

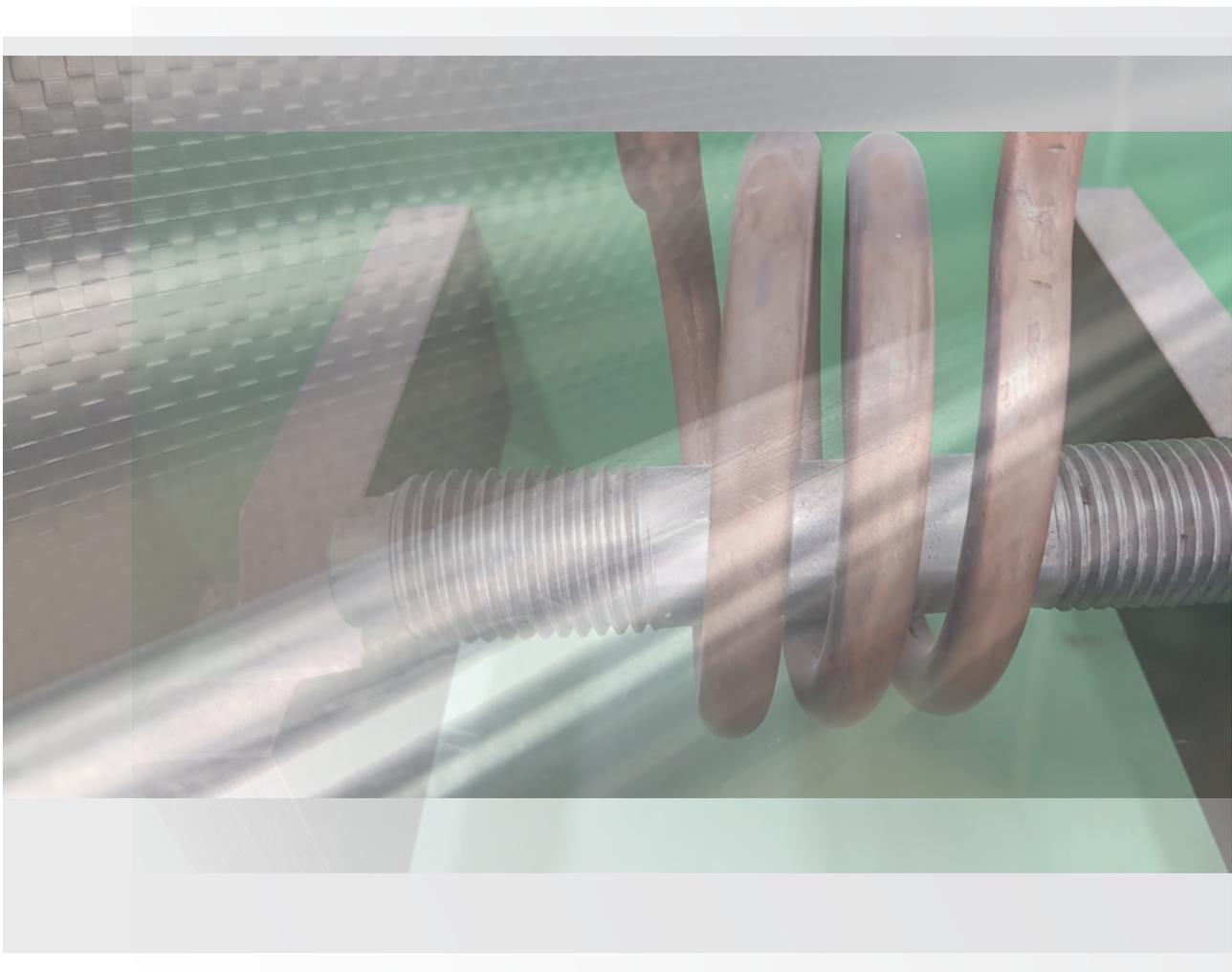


DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG e.V.

## *ZfP heute*

---

### **Wissenschaftliche Beiträge zur Zerstörungsfreien Prüfung 2020**



Die DGZfP-Jahrestagung 2020 war vom 18. – 20. Mai 2020 in Würzburg geplant. Der Programm-ausschuss hatte für die drei parallelen Vortragssitzungen insgesamt 93 Vorträge und 32 Poster ausgewählt. Aufgrund der erforderlichen Absage der Jahrestagung wegen der Corona-Pandemie, hat der Vorstand der DGZfP beschlossen, diesen Sonderband „ZfP heute“ herauszugeben. Den Autoren, die für diese Tagung Beiträge eingereicht hatten, soll damit eine Möglichkeit zur Publi-kation angeboten werden. Ausdrücklich bietet der Sonderband auch Platz für Beiträge, die auf anderen Konferenzen rund um das Thema ZfP angemeldet waren, die ebenfalls nicht stattfinden konnten.

In diesem Band sind insgesamt 25 Beiträge zusammengestellt. Einige der Autor\*innen haben bereits vorher ihre Vorträge in gekürzter Form in der ZfP-Zeitung, Ausgabe, 170 Juli 2020, veröffentlicht. Mehrere dieser Beiträge sind nun hier im Sonderband in der ursprünglich vorge-sehenen Länge zu finden.

Wir freuen uns, dass das Angebot von vielen Autoren begrüßt und angenommen wurde. Der Sonderband beginnt mit den Beiträgen der drei Träger des Wissenschafts-, Nachwuchs- und Anwenderpreises 2020, die in diesem Röntgen-Jahr das Thema Radiographie und Computer-tomographie behandeln.

Auf ein Wiedersehen in guter Atmosphäre auf der Jahrestagung 2021 in Osnabrück!

Der Vorstand der DGZfP

Dr. Anton Erhard Dr. Jochen Kurz Dr. Matthias Purschke Dr. Dirk Treppmann

Berlin, August 2020

<b>BEITRAG</b>	<b>VERFAHREN/TITEL/AUTOR*IN</b>	<b>SEITE</b>
	<b>Wissenschaftspreis der DGZfP 2020   Computertomographie</b>	
Beitrag 1	Artifact Correction and Real-Time Scatter Estimation for X-Ray Computed Tomography in Industrial Metrology <i>Joscha Maier</i>	5
	<b>Nachwuchspreis der DGZfP 2020   Röntgendiffraktometrie</b>	
Beitrag 2	Röntgendiffraktometrie mit dem Pulstec $\mu$ -x360 Gerät – Vergleichende Untersuchungen <i>Sebastian Matthes</i>	18
	<b>Anwenderpreis der DGZfP 2020   Computertomografie</b>	
Beitrag 3	RoboCT – Production Monitoring in Automobile Industry 4.0 <i>Wolfgang Holub, Peter Jahnke, Anya Ziertmann</i>	22
	<b>Condition monitoring</b>	
Beitrag 4	Development of a sensor- and cloud-based condition monitoring system for the detection of gear damage <i>Andreas Beering, Karl-Ludwig Krieger</i>	27
	<b>Dichtheitsprüfung</b>	
Beitrag 5	Dichtheitsprüfung von Produkten mit Druckausgleichselementen <i>Joachim Lapsien</i>	31
	<b>Kernspinresonanz</b>	
Beitrag 6	Zerstörungsfreie Prüfung von Klebeverbindungen durch den Einsatz unilateraler NMR <i>Norbert Halmen, Ulrich Hack, Linda Mittelberg, Eduard Kraus, Benjamin Baudrit, Thomas Hochrein, Martin Bastian</i>	34
	<b>Materialcharakterisierung</b>	
Beitrag 7	Röntgenographische Spannungsmessung Vergleich von $\sin 2\psi$ - und $\cos \alpha$ - Verfahren <i>Lothar Spieß, Sebastian Matthes, A. Grüning</i>	39
	<b>Mikrowellenprüfung</b>	
Beitrag 8	Mikrowellenprüfung mit der Pitch-Catch-Methode <i>Johann Hinken, Aschwin Gopalan</i>	42
	<b>Shearographie</b>	
Beitrag 9	Mach-Zehnder-Interferometer Aufbau mit Virtuellem Doppelspalt für Shearografie mit räumlichem Phasenschieben bei variablem Shear <i>Christopher Petry, Michael Schuth</i>	46
	<b>Thermografie</b>	
Beitrag 10	Pulverbettüberwachung bei der Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen durch aktive Thermografie <i>Fabian Herzer, J. Schilp</i>	52
Beitrag 11	Zerstörungsfreie Bauteilprüfung von großflächigen, glasfaserverstärkten Schienenfahrzeug-Komponenten <i>Moritz Kaczmarek, Marco Müller</i>	56
Beitrag 12	Grenzen und Potenziale der Thermografie für die Qualitätssicherung beim Ultraschallschweißen <i>Christopher Pommer</i>	58

BEITRAG	VERFAHREN/TITEL/AUTOR*IN	SEITE
	<b>Ultraschallprüfung</b>	
Beitrag 13	Bindungsprüfung an Verbundgleitlagern im Pumpspeicherkraftwerk mit Phased-Array-Ultraschall <i>S. Berner, Anne Jüngert</i>	59
Beitrag 14	Prüfung von Hochtemperatur-Wasserstoffangriffen (HTHA) mittels der FMC/TFM-Methode und die Auswahl des richtigen Prüfkopfes <i>Chi-Hang Kwan, Victor Chumillas, Florin Turcu, Heiko Küchler, Reinbert Rosenberg, Anton Schönbauer</i>	63
Beitrag 15	Prüfung von Faserverbundwerkstoffen aus Luftfahrtanwendungen mit elektromagnetischem Ultraschall (EMAT) <i>Frank Niese, Tobias Roelfes, Michael Koerdt, Marcel Rennoch, Björn Maack, Elisabeth Hardi</i>	69
Beitrag 16	Pulskompression mit luftgekoppeltem Ultraschall <i>Pierre Pfeffer, Christian Kolb, Daniel Hoffmann, Giovanni Schober</i>	73
Beitrag 17	Entwicklung eines Ultraschallsystems zur Überwachung des Lotverhaltens während eines Lötprozesses <i>Reiner Zielke, Wolfgang Tillmann, Arne Eilers, Julia Bültena</i>	78
Beitrag 18	Entwicklung einer Prüfmaschine zu In-Situ Untersuchungen mit Hilfe der Computertomografie <i>Reiner Zielke, Wolfgang Tillmann, Maximilian Ambaum, Siegfried Schmauder, Yanling Schneider</i>	82
Beitrag 19	Einfluss der Ultraschall-Prüfparameter auf die Detektion von Imperfektionen in gelöteten Fügeverbunden <i>Reiner Zielke, Wolfgang Tillmann, Arne Eilers, Julia Bültena, Katharina Schmidt</i>	85
	<b>Wirbelstrom</b>	
Beitrag 20	Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe – von der Theorie zur Anwendung <i>Sebastian Joas, Marc Kreuzbruck</i>	90
Beitrag 21	Wirbelstromprüfung beschichteter Zylinderlaufflächen mit Sensorarrays <i>Gerhard Mook, Yury Simonin</i>	95
Beitrag 22	In situ Qualitätsbeurteilung von Schleifprozessen mittels Mikrosystemtechnik basierter Sensorfusion <i>Isman Khazi, Andras Kovacs, Ali Zahedi, Christian Reser, Ulrich Mescheder, Bahman Azarhoushang, Christoph Reich</i>	99
	<b>ZfP 4.0</b>	
Beitrag 23	Qualität hören – Das Gehör des Technikers für die Produktion 4.0 <i>Tobias Clauß, Judith Liebetrau</i>	102
Beitrag 24	Erste Schritte in Richtung ZfP 4.0 <i>Maximilian Topp</i>	104
Beitrag 25	Digitale Zwillinge metrologischer Röntgencomputertomografen für die numerische Messunsicherheitsbestimmung <i>Florian Wohlgemuth, Frederike Wolter, Tino Hausotte</i>	106
	<b>Sichtprüfung</b>	
Beitrag 26	Untersuchung der Einflussgrößen auf die Anzeigenerkennbarkeit bei der visuellen Prüfung <i>Michel Blankschän, Marija Bertovic, Daniel Kanzler, Martina Rosenthal, Stanislav Lindt</i>	111
Beitrag 27	<b>Wirbelstrom</b> Bestimmung und Klassifizierung von Korrosionserscheinungen in ferromagnetischen Tankbodenblechen mit einer Wirbelstromapplikation in Verbindung mit der Streuflussmethode <i>Matthias Janßen, Dirk Koster</i>	115

BEITRAG 1 – WISSENSCHAFTSPREIS 2020

# Artifact Correction and Real-Time Scatter Estimation for X-Ray Computed Tomography in Industrial Metrology

Joscha Maier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Division of X-Ray Imaging and CT, German Cancer Research Center (DKFZ), Heidelberg; RayConStruct GmbH, Nürnberg

**ABSTRACT** | In recent years, computed tomography (CT) has become a valuable tool in metrology. However, the potential of CT is often limited by CT artifacts which may impair an accurate metrological assessment. To overcome this limitation, two promising approaches have been proposed recently: the so-called simulation-based artifact correction (SBAC) and the deep scatter estimation (DSE). The SBAC provides a very general framework for CT artifact correction. Given a prior model of the measured component, it performs a precise simulation of the CT measurement process including all physical effects causing artifacts. The difference between this and an ideal simulation yields an estimate of the present artifacts that can be used to correct the corresponding CT measurement. It has been shown that this approach allows to correct the most common CT artifacts, i. e. beam hardening, x-ray scattering, off-focal radiation, partial volume effects, and cone-beam artifacts. Applied to single- and multi-material measurements, it provided CT images that were almost free of artifacts and whose quality was clearly superior to common reference approaches. In this context, the problem of long runtimes of scatter simulations could be solved by the DSE using a deep convolutional neural network. Here, DSE is trained to reproduce Monte Carlo (MC) scatter estimates using only the acquired projection data as input. Once trained, DSE can be applied to unknown data in real-time and provides scatter estimates that differ from MC simulations by less than 2 %.

## 1 Introduction

With the rising variety and complexity of industrial components and the need for tolerance and geometrical quality control, the use of computed tomography (CT) for metrology started to be investigated in the early 1990s [1]–[3]. Providing a high measurement point density, comparably short scan times and the ability to assess internal features non-destructively, it has since become the state-of-the-art in several areas of application [4]. Despite the progress made in recent years, the investigation of highly attenuating or multi-material components remains a major challenge. As depicted in figure 1, the reconstructions of such components often show cupping, shading or streak artifacts. In general, these artifacts are caused by different physical effects that lead to a non-linear relationship between projection values and material intersection lengths, and thus, cannot

be reconstructed exactly by analytic reconstruction algorithms. Among these effects, beam hardening, x-ray scattering, partial volume effects and off-focal radiation are the most prominent ones [5]. Another common source of artifacts is the use of circular scan trajectories in combination with a cone-beam setup. Since this trajectory only allows for an exact CT reconstruction within the mid-plane, so-called cone-beam artifacts are introduced, especially in the periphery of the reconstructed volume.

As CT artifacts often impair an accurate metrological assessment [6], artifact correction has become an active field of research. However, existing approaches are either optimized for a certain artifact, too computationally expensive to be applied routinely or they are restricted to either single- or multi-material components only. To overcome these drawbacks two promising approaches have been proposed recently by the author: the so-called simulation-based artifact correction (SBAC) and the deep scatter estimation (DSE). While the SBAC provides a very general framework to correct for most CT artifacts, DSE enables real-time scatter estimation with similar accuracy as Monte Carlo simulations. In the following both approaches are briefly reviewed, focussing on basic concepts rather than implementation details. For a more comprehensive description, the reader is referred to the original publications (reference [7], [8], and [9]).

## 2. Related Work

Since the introduction of CT, there has been ongoing research on CT artifact correction. A brief overview of existing artifact correction approaches in general and scatter correction approaches in particular is given in the following section.

### 2.1 CT Artifact Correction

In general, artifact correction approaches can be divided into iterative approaches, post- and precorrection approaches. Iterative approaches, which have become very popular in medical CT in recent years, try to solve the reconstruction problem in an iterative manner. To do so, they usually set up a forward model that predicts projec-

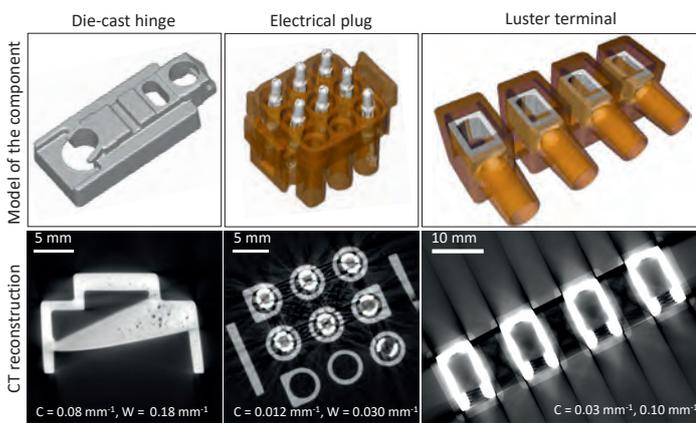


Figure 1: Models (top row) and CT reconstructions (bottom row) of typical highly attenuating (left column) and multi-material components (middle and right column). The corresponding CT reconstructions (bottom row) show severe cupping, shading and streak artifacts which impair an accurate metrological assessment.

tion data based on an estimate of the CT image. This estimate is then refined in every iteration step by calculating an update according to the discrepancy between the prediction and the measured projection data. This procedure is repeated until convergence is reached, i. e. the prediction fits the measurement. Depending on the design of the forward model, iterative approaches are able to account for the most common CT artifacts [10]–[14]. Furthermore, they allow to incorporate prior knowledge such as the shape of the measured component or image sparsity for instance [15]–[19]. However, the need for at least a few forward and backprojections makes them computationally expensive. Especially in metrological CT, which often deals with very large data sets, this is currently a major limitation.

