

# Qualitätsüberwachung von laserstrahlgeschweißten Tapes aus faserverstärkten Kunststoffen mittels Thermografie

## Quality monitoring of laser-beam-welded tapes made of fibre-reinforced plastics by means of thermography

Andrea Lanfermann, M. Sc.; Dipl.-Ing. Peter Abels, Fraunhofer ILT – Institut für Lasertechnik, Aachen; Andreas Gomer, M. Sc.; Prof. Dr. Werner Karl Schomburg, RWTH Aachen University KEmikro – Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen, Aachen

### Kurzfassung

Die Qualitätsüberwachung bei der Herstellung von Druckbehältern aus faserverstärkten Kunststoffen ist entscheidend für die Produktsicherheit. Insbesondere aus diesem Grund wurde im EU-Projekt „ambliFibre“ zur Entwicklung des Laserstrahl-schweißprozesses von FVK-Tapes ein Online-Qualitätsüberwachungssystem entwickelt. Während des laufenden Herstellungsprozesses werden Qualitätsaussagen über die Konsolidierung der aufeinanderliegenden Lagen gemacht. Die Qualitätsüberwachung basiert auf der Kombination von Infrarottechnologie und maschinellem Lernen. Um die Prozessüberwachung einsetzen zu können, müssen die Bänder vor dem Fügen mit einem speziell entwickelten Ultraschallheißprägeverfahren mit Prüfstrukturen versehen werden.

### 1. Einleitung

Die Herstellung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen wird aufgrund des günstigen Verhältnisses zwischen Gewicht und Festigkeit nicht nur für den Leichtbau zunehmend wichtiger, die Sicherstellung der Strukturintegrität der Bauteile ist von großer Bedeutung. Die hier beschriebenen Arbeiten sind Teil des EU-geförderten Projekts „ambliFibre“ [1], das sich mit der Entwicklung eines intelligenten, modelbasierten und qualitätsüberwachten Laserstrahl-schweißprozesses zur Wicklung von Bauteilen aus thermoplastischen, faserverstärkten Kunststoffbändern (FVK) befasst. Diese Tapes haben eine Breite von 10 bis 25 mm, eine Dicke von 100 bis 250 µm und eine Länge von mehreren hundert Metern. Der Laserschweißkopf zum Fügen der Tapes ist in Bild 1 dargestellt. Die FVK-Tapes werden in mehreren Lagen um eine Form gewickelt, dabei mit einem Laser im Zwickel lokal aufgeschmolzen und anschließend mit einer Rolle auf die vorangegangene Lage konsolidiert. Während des Prozesses

	<p>Andrea Lanfermann, M. Sc. Profil: <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=307487">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=307487</a> profile: <a href="http://www.joining-plastics.info/?id=307487">www.joining-plastics.info/?id=307487</a> andrea.lanfermann@ilt.fraunhofer.de</p>
	<p>Dipl.-Ing. Peter Abels Profil: <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=307488">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=307488</a> profile: <a href="http://www.joining-plastics.info/?id=307488">www.joining-plastics.info/?id=307488</a> peter.abels@ilt.fraunhofer.de</p>
	<p>Andreas Gomer, M. Sc. Profil: <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=307486">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=307486</a> profile: <a href="http://www.joining-plastics.info/?id=307486">www.joining-plastics.info/?id=307486</a> Gomer@KEmikro.rwth-aachen.de</p>
	<p>Prof. Dr. Werner Karl Schomburg Profil: <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=307489">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=307489</a> profile: <a href="http://www.joining-plastics.info/?id=307489">www.joining-plastics.info/?id=307489</a> Schomburg@KEmikro.rwth-aachen.de</p>

wird zur Prozessüberwachung zum einen mit einer Infrarotkamera Infrarotstrahlung aus dem Fügezwickel erfasst. Zum anderen wird mit einer zweiten

