [15]. Nachteilig sind zum einen die hohen Kosten der Computertomographen und zum anderen der insgesamt schwierige Einsatz in der Fertigung aufgrund der emittierten Strahlung und der damit verbundenen Auflagen des Strahlenschutzes.

Mikromagnetik

Mikromagnetik im Rahmen des Karosseriebaus wird zur Überprüfung von zu verarbeitenden Blechen eingesetzt. Hierbei wird speziell das so genannte 3MA-Verfahren verwendet, welches ausformuliert Mikromagnetische Multiparameter Mikrostruktur und Spannungsanalyse heißt [16].

Das Funktionsprinzip aller mikromagnetischen Prüfverfahren kann folgendermaßen vereinfachend beschrieben werden: „Diese Verfahren basieren auf der Wechselwirkung der magnetischen Struktur (Bloch-Wandbewegungen und magnetische Domänen) mit der Mikrostruktur und den mechanischen Spannungsfeldern des Werkstoffs. Verändert sich die Mikrostruktur (Zusammensetzung, Gitterfehler, 2te Phasen, etc.) oder der Eigenspannungszustand des Werkstoffs, so beeinflusst dies nicht nur seine mechanisch-technologischen sondern auch dessen elektromagnetischen Eigenschaften. Daher kann indirekt aus den elektromagnetischen Eigenschaften auf beispielsweise Härte, Streckgrenze oder Zugfestigkeit geschlossen werden.“ [16] Das heißt also, dass mit Hilfe von mikromagnetischen Verfahren, welche die magnetischen Verhältnisse des Werkstoffs messen können, auf die Spannungsverhältnisse im Werkstoff geschlossen werden kann. Somit werden einerseits Eigenspannungsmessungen bei ohne Belastung möglich, aber auch Spannungsmessungen unter Last möglich. Besondere Bedeutung hat das Verfahren im Karosseriebau und im Presswerk, wo Bauteile beim Tiefziehverfahren (umgangssprachlich „Abpressen“) verformt werden und im verformten Zustand weiterverarbeitet werden.

Typisch für die Anwendung der 3MA-Technik ist die Stützung auf mehrere Messtechnologien, die voneinander unabhängig sind. Durch den Einsatz dieser Techniken lassen sich bis zu 41 verschiedene Messgrößen ermitteln, die zum Teil redundant sind und zum Teil differenzierte Aussagen überhaupt erst ermöglichen. Die vier Messmethoden bei dem 3MA-Verfahren für die Blechverarbeitung im Automobilbau sind

- Oberwellenanalyse
- Barkhausenrauschen
- Überlagerungspermeabilität
- Vier-Frequenz-Wirbelstrom. [17]

Die Aufnahme der Messgrößen findet grundsätzlich mit einem an die jeweilige Bauteilgeometrie angepassten Sensor mit zugehöriger Hardware statt. Die Weiterleitung durch das Kabel führt zum Rechner für die Verarbeitung und Visualisierung der Daten. [17] Die Prüfung mittels 3MA wird bei der Eingangsprüfung von Blechen verwendet, um die Eigenspannungen vor der Verarbeitung vorherzusagen. Des Weiteren werden die Tiefzieh- oder Pressvorgänge überwacht, wenn es zu Spannungsänderungen kommt. Dabei können Reißer im Blech vorhergesagt werden. Schließlich kann vor der Weiterverarbeitung des Blechs als Eingangsprüfung im Karosseriebau das tiefgezogene Blech überprüft werden, um weitere Einflüsse vor allem durch die thermische Einwirkung beim Schweißen und Löten vorherzusagen. [17]

Vorteile dieser Technik sind die mittlerweile einfache Verarbeitung und Darstellung der Ergebnisse mit Hilfe der Informationstechnologie sowie die größtenteils schon standardisierten Bauteile der Messapparate, die zu einer erheblichen Kostensenkung bei der Beschaffung in den letzten Jahren führte. Nachteilig sind nach wie vor Einflüsse auf die Messergebnisse, die noch nicht vollständig geklärt sind und somit zu einer Verringerung der Qualität der Messergebnisse führen. Beispiele hierfür sind die elektromagnetische Felder im industriellen Umfeld oder die Temperaturabhängigkeit des Messgeräts. [18]

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Zerstörungsfreie Prüfung auf unterschiedliche Art und Weise seit vielen Jahren Einzug in das Automobilbaugewerk des Karosseriebaus gefunden hat. Dabei werden teilweise die gleichen Prüfaussagen mit unterschiedlichen Verfahren getroffen, da verschiedene Arbeitsvorgänge differente Anforderungen an die Prüfung und Qualitätssicherung stellen.