Postcorrection approaches are often used as a faster alternative. These approaches apply physically or empirically motivated correction terms, to an analytic reconstruction. Therefore, they typically set up models with a given number of open parameters that can potentially account for a certain artifact. Subsequently, the open parameters are adjusted such that an appropriate metric, sensitive to artifacts in image domain, is minimized [20]–[23]. Therefore, no dedicated prior knowledge, such as the x-ray spectrum, is required which can be seen as a further advantage over iterative methods. More recently, the use of artificial neural networks has been proposed as another realization of postcorrection approaches [24]–[26].

Besides being applied in image domain, correction terms can also be applied in projection domain prior to the reconstruction. These precorrection approaches have been proposed in several variants. Considering multi-material components that contain metal, so-called metal artifact reduction (MAR) algorithms are frequently applied. Initially MAR approaches were proposed for the correction of artifacts caused by metal implants in medical CT [27]. Their basic principle relies on the identification of the metal trace within the acquired projection data and its subsequent replacement with some sort of interpolated data [28]–[31]. The corrected projections are then reconstructed and the metal is reinserted into the CT image. While this strategy is potentially useful for multi-material components with a small amount of metal [32], interpolation errors may degrade the correction result in case of higher metal fractions.

The correction of single-material components, in contrast, often relies on approaches similar to water precorrection in clinical CT [33]. These approaches aim to map the measured projection data to ideal data which are proportional to intersection length through the object. This mapping is typically implemented by an analytic function or a look-up table that is either derived from theoretical considerations, i.e. by numerical inversion of a certain physical model describing the data acquisition, or by performing calibration measurements of a known component [34], [35]. However, strictly speaking only beam hardening artifacts can be corrected using this approach. In case of other artifacts, such as x-ray scattering or off-focal radiation, there is no unique relationship between projection values and intersection lengths. Consequently, these effects have to be considered a priori.

## 2.2 Scatter Estimation and Scatter Correction

There are two typical strategies to reduce the impact of scattered x-rays on CT image quality: scatter suppression and scatter estimation. The former approach is based on the use of additional hardware, such as anti-scatter grids or collimators, which are designed to reduce the number of scattered x-rays reaching the detector [36]. Scatter estimation approaches, in contrast, aim at estimating the contribution of scattered x-rays to the measured data, to subtract it subsequently [37]. One option to derive this estimate is to use dedicated hardware, e. g. primary modulation grids or beam blockers, which allow to distinguish between primary and scattered x-rays [38]–[45]. Other approaches use software-based solutions that set up empirical, physical or consistency-based models that predict or approximate x-ray scattering [21], [46]–[59].

The gold standard among these methods is Monte Carlo (MC) simulation which is able to model the entire physics of the CT data acquisition process, and thus, yields highly accurate scatter estimates [37]. On the downside, MC simulations are very time-consuming and cannot be applied in real-time using conventional hardware. Furthermore, they need prior information such as the material distribution and the density distribution that has to be estimated in advance [60].

So-called kernel-based scatter estimation (KSE) approaches are often used as a faster alternative. Basically, there are two flavors of KSE approaches. The first one estimates scattered x-rays as an integral transform of a scatter source term and a scatter propagation kernel [46], [47], [61]–[63]. The scatter source term, which is typically derived from a simplified theoretical model (e. g. only single scattering in forward direction is considered), represents the fraction of x-rays that are scattered along a straight line from the x-ray source position to a certain detector element. The scatter propagation kernel reflects the spatial spreading of scattered x-rays and is usually calibrated to fit reference measurements or MC simulations [55]. Since the multiplication of these two quantities represents the scatter distribution for a single ray, the total scatter distribution is given as the sum of all rays.

Instead of using analytic models to approximate scattering along a certain ray, other KSE approaches perform needle-beam MC simulations of primitive geometries, e. g. ellipsoids or cuboids, with varying dimensions [49], [51]–[53]. The corresponding scatter distributions are then stored as a look-up table. To estimate the x-ray scatter of a given measurement each detector pixel is assigned one of the precalculated needle-beam scatter distributions according to a similarity metric. Summing the contribution of each needle beam, including correction terms that account for the shape of the actual object, then yields the total scatter distribution [53].

While being real-time capable, KSE approaches are typically less accurate than MC simulations. Furthermore, it can be challenging to calibrate the open parameters of these models in such a way that they apply to different acquisition conditions as well as to different components. So far, there is always a trade-off between accuracy and computational performance that may be overcome by the deep scatter estimation as described in section 4.

### 3 Simulation-Based Artifact Correction (SBAC)

#### 3.1 Basic Principle

Analytic CT reconstruction algorithms are based on the assumption that the projection value measured at detector position  $\mathbf{d}$  corresponds to the following line integral:

$$\rho(\mathbf{d}) = \int_0^1 d\lambda f(\mathbf{s} + \lambda \cdot (\mathbf{d} - \mathbf{s})), \quad (1)$$

where  $\mathbf{s}$  is the focal spot position and  $f$  is the CT image, i. e. the distribution of the attenuation coefficient. In that case,  $f$  can be reconstructed exactly from the set of all possible line integrals  $\rho$ :

$$f = X^{-1}\rho, \quad (2)$$

where  $X^{-1}$  denotes the inverse x-ray transform operator which is typically implemented as filtered backprojection.

However, due to the polychromatic x-ray spectrum, off-focal radiation, x-ray scattering and partial volume effects, the actual data acquisition process is not modeled appropriately by equation (2).

$$\begin{aligned} g &= X^{-1}q = X^{-1}q + X^{-1}p - X^{-1}p \\ &= f + X^{-1}(q - p) \\ &= f + a, \end{aligned} \quad (3)$$

Thus, applying the reconstruction operator  $X^{-1}$  to the measured projection data  $q$  does not yield the desired image  $f$ , but an image  $g$  containing artifacts  $a$ :

According to equation (3), a corrected image can be calculated by subtracting an estimate  $\tilde{a}$  of the artifacts:

$$f_{\text{SBAC}} = g - \tilde{a} = g - X^{-1}(\tilde{q} - \tilde{p}), \quad (4)$$

where  $\tilde{p}$  and  $\tilde{q}$  represent estimates of ideal and real projection data. As shown in figure 2, the SBAC derives these estimates by performing CT simulations based on a prior model  $f_{\text{prior}}$  (e. g. a CAD model or a segmentation  $Tg$  of the initial reconstruction) of the component. While ideal projection data can be calculated according to equation (1) with  $f = f_{\text{prior}}$ , the main challenge of the SBAC is to model the actual data acquisition process as accurately as possible. To do so, precise models have been developed or existing models have been refined. A detailed description of these models that cover the generation of x-rays, the effect and the determination of the focal spot distribution including off-focal radiation, the interaction of x-ray photons within the measured object as well as the x-ray detection process can be found in reference [7] and [9].

In a similar way, the SBAC can also account for conebeam artifacts by performing the ideal simulation as well as the corresponding reconstruction in parallel beam geometry. It has to be noted that in this case the difference between the ideal and the real simulation cannot be calculated in projection domain. In contrast to equation (4), the difference needs to be evaluated in image domain, i. e. the estimate of the artifacts is given by:

$$\tilde{a} = X_{\parallel}^{-1}\tilde{q} - X_{\parallel}^{-1}\tilde{p}, \quad (5)$$

where  $X_{\parallel}^{-1}$  represents the reconstruction operator in parallel beam geometry.

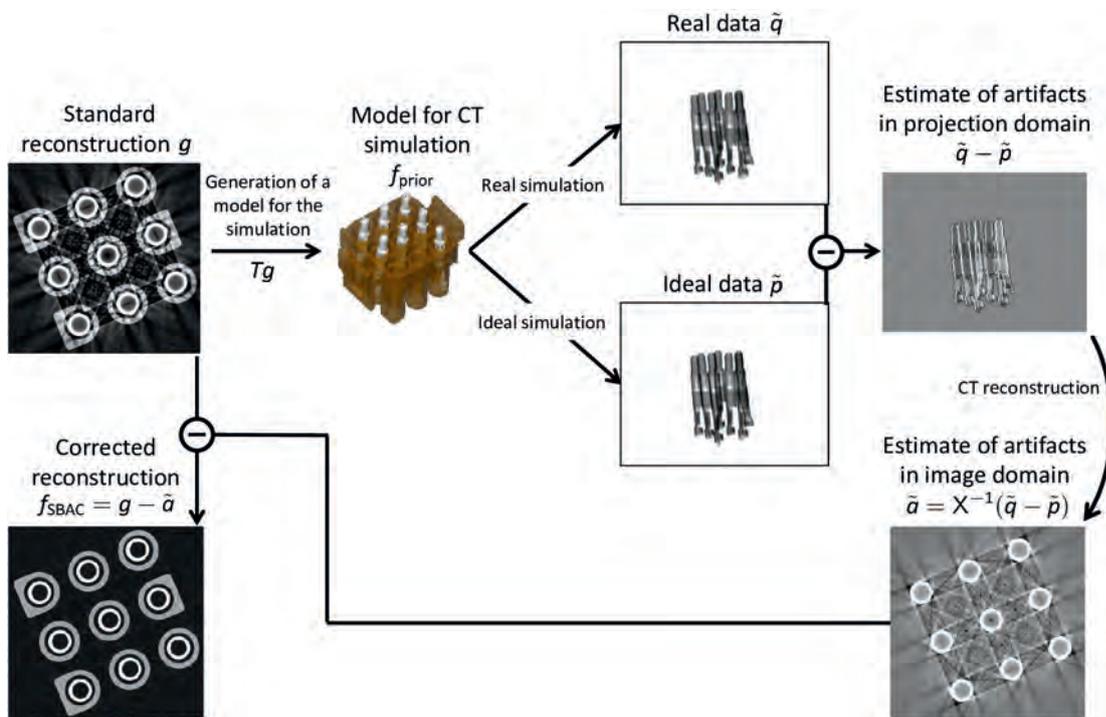


Figure 2: Schematic of the SBAC workflow. An initial reconstruction  $g$  is used to generate a prior model. Based on that model, a real and an ideal simulation is performed. Their difference represents the artifacts within the measurement and can be used to calculate a correction term for the initial reconstruction.

Table 1: Acquisition parameters of single-material and multi-material measurements as well as the mean and the maximum intersection length (L). It has to be noted that in case of the multi-material components these measures only refer to the metal intersection length.

Sample	Voltage	Current	Prefilter	Projections per 360°	Pixel size at isocenter	Mean L / Max. L
Plug 1	225 kV	170 $\mu$ A	1.2 mm Sn	1200	41 $\mu$ m	3.0 mm / 15.9 mm
Luster terminal	225 kV	170 $\mu$ A	1.2 mm Sn	1200	41 $\mu$ m	4.9 mm / 29.8 mm
Inhalator	160 kV	90 $\mu$ A	0.5 mm Al	800	80 $\mu$ m	4.3 mm / 42.6 mm
Plug 2	225 kV	170 $\mu$ A	1.2 mm Sn	1200	25 $\mu$ m	1.1 mm / 6.8 mm
Zinc hinge	215 kV	180 $\mu$ A	1.0 mm Sn	800	43 $\mu$ m	3.8 mm / 20.5 mm

### 3.2 Measurements and Evaluation

To demonstrate the potential of the SBAC, it was applied to measurements of different single- and multi-material components (see figure 3). All measurements were conducted using a commercial industrial CT system (Werth TomoScape® 200) that is equipped with a 225 kV micro-focus x-ray tube and a 3888 x 3072 flat detector with a pixel size of 149.6 x 149.6  $\mu$ m in a 2 x 2 binning mode. The corresponding measurement parameters as well as the maximum and the mean intersection lengths are summarized in table 1.

Considering the single-material measurements, the focus of the evaluation was set on dimensional accuracy. Therefore, surface meshes extracted from CT reconstructions with and without SBAC were compared against (almost) artifact free reference measurements. In case of the die-cast zinc hinge, the corresponding reference measurements were performed using a commercial coordinate measurement machine (Werth Touch Probe TP 200) with a maximum permissible probing error of 2  $\mu$ m. In case of the plastic inhalator, which mainly shows cone-beam artifacts, two CT measurements were performed. One with a large cone-angle and one with a small cone-angle.

While the SBAC was applied to the large cone-angle measurement, the small cone-angle measurement which showed only minor artifacts was used as reference.

In contrast to the single-material measurements, an artifact free reference measurement could not be performed for the multi-material components. Therefore, the performance of the SBAC was evaluated

qualitatively by a comparison to two state-of-the-art artifact correction approaches: the normalized metal artifact reduction (NMAR) [29] and the iTV algorithm [64]. As described in section 2, the NMAR belongs to the inpainting-based correction approaches that identify the metal trace within the acquired projection data and replace it by interpolated data. The iTV algorithm, in contrast, solves the reconstruction problem iteratively including a total variation (TV) constraint.

### 3.3 Results

#### 3.3.1 Single-Material Components

CT reconstructions of the single-material components are shown in figure 4. While the uncorrected reconstruction of the zinc hinge shows strong cupping and shading artifacts, the one of the plastic inhalator is mainly corrupted by cone-beam artifacts. In any case, almost all artifacts are removed after applying the SBAC.

Since the visual impression does not necessarily correlate with the dimensional accuracy of the CT measurement, a dimensional evaluation was performed as well. For this purpose, surface meshes were extracted from the CT reconstructions and compared against the

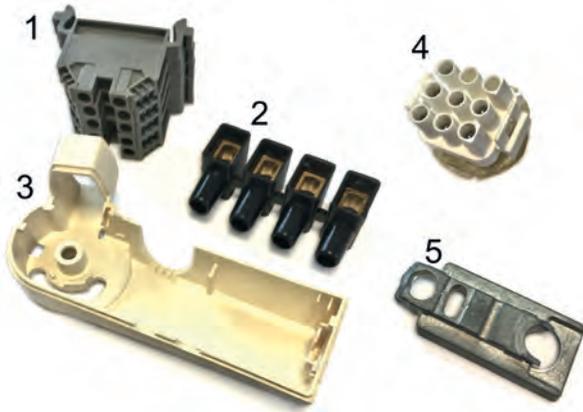


Figure 3: Photograph of the components used for testing the performance of the SBAC. 1. Electrical plug 1, 2. Luster terminal, 3. Plastic inhalator, 4. Electrical plug 2, 5. Die-cast zinc hinge.

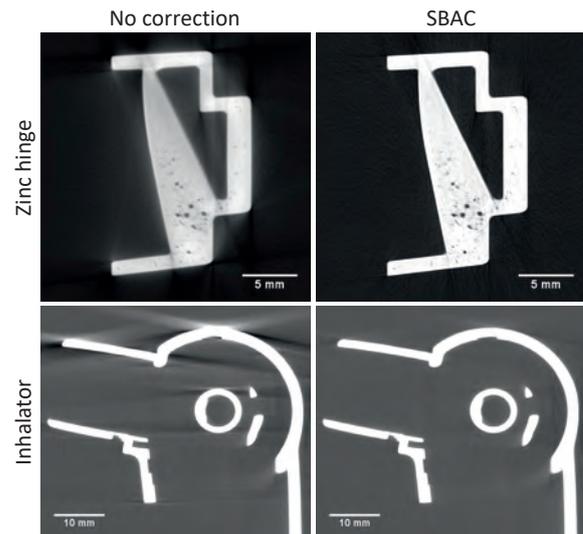


Figure 4: Reconstruction of the measured die-cast zinc hinge (top,  $C = 0.08 \text{ mm}^{-1} / W = 0.20 \text{ mm}^{-1}$ ) and the inhalator (bottom,  $C = 0.00 \text{ mm}^{-1} / W = 0.10 \text{ mm}^{-1}$ ) without and with simulation-based artifact correction (left and right).