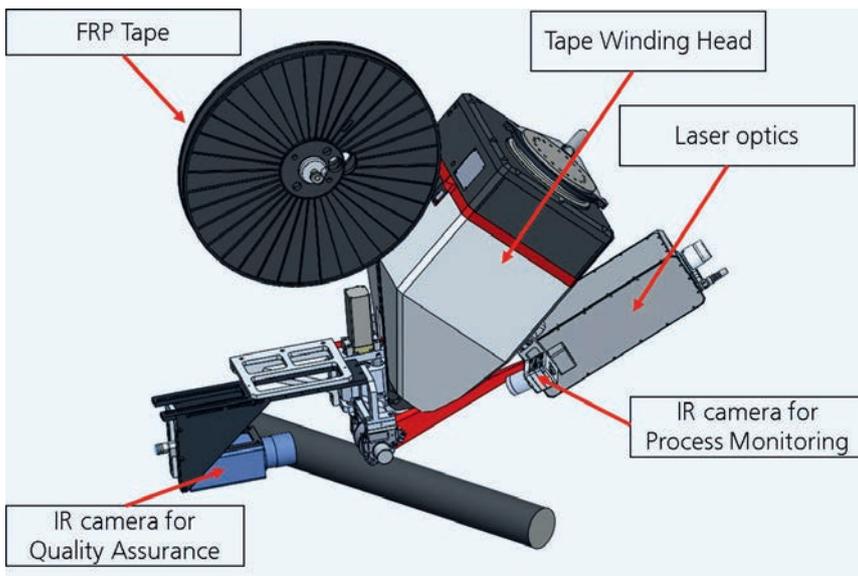
### Abstract

The quality monitoring during the manufacture of pressure vessels made of fibre-reinforced plastics (FRPs) is decisive for the product safety. Particularly for this reason, an online quality monitoring system was developed in the EU project entitled „ambliFibre“ for the development of the laser beam welding process on FRP tapes. During the ongoing manufacturing process, quality statements are made about the consolidation of the layers located on top of each other. The quality monitoring is based on the combination of infrared technology and machine learning. In order to be able to utilise the process monitoring, the tapes must be embossed with testing structures using a specially developed ultrasonic hot embossing process before the joining.

lightweight construction because of the favourable weight-to-strength ratio but great significance is also being attached to safeguarding the structural integrity of the components. The work described here is a part of the EU-promoted project which is entitled „ambliFibre“ [1] and is concerned with the development of an intelligent, model-based and quality-monitored laser beam welding process for the winding of components made of thermoplastic, fibre-reinforced plastic tapes. These tapes have widths from 10 mm to 25 mm, thicknesses from 100 µm to 250 µm and lengths of several hundred metres. The laser welding head for the joining of the tapes is portrayed on Fig. 1. The FRP tapes are wound around a roll in several layers, are locally melted completely in the gusset zone using a laser during this operation and are subsequently consolidated on to the preceding layer using a roller. On the one hand, infrared radiation from the joining gusset is detected with an infrared camera during the process in order to monitor the process. On the

### 1. Introduction

The manufacture of components made of fibre-reinforced plastics is not only becoming increasingly important for



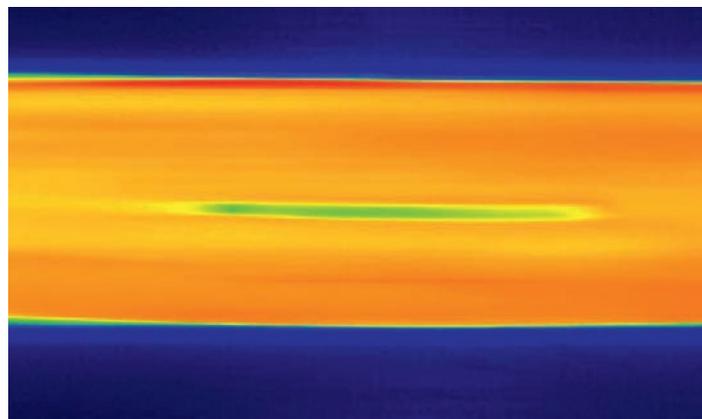
**Bild 1:** Schematische Darstellung des qualitätsüberwachten Laserstrahlschweißprozesses zur Wicklung von FVK-Tapes (Bildquelle: Fraunhofer IPT)

**Fig. 1:** Schematic representation of the quality-monitored laser beam welding process for the winding of FRP tapes (picture source: Fraunhofer IPT)

Infrarotkamera die Konsolidierung mit Hilfe von im Tape eingepprägten Strukturen hinter dem Bearbeitungspunkt bewertet. Im Folgenden steht die Bestimmung der Konsolidierungsqualität mit der zweiten Infrarotkamera im Mittelpunkt.

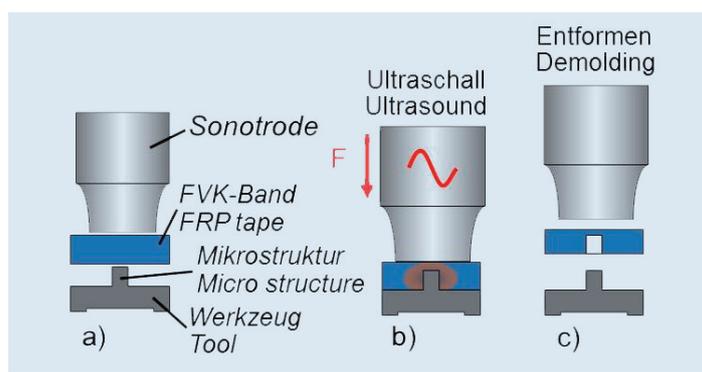
**2. Ultraschallheißprägen**

Mit dem Ultraschallheißprägen werden die Prüfstrukturen vor der Laserstrahlschweißung in die Materialoberfläche eingebracht. Hierbei wird das zu prägende Material zwischen der Sonotrode einer Ultraschallschweißmaschine und einem Werkzeug mit einer erhabenen Mikrostruktur platziert (Bild 3a). Die Sonotrode presst das Material mit einer Schweißkraft von 50 N auf das Werkzeug und, sobald die Kraft einen zuvor definierten Schwellenwert von etwa 30 N erreicht hat, werden Ultraschallschwingungen mit einer Amplitude von 30 µm eingebracht (Bild 3b). Die Ultraschallschwingungen führen ähnlich wie beim seit Jahrzehnten industriell eingesetzten Ultraschallschweißen zu hochfrequenten Mikrobewegungen an der Grenzfläche zwischen dem Material und dem Werkzeug und erzeugen somit Reibung. Diese Reibung erwärmt das Material und schmilzt es auf. Nach 1 s wird der Ultraschall abgestellt. Anschließend beginnt die sogenannte Haltezeit (etwa 1 s), in der das Material unter Kräfteinwirkung durch die Sonotrode abkühlt und wieder erhärtet. Nach der Haltephase wird die Sonotrode abgehoben und das geprägte Material entnommen (Bild 3c).



**Bild 2:** Thermografiebild eines FVK-Tapes mit eingebrachter Prägung während des Laserstrahlschweißprozesses

**Fig. 2:** Thermograph of an FRP tape with incorporated embossment during the laser beam welding process



**Bild 3:** Werkzeug zum Ultraschallheißprägen: a) Werkzeug mit erhabener Mikrostruktur, b) Prägung der Mikrostruktur, c) Lösen des Ultraschallkopfs

**Fig. 3:** Tool for ultrasonic hot embossing: a) tool with a raised microstructure, b) stamping of the microstructure, c) detachment of the ultrasonic head

Beim Ultraschallheißprägen betragen die Prozesszykluszeiten nur wenige Sekunden. Eine Vielzahl thermoplastischer Polymere, wie etwa PE, PP, PA

other hand, the consolidation with the aid of structures embossed into the tape is assessed downstream of the processing point using a second infrared

camera. Below, attention focuses on determining the consolidation quality with the second infrared camera.

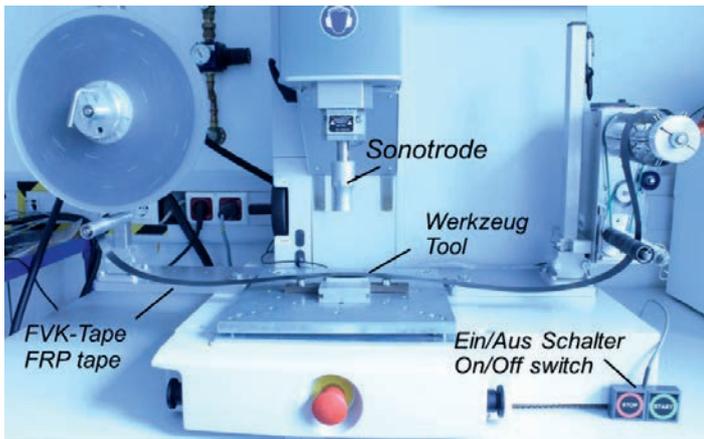
**2. Ultrasonic hot embossing**

With ultrasonic hot embossing, the test structures are incorporated into the material surface before the laser beam welding. In this respect, the material to be embossed is placed between the sonotrode of an ultrasonic welding machine and a tool with a protruding microstructure (Fig. 3a). The sonotrode presses the material on to the tool at a welding force of 50 N. Ultrasonic oscillations with an amplitude of 30 µm are generated as soon as the force has reached a previously defined threshold value of approx. 30 N (Fig. 3b). Similar to the case of ultrasonic welding which has been utilised industrially for decades, the ultrasonic oscillations lead to high-frequency micromovements at the interface between the material and the tool and produce friction in this way. This friction heats the material and melts it completely. The ultrasound is switched off after 1 s. This is followed by the so-called holding time (approx. 1 s) in which the material cools down while the sonotrode is retaining a force effect and hardens once again. After the holding phase, the sonotrode is lifted off and the embossed material is removed (Fig. 3c).

In the case of ultrasonic hot embossing, the process cycle times are just a few seconds. A large number of thermoplastic polymers, such as PE, PP, PA or PVDF, can be processed. Due to the only local energy input, the procedure is energy-efficient. Since the purchasing costs of ultrasonic welding machines are just a few € 10,000, the procedure is suitable, for example, for the cost-favourable fabrication of small quantities. Furthermore, ultrasonic welding machines can be operated in both manual and automated modes. Fig. 4 shows the ultrasonic welding machine used for the automated embossing of thermoplastic FRP tapes from roll to roll [2, 3].

**3. Online quality monitoring**

The laser beam welding process developed for the winding of tapes made of fibre-reinforced plastic is used, for example, for the manufacture of pressure tanks for trucks which must withstand a pressure of 15 bar and must the-



**Bild 4:** Ultraschallschweißmaschine zur automatisierten Prägung von thermoplastischen FVK-Tapes

**Fig. 4:** Ultrasonic welding machine for the automated embossing of thermoplastic FRP tapes

oder PVDF, können verarbeitet werden. Durch den nur lokalen Energieeintrag ist das Verfahren energieeffizient. Da die Anschaffungskosten für Ultraschallschweißmaschinen nur wenige 10.000 € betragen, ist das Verfahren beispielsweise für die kostengünstige Fertigung kleiner Stückzahlen geeignet. Darüber hinaus können Ultraschallschweißmaschinen sowohl manuell als auch automatisiert betrieben werden. Bild 4 zeigt die verwendete Ultraschallschweißmaschine zur automatisierten Prägung von thermoplastischen FVK-Tapes von Rolle zu Rolle [2, 3].

### 3. Online-Qualitätsüberwachung

Der entwickelte Laserstrahlschweißprozess zum Wickeln von Tapes aus faserverstärktem Kunststoff wird zum Beispiel zur Herstellung von Drucktanks für LKWs verwendet, die einem Druck von 15 bar standhalten und daher fehlerfrei produziert werden müssen. Zur Qualitätsüberprüfung werden im Voraus definierte Prägungen mit einer Höhe von 300  $\mu\text{m}$ , einer Breite von 500  $\mu\text{m}$  und einer Länge von 1600  $\mu\text{m}$  in die Oberfläche der Tapes durch Ultraschallheißprägung eingebracht. Die Prägungen dienen dem Überwachungsprozess als Prüfstrukturen und können mittels Thermografie detektiert werden. Die anfängliche Höhe der Mikrostruktur reduziert sich beim Wickelprozess in Abhängigkeit von den gewählten Prozessparametern und der Anbindungsgüte, sodass erkennbar wird, ob das Tape eine geeignete Anbindung zu der vorangegangenen Schicht aufweist. Zur Entwicklung des Überwachungsprozesses wurde der Laserstrahlschweiß-

prozess durch die Aufheizung von bereits geschweißten Tapes simuliert (Bild 5). Hierfür wurde das FVK-Tape auf eine Rotationsachse gespannt, die sich mit der gleichförmigen Geschwindigkeit bewegt wie im industriellen Prozess. Das Tape wurde mit einem Diodenlaser (808 nm Wellenlänge) erhitzt und um 90° versetzt mit einer Infrarotkamera beobachtet. Die Analyse beginnt mit dem ersten Bild der Thermokamera. Aufgrund der Anbindungsqualität verändern sich die Wärmeverteilung und die Abkühlrate des Werkstoffs im Bereich der Prägung. Aus jedem Bild der Thermokamera werden daher in einem definierten Ausschnitt statistische Werte der gemessenen Temperaturstrahlung berechnet, die charakteristisch für den Zustand der Konsolidierung sind. Mit Hilfe dieses Aufbaus konnte die Erkennung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Konsolidierungszuständen erarbeitet werden.

### 4. Datenanalyse und Bewertung

Wie bei den Voruntersuchungen nutzt die Datenanalyse die im Laserstrahlschweißprozess aufgenommenen Infrarotbilder zur Identifikation der Konsolidierungsqualität zweier Lagen. Die Prozessbilder werden mit Hilfe von Methoden des maschinellen Lernens einzeln analysiert. Dazu wird in jedem Bild ein definierter, ortsfester Ausschnitt untersucht und sechs Merkmale aus den Bildwerten, die der Wärmestrahlung entsprechen, berechnet. Hierzu zählen der Mittelwert, der Maximal-, der Minimalwert, die Standardabweichung, die Skewness und die Kurtosis der Temperaturverteilung. Während die

reife be produziert werden ohne Defekte. In order to check the quality, previously defined embossments with a height of 300  $\mu\text{m}$ , a width of 500  $\mu\text{m}$  and a length of 1,600  $\mu\text{m}$  are incorporated into the surfaces of the tapes using ultrasonic hot embossing. The embossments serve the monitoring process as testing structures and can be detected by means of thermography. The initial height of the microstructure is reduced during the winding process depending on the chosen process parameters and the consolidation quality so that it becomes recognisable whether the tape exhibits suitable bonding to the preceding layer.

In order to develop the monitoring process, the laser beam welding process was simulated by heating up already welded tapes (Fig. 5). For this purpose, the FRP tape was clamped on a rotation axis which moves at the uniform speed as in the industrial process. The tape was heated with a diode laser (wavelength: 808 nm) and observed with an infrared camera offset by 90°.

The analysis begins with the first image of the thermal camera. The heat distribution and the cooling rate of the material in the region of the embossment alter as a result of the consolidation quality. Therefore, statistical values of the measured temperature radiation which are characteristic of the state of the consolidation are calculated from every image of the thermal camera in a defined section. With the aid of this setup, it was possible to elaborate the recognition of

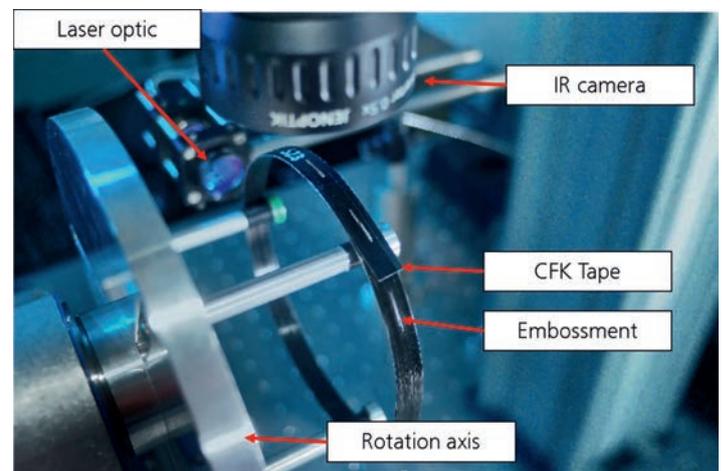
the differences between the various consolidation states.

### 4. Data analysis and assessment

As during the preliminary investigations, the data analysis uses the infrared images recorded in the laser beam welding process in order to identify the consolidation quality of two layers. The process images are analysed individually with the aid of machine learning methods.

For this purpose, a defined, stationary section is investigated on every image and six characteristics which are taken from the image values and correspond to the heat radiation are calculated. These include the mean, maximum and minimum values, the standard deviation as well as the skewness and kurtosis of the temperature distribution. While the statistical values are extremely dependent on the level of the measured temperature radiation, the skewness and the kurtosis describe the distribution of the values and are more difficult to influence by the absolute level of the temperature radiation. The skewness describes the extent of the asymmetry of the distribution and the kurtosis describes its steepness.

In order to develop the evaluation method, parameter sets corresponding to sufficient and insufficient consolidation were stipulated for the laser beam process. The resulting welded rings were investigated destructively using cross sections and the consolidation quality was determined. From every specimen, the image sections of the infrared images were assessed manually and assigned to various states. These states are emboss-



**Bild 5:** Experimenteller Aufbau zur Entwicklung des Überwachungsprozesses

**Fig. 5:** Experimental setup for the development of the monitoring process

statistischen Werte stark von der Größe der gemessenen Temperaturstrahlung abhängig sind, beschreiben die Skewness und Kurtosis die Verteilung der Werte und sind schwerer durch die absolute Größe der Temperaturstrahlung zu beeinflussen. Die Skewness, auch Schiefe, beschreibt die Stärke der Asymmetrie der Verteilung und die Kurtosis, auch Wölbung, beschreibt deren Steilheit.

Zur Entwicklung der Auswertemethode wurden Parametersätze für den Laserstrahlprozess festgelegt, die einer ausreichenden und einer unzureichenden Konsolidierung entsprechen. Die entstandenen geschweißten Ringe wurden zerstörend durch Querschnitte untersucht und die Konsolidierungsqualität bestimmt. Von jeder Probe wurden manuell die Bildausschnitte der Infrarotbilder bewertet und verschiedenen Zuständen zugeordnet. Diese Zustände sind Prägung, keine Prägung und im Falle einer Prägung ausreichende und unzureichende Konsolidierung. Mit Hilfe dieser Ergebnisse für bekannte Fügeprozesse erfolgt der Lernprozess des maschinellen Lernens, um bei neuen unbekanntem Prozessbildern die Zustände automatisch zu erkennen. Der Auswerteprozess ist in zwei Stufen unterteilt. Im ersten Schritt wird bestimmt, ob sich eine Prägung im Analysebereich des Infrarotbilds befindet und damit entschieden, ob im zweiten Schritt eine Unterscheidung der Konsolidierungsqualität stattfindet. Dies stellt eine möglichst schnelle Analyse der großen Datenmengen sicher. Für die erste Stufe wird das Prinzip der Entscheidungswälder verwendet. Hierbei werden bis zu 150 verschiedene Entscheidungsbäume verwendet, um die richtige Aussage zu treffen. Jeder Entscheidungsbaum wägt an verschiedenen Knotenpunkten ab, welcher Zustand im aktuellen Bild vorliegt. Als Knotenpunkte dienen hierbei die sechs oben genannten Merkmale. Die Reihenfolge, in der die statistischen Merkmale eingebracht werden, variiert zwischen den verschiedenen Entscheidungsbäumen. Die finale Aussage wird letztendlich über die Mehrheit der Ergebnisse ermittelt. [4, 5] Für jedes Training werden 25% der Gesamtdaten aus dem Trainingssatz verwendet und die restlichen 75% dienen zur Evaluation des trainierten Modells als Testdatensatz.

Bei der Berechnung des ersten Schritts des Modells wurden insgesamt 150 Bilder als Testdaten verwendet. Auf 123 Bildern

True Class	No Embossment	120	3
	Embossment		27
		No Embossment	Embossment
		Predicted Class	

**Bild 6: Konfusionsmatrix des maschinell angelegten Modells zur Findung von Prägungen auf der Oberfläche von FVK-Tapes**

**Fig. 6: Confusion matrix of the machine-learned model in order to find embossments on the surfaces of FRP tapes**

ist keine Prägung und auf 27 ist eine Prägung zu sehen. Der maschinelle Lernalgorithmus hat 120 Bildern keine Prägung zugeordnet, auf denen auch in der Realität keine Prägung ist. Den restlichen drei Bildern ohne Prägung wurde von dem Algorithmus fälschlich eine Prägung zugeordnet. Die Bilder, auf denen eine Prägung existiert, wurden alle richtig zugeordnet. Dies entspricht einer Genauigkeit von 98%. Dieses Ergebnis ist in einer Konfusionsmatrix in Bild 6 dargestellt. In der Konfusionsmatrix wird gegenübergestellt wie die Bilder tatsächlich eingeordnet sind und wie der Algorithmus die Bilder seinerseits einordnet.

Für den zweiten Schritt wird eine „Support Vector Machine“ (SVM) verwendet, um das Modell zu trainieren, da dieses Prinzip für diesen Fall eine höhere Genauigkeit aufweist als die Entscheidungsbäume. Beim Prinzip der „Support Vector Machine“ werden alle Trainingsobjekte als Vektor im Vektorraum dargestellt. Um die Objekte zu trennen, wird eine lineare Trennlinie gelegt, so dass sich um eine Punktwolke herum ein möglichst großer Bereich ohne weitere Messpunkte befindet. Bei stark variierenden Messdaten wird der Vektorraum in einen höherdimensionalen Raum überführt, in dem die Daten trennbar sind. [4, 5] Im zweiten Schritt wird mit Hilfe der vorliegenden Daten eine Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit der Bewertung von 100% erreicht, was sich auch in der Konfusionsmatrix in Bild 7 widerspiegelt.

27 Bilder mit Prägung wurden als Testdatensatz herausgenommen, wobei 10 Bilder zu einer ausreichenden Konsolidierung gehören und 17 zu einer unzu-

reichenden Konsolidierung, no embossment and, in the case of embossment, sufficient and insufficient consolidation. The machine learning process is carried out with the aid of these results for known joining processes in order to recognise the states automatically in the event of any new unknown process images.

The evaluation process is divided into two stages. In the first step, it is determined whether an embossment is located in the analysis region of the infrared image and it is thus decided whether the consolidation quality is differentiated in the second step. This ensures the quickest possible analysis of the large data quantities. The principle of the decision forests is used for the first stage. In this respect, up to 150 different decision trees are used in order to make the correct statement. At various nodal points, every decision tree appraises what state exists on the current image. In this respect, the six characteristics specified above serve as nodal

points. The sequence in which the statistical characteristics are incorporated varies between the different decision trees. The final statement is ultimately established using the majority of the results [4, 5]. 25% of the total data from the training set is used for every training session and the remaining 75% serves to evaluate the trained model as a test data set. During the calculation of the first step of the model, a total of 150 images were used as test data. No embossment can be seen on 123 images and an embossment can be seen on 27 images. The machine learning algorithm did not assign any embossment to 120 images on which there is no embossment in reality either. The algorithm mistakenly assigned embossments the three remaining images without any embossment. The images on which embossments exists were all assigned correctly. This corresponds to an accuracy of 98%. On Fig. 6, this result is portrayed in a confusion matrix in which it is compared how the images are actually classified and how the algorithm classifies the images itself.

For the second step, a „support vector machine“ (SVM) is used in order to train the model since this principle exhibits a higher accuracy for this case than the decision trees. According to the „support vector machine“ principle, all the training objects are represented as vectors in the vector space. A linear separating line is drawn in order to separate the objects so that the largest possible region without any further measuring points is located around one point cloud. If the measured data varies extremely, the vector space is transferred into a higher-dimensional space in

True Class	Sufficient	10	
	Insufficient		17
		Sufficient	Insufficient
		Predicted Class	

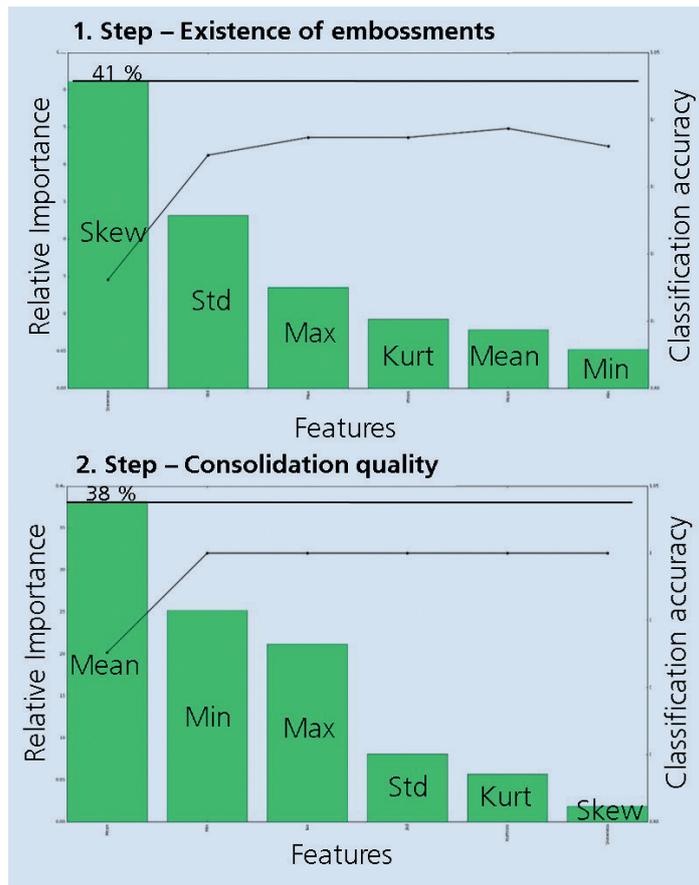
**Bild 7: Konfusionsmatrix des maschinell angelegten Modells zur Ermittlung der Konsolidierungsqualität von verschweißten FVK-Tapes**

**Fig. 7: Confusion matrix of the machine-learned model in order to establish the consolidation qualities of welded FRP tapes**

reichenden. Alle Bilder wurden von dem trainierten Algorithmus richtig zugeordnet (Bild 7). Die Anzahl der Testdaten ist aufgrund der zur Verfügung stehenden Proben klein, sodass dieses Ergebnis nur einen ersten Ansatz bietet zur Auswertung der Messdaten. Wenn mehr Probenmaterial zur Verfügung steht, kann dieser Ansatz weiter ausgebaut und optimiert werden. Gegebenfalls muss bei einer größeren Menge an Messdaten ein anderes Trainingsprinzip für den maschinellen Lernalgorithmus gewählt werden oder die Anzahl der Merkmale variiert.

Eine Variation der Merkmale kann zu einem besseren Ergebnis führen, wenn das System zum Beispiel überklassifiziert ist und nur noch auf gezielte Fälle reagiert. Zur Einschätzung der Merkmale kann der Einfluss eines einzelnen Features in Abhängigkeit der Modellgenauigkeit berechnet werden. Diese Genauigkeiten sind für die sechs gewählten Merkmale in Bild 8 zu sehen. Die Relevanz der einzelnen Merkmale ist in dem Balkendiagramm gezeigt und die Genauigkeit des Modells als Graph. Bei der Unterscheidung der Existenz von Prägungen im Messbereich ist die Schiefe mit einer Wichtung von 42% das wichtigste Merkmal für die Analyse, reicht aber nicht alleine aus, um das Bild vollständig zuzuweisen. Im Gegensatz hierzu ist der Mittelwert im zweiten Schritt das wichtigste Merkmal. Der Mittelwert variiert stark mit den absoluten Temperaturwerten, so dass eine leichte Änderung der äußeren Einflüsse das Ergebnis verfälschen könnte. Durch eine Verwendung ergänzender Merkmale, in diesem Fall des Minimums, kann dem aber vorgebeugt werden. Grundsätzlich kann zur Optimierung der Genauigkeit des Algorithmus die Auswahl der Merkmale sowie die Menge an Trainingsdaten variiert werden.

Zusammengefasst ist der Algorithmus in der Lage automatisch zu erkennen, welchen der drei vorgegebenen Zustände die einzelnen Bilder zeigen. Auf diese Weise kann erkannt werden wie die Anbindung zweier Lagen beim Laserstrahlschweißen der FVK-Tapes beschaffen ist. Das Gesamtsystem ist mit einer Steuerung verbunden, die das Ergebnis in diesem Fall in Form eines Analogsignals übergibt, so dass bereits vor Prozessen auf den Anbindungszustand reagiert



**Bild 8:** Genauigkeiten und Relevanz der einzelnen Features, oben: Erkennung von Prägungen, unten: Erkennung der Konsolidierung

**Fig. 8:** Accuracies and relevances of the individual features, top: recognition of embossments, bottom: recognition of the consolidation

werden kann. Wenn der Prozess verändert wird, sei es durch andere Prozessparameter oder durch die Verschweißung eines anderen Materials, kann der Algorithmus mit neuen Trainingsdaten leicht angepasst und das Modell neu trainiert werden. Grundvoraussetzung für die Funktionalität dieses Überwachungssystems ist, dass die zu erkennenden Eigenschaften Korrelationen hervorrufen, die mit der Infrarot-Kamera beobachtet werden können.

### 5. Zusammenfassung

Dichtheit und mechanische Stabilität stehen bei einer Produktion von Druckbehältern und Rohren im Vordergrund. Um solche Bauteile fehlerfrei zu produzieren, wurde für den Laserstrahlschweißprozess von FVK-Bändern eine Qualitätsüberwachung entwickelt, die bereits während des Prozesses die Qualität der Anbindung zuverlässig erkennen kann. Hierzu wird das bereits verschweißte Tape im Nachlauf mit einer Infrarotkamera beobachtet und die Bil-

tem is overclassified and reacts to targeted cases only. In order to estimate the characteristics, the influences of the individual features can be calculated depending on the model accuracy. On Fig. 8, these accuracies can be seen for the six chosen characteristics. The relevances of the individual characteristics are shown on the bar chart and the accuracy of the model as a graph. When making distinctions between the existence of embossments in the measuring region, the skewness is, with weighting of 42%, the most important characteristic for the analysis but, on its own, is not sufficient in order to allocate the image completely. In contrast with this, the mean value is the most important characteristic in the second step. The mean value varies extremely with the absolute temperature values. Thus, a slight change in the external influences might falsify the result. However, this can be prevented by using supplementary characteristics - in this case, the minimum. Basically, the selection of the characteristics as well as the quantity of training data can be varied in order to optimise the accuracy of the algorithm.

In summary, the algorithm is capable of automatically recognising which of the three stipulated states is shown on the individual images. The condition of the bonding between two layers during the laser beam welding of the FRP tapes can be recognised in this way.

The overall system is connected with a controller which transfers the result (in this case, in the form of an analog signal) so that a reaction to the bonding state can already be made before the end of the process. If the process is altered (no matter whether by using other process parameters or by welding another material), the algorithm can be adjusted easily with new training data and the model can be retrained. The basic prerequisite for the functionality of this monitoring system is that the properties to be recognised give rise to correlations which can be observed with the infrared camera.

### 5. Summary

During the production of pressure vessels and pipes, attention focuses on leak tightness and mechanical stability. In order to produce such components without any defects, a quality monitoring method which can reliably recognise the quality of the bonding already during the process

der analysiert. Der Analysealgorithmus nutzt die Änderung der Wärmeverteilung auf dem Tape, die an gezielt eingebrachten Prüfstrukturen entsteht. Die entwickelte Qualitätsüberprüfung ist in der Lage, die Prägungen auf dem FVK-Tape zu erkennen und die Konsolidierung aufgrund gesammelter Daten zu bewerten. Die Prüfstrukturen sind Mikrostrukturen, deren geometrische Abmessungen so gewählt sind, dass es zu keiner Schädigung des faserverstärkten Tapes kommt.

**6. Ausblick**

Die Untersuchungen zeigen, dass das Zusammenwirken der eingepprägten Mikrostrukturen sowie deren Detektion mittels Thermografie dazu beitragen kann, die Qualität des Laserstrahlschweißprozesses kontinuierlich zu überwachen und Fehlproduktion zu reduzieren. Dadurch können sowohl Abfall als auch Energieeinsatz in der Produktion verringert werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, das vorgestellte Messverfahren auf andere Produktionsverfahren für thermoplastische Kunststoffbauteile zu übertragen.

**Danksagung**

Dieses Projekt wurde durch das Forschungs- und Innovationsprogramm

**Literatur References**

- [1] <https://www.amblifibre.eu/>, aufgerufen am 10.07.2018.
- [2] Sackmann, J.; Burlage, K.; Gerhardy, C.; Memering, B.; Liao, S.; Schomburg, W. K.: Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices. Ultrasonics, 56, pp. 189/200, 2015.
- [3] Daniels, H. P. C.: Ultrasonic Welding. Ultrasonics, 3, pp. 190/6, 1965.
- [4] The MathWorks, Inc. Applying Supervised Learning, 2016.
- [5] Bishop, C. M. : Pattern Recognition and Machine Learning, 2006.

Horizon 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Finanzhilfvereinbarung Nr. 678875 gefördert. Die Verbreitung des Projekts spiegelt nur die Meinung der Autoren wieder und die Kommission ist nicht verantwortlich für die Verwendung der darin enthaltenen Informationen.



**Hinweis**

Diesen Fachbeitrag können Sie von unserer Internetseite [www.fuegen-von-kunststoffen.de](http://www.fuegen-von-kunststoffen.de) kostenfrei herunterladen.

was developed for the laser beam welding process on FRP tapes. For this purpose, the already welded tape is subsequently observed with an infrared camera and the images are analysed. The analysis algorithm uses that change in the heat distribution on the tape which results on test structures incorporated in a targeted way. The developed quality checking method is capable of recognising the embossments on the FRP tape and assessing the consolidation on the basis of collected data. The test structures are microstructures whose geometrical dimensions are chosen in such a way that the fibre-reinforced tapes are not damaged.

**6. Outlook**

The investigations show that the interaction between the imprinted microstructures as well as their detection by means of thermography may con-

tribute to the continuous monitoring of the quality of the laser beam welding process and to the reduction of any defective production. This may serve to decrease not only the waste but also the energy utilisation in the production.

Furthermore, there is the possibility of transferring the introduced measuring procedure to other production procedures for thermoplastic components.

**Acknowledgement**

This project was promoted by the Horizon 2020 research and innovation programme of the European Union within the framework of Grant Agreement No. 678875. The dissemination of the project only reflects the opinions of the authors and the Commission is not responsible for the use of the information included in it.



**Notice**

You can download this peer-reviewed paper from our website [www.joining-plastics.info](http://www.joining-plastics.info) for free.



Das Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien Fügen von Kunststoffen ist in der 16. Auflage erschienen - vollständig überarbeitet und erweitert.

Erarbeitet von der Arbeitsgruppe W 4 „Fügen von Kunststoffen“, bildet das Fachbuch das Regelwerk für das Fügen von Kunststoffen umfassend ab.

Die Publikation hat sich als das führende Werk auf diesem Fachgebiet etabliert. Im Bereich des Kunststofffügens haben sich aktuell zahlreiche Entwicklungen ergeben, die als Neuerungen in den DVS-Richtlinien und -Richtlinienentwürfen aufgegriffen wurden.

16. Auflage, erschienen: Dezember 2015  
1096 Seiten, 1289 Bilder u. Abb. / 352 Tabellen  
Best.-Nr.: 102351, ISBN: 978-3-945023-50-1

Preis: 109,00 Euro

Fachbuchreihe Schweißtechnik

DVS Media GmbH • Aachener Straße 172 • 40223 Düsseldorf • T +49. (0)211. 1591-162 • F +49. (0)211. 1591-250 • [vertrieb@dvs-hg.de](mailto:vertrieb@dvs-hg.de) • [www.dvs-media.eu](http://www.dvs-media.eu)