Es gilt stets zu beachten, dass jedes Verfahren Schwächen und Stärken aufweist, nach denen sich der Einsatz zwangsläufig richten muss, um qualitativ hochwertige Messergebnisse erzielen zu können.

Ein weiterer Aspekt bei industriellen Einsätzen der Verfahren ist die Möglichkeit der Integration in die Linie, also in den Fertigungsablauf und somit auch in das Fertigungslayout der Fabrik. Die Methoden der schlanken Produktion (lean production) erfordern diese Prämisse zwingend, damit einerseits die Qualität der Fertigung immer auf hohem Niveau bleibt und andererseits die Kosten für die Produktion und die zugehörige Qualitätssicherung selbst vertretbar sind. Insgesamt liegt durch die Verhinderung von Bauteil- und Materialzerstörungen die Zerstörungsfreie Prüfung im Trend der Automobilindustrie.

Literatur

- Altpeter, Iris; Kopp, Melanie; Kröning, Michael; Behrens, Bernd-Arno; Hübner, Sven; Voges-Schwieger, Kathrin: Zerstörungsfreie Charakterisierung von Spannungszuständen in Blechen beim Tiefziehen mittels elektromagnetischer Prüfverfahren. DGZfP-Jahrestagung 2009. Münster 2009.
- AUDI AG: Interne Quellen.
- Bartscher, Markus; Hilpert, Uwe; Neuschaefer-Rube, Ulrich: Industrielle Computertomografie auf dem Weg zur Koordinatenmesstechnik. In: PTB-Mitteilungen 117 (2007), Heft 4, S. 397 – 406.
- Bauer, Norbert (Hrsg.): Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung. Qualitätssicherung in der Praxis. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart 2008.
- Deutsch, Volker: Zerstörungsfreie Prüfung in der Schweißtechnik. DVS-Verlag. Düsseldorf 2001.
- Felber, Eric: Untersuchungen mit dem Computertomographen bei Audi: Von der Aluminium-Karosserie zur ägyptischen Mumie. In: innovations-report. 11.10.2006. Abgerufen am 07.01.2011 über http://www.innovations-report.de/html/berichte/automotive/untersuchungen_computertomographen_audi_aluminium_71805.html
- Fraunhofer-Allianz Vision (Hrsg.): Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3-D-Messtechnik. 2005
- Fritz, Herbert (Hrsg.); Schulze, Günter (Hrsg.): Fertigungstechnik. 6. Auflage. Springer-Verlag. Heidelberg 2004.
- Große, Christian: Grundlagen der Zerstörungsfreien Prüfung. Arbeitsblätter im Rahmen der Vorlesung Zerstörungsfreie Prüfung an der Technischen Universität München im Wintersemester 2010. München 2010.
- Hübner, Sven: Mechanisches Fügen – Schlüsseltechnologie mit Zukunft. Vortrag des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover. Lönningen 14.03.2006.
- Kastner, J.: CT: Prüf- und Messmittel für Industrie und Forschung. Vortrag FH Oberösterreich. Wels 2010.
- Matthes, Klaus-Jürgen (Hrsg.); Riedel, Frank (Hrsg.): Fügetechnik. Carl Hanser Verlag. München 2003.

- Neuhäusler, Stefan; Zenzinger, Günter; Krell, Thomas; Carl, Volker: Optimierung der Impuls-Thermografie-Prüftechnik durch Laserscans und Blitzsequenzen. DGZfP-Berichtsband 86-CD. 2003
- Örtl, Reinhard: Zerstörungsfreie und zerstörende Schweißnahtprüfung. WEKA MEDIA. Kissing 2007.
- Plapper, Peter; Gericke, Holger; Fürst, Arnold: Vollautomatische Lasermeßtechnik in der Karosserie-riefertigung. Frankfurt 1998.
- Siemer, Ulrike: Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Automobilindustrie. Dissertation. Universität des Saarlandes. Saarbrücken 2010.
- Szielasko, Klaus: Entwicklung messtechnischer Module zur mehrparametrischen elektromagnetischen Werkstoffcharakterisierung und –prüfung. Dissertation. Universität des Saarlandes. Saarbrücken 2009.
- Weiss, Christian: Karosserietechnik. Skript zur gleichnamigen Vorlesung an Hochschule Konstanz im Wintersemester 2007.
- Wolter, B.; Buchholtz O.; Hofmann, U.; Meilland, P.; Kern, R.; Schneider, E.: Zerstörungsfreie Bestimmung von Qualitätsmerkmalen bei der Grobblechfertigung. DGZfP-Berichtsband 94-CD. Rostock 2005.