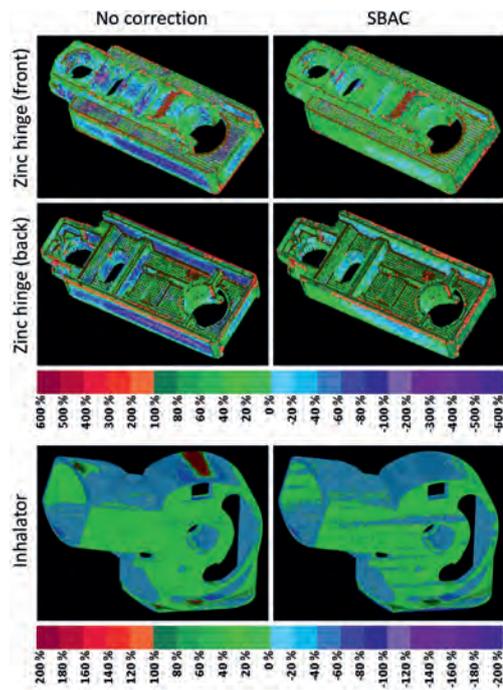


Figure 5: Dimensional evaluation of the CT measurement of the die-cast zinc hinge (top) and the inhalator (bottom) with and without simulation-based artifact correction. The color scale refers to the tolerances specified by the manufacturer. Here, 100 % and -100 % are the maximum acceptable deviations of the CT measurement from the reference measurement.

reference measurements described in section 3.2. The corresponding results are shown in figure 5. In case of the die-cast zinc hinge, there are large deviations from the tactile reference measurement that exceed the tolerances specified by the manufacturer by up to 400 %. These deviations are reduced to well below 60 % when using the

SBAC, indicating the high accuracy of the proposed approach (note that the deviations along the edges of the component result from missing sample points of the tactile measurement).

The evaluation of the inhalator measurement demonstrates the potential of the SBAC for cone-beam artifact correction. Here, the surface meshes were compared against a surface mesh calculated from a CT measurement with a narrow cone-angle. Without correction there are deviations, especially in the periphery of the field of measurement where the cone-angle is large, that exceed the tolerances of the manufacturer by more than 200 %. Applying the SBAC reduces these deviations to values well below values of 40 %.

### 3.3.2 Multi-Material Components

The correction of multi-material components was evaluated for three typical components with different metal fractions or metal intersection lengths, respectively (see table 1). Since multi-material components cannot be assessed entirely using a tactile probe, two commonly used artifact correction algorithms, NMAR and an iterative reconstruction with TV regularization, were implemented as a reference. The corresponding CT reconstructions as well as an analytic reconstruction and the SBAC result are shown in figure 6.

As expected, the presence of metal leads to severe streak artifacts in the analytic reconstruction. In contrast to measurements with small metal fractions, where the NMAR usually yields a considerable improvement of image quality, the correction of the present measurements is rather poor. This can be explained by the fact that the metal trace covers a large area of the projections. As a result, the interpolation approach used by the NMAR algorithm fails and even new artifacts are introduced to the CT reconstruction. Similarly, the iterative reconstruction approach does not manage to remove streak artifacts but leads to a small improvement only. In contrast, the SBAC removes almost all artifacts and yields CT volumes that allow for a clear discrimination between plastic and metal.

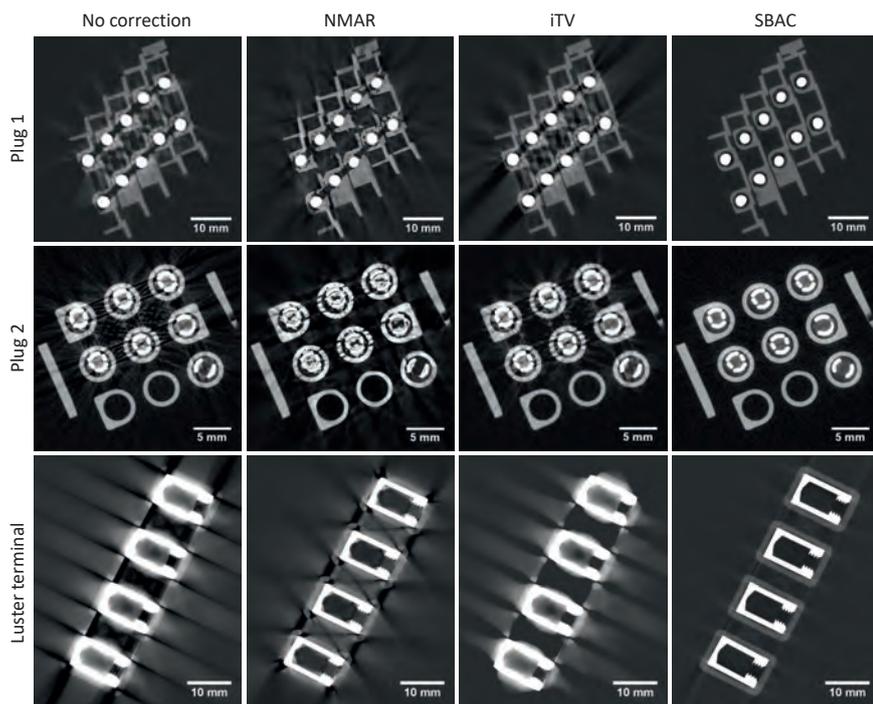


Figure 6: CT reconstructions of two different multi-material plugs (top row,  $C = 0.012 \text{ mm}^{-1} / W = 0.030 \text{ mm}^{-1}$  middle row  $C = 0.02 \text{ mm}^{-1} / W = 0.06 \text{ mm}^{-1}$ ) and a luster terminal (bottom row,  $C = 0.03 \text{ mm}^{-1} / W = 0.10 \text{ mm}^{-1}$ ).

## 4. Deep Scatter Estimations

### 4.1 Basic Principle

Existing Scatter estimation approaches that are real-time capable usually have the drawback of being restricted to a predefined model that is based on simplified assumptions and approximations of the x-ray scattering process. As a result, they often do not generalize well to arbitrary samples, and may not be accurate enough. More sophisticated approaches such as Monte Carlo (MC) simulations, however, are too slow to be applied routinely. To combine both, accuracy and computational performance, the so-called deep scatter estimation (DSE) has been proposed recently by the author [7], [9]. The basic idea of DSE is to train a deep convolutional neural network (DCNN) to reproduce MC scatter estimates. Therefore, DSE uses a U-net like neural network as shown in figure 7 [65], and determines its open parameters  $\theta$  by minimizing the following loss function:

$$\theta = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} K \cdot \sum_n \left| \frac{\operatorname{DSE}(\psi_n, \theta) - S_{\text{MC},n}}{S_{\text{MC},n}} \right|, \quad (6)$$

where  $K$  is a normalization constant,  $n$  the sample index,  $\psi_n$  the corresponding input to the network, and  $S_{\text{MC},n}$  the MC scatter estimate. Since DCNNs can be implemented efficiently on a GPU, DSE can be used to perform the mapping  $\psi \rightarrow S_{\text{MC}}$  in real-time once the network is trained.

It has to be noted that DSE was trained and tested using different input functions  $\psi$ , namely  $\psi = e^{-p}$ ,  $\psi = p$ , and  $\psi = p \cdot e^{-p}$ . While  $e^{-p}$  corresponds to the normalized intensities and  $p$  to their negative logarithm,  $p \cdot e^{-p}$  represents an analytic estimate of forward scattering that is often used by kernel-based scatter estimation approaches [47]. Since DSE performed best using the  $p \cdot e^{-p}$  input, only these results are shown here. For a more comprehensive evaluation including different inputs, the reader is referred to reference [9]

### 4.2. Simulation Study

Considering a certain scatter estimation approach it is advantageous if it can be applied to different components and different acquisition conditions without major adjustments. The potential of DSE to do so, was investigated using CT simulations based on the models

shown in figure 8. Given the prior model, artificial projections were generated as:

$$\rho_{\text{sim}} = -\ln \left( \frac{I + N_p + S_{\text{MC}}}{I_0} \right), \quad (7)$$

with  $I$  being the polychromatic forward projection of the prior model,  $N_p$  being Poisson distributed noise,  $I_0$  being the flat field image, and  $S_{\text{MC}}$  being the distribution of scattered x-rays that was calculated using our in-house Monte Carlo software. For each component a training data set and a testing data set was simulated according to the parameters given in table 2. To ensure that the training data does not resemble the testing data, it was generated using different tube voltages, different tilt angles of the component and different scaling factors.

### 4.3 Measurements

To test the application of DSE to real data, measurements of an aluminum profile were performed at our in-house table-top CT system which is equipped with a Varian 4030 flat detector and a Hamamatsu micro-focus x-ray source. There are several strategies to generate suitable training data for these measurements. Probably the most accurate way is to derive the training data from reference measurements, e.g. measurements with and without anti-scatter grid or with and without collimation. However, practically it is difficult to acquire a huge amount of data following this strategy. Therefore, simulated training data were generated using the prior models shown in figure 8. In contrast to the simulation study described in the previous section, the simulations were designed to resemble the measurement data in terms of the acquisition geometry and the acquisition conditions using the models that have been developed for the SBAC (see section 3).

### 4.4 Evaluation

The generalization of DSE to different components was evaluated using simulated data (see section 4.2). Therefore, different training data sets were generated: one containing the training data of all

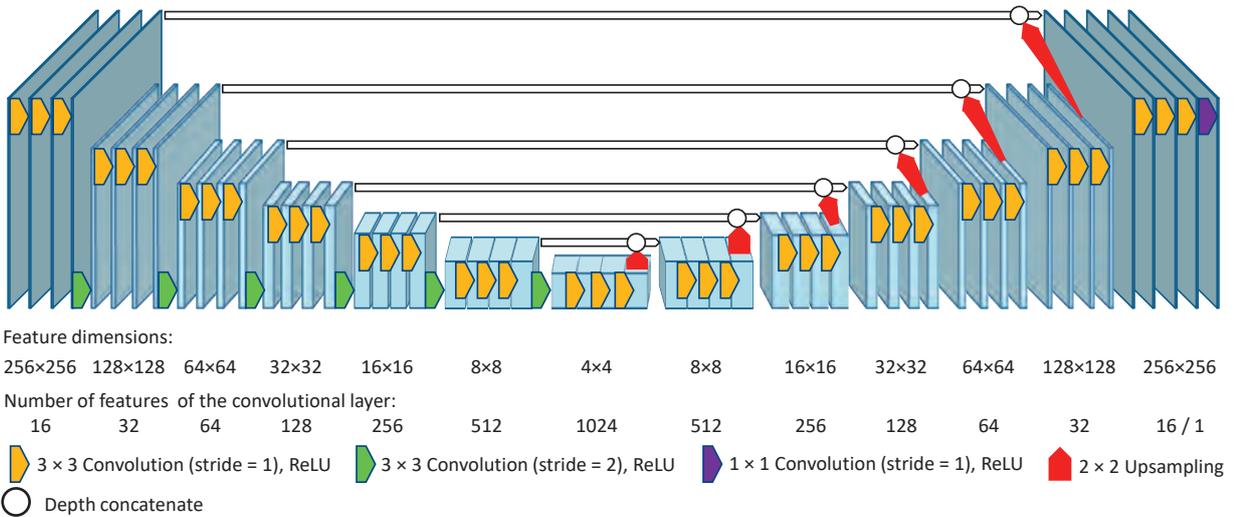


Figure 7: Architecture of the DSE deep convolutional neural network. Note that the network does not take the full size projection data as input, but a downsampled 256 x 256 version. Thus, the DSE scatter estimate needs to be upsampled prior to scatter correction.

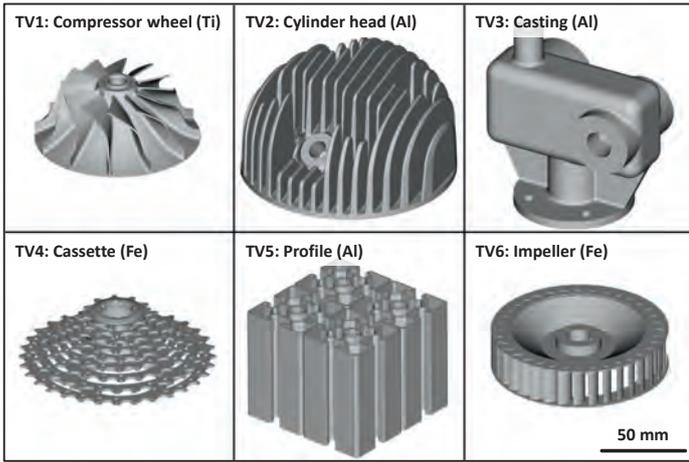


Figure 8: CAD models that were used for the generation of artificial CT data.

components, one containing the training data of the cassette and the profile, and data sets containing the training data of one component only. For each training data set, the open parameters of the DSE network were determined according to equation (6). Subsequently, the performance of the networks was evaluated using the corresponding testing data sets. The accuracy of scatter predictions was quantified using the mean absolute percentage error (MAPE) with respect to the ground truth MC scatter estimate as figure of merit.

Additionally, two conventional scatter estimation approaches were implemented as reference: the kernel-based scatter estimation (KSE) [47], and the hybrid scatter estimation (HSE) [55]. These approaches derive the scatter estimate as a convolution of a scatter kernel  $G$ , with a  $p \cdot e^{-p}$  image:

$$S_{KSE} = G * (p \cdot e^{-p}). \tag{8}$$

Similar to DSE, KSE determines the open parameters of  $G$  in such a way that the scatter predictions fit the MC scatter estimates of a

training data set. Once the kernel is determined, it is used for any subsequent scatter prediction. HSE, in contrast, recalibrates the kernel  $G$  for any sample to be processed. In order to achieve a reasonable computational performance, only a very coarse MC simulation is used for this recalibration.

Since there is no scatter ground truth for measured data, a slit scan acquisition with a narrow collimation was performed as a reference to evaluate the performance of the scatter correction.

## 5 Results

### 5.1 Simulation Study

Exemplary KSE, HSE and DSE scatter estimates for the the six investigated components are shown in figure 9. A quantitative evaluation of all testing data is given in table 3.

Considering a training using the data of all components, KSE shows the lowest accuracy with errors ranging from 15.4 % (casting) to 51.3 % (impeller). Since HSE calculates a distinct parameter set for every sample, the MAPE is decreased to values between 2.0 % (profile) and 8.1 % (cassette). The highest accuracy can be observed for DSE. Here, the scatter prediction is almost equal to MC simulations with a MAPE ranging from 0.8 % (casting) to 1.4 % (cassette).

Further experiments optimized the scatter estimation for one particular component only. This led to an increase of the accuracy of KSE scatter predictions, especially for highly attenuating components (compressor, cassette, impeller). In contrast, no further improvement could be observed for DSE. In any case, the accuracy decreased for components that were not contained in the training data set. However, there seems to be a material dependency. Training on one of the aluminum components only (cylinder head, casting, profile), also led to a reasonable performance for the other two components while high errors occurred for the titanium and iron components (compressor, cassette, impeller). Interestingly, the errors are smaller if training and testing are performed the other way round, i. e. training on one of the high attenuation components and testing on one of the aluminum components. This might be explained by the fact that the high attenuation components have a wider range of

Table 2: Parameters of the simulation study.

Parameter	Training	Testing
Models (see figure 8)	TV1–TV6	TV1–TV6
Source-to-isocenter distance	250 mm, 375 mm, 500 mm	250 mm, 375 mm, 500 mm
Source-to-detector distance	1000 mm	1000 mm
View angle	0° – 360°, $\Delta\alpha = 10^\circ$	0°– 360°, $\Delta\alpha = 10^\circ$
Detector elements	1024 × 1024	1024 × 1024
Detector pixel size	0.4 mm x 0,4 mm	0.4 mm x 0,4 mm
Tube voltage	150 kV, 200 kV, 300 kV	250 kV, 350 kV
Prefilter	1 mm Sn	1 mm Sn
Detector material	1 mm CsI	1 mm CsI
Object scaling factor	0.9, 1.1	1.0
Object tilt angle	0°, 18°, 72°	36°, 54°
Object material	Al (TV2, TV3, TV5), Ti (TV1), Fe (TV4, TV6)	Al (TV2, TV 3, TV 5), Ti (TV1) Fe (TV4, TV 6)
Samples	11664 for every component	2592 for every component

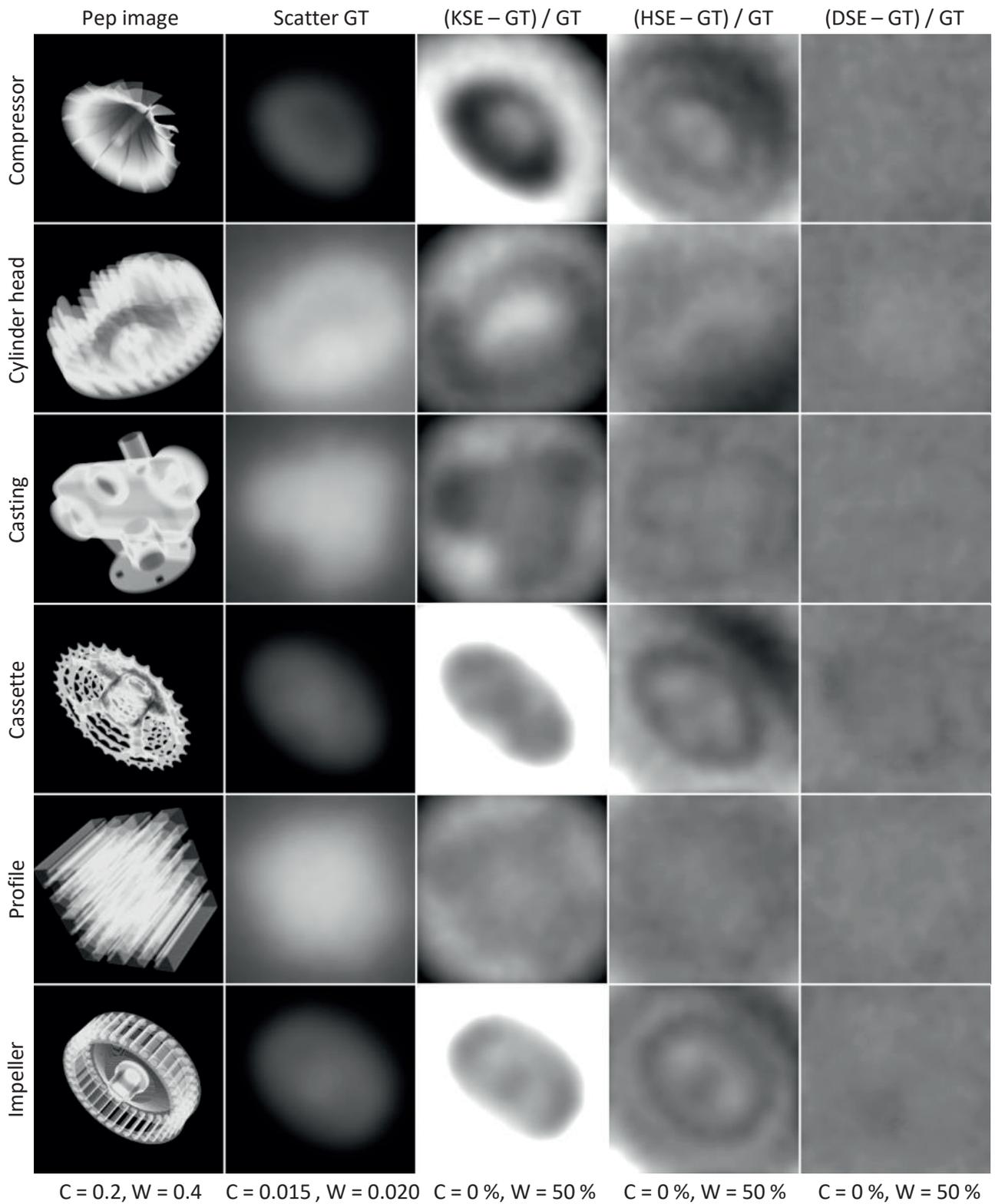


Figure 9: Percentage error of KSE, HSE and DSE scatter estimates for different components. KSE and DSE were optimized using a training data set containing all components. HSE was optimized directly for the test data.

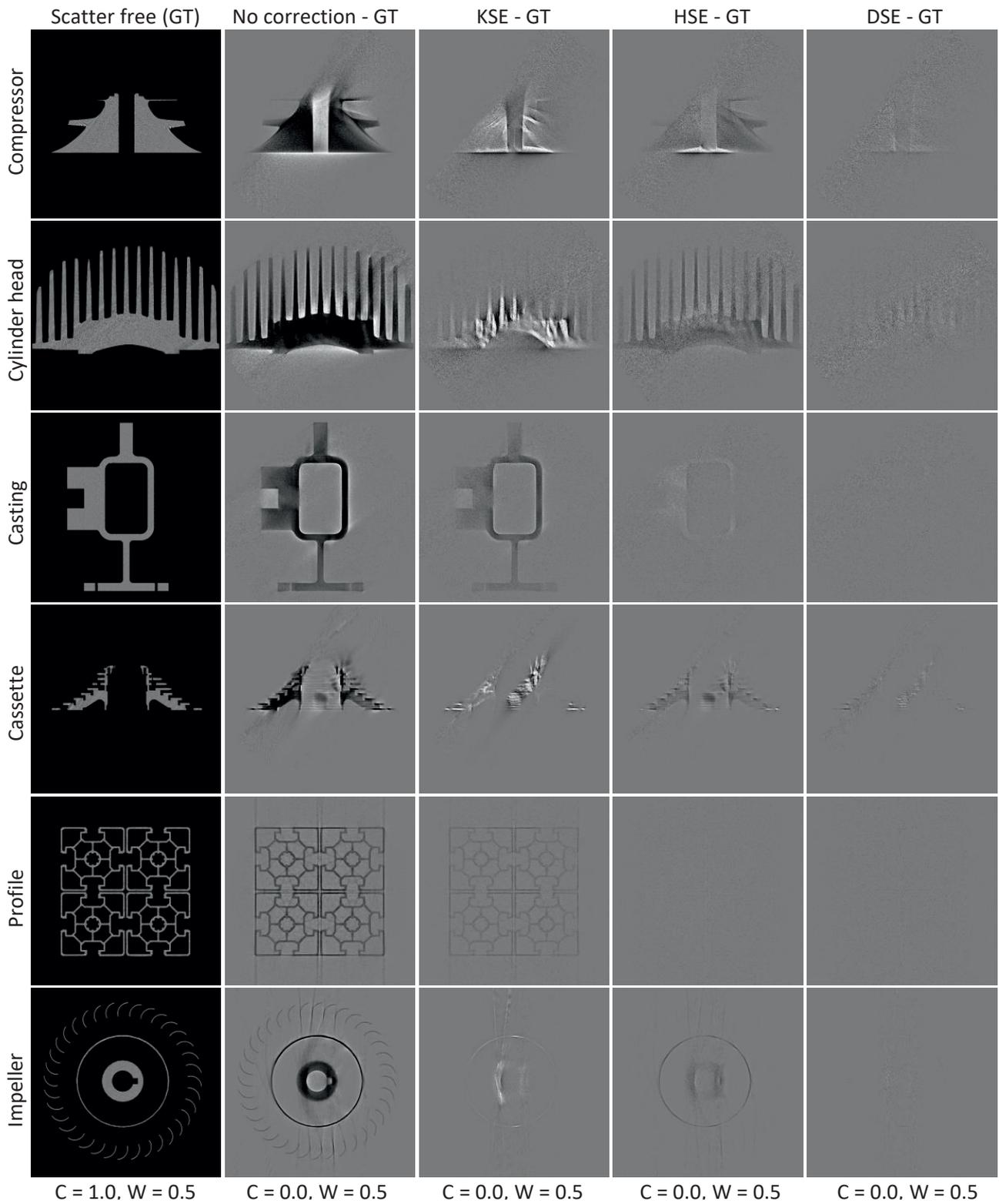


Figure 10: Scatter corrected CT reconstructions of simulated data. The simulations were performed with a tube voltage of 250 kV. Scatter was estimated using KSE, HSE and DSE and subtracted in intensity domain to get a corrected data set. Prior to reconstruction the projections were precorrected such that they represent intersection lengths. Therefore, an ideal reconstruction has a CT value equal to 1.

Table 3: Mean absolute percentage error of KSE, HSE and DSE scatter estimates for different components and different training data sets (left column). Note that there are no training data for HSE as its parameters are optimized for every sample to be processed.

	Testing Compressor	Cylinder Head	Casting	Cassette	Profile	Impeller
Training						
KSE						
Compressor	15.4	21.6	20.8	24.3	18.9	22.8
Cylinder Head	53.0	14.6	16.3	79.5	15.1	73.7
Casting	34.2	15.3	15.2	60.6	16.7	63.1
Cassette	17.5	29.9	29.1	17.3	26.9	14.9
Profile	31.5	13.9	14.1	56.7	13.7	59.3
Impeller	18.1	31.2	30.3	17.2	28.2	14.6
Profile & Cassette	26.4	15.7	15.4	47.2	13.9	49.4
All Parts	27.8	15.5	15.4	49.5	14.8	51.8
HSE						
-	7.7	5.6	3.5	8.1	2.0	5.6
DSE						
Compressor	1.3	6.1	4.0	4.3	5.3	3.8
Cylinder Head	28.1	1.0	3.8	38.1	4.9	23.4
Casting	16.3	2.3	0.9	24.9	2.1	14.3
Cassette	3.0	5.2	3.3	1.4	3.5	1.5
Profile	35.6	3.5	1.9	48.6	1.3	24.9
Impeller	5.3	8.7	5.3	4.8	6.2	1.1
Profile & Cassette	2.1	3.2	1.8	1.5	1.8	1.7
All Parts	1.2	0.9	0.8	1.4	0.9	1.1

possible projection values that potentially improves the generalization of the scatter estimation.

Furthermore, it has to be noted that training DSE only on data of two components, i.e. the profile and the cassette, yields considerably accurate scatter predictions (maximum MAPE of 3.2 %) for any other component. This suggests that DSE needs to be trained on only a few representative components to be applicable to any other measurement.

To demonstrate the impact of scatter correction on CT images, CT reconstructions were performed for the testing data. For each case scatter was estimated use KSE, HSE, and DSE and subtracted in intensity domain. To account for beamhardening, an analytic beamhardening correction was applied prior to the reconstruction. The corresponding results are shown in figure 10. Here, all three scatter estimation approaches lead to a significant improvement of the CT values. However, KSE tends to overestimate scatter in regions with a high scatter-to-primary ratio. Consequently, the attenuation of the scatter corrected projection data is overestimated as well, which leads to bright streaks in the CT reconstruction. Being recalibrated for every projection, HSE can further improve image quality but cannot completely account for all scatter artifacts. DSE, in contrast, leads to CT images that are almost equal to the scatter free ground truth.

## 5.2 Measured Data

To evaluate the potential of DSE as well as the reference approaches for real data, measurements were performed at our in-house tabletop CT. Due to the absence of a ground truth scatter distribution, a slit scan, which was collimated to 16 detector rows, was performed as reference.

Similar to the simulation study, corrected projection data were calculated by subtracting the scatter estimate in intensity domain prior to the reconstruction. In addition to KSE, HSE, and DSE, a MC-based scatter correction was performed. The corresponding results are shown in figure 11.

Visually, all scatter estimation approaches are able to reduce the scatter-related artifacts. However, especially KSE and HSE lead to the introduction of bright streaks to the CT images. In contrast, DSE shows a similar accuracy as Monte Carlo and provides CT images that are almost equal to the slit scan.

A quantitative evaluation of the MAPE with respect to the slit scans yields similar trends. Here the following errors can be measured: 30.0 % (no correction), 15.9 % (KSE), 13.2 % (HSE), 6.0 % (DSE), and 5.8 % (MC).

However, compared to the simulation study the performance of DSE seems to be slightly lower. This may be explained by the fact that the slit scan is not completely free of scatter. Furthermore, it has to be noted that there may be additional effects causing artifacts (e.g. detector backscattering), which are currently not considered.

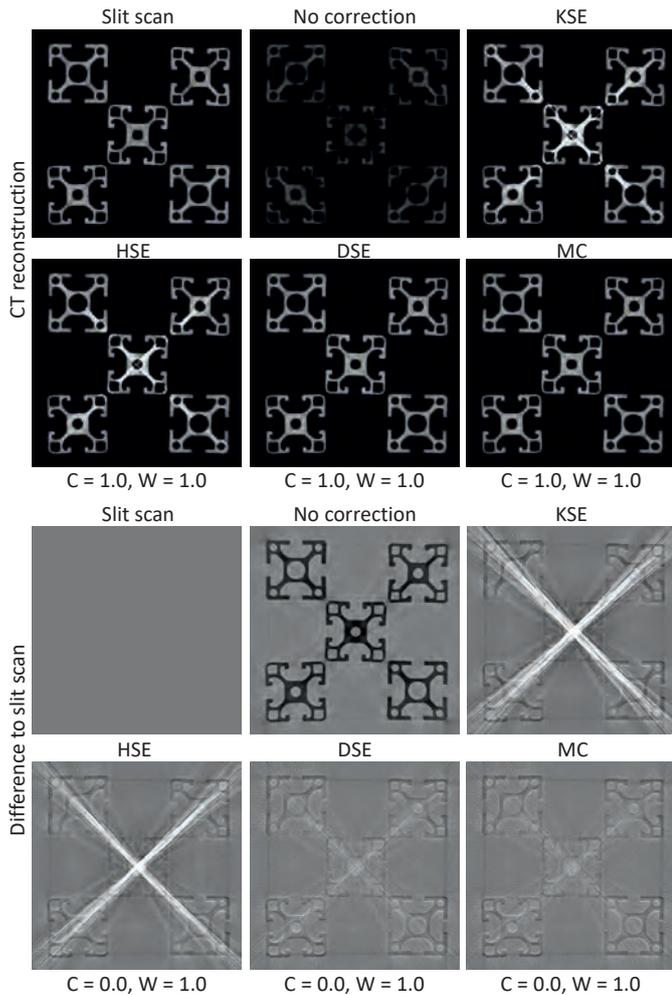


Figure 11: Scatter corrected CT reconstructions of measured data. Scatter was estimated using KSE, HSE, DSE as well as a MC simulation. Prior to reconstruction the projections were precorrected such that they represent intersection lengths. Therefore, an ideal reconstruction has a CT value equal to 1.

## 6. Summary and Conclusion

Today, x-ray CT finds a variety of industrial applications ranging from dimensional inspection and flaw detection to reverse engineering. However, the measurement of highly attenuating or multi-material components remains a major challenge as the corresponding CT reconstructions are often corrupted by CT artifacts. Two approaches that can potentially overcome this limitation are presented in this manuscript: the simulation-based artifact correction (SBAC) and the deep scatter estimation (DSE). The SBAC provides a very general framework to correct CT artifacts using precise simulations of the CT measurement process. In this way, the SBAC accounts for any artifact that is modeled appropriately by the CT simulation. Here, the potential of the SBAC was demonstrated for the correction of beam hardening, x-ray scattering, off-focal radiation, partial volume effects and cone-beam artifacts. For measurements of single- and multi-material components, the SBAC provided CT reconstructions that showed almost no artifacts and whose quality was clearly superior to common reference approaches. Furthermore, it could be shown that the SBAC not only increases the visual impression of the CT

reconstructions, but also their dimensional accuracy. Surface meshes extracted from SBAC-corrected CT reconstructions revealed only minor deviations from tactile measurements, the gold standard in dimensional metrology. Thus, the SBAC contributes to extending the applicability of CT in the field of industrial metrology and to establishing CT as an alternative to tactile measurements even for highly attenuating components.

In the context of scatter artifact correction, the DSE was developed to solve the problem of long processing times of accurate scatter estimation approaches. Therefore, DSE trains a deep convolutional neural network to reproduce MC scatter simulations based on the measured projection data. Once, the network is trained, it can be applied to unknown data in real-time ( $\approx 10$  ms / projection). In contrast to conventional approaches, DSE does not rely on a certain theoretically motivated scattering model, but learns the most suitable model itself from observational data. This is especially an advantage if a certain scatter estimation approach needs to be adapted to novel data, e.g. data that have been acquired with different acquisition parameters or at a different system. While conventional approaches might require to refine the underlying theoretical model, DSE can be adapted by simply exchanging or extending the training data set. In order to demonstrate the practical applicability of DSE, different simulation studies and measurements were carried out. Here, the simulation study demonstrated that DSE generalizes well to different tube voltages, different materials, as well as different components. In particular, it could be shown that DSE is clearly superior to conventional reference methods and provides scatter distributions that deviate on average by less than 2 % from MC simulations. Furthermore, these experiments suggest that a single DSE network, trained on representative data, can be used universally for different scatter estimation tasks.

A similarly good performance could be observed for measured data of an experimental CT system. Here, DSE provided scatter-corrected CT reconstructions whose quality was almost equal to slit scan measurements. Furthermore, this study demonstrated that a DSE network, trained on simulated data, also applies to measured data. This is of particular importance as simulation is an easy way to generate an arbitrary number of training examples.

However, it has to be noted that several efforts have been made here to tune the simulations to reproduce measurements of the experimental CT system. To which extent the simulation must match the measured data is the subject of further investigations.

Obviously, if a sufficiently accurate simulation is practically not possible, DSE can also be trained using measured data, e.g. of a slit scan or a beam blocker measurement. Conceptually, there are no restrictions for the generation of training data.

Thus, DSE makes an important contribution to improve the accuracy of x-ray scatter correction, especially in case of time-critical applications such as inline-CT measurements, which require real-time capable correction approaches.

## Acknowledgements

Parts of this work were supported by the AiF under grant KF2301004UW1 and the Werth Messtechnik GmbH, Gießen, Germany. Parts of the reconstruction software were provided by RayConStruct® GmbH, Nürnberg, Germany.

Kontakt: joscha.maier@dkfz-heidelberg.de

## REFERENCES

- [1] G. Georgeson and R. Bossi, "X-ray CT for quantitative casting material evaluation", *NDT & E International*, volume 27, number 2, page 101, 1994.
- [2] S. T. Neel, D. S. Eliassen, and R. N. Yancey, "Dimensional measurement of internal features in complex castings", in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Boston, MA: Springer US, 1995, pages 689-694.
- [3] S. Trent Neel, R. Gibson, C. R. Daniels, and E. L. Klosterman, "Dimensional accuracy in X-ray computed tomography imaging", in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Boston, MA: Springer US, 1998, pages 411-412.
- [4] L. De Chire, S. Carmignato, J.-P. Kruth, R. Schmitt, and A. Weckenmann, "Industrial applications of computed tomography", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, volume 63, number 2, pages 655-677, 2014.
- [5] J. F. Barrett and N. Keat, "Artifacts in CT: Recognition and avoidance", *Radiographics*, volume 24, number 6, pages 1679-91, 2004.
- [6] J. J. Lifton, A. A. Malcolm, and J. W. McBride, "An experimental study on the influence of scatter and beam hardening in x-ray CT for dimensional metrology", *Measurement Science and Technology*, volume 27, number 1, pages 192-199, 2016.
- [7] J. Maier, C. Leinweber, S. Sawall, H. Stoschus, F. Ballach, T. Müller, M. Hammer, R. Christoph, and M. Kachelrieß, "Simulation-based artifact correction (SBAC) for metrological computed tomography", *Measurement Science and Technology*, volume 28, number 6, page 065 011, 2017.
- [8] J. Maier, S. Sawall, M. Knaup, and M. Kachelrieß, "Deep scatter estimation (DSE): Accurate real-time scatter estimation for X-ray CT using a deep convolutional neural network", *Journal of Nondestructive Evaluation*, volume 37, number 3, page 57, 2018.
- [9] J. Maier, "Artifact Correction and Real-Time Scatter Estimation for X-Ray Computed Tomography in Industrial Metrology", PhD thesis, Heidelberg University, 2019.
- [10] J. Nuyts, B. De Man, J. A. Fessler, W. Zbijewski, and F. J. Beekman, "Modelling the physics in the iterative reconstruction for transmission computed tomography", *Physics in Medicine and Biology*, volume 58, number 12, R63-96, 2013.
- [11] L. Brabant, E. Pauwels, M. Dierick, D. Van Loo, M. Boone, and L. Van Hoorebeke, "A novel beam hardening correction method requiring no prior knowledge, incorporated in an iterative reconstruction algorithm", *NDT & E International*, volume 51, pages 68-73, 2012.
- [12] L. Brabant, M. Dierick, E. Pauwels, M. N. Boone, and L. Van Hoorebeke, "EDART, a discrete algebraic reconstructing technique for experimental data obtained with high resolution computed tomography.", *Journal of X-ray Science and Technology*, volume 22, number 1, pages 47-61, 2014.
- [13] Y. Zhao and M. Li, "Iterative beam hardening correction for multi-material objects", *PLOS ONE*, volume 10, number 12, L. Zeng, Ed., e0144607, 2015.
- [14] K. Dremel and T. Fuchs, "Scatter simulation and correction in computed tomography: A reconstruction-integrated approach modelling the forward projection", *NDT & E International*, volume 86, pages 132-139, 2017.
- [15] E. Y. Sidky and X. Pan, "Image reconstruction in circular cone-beam computed tomography by constrained, total-variation minimization.", *Physics in Medicine and Biology*
- [16] J. W. Stayman, Y. Otake, J. L. Prince, A. J. Khanna, and J. H. Siewerdsen, "Model-based tomographic reconstruction of objects containing known components", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, volume 31, number 10, pages 1837-1848, 2012.
- [17] J. W. Stayman, H. Dang, Y. Ding, and J. H. Siewerdsen, "PIRPLE: a penalized-likelihood framework for incorporation of prior images in CT reconstruction", *Physics in Medicine and Biology*, volume 58, number 21, page 7563, 2013.
- [18] M. Schrapp, T. Scharrer, M. Goldammer, S. J. Rupitsch, A. Sutor, H. Ermert, and R. Lerch, "Artifact reduction in non-destructive testing by means of complementary data fusion of X-ray computed tomography and ultrasonic pulse-echo testing", *Measurement Science and Technology*, volume 24, number 12, page 125 403, 2013.
- [19] Y. Liu, A. Beyer, P. Schuetz, J. Hofmann, A. Flisch, and U. Sennhauser, "Cooperative data fusion of transmission and surface scan for improving limited-angle computed tomography reconstruction", *NDT & E International*, volume 83, pages 24-31, 2016.
- [20] M. Kachelrieß, K. Sourbelle, and W. A. Kalender, "Empirical cupping correction: A first-order raw data pre-correction for cone-beam computed tomography", *Medical Physics*, volume 33, number 5, pages 1269-1274, 2006.
- [21] E. Meyer, C. Maaß, M. Baer, R. Raupach, B. Schmidt, and M. Kachelrieß, "Empirical scatter correction (ESC): A new CT scatter correction method and its application to metal artifact reduction", in *IEEE Medical Imaging Conference*, 2010, pages 2036-2041.
- [22] H. S. Park, D. Hwang, and J. K. Seo, "Metal artifact reduction for polychromatic x-ray CT based on a beam-hardening corrector", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, volume 35, number 2, pages 480-487, 2016.
- [23] Y. Kyriakou, E. Meyer, D. Prell, and M. Kachelrieß, "Empirical beam hardening correction (EBHC) for CT", *Medical Physics*, volume 37, number 10, pages 5179-5187, 2010.
- [24] S. Xu and H. Dang, "Deep residual learning enabled metal artifact reduction in CT", in *Proceedings of the SPIE Medical Imaging Conference*, 2018.
- [25] H. Yu, Y. Zhang, and Y. Chu, "Reduction of metal artifacts in x-ray CT images using a convolutional neural network", in *SPIE Optical Engineering and Applications*, 2017.
- [26] Y. Zhang and H. Yu, "Convolutional neural network based metal artifact reduction in X-ray computed tomography", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, volume 37, number 6, pages 1370-1381, 2018.
- [27] W. A. Kalender, R. Hebel, and J. Ebersberger, "Reduction of CT artifacts caused by metallic implants", *Radiology*, volume 164, number 2, pages 576-577, 1987.
- [28] A. H. Mahnken, R. Raupach, J. E. Wildberger, B. Jung, N. Heussen, T. G. Flohr, R. W. Günther, and S. Schaller, "A new algorithm for metal artifact reduction in computed tomography", *Investigative Radiology*, volume 38, number 12, pages 769-775, 2003.
- [29] E. Meyer, R. Raupach, M. Lell, B. Schmidt, and M. Kachelrieß, "Normalized metal artifact reduction (NMAR) in computed tomography", *Medical Physics*, volume 37, number 2010, pages 5482-5493, 2012.
- [30] E. Meyer, R. Raupach, M. Lell, B. Schmidt, and M. Kachelrieß, "Frequency split metal artifact reduction (FSMAR) in computed tomography", *Medical Physics*, volume 39, number 4, page 1904, 2012.
- [31] J. Wang, S. Wang, Y. Chen, J. Wu, J.-L. Coatrieux, and L. Luo, "Metal artifact reduction in CT using fusion based prior image.", *Medical Physics*, volume 40, number 8, page 081 903, 2013.
- [32] A. Amirkhanov, C. Heinzl, M. Reiter, J. Kastner, and E. Groller, "Projection-based metal-artifact reduction for industrial 3D X-ray computed tomography", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, volume 17, number 12, pages 2193-2202, 2011.
- [33] G. T. Herman, "Correction for beam hardening in computed tomography", *Physics in Medicine and Biology*, volume 24, number 1, pages 81-106, 1979.

- [34] P. Hammersberg and M. Mångård, "Correction for beam hardening artefacts in computerised tomography," *Journal of X-Ray Science and Technology*, volume 8, number 1, pages 75-93, 1998.
- [35] M. Krumm, S. Kasperl, and M. Franz, "Reducing non-linear artifacts of multi-material objects in industrial 3D computed tomography," *NDT & E International*, volume 41, number 4, pages 242-251, 2008.
- [36] E.-P. Rührnschopf and K. Klingenbeck, "A general framework and review of scatter correction methods in x-ray cone-beam computerized tomography. Part 1: Scatter compensation approaches," *Medical Physics*, volume 38, number 7, pages 4296-4311, 2011.
- [37] E.-P. Rührnschopf and K. Klingenbeck, "A general framework and review of scatter correction methods in cone-beam CT. Part 2: Scatter estimation approaches," *Medical Physics*, volume 38, number 9, pages 5186-5199, 2011.
- [38] R. Ning, X. Tang, and D. Conover, "X-ray scatter correction algorithm for cone-beam CT imaging," *Medical Physics*, volume 31, number 5, pages 1195-1202, 2004.
- [39] L. Zhu, N. Strobel, and R. Fahrig, "X-ray scatter correction for cone-beam CT using moving blocker array," in *Proceedings of the SPIE Medical Imaging Conference*, M. J. Flynn, Ed., volume 5745, 2005, page 251.
- [40] L. Zhu, N. R. Bennett, and R. Fahrig, "Scatter correction method for X-ray ct using primary modulation: Theory and preliminary results," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, volume 25, number 12, pages 1573-1587, 2006.
- [41] K. Schorner, M. Goldammer, K. Stierstorfer, J. Stephan, and P. Boni, "Scatter correction method by temporal primary modulation in X-ray CT," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, volume 59, number 6, pages 3278-3285, 2012.
- [42] R. Grimmer, R. Fahrig, W. Hinshaw, H. Gao, and M. Kachelrieß, "Empirical cupping correction for ct scanners with primary modulation (ECCP)," *Medical Physics*, volume 39, number 2, pages 825-831, 2012.
- [43] L. Ritschl, R. Fahrig, M. Knaup, J. Maier, and M. Kachelrieß, "Robust primary modulation-based scatter estimation for cone-beam CT," *Medical Physics*, volume 42, number 1, pages 469-478, 2015.
- [44] S. Hsieh, "Estimating scatter in cone-beam CT with striped ratio grids: A preliminary investigation," *Medical Physics*, volume 43, number 9, pages 5084-5092, 2016.
- [45] B. Bier, M. Berger, A. Maier, M. Kachelrieß, L. Ritschl, K. Müller, J.-h. Choi, and R. Fahrig, "Scatter correction using a primary modulator on a clinical angiography C-arm CT system," *Medical Physics*, volume 44, number 9, e125-e137, 2017.
- [46] W. Swindell and P. M. Evans, "Scattered radiation in portal images: A Monte Carlo simulation and a simple physical model," *Medical Physics*, volume 23, number 1, pages 63-73, 1996.
- [47] B. Ohnesorge, T. Flohr, and K. Klingenbeck-Regn, "Efficient object scatter correction algorithm for third and fourth generation CT scanners," *European Radiology*, volume 9, number 3, pages 563-569, 1999.
- [48] W. Zbijewski and F. Beekman, "Fast scatter estimation for cone-beam X-ray CT by combined Monte Carlo tracking and Richardson-Lucy fitting," *IEEE Medical Imaging Conference*, volume 5, number C, pages 2774-2777, 2004.
- [49] H. Li, R. Mohan, and X. R. Zhu, "Scatter kernel estimation with an edge-spread function method for cone-beam computed tomography imaging," *Physics in Medicine and Biology*, volume 53, number 23, pages 6729-6748, 2008.
- [50] G. Poludniowski, P. M. Evans, V. N. Hansen, and S. Webb, "An efficient Monte Carlo-based algorithm for scatter correction in keV cone-beam CT," *Physics in Medicine and Biology*, volume 54, number 12, pages 3847-3864, 2009.
- [51] J. Star-Lack, M. Sun, A. Kaestner, R. Hassanein, G. Virshup, T. Berkus, and M. Oelhafen, "Efficient scatter correction using asymmetric kernels," in *Proceedings of the SPIE Medical Imaging Conference*, E. Samei and J. Hsieh, Eds., volume 7258, 2009, 72581Z.
- [52] M. Meyer, W. A. Kalender, and Y. Kyriakou, "A fast and pragmatic approach for scatter correction in flat-detector CT using elliptic modeling and iterative optimization," *Physics in Medicine and Biology*, volume 55, number 1, pages 99-120, 2010.
- [53] M. Sun and J. M. Star-Lack, "Improved scatter correction using adaptive scatter kernel superposition," *Physics in Medicine and Biology*, volume 55, number 22, pages 6695-6720, 2010.
- [54] W. Yao and K. W. Leszczynski, "An analytical approach to estimating the first order scatter in heterogeneous medium. II. A practical application," *Medical Physics*, volume 36, number 7, pages 3157-3167, 2009.
- [55] M. Baer and M. Kachelrieß, "Hybrid scatter correction for CT imaging," *Physics in Medicine and Biology*, volume 57, number 21, pages 6849-6867, 2012.
- [56] A. Sossin, V. Rebuffel, J. Tabary, J. M. L'etang, N. Freud, and L. Verger, "A novel scatter separation method for multi-energy x-ray imaging," *Physics in Medicine and Biology*, volume 61, number 12, pages 4711-4728, 2016.
- [57] A. Maslowski, A. Wang, M. Sun, T. Wareing, I. Davis, and J. Star-Lack, "Acuras CTS: A fast, linear Boltzmann transport equation solver for computed tomography scatter - part I: Core algorithms and validation," *Medical Physics*, volume 45, number 5, pages 1899-1913, 2018.
- [58] A. Wang, A. Maslowski, P. Messmer, M. Lehmann, A. Strzelecki, E. Yu, P. Paysan, M. Brehm, P. Munro, J. Star-Lack, and D. Seghers, "Acuras CTS: A fast, linear Boltzmann transport equation solver for computed tomography scatter - part II: System modeling, scatter correction, and optimization," *Medical Physics*, volume 45, number 5, pages 1914-1925, 2018.
- [59] M. Hoffmann, W. Tobias, N. Maaß, F. Dennerlein, and A. Maier, "Empirical scatter correction using the epipolar consistency condition," in *5th International Conference on Image Formation in X-Ray Computed Tomography*, 2018.
- [60] N. Waltrich, S. Sawall, J. Maier, J. Kuntz, K. Stannigel, K. Lindenberg, and M. Kachelrieß, "Effect of truncation on the accuracy of Monte Carlo-based scatter estimation in truncated CBCT," *Medical Physics*, volume 45, number 8, pages 3574-3590, 2018.
- [61] L. A. Love and R. A. Kruger, "Scatter estimation for a digital radiographic system using convolution filtering," *Medical Physics*, volume 14, number 2, pages 178-185, 1987.
- [62] L. Spies, M. Ebert, B. a. Groh, B. M. Hesse, and T. Bortfeld, "Correction of scatter in megavoltage cone-beam CT," *Physics in Medicine and Biology*, volume 46, number 3, pages 821-833, 2001.
- [63] J. Rinkel, L. Gerfault, F. Estève, and J.-M. Dinten, "A new method for x-ray scatter correction: first assessment on a cone-beam CT experimental setup," *Physics in Medicine and Biology*, volume 52, number 15, pages 4633-4652, 2007.
- [64] L. Ritschl, F. Bergner, C. Fleischmann, and M. Kachelrieß, "Improved total variation-based CT image reconstruction applied to clinical data," *Physics in Medicine and Biology*, volume 56, number 6, pages 1545-1561, 2011.
- [65] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation," *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pages 234-241, 2015.

## Röntgendiffraktometrie mit dem Pulstec $\mu$ -x360 Gerät – Vergleichende Untersuchungen

Sebastian Matthes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Ilmenau; Kontakt: sebastian.matthes@tu-ilmenau.de

**KURZFASSUNG** | Mit stetig wachsenden Anforderungen an Bauteile und die verwendeten Werkstoffe ist es notwendig, das Eigenschaftspotential dieser voll auszuschöpfen. Besonders bei wechselbeanspruchten Bauteilen ist es erforderlich, die Lebensdauer und Belastungsgrenzen zu erhöhen. Eigenspannungen in den Oberflächen haben einen sehr großen Einfluss auf die Wöhlerkurve, die in vielen Gebieten der Wissenschaft und Technik Parameter für die Bauteilauslegung liefert. Die Bestimmung des Eigenspannungszustands kann durch verschiedene Messmethoden realisiert werden. In der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung konnte sich das röntgenographische Verfahren der  $\sin^2 \psi$ -Methode etablieren. Eine alternative Methode ist das  $\cos \alpha$ -Verfahren, dessen Grundlagen durch Taira et al. [1] im Jahr 1978 erarbeitet wurden.

In diesem Beitrag steht das zurzeit weltweit kleinste und leichteste Eigenspannungsmessgerät Pulstec  $\mu$ -X360s (Entwicklung im Jahr 2016) im Fokus. Durch eine einzige Bestrahlung kann ein Debye-Scherrer-Ring mithilfe einer Bildplatte als zwei-dimensionalen Detektor aufgenommen und daraus die Eigenspannungen ermittelt werden. Wegen mangelnden Erfahrungswerten müssen die Einflussparameter und Grenzen des Geräts näher untersucht werden. Die Variation des Auswertungsbereichs der Debye-Scherrer-Ringe sowie die Untersuchungen bei verschiedenen Lichtverhältnissen repräsentieren einen Auszug aus den Untersuchungspunkten. Es konnte gezeigt werden, dass die Einrichtung der Messung sehr genau erfolgen sollte und sich einige Zusatzkomponenten, wie z. B. ein x-y-Tisch für die Probenpositionierung, als sehr nützlich erwiesen haben. Aufgrund verschiedener Probengeometrien ist es möglich, dass die Debye-Scherrer Ringe teilweise abgeschattet werden. Um den Einfluss dieser Unregelmäßigkeiten zu vermindern, ist es notwendig, den Auswertungsbereich teilweise einzuschränken. Im Vergleich zu Messungen mit der  $\sin^2 \psi$ -Methode konnten bei nahezu allen Ergebnissen äquivalente Werte erzielt werden, was die Validität des Geräts und der  $\cos \alpha$ -Methode bestätigt. Dennoch ist anzumerken, dass es Verbesserungsbedarf hinsichtlich des Laserpunkts, der Einrichtungsmöglichkeit des Geräts und der Auswertungssoftware gibt.

### Einleitung

Eigenspannungen sind innere mechanische Spannungen, die ohne Anliegen äußerer Kräfte im Kräfte- und Momentengleichgewicht stehen. Sie entstehen durch inhomogene plastische Formänderungen aufgrund von z. B. thermischen oder mechanischen Einflüssen. Mit immer höheren Ansprüchen von Bauteilen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Gewicht, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer ist es notwendig das Werkstoffpotential voll auszuschöpfen. Besonders die Druckeigenspannungen in der Oberfläche können zu einer Verbesserung der Lebensdauer und Belastbarkeit beitragen. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Eigenspannungen nach dem Superpositionsprinzip mit den Lastspannungen überlagern, haben sie enormen Einfluss auf die lokalen Versagensgrenzen. Vor allem Druckeigenspannungen führen zu einer Erhöhung der Dauerfestigkeit in bestimmten Bauteilen. Eine Voraussetzung zum Erreichen des anwendungsbezogenen Optimums ist die genaue Kenntnis über die Eigenspannungszustände im Bauteil. [3–6]

Zur Ermittlung der Eigenspannungen können verschiedenste Techniken herangezogen werden, die sich zunächst in zerstörende und zerstörungsfreie Methoden unterteilen. Die größte Bedeutung im Bereich der zerstörungsfreien Methoden stellt die Röntgenographische Spannungsanalyse dar. Das angewendete Verfahren der  $\sin^2 \psi$ -Methode konnte sich hinsichtlich Genauigkeit sowie Zuverlässigkeit etablieren und ist bis heute ein sehr weit verbreitetes Verfahren zur Eigenspannungsanalyse. Durch methodische und apparative Weiterentwicklungen konnte die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieses Verfahrens erhöht werden, bei gleichzeitiger Verringerung der Messzeit. [2, 7, 8]

Dennoch ist der gesamte Zeitaufwand einer Spannungsermittlung (Einrichtung und Messung) der konventionellen standorttreuen Geräte als relativ hoch zu bewerten. Unter kritischer Betrachtung ist diese Methode nicht bedingungslos unter den zerstörungsfreien Prüfverfahren einzuordnen, da der Probenraum oftmals begrenzt ist und dadurch ein Freischneiden der Messstelle erfolgen muss.

Infolgedessen kann es sowohl zum Auslösen als auch zum Eintrag bzw. zur Umlagerung von Eigenspannungen am Prüfling kommen, bei gleichzeitiger Zerstörung des Bauteils.

An diesen Kritikpunkten soll ein neues zerstörungsfreies Eigenspannungsmessgerät der Firma Pulstec ansetzen. Es verwendet die  $\cos \alpha$ -Methode, die im Jahr 1978 von Taira et al. [1] vorgestellt wurde. Wegen technischer Schwierigkeiten, besonders hinsichtlich Detektion und Bildverarbeitungsmethoden, konnte erst im Jahr 2012 ein kommerzielles Eigenspannungsmessgerät basierend auf dieser Methode von der Firma Pulstec auf den Markt gebracht werden. Das derzeit aktuelle Modell, das Pulstec  $\mu$ -X360s (Entwicklung im Jahr 2016) verwendet eine zweidimensionale Bildplatte in Verbindung mit der digitalen Lumineszenzspektroskopie zur Detektion der gebeugten Röntgenstrahlung. Der Spannungswert von beispielsweise Stahl-Prüflingen wird durch die Vermessung des gesamten Debye-Scherrer-Rings (DS-Rings) der (211)-Netzebene ermittelt. Dabei erfolgt die Unterteilung des DS-Rings in 500 radiale Messpunkte, was einer Schrittweite von  $0,72^\circ$  entspricht. Durch diese Aspekte verringert sich die Messzeit im Gegensatz zum  $\sin^2 \psi$ -Verfahren erheblich (Messzeit je nach Kollimator: 10 s bis 120 s). Weiterhin wird kein aufwändiges Goniometer benötigt, da eine exakt winkeltreue Positionierung zwischen Messgerät und Prüfling nicht notwendig ist. Das Gerät arbeitet mit einer Metall-Keramik-Röhre (Cr- Anode), die mit einer maximalen Leistung von 50 W angegeben ist. Dadurch ist es möglich, ohne aufwändige Wasserkühlung auszukommen und das Gerät mit einer einfachen Luftkühlung zu betreiben. Genauso wie beim  $\sin^2 \psi$ -Verfahren werden zur Ermittlung der Spannungswerte nicht die exakten spannungsfreien Parameter ( $d_0$  bzw.  $\theta_0$ ) benötigt. Zusammenfassend repräsentiert das Pulstec  $\mu$ -X360s das derzeit weltweit kleinste und leichteste Eigenspannungsmessgerät in der zerstörungsfreien Prüfung. Zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich der Validität der Messwerte, insbesondere auch zum Vergleich mit dem  $\sin^2 \psi$ -Verfahren, wurden durchgeführt [9–16].

Die veröffentlichten Ergebnisse haben nicht alle Einflussparameter zufriedenstellend abgedeckt, was die Notwendigkeit von weiteren Untersuchungen erforderlich machte. [17]

**Grundlagen**

Die Entwicklung des  $\cos \alpha$ -Verfahrens geht bis auf das Jahr 1978 zurück, als Taira, Tanaka und Yamasaki eine Methode vorstellten, bei der die Spannungsermittlung durch die Betrachtung und Auswertung der Dehnungswerte entlang des gesamten Debye-Scherrer-Rings erfolgt. Die schematische Messanordnung ist in Abb. 1 dargestellt. Die vom Probenstück zurückbeugten Röntgenstrahlen werden mit Hilfe einer Bildplatte (Image Plate – IP) in Verbindung mit der digitalen Lumineszenzspektroskopie detektiert. Während der Belichtung mit Röntgenstrahlen werden die fotoempfindlichen Kristalle in einen metastabilen Zustand angeregt, wodurch der latente Zustand der Beugungsprofile zwischengespeichert wird. Zum Auslesen wird die Bildplatte durch einen entsprechenden Laser rasterartig in radialer Richtung beleuchtet. Dadurch werden die metastabilen Kristalle zum Aussenden von Photonen angeregt, deren Quantität ein Maß für die Intensität der Röntgenstrahlung ist.

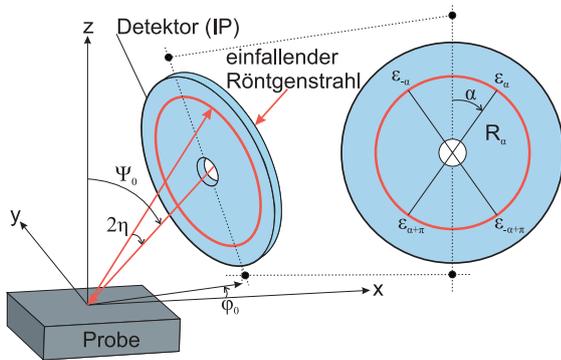


Abb. 1: Schematische Darstellung der Messanordnung mit eingetragenen Dehnungen, in Anlehnung an [19]

Zur Bestimmung der Normalspannungskomponente  $\sigma_x$  werden die ermittelten Dehnungen des Debye-Scherrer-Rings verwendet. Die vier eingezeichneten Dehnungen  $\epsilon_\alpha, \epsilon_{-\alpha}, \epsilon_{\alpha+\pi}$  und  $\epsilon_{-\alpha+\pi}$  sind alle abhängig vom Umfangswinkel  $\alpha$  des Debye-Scherrer Rings. Mit Hilfe dieser lässt sich der neu eingeführte Parameter  $a_1$  wie folgt ermitteln:

$$a_1(\varphi_0) = \frac{1}{2} [(\epsilon_\alpha - \epsilon_{\alpha+\pi}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{-\alpha+\pi})]$$

Unter Verwendung der entsprechenden Richtungskosinus sowie der Grundgleichung der röntgenographischen Spannungsanalyse [7] ergibt sich für die Ermittlung der Normalspannungskomponente  $\sigma_x$ :

$$\sigma_x = - \frac{E}{1 + \nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\Psi_0} \left( \frac{\partial a_1(\varphi_0 = 0^\circ)}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (1)$$

Unter der Annahme, dass die Parameter  $E, \nu, \eta$  und  $\Psi_0$  als konstant betrachtet werden, kann  $\sigma_x$  mit Hilfe des Anstiegs der Regressionsgeraden von  $a_1$  und  $\cos \alpha$  ermittelt werden. Zum Verständnis sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der vollständige DS-Ring zur Auswertung in eine Vielzahl an Beugungspunkten (je  $0,72^\circ \pm 500$  Punkte) unterteilt wird, um somit eine große Menge an  $a_1$ -Werten zu generieren. Je mehr Datenpunkte beim Erstellen der Geraden vorhanden sind, desto besser und vor allem genauer kann diese bestimmt werden [18].

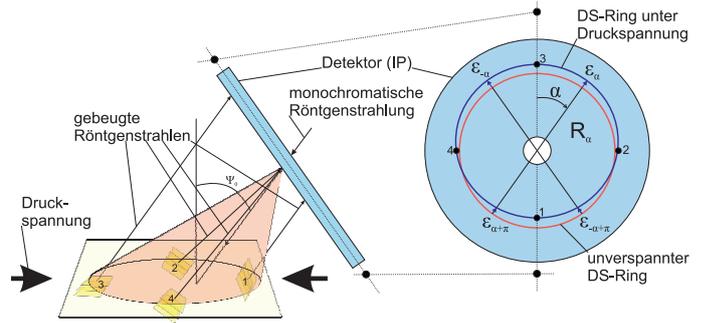


Abb. 2: Schematische Darstellung zur Veränderung des Debye-Scherrer-Rings bei anliegender Druckspannung

Mit Hilfe von Abb. 2 soll die Veränderung des DS-Rings unter Druckspannungen erläutert werden, dabei werden die Verzerrungen stark übertrieben dargestellt. Innerhalb des Brennflecks der Röntgenstrahlung sind die Normalenvektoren der Netzebenen unterschiedlich orientiert. Im Falle einer spannungsfreien Probe ergibt sich an jedem Winkel  $\alpha$  der gleiche Radius  $R_\alpha$  und es ergibt sich ein „perfekter“ Kreis. Liegt im Probekörper eine Druckspannung vor, so hat die unterschiedliche Lage der Normalenvektoren der Netzebenen zum Spannungsvektor einen Einfluss. Dadurch wird die Netzebene 1 in Normalenrichtung gestaucht, wohingegen Netzebene 3 in Normalenrichtung gedehnt wird. Die Netzebenen 2 und 4 liegen relativ gesehen gleich zur Belastungsrichtung, was zur Änderung der Netzebenenabstände in gleichem Maße führt. Infolgedessen wird der Debye-Scherrer-Ring verzerrt, wodurch sich bei unterschiedlichen Umfangswinkeln  $\alpha$  unterschiedliche Radien  $R_\alpha$  ergeben, was schließlich zu verschiedenen Dehnungswerten ( $\epsilon_\alpha, \epsilon_{-\alpha}, \epsilon_{\alpha+\pi}$  und  $\epsilon_{-\alpha+\pi}$ ) führt.

**Experimentelles**

**1. Untersuchungen bei verschiedenen Lichtverhältnissen**

Die Untersuchungen bei verschiedenen Lichtverhältnissen sind aufgrund der Detektionsart des Gerätes mit Hilfe einer Bildplatte und der Möglichkeit von mobilen Messungen notwendig. Zur Untersuchung sind verschiedene Proben aus einem Round-Robin-Test mit bekannten Eigenspannungswerten verwendet wurden, deren Ergebnisse als Sollwerte angesetzt sind.

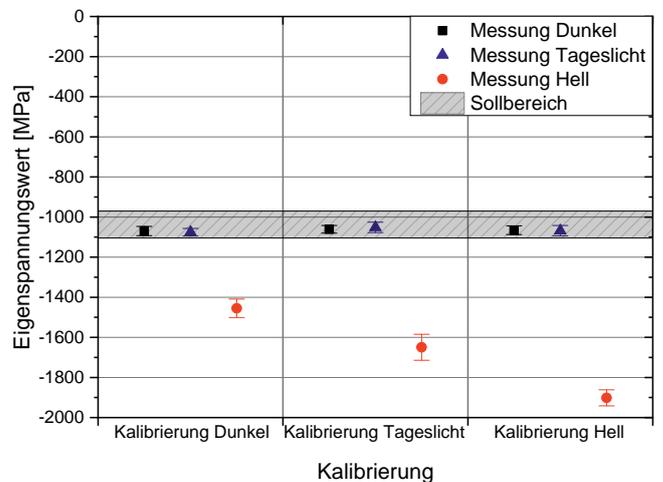


Abb. 3: Grafische Darstellung der Messergebnisse von Probe A7-90° bei verschiedenen Lichtverhältnissen während der Kalibrierung und Messung

Die Messungen erfolgten bei verschiedenen eingeteilten Lichtverhältnissen: „Dunkel“  $\approx (3 \pm 1) \text{ lm/m}^2$ , „Tageslicht“  $\approx (500 \pm 100) \text{ lm/m}^2$ , „Hell“  $\approx (18000 \pm 1000) \text{ lm/m}^2$ . Die zunächst im Labor untersuchten Helligkeiten wurden mittels Abdeckungen bzw. einer externen Lichtquelle erzeugt. Weiterhin ist die Kalibrierung des Gerätes bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen durchgeführt worden, um Anpassungsmöglichkeiten des Gerätes an verschiedene Lichtverhältnisse zu untersuchen. Exemplarisch sind die Ergebnisse in Abb. 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass lediglich die Messungen im „Hellen“ deutlich außerhalb des Sollbereichs liegen. Dies kann durch eine beobachtete unregelmäßige Intensitätsverteilung des Debye-Scherrer-Rings sowie eine deutlich erhöhte Grundintensität der Bildplatte erklärt werden. Diese Fremdintensitäten können einen so großen Einfluss besitzen, dass die Auswertungssoftware den DS-Ring nur unzureichend anfittet kann und somit zu starken Ergebnisabweichungen zum Sollbereich führt. Bei weiteren Messungen im Freien mit einer Beleuchtungsstärke  $\approx (33000 \pm 1000) \text{ lm/m}^2$  führte die sehr hohe Grundintensität der Bildplatte dazu, dass kein Debye-Scherrer-Ring mehr sichtbar war und entsprechend keine Auswertung durchgeführt werden konnte.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass unter Laborbedingungen (Beleuchtungsstärke  $\approx (500 \pm 100) \text{ lm/m}^2$ ) keine bzw. eine nicht signifikante Änderung der Messergebnisse vorhanden ist. Besonders bei mobilen Messungen sollte darauf geachtet werden, dass das Messgerät bzw. der Detektor einer nicht zu hohen Beleuchtungsstärke ausgesetzt wird. Dies gilt gleichzeitig für reflektierende Proben- oder Unterlagenerflächen, die den Detektor ungewollt beleuchten könnten. Bestenfalls sollte bei mobilen Messungen eine Abdeckung für das Gerät verwendet werden, denn auch bei bedecktem Himmel kann die Beleuchtungsstärke bis zu  $10.000 \text{ lm/m}^2$  erreichen. Bei Einsatz des Gerätes zur Überwachung in der Produktion sollte dies auch bei stark ausgeleuchteten Werkshallen berücksichtigt werden.

## 2. Variation des Auswertungsbereichs der Debye-Scherrer-Ringe

Besonders durch schwer zugängliche Messstellen, starke Textur oder grobes Gefüge können einzelne Abschnitte des DS-Rings abgeschattet oder verfälscht werden. Dies kann dazu führen, dass die standardmäßige Auswertung falsche Ergebnisse liefert. Durch die Möglichkeit der Re-Analysis (erneute Analyse mit veränderbaren Parametern) kann der standardmäßige Auswertungsbereich ( $18^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ) verändert werden. Aufgrund der Berechnungsgrundlage für den Parameter  $a_1(\varphi_0)$ , siehe Gleichung (1), ist dies allerdings nicht uneingeschränkt möglich. Die 4 Dehnungen  $\epsilon_\alpha$ ,  $\epsilon_{-\alpha}$ ,  $\epsilon_{\alpha+\pi}$  und  $\epsilon_{-\alpha+\pi}$  müssen bei jedem Umfangswinkel  $\alpha$  erhalten bleiben, da ansonsten die Berechnung scheitert. Dadurch ergibt sich ein bestimmtes

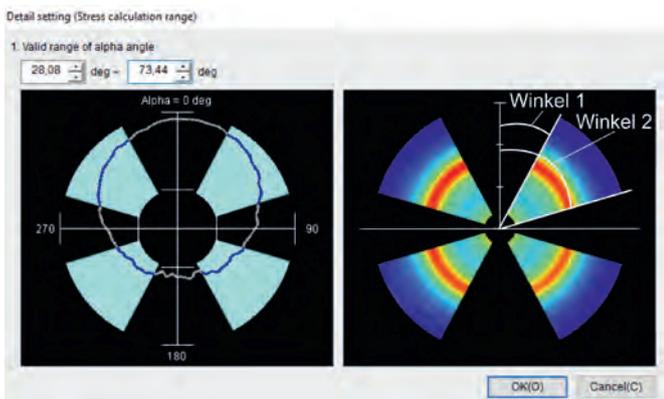


Abb. 4: Darstellung der Möglichkeit der Variation des Auswertungsbereichs mit Hilfe der Re-Analysis

Segmentierungsmuster für das Einschränken des Auswertungsbereichs, siehe Abb. 4.

Aufgrund der hohen Anzahl der Winkelkombinationen sind die Ergebnisse mit Hilfe einer 3D-Oberfläche inklusive der Datenpunkte (schwarz) dargestellt, siehe Abb. 5.

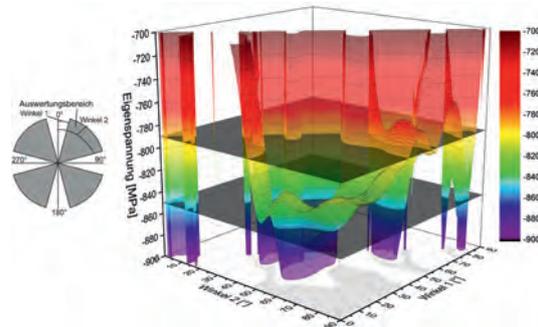


Abb. 5: 3D-Darstellung der Ergebnisse der verschiedenen Winkelkombinationen der Probe A3-90° inklusive des Sollbereichs (schwarze Ebenen) und der Projektion der Datenpunkte, die im Sollbereich liegen, auf die xy-Ebene

Der Sollbereich der Proben ( $\pm 30 \text{ MPa}$ ) ist durch die beiden schwarzen Flächen gekennzeichnet. Zusätzlich sind alle Datenpunkte, die sich im Sollbereich befinden durch die Projektion in die xy-Ebene eingetragen. Unter Betrachtung der Round-Robin-Proben ist festzustellen, dass die Winkelbereiche, deren Ergebnisse im Sollbereich liegen, stark variiert werden können. So ist es teilweise möglich, dass nur zwei  $a_1$ -Werte ausreichend sind, um Eigenspannungen zu ermitteln, die sich im Sollbereich befinden. Im Allgemeinen kann durch einen hohen Winkel 2 und einen niedrigen Winkel 1, das bedeutet ein großer Auswertungsbereich, der Sollbereich fast immer erreicht werden. Somit nehmen Einschränkungen von + (bei Winkel 1) bzw. - (bei Winkel 2)  $20^\circ$  einen nicht signifikanten Einfluss auf das Messergebnis. Weiterhin ist dies vom Gefüge der Probe, genauer der Korngröße und deren Verteilung, abhängig. Bei einem grobkörnigen Gefüge tragen beim standardmäßigen Auswertungsbereich vergleichsweise wenig Kristallite zur Beugung bei, bezüglich stark texturierter Proben verstärkt sich dieser Effekt zusätzlich. Schränkt man diesen Bereich noch weiter ein, so reduziert sich die Anzahl der ausgewerteten Kristallite stetig. Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf Messungen, deren DS-Ringe als gut, hinsichtlich Intensität und deren Verteilung über den Umfangswinkel  $\alpha$ , anzusehen sind. Im Folgenden wird ein Beispiel beschrieben, bei dem es zwingend notwendig ist den Auswertungsbereich anzupassen. In Abb. 6(a) ist ein teilweise abgeschatteter DS-Ring dargestellt. Der ermittelte Wert der standardmäßigen Auswertung lag nicht im Sollbereich. Erst durch eine starke Einschränkung des Auswertungs-

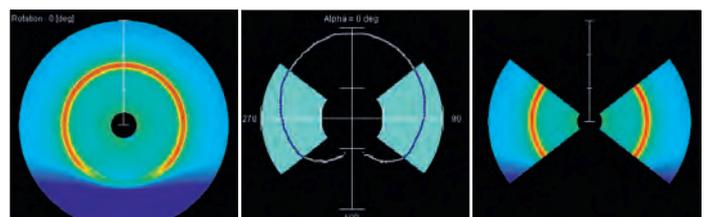


Abb. 6: Darstellung einer teilweise abgeschatteten Messung (a) Debye-Scherrer-Ring (b) Einfluss der abgeschatteten Stelle und Einschränkung des Messbereichs während der Re-Analysis

bereichs konnte der Einfluss der Abschattung eliminiert werden, s. Abb. 6(b). In diesem Beispiel ist es ohne diese nachträgliche Einschränkung nicht möglich, den wahren Eigenspannungswert zu erhalten. Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Auswertungsbereich, in Verbindung mit Datenverlust, sehr stark eingeschränkt werden kann und dennoch valide Ergebnisse generiert werden können. Es gilt das Prinzip, dass der Auswertungsbereich so groß wie möglich und so klein wie nötig gewählt werden sollte. Bei weiteren Messungen ist besonders auf das Profil des Debye-Scherrer-Rings zu achten, um bestenfalls Unregelmäßigkeiten, wie z. B. in Abb. 6(a), nicht mit in die Auswertung einfließen zu lassen.

### Fazit und Ausblick

Die theoretischen Ausarbeitungen zeigen, dass die Validität der  $\cos \alpha$ -Methode gegeben ist. Sie hat im Vergleich zum  $\sin^2 \psi$ -Verfahren einige Vorteile, wie z. B. eine deutlich verkürzte Messzeit, die Möglichkeit des mobilen Einsatzes und einen 2D-Detektor, der es ermöglicht, mehr Messpunkte mit einer Messung aufzunehmen [18].

Die Beleuchtungsstärke des Detektors sollte vor allem während des mobilen Einsatzes beachtet werden. Zur Verhinderung von zu hohen Beleuchtungsstärken ist eine Abdeckung für das Gerät vorzusehen, um eine deutliche Erhöhung der Grundintensität der Bildplatte durch externe Lichtquellen (z. B. Hallenausleuchtung, Sonne) zu verhindern. In Folge dieser Fremdintensitäten kann die Intensität des Debye-Scherrer-Rings nicht von der Grundintensität differenziert werden und eine Ermittlung der Eigenspannung ist nicht mehr möglich. Dies resultiert aus der verwendeten Detektionstechnik, die durch einen 2-dimensionalen Detektor in Form einer Bildplatte in Verbindung mit der digitalen Lumineszenzspektroskopie umgesetzt wurde. Unter den Lichtverhältnissen im Laborbereich sind keine Veränderungen des Messergebnisses zu erkennen. Durch die Re-Analyse ist die Möglichkeit gegeben, den Auswertungsbereich der Debye-Scherrer-Ringe in Form einer Segmentierung einzuschränken. Es zeigte sich, dass mit nur wenigen Datenpunkten korrekte Eigenspannungswerte ermittelt werden können. Weiterhin ist es teilweise zwingend notwendig, den Auswertungsbereich einzuschränken. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass trotz der Variation von verschiedenen Parametern, wie z. B. Verkippungswinkel, Krümmungsradius und grobkörnigem Gefüge, die  $\cos \alpha$ -Methode valide Messergebnisse liefert. Es sind Erkenntnisse entstanden, die in weiteren Messungen unbedingt Berücksichtigung finden müssen. Trotz der einfachen geometrischen Rahmenbedingungen, was den Entfall eines Goniometers ermöglicht, muss auf eine exakte Einrichtung der Messung geachtet werden. Durch zusätzliche Komponenten wie einen verstellbaren x-y-Tisch oder Stellschrauben zur Einstellung des Verkippungswinkels, ist es möglich, die Messeinstellung zu erleichtern. Zur Ausschöpfung des vollen Potentials des Gerätes muss vor allem die Software überarbeitet und neue Anwendungsmöglichkeiten hinterlegt werden. Dazu zählen die Möglichkeit, Intensitäten mehrerer Debye-Scherrer-Ringe miteinander zu kombinieren, die Auswertung auf die Fourieranalyse zurückzuführen (Entfall der typischen Segmentierung beim Einschränken des Auswertungsbereichs) und einen Programmablauf zur Bestimmung des vollständigen Eigenspannungszustands zu entwickeln. Weiterführende Aufgabenbereiche, wie z. B. quantitative Korngrößenbestimmung auf Basis der Debye-Scherrer-Ringe, Analyse von texturierten Probekörpern oder der Einsatz in der automatisierten Serienteilüberwachung, könnten zukünftig durch die  $\cos \alpha$ -Methode realisiert werden.

*Die Messungen sind im Rahmen einer Masterarbeit bei der ZF Friedrichshafen AG im Bereich Zentrale Forschung und Entwicklung/Werkstofftechnik durchgeführt worden.*

### LITERATURVERZEICHNIS

- [1] TAIRA, S.; TANAKA, K.; YAMASAKI, T.: A Method of X-Ray Microbeam Measurement of Local Stress an Its Application to Fatigue Crack Growth Problems. In: *Journal of the Society of Materials Science, Japan* März 1978, Nr. 27.294, S. 251–256
- [2] BARON, H.-U.; BEHNKEN, H.; EIGENMANN, B.; GIBMEIER, J.; HIRSCH, T.; PFEIFFER, W.: *Röntgenographische Ermittlung von Spannungen – Ermittlung und Bewertung homogener Spannungszustände in kristallinen, makroskopisch isotropen Werkstoffen*, 2000
- [3] HUBEL, S.; BAMBERG, J.; DILLHÖFER, A.; HESSERT, R.; PREIKSZAS, C.; RIEDER, H.; SPIES, M.: *Grundlegende Untersuchungen zur Spannungsmessung mittels Ultraschall an Werkstoffen im Triebwerksbau*. In: *DACH-Jahrestagung Graz 2012*, S. 1–9
- [4] EIMS, E.-H.: *Anwendung eines konischen Blendensystems zur tiefen aufgelösten Bestimmung von Eigenspannungen in Materialien mittels Synchrotronstrahlung*. Diplomarbeit. Feb./2011
- [5] STRAUSS, T.: *Ermittlung von fertigungsprozessbedingten Eigenspannungen bei komplexer Bauteilgeometrie*. Karlsruhe. Dissertation. 2013
- [6] POSSEL-DÖLKEN, I.: *Röntgenographische Bestimmung von Mikrospannungen in polykristallinen Werkstoffen und ihr Verhalten bei statischer Verformung und schwingender Beanspruchung*. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Dissertation. 2007
- [7] SPIEß, L.; TEICHERT, G.; SCHWARZER, R.; BEHNKEN, H.; GENZEL, C.: *Moderne Röntgenbeugung: Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker*. 3. Aufl. : Springer & Spektrum, 2019
- [8] *Deutsche Norm DIN EN 15305*. 2008. *Zerstörungsfreie Prüfung – Röntgendiffraktometrisches Prüfverfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen*
- [9] DELBERGUE, D.; TEXIER, D.; LÉVESQUE, M.; BOCHER, P.: *Comparison of Two X-Ray Residual Stress Measurement Methods:  $\sin^2 \Psi$  and  $\cos \alpha$ , Through the Determination of a Martensitic Steel X-Ray Elastic Constant*. In: *Residual Stresses 2017*, Nr. 10, S. 55–60
- [10] KOHRI, A.; TAKAKU, Y.; NAKASHIRO, M.: *Comparison of X-Ray Residual Stress Measurement Values by  $\cos \alpha$  Method and  $\sin^2 \Psi$  Method* (2017), S. 103–108
- [11] MATSUDA, M.; OKITA, K.; NAKAGAWA, T.; SASAKI, T.: *Application of X-ray stress measurement for residual stress analysis by inherent strain method - Comparison of  $\cos \alpha$  and  $\sin^2 \Psi$  method*. In: *Mechanical Engineering Journal* 2017, Nr. 4.5, S. 1–13
- [12] LING, J.; LEE, S.-Y.: *Characterization of a Portable X-Ray Device for Residual Stress Measurements*. In: *JCPDS-International Centre for Diffraction* 2015, S. 153–162
- [13] MIYAZAKI, T.; SASAKI, T.: *X-Ray Residual Stress Measurement of Austenitic Stainless Steel Based on Fourier Analysis*. In: *Nuclear Technology* Apr. 2016, Nr. 106.3, S. 111–116
- [14] PETERSON, N.; KOBAYASHI, Y.; TRAEGER, B.; SANDERS, P.: *Assessment and Validation of  $\cos \alpha$  Method for Residual Stress Measurement* (2017), S. 80–86
- [15] RAMIREZ-RICO, J.; LEE, S.-Y.; LING, J. J.; NOYAN, I. C.: *Stress measurement using area detectors: a theoretical and experimental comparison of different methods in ferritic steel using a portable X-ray apparatus*. In: *Journal of Materials Science* Juni 2016, Nr. 51.11, S. 5343–5355
- [16] SASAKI, T.; HIKARU, S.: *X-Ray Stress Measurement of Austenitic Stainless Steel with  $\cos \alpha$  Method and Two-Dimensional X-Ray Detector*. In: *Materials Science Forum* 2017, Nr. 879, S. 1679–1684
- [17] MATTHES, S.: *Röntgendiffraktometrie mit dem Pulstec  $\mu$ -x360 Gerät – Vergleichende Untersuchungen*. Technische Universität Ilmenau. 2019
- [18] SPIEß, L.; GRÜNING, A.; MATTHES, S.: *Röntgenographische Spannungsmessung. Vergleich von  $\sin^2 \Psi$  – u.  $\cos \alpha$ -Verfahren*. In: *ZfP heute*. 2020, S. 39-41
- [19] KAMURA, N.; FUJITA, T.; SASAKI, T.: *Evaluation of Rolling Contact Fatigue by X-ray Diffraction Ring*. In: *NTN Technical Review* Feb.'16, Nr. 83, S. 67–74

## RoboCT – Production Monitoring in Automobile Industry 4.0

Anya Ziertmann<sup>1</sup>, Peter Jahnke<sup>1</sup>, Wolfgang Holub<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BMW Group, Material and Process Analysis, Munich, Germany;

<sup>2</sup> Fraunhofer Development Center X-ray Technology EZRT, Fuerth, Germany



Figure 1 – RoboCT at BMW Group's pilot plant in Munich.

### 1. Introduction

Newly emerging technologies of e-mobility together with the necessity of lightweight construction require involved industries to be capable of monitoring those new technologies and materials – both in production and development. In order to keep pace with fast development cycles we need monitoring technology to provide fast feedback on new constructions during prototype development. Only with quick access to information about these new developments short times between an idea and the serial production of a new model can be met.

### 2. Motivation

X-ray computed tomography (CT) is one very powerful and established means of non-destructive testing (NDT) in industry. Implemented in the laboratories worldwide, it is often applied as gold

standard for the inspection and characterization of materials and components. CT allows to generate volumetric three-dimensional images of an object with the possibility to analyze arbitrary intersecting planes through that object without the need for destruction of the specimen – as is the case with micro-cuts.

With regular CT systems, the object sizes that can be scanned are usually limited to a maximum of some ten centimeters in diameter. Until recently, this did hardly allow to apply CT to full size objects but only to cutout specimens. With the BMW's i3, BMW's first model with a car body made entirely of carbon fiber reinforced polymer (CFRP), we were confronted with the challenge to be able to bring computed tomography to the scale of object sizes far beyond those tens of centimeters. This is why we have investigated the possibilities to perform Micro-CT measurements on large scale objects [1]. Today, in the context of industry 4.0 with faster development cycles

and increasingly more complex manufacturing techniques, the BMW Group has introduced RoboCT (robot based computed tomography) into prototype development, production and analysis. Scans are performed by four cooperating industrial robots, which move the X-ray equipment around the object. Thanks to this technology, the full range of vehicles, from MINI to Rolls-Royce, can now be quality-controlled even in the early stages of development [2]. That installation promises to analyze newly built units of prototype cars in order to save their destructive testing that is being applied today. This shall speed up the feedback loop to development and to production – altogether helping to reduce response times for adjustments and shorten the overall realization process.

### 3. RoboCT Technology

The principle concept of the RoboCT technology is to replace high precision manipulators as are being used for conventional laboratory computed tomography systems by cooperating industrial robots manipulating the X-ray equipment. One robot is carrying the X-ray source and the other the X-ray detector (Figure 2). [3]

The possibility to build CT systems without complex high precision mechanical engineering assembled on large blocks of granite offers the possibility to come to yet unknown scales of CT systems and object sizes that can be handled. Industrial robots typically are only precise up to residual errors in the range of a millimeter in absolute space, whilst CT acquires structures in the object at detail levels finer than 100 µm and depends not necessarily on such high absolute precision – but at least on the precise knowledge on the geometry with less than 100 µm deviation. This is why the first enabling steps necessarily had to be the development of methods of geometric calibration, building a model of the geometry of a RoboCT system and its inaccuracies so that these can be compensated for in the subsequent computational step of 3-D CT reconstruction.

The installed system usually is set up with robots that can reach up to 3 m, which allows to build RoboCT cells with measurement volumes of up to 5 m in width, 4 m in height and almost unlimited length – defined only by the dimensions of the object to be inspected. The robots provide the flexibility to position X-ray source and detector at hardly restricted poses (i.e. position and orientation) in



Figure 2 – Robots positioning X-ray source and detector at the A-pillar of a BMW i8 Roadster.

the space of the RoboCT cell. This gives the freedom to acquire CT scans of objects that couldn't yet be examined by means of X-ray Micro-CT

and allows for a whole new field of research in computed tomography, unlocking the benefits of arbitrary acquisition trajectories for industrial application.

### 4. Research & Development History

Back in 2005, the idea for the RoboCT technology was born at Fraunhofer EZRT having had in mind the application of mobile and large scale X-ray inspection of airplanes in operation. The steps of fundamental research and development led to the first full scale demonstration installation within European FRP7 project QUICOM (“Quantitative inspection of complex composite aeronautic parts using advanced X-ray techniques”) at the site of FACC, a tier one supplier for aerospace industry. There, it was possible to prove the feasibility to perform RoboCT on the winglet of a business jet and illustrate the first clear business case for the application of that new technology. [4] In parallel, the BMW Group began their first studies on RoboCT with Fraunhofer EZRT to investigate the application of different CT methods on BMW's largest CFRP component, the side frame of BMW i3 [1]. The aim was to provide comparable results as the engineers were used to from laboratory CT scans of cutout specimens of the material, since computed tomography was already established as gold standard characterization modality for such composite materials. In 2017, we examined the application of RoboCT for the inspection of joining technologies (like piercing and pop rivets, adhesive bonding, screws, soldering, welds, etc.) on a full body in white. [5][6]

### 5. RoboCT Installations at BMW Group

Based on the previous successful studies, the BMW Group has installed their first RoboCT cell in their pilot plant in Munich in 2018 where it assists in the development of tomorrow's new car models. The system consists of four robots on two linear axes forming four possible cooperating pairs of robots for CT (Figure 1).

Thus, the acquisition can be performed with either front, rear, left or right pair of robots giving best possible access to either region of a car body. The system is equipped with Comet Variofocus X-ray sources with adjustable focal spot size down to 250 µm at 225 kV maximum voltage and Varex XRD-3025 detector with 100 µm pixel pitch. The maximum achievable resolution with this setup is at approximately 70 µm voxel size. The cell is equipped with a lifting table designed to raise cars or car bodies up to 2200 mm in height for optimal access to the desired scan region. [7][8]

### 6. Comparison RoboCT versus Laboratory CT

In this contribution, we propose the comparison of RoboCT with state-of-the-art laboratory CT. Therefore, we compare scans of a test specimen from a regular CT scan with a conventional CT device to RoboCT in two different acquisition scenarios. The test specimen (Figure 3) is a pair of aluminum platelets joined together with self-piercing half-hollow rivets of which a CT scan shall provide all necessary information so that the state of the rivet joints can be evaluated.

Three scans have been set up for comparison with acquisition parameters as shown in Table 1: a) a regular CT scan with a Waygate phoenix v|tome|x L laboratory CT scanner b) a RoboCT acquisition with the specimen positioned on a pole with hardly any obstructing contours that would limit the accessibility for RoboCT application



Figure 3 – specimen: rivet joint plates, 110 mm x 50 mm.

	a) Laboratory CT	b) RoboCT unobstructed	c) RoboCT at door
X-ray voltage	200 kV	200 kV	200 kV
X-ray power	90 W	260 W	260 W
prefilter	0.5 mm Cu	0.5 mm Cu	0.5 mm Cu
scan duration	0h 16m	1h 30m	0h 50m
FOD	726 mm	750 mm	750 mm
FDD	1050 mm	1050 mm	1050 mm
voxel size	69.18 $\mu\text{m}$	71.42 $\mu\text{m}$	71.42 $\mu\text{m}$
scan range	360°	240°	125°
angular steps	1440 @ 0.25°	881 @ 0.25°	501 @ 0.25°
scan trajectory orientation	horizontal	horizontal	tilted 70°

Table 1 – CT parameters of comparative scans.

and c) another RoboCT acquisition with the specimen mounted to the frame of a car's back door, resulting in a realistic limited access to the region-of-interest (ROI) of the scan.

Regular computed tomography is performed by acquiring X-ray projection images from a full rotation of 360° circular scan range by precisely rotating an object on a turntable. With additional computational steps, CT is also possible with the minimum required X-ray images from at least 180° scan range for a fully defined 3 D CT image. Acquisition geometries with less than 180° result in so called limited angle scans with under-determined perspective information in the 3-D image.

With the acquisition setup shown, we demonstrate the comparison between a regular laboratory CT scan and RoboCT. The latter is further being distinguished between the current ideal case with full accessibility of a ROI and also the impact of a possible full scale object's accessibility onto the CT scan quality when its contours influence the accessibility and thus the angular scan range that can be realized.

Figure 4 shows the active pair of robots at one projection angle for the specimen mounted on a pole in case of unobstructed accessibility. In this situation, it was possible to access the object from a very wide angular scan range of 240° (a maximum angle of 120° to both directions clock- and counter-clockwise) on a horizontal acquisition trajectory as is visualized in Figure 5.

To compare the image quality and to give an impression on the impact of reduced perspective information on the CT image, the rivet platelet has then been mounted on the frame of a car's back door as can be seen in Figure 6. The extreme flexibility of RoboCT allowed to parametrize a tilted acquisition trajectory with the platelet and the



Figure 4 – unobstructed specimen in RoboCT setup with robots at maximum angle of 120°.

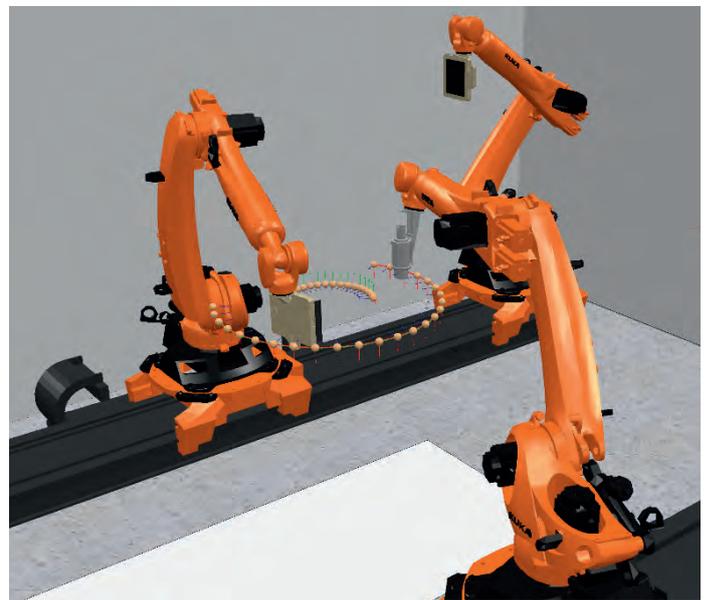


Figure 5 – horizontal acquisition trajectory with a total of 240° scan range around a given ROI.

frame of the door as rotation axis. On this tilted circular trajectory, we could realize a scan range of 125° (-70° to +55° inclination to the horizontal) limited by the obstructing contour of the door. The acquisition trajectory is visualized in the model in Figure 7.

All three scans resulted in good CT images of the specimen, clearly representing the geometry of the rivet joints. Sagittal slices (Figure 8) allow an easy interpretation of the rivets piercing the sheets of metal and visualize their geometric features, like final head position or undercut. The RoboCT acquisitions show a very similar level of detail as does the laboratory CT scan and only suffer from a small amount of additional image artifacts (presumably due to residual geometric misalignments from the robots' inaccuracies).

The presence of the car door in the third scan does only introduce a little amount of additional artifacts from the material added into the measurement volume.

Nonetheless, the perpendicular intersecting plane, illustrated in Figure 9, shows the influence of limited perspective introduced by the limited angle scan with the specimen mounted to the doorframe. This did no longer allow a full circular CT scan of more than 180°. In this orientation, the slice from the 125° scan is more difficult to interpret as the geometry of the rivet is no longer reflected without

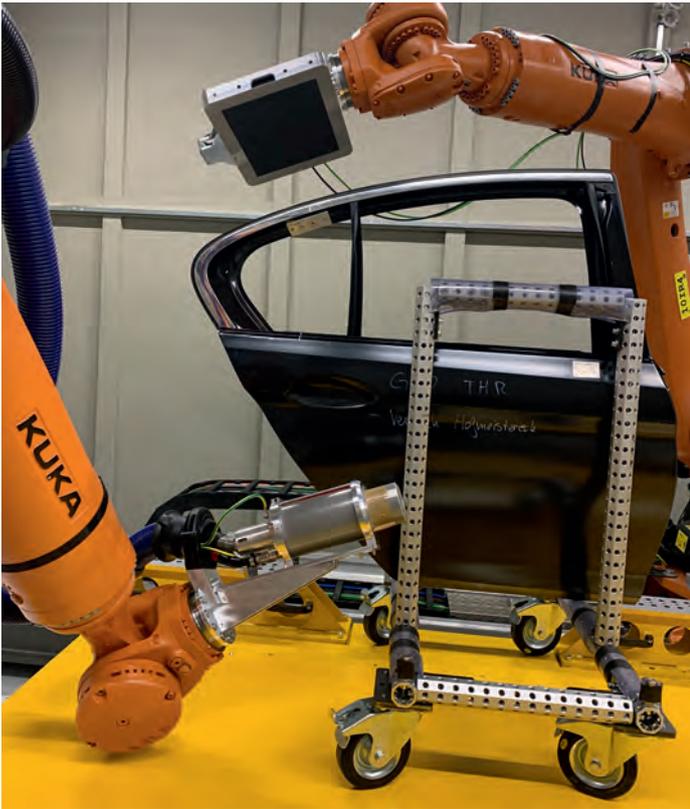


Figure 6 – specimen in RoboCT setup mounted to a door.

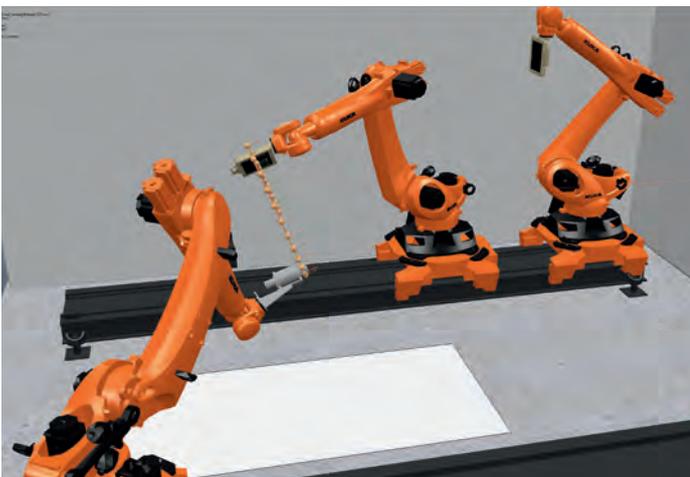


Figure 7 – tilted (almost vertical) acquisition trajectory around the inclined ROI at the beam of the door.

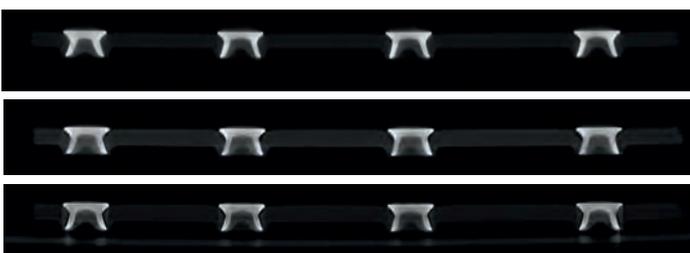


Figure 8 – sagittal CT slice through the row of rivets  
top: laboratory CT, middle: RoboCT 240°, bottom: RoboCT 125° with door (metal frame of door visible below rivets).

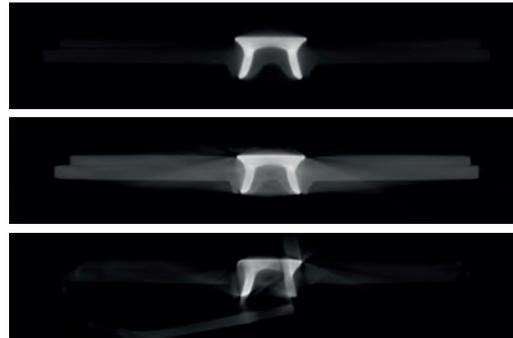


Figure 9 – transversal CT slice through one rivet  
top: laboratory CT, middle: RoboCT 240°, bottom: RoboCT 125° with door (metal frame of door visible below rivet); one can clearly see the impact of missing perspective information in the 125° limited angle scan.

disturbance. Especially the two legs of the rivet give the idea of anisotropic information in the limited angle CT image, where the rivet leg with a seven o'clock orientation is much better visible than the one with five o'clock orientation.

Given the results from this comparison, we can reason that the technology of RoboCT has arrived at a degree of maturity that allows its productive application in the BMW Groups development process where it is already established for regular inspection tasks at two different facilities.

The image quality provided by RoboCT is hardly inferior to that of regular established laboratory CT systems – as long as they are parametrized for acquisitions at the same level of detail. As expected, limiting the perspective information of the CT scan results in image artifacts by incomplete three-dimensionally information in the image – comparable to limited angle CT scans with regular CT devices. Today, these cannot yet be avoided as long as we are bound to acquisitions on regular trajectories, like e.g. circles, which may be limited by the contour of the full scale components that are being examined.

As unexpected finding, we were surprised by the extraordinarily good representation of the rubber seal within the scan of the door. Figure 10 shows an intersecting plane perpendicular to the door-frame. The CT slice shows the clamps and fastening structures of the seal correctly inserted in the metal structures of the door.



Figure 10 – CT slice orthogonally through the doorframe (on the right), clearly visualizing the door's rubber seal (on the left) and how it snaps into the metal structures.

## 7. Next Development Steps

Now that the RoboCT technology has proven maturity for industrial application, we primarily aim at increasing its level of usability. Today it still takes an amount of several hours for highly trained operators to set up a measurement and they carry the responsibility to avoid possible collision of robots, X-ray equipment and objects by extraordinary attention when operating these systems. BMW Group is accompanying the research of the engineers at Fraunhofer EZRT, working on the enhancement of safety and usability of RoboCT in the near future. A digital twin of the system (similar to the one that has been used for the visualizations in Figures 5 and 7) shall be developed so that it will prohibit potentially harmful machine movements. That virtual representation of the CT device and object to be scanned shall intelligently assist the operator by parametrizing valuable CT scans.

## 8. Outlook

In the future, today's technology of RoboCT shall represent one first fundament for future cognitive sensor systems. The researchers at Fraunhofer EZRT target at intelligent monitoring cells incorporating a variety of sensors like e.g. X-ray, ultrasonic, thermography and optics that will automatically be combined and parametrized for a given task at hand.

With such technological progress in NDT technology, we want to come to a point where such monitoring contributes to the production processes by providing feedback information to the machinery to stabilize and regularize the making of waste-free, high quality and highly efficient production – especially in the context of industry 4.0 with its path towards sophisticated and highly individualized goods.

## 9. Conclusion

Robot based computed tomography (RoboCT) is an established new means of NDT that is already implemented in the BMW Group and used to support the different development stages of tomorrow's car models. The comparison of this study has shown that RoboCT is capable of generating CT images hardly different to established lab CT devices at detail levels of about 70 µm voxel size. Already valuable for today's development stages in automotive industry, the technology promises to