Einzelnachweise

1. Weiss, Christian: Karosserietechnik. Skript zur gleichnamigen Vorlesung an Hochschule Konstanz im Wintersemester 2007.
2. Matthes, Klaus-Jürgen (Hrsg.); Riedel, Frank (Hrsg.): Fügetechnik. Carl Hanser Verlag. München 2003.
3. Fritz, Herbert (Hrsg.); Schulze, Günter (Hrsg.): Fertigungstechnik. 6. Auflage. Springer-Verlag. Heidelberg 2004.
4. Hübner, Sven: Mechanisches Fügen – Schlüsseltechnologie mit Zukunft. Vortrag des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover. Lönningen 14.03.2006.
5. Örtl, Reinhard: Zerstörungsfreie und zerstörende Schweißnahtprüfung. WEKA MEDIA. Kissing 2007.
6. Deutsch, Volker: Zerstörungsfreie Prüfung in der Schweißtechnik. DVS-Verlag. Düsseldorf 2001.
7. Große, Christian: Grundlagen der Zerstörungsfreien Prüfung. Arbeitsblätter im Rahmen der Vorlesung Zerstörungsfreie Prüfung an der Technischen Universität München im Wintersemester 2010. München 2010.
8. Neuhäusler, Stefan; Zenzinger, Günter; Krell, Thomas; Carl, Volker: Optimierung der Impuls-Thermografie-Prüftechnik durch Laserscans und Blitzsequenzen. DGZfP-Berichtsband 86-CD. 2003
9. Siemer, Ulrike: Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Automobilindustrie. Dissertation. Universität des Saarlandes. Saarbrücken 2010.
10. Fraunhofer-Allianz Vision (Hrsg.): Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3-D-Messtechnik. 2005
11. Plapper, Peter; Gericke, Holger; Fürst, Arnold: Vollautomatische Lasermeßtechnik in der Karosserie-riefertigung. Frankfurt 1998.
12. Bartscher, Markus; Hilpert, Uwe; Neuschaefer-Rube, Ulrich: Industrielle Computertomografie auf dem Weg zur Koordinatenmesstechnik. In: PTB-Mitteilungen 117 (2007), Heft 4, S. 397 – 406.
13. Bauer, Norbert (Hrsg.): Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung. Qualitätssicherung in der Praxis. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart 2008.
14. Felber, Eric: Untersuchungen mit dem Computertomographen bei Audi: Von der Aluminium-Karosserie zur ägyptischen Mumie. In: innovations-report. 11.10.2006. Abgerufen am 07.01.2011 über http://www.innovations-report.de/html/berichte/automotive/untersuchungen_computertomographen_audi_aluminium_71805.html
15. Kastner, J.: CT: Prüf- und Messmittel für Industrie und Forschung. Vortrag FH Oberösterreich. Wels 2010.
16. Wolter, B.; Buchholtz O.; Hofmann, U.; Meilland, P.; Kern, R.; Schneider, E.: Zerstörungsfreie Bestimmung von Qualitätsmerkmalen bei der Grobblechfertigung. DGZfP-Berichtsband 94-CD. Rostock 2005.
17. Altpeter, Iris; Kopp, Melanie; Kröning, Michael; Behrens, Bernd-Arno; Hübner, Sven; Voges-Schwieger, Kathrin: Zerstörungsfreie Charakterisierung von Spannungszuständen in Blechen beim Tiefziehen mittels elektromagnetischer Prüfverfahren. DGZfP-Jahrestagung 2009. Münster 2009.
18. Szielasko, Klaus: Entwicklung messtechnischer Module zur mehrparametrischen elektromagnetischen Werkstoffcharakterisierung und –prüfung. Dissertation. Universität des Saarlandes. Saarbrücken 2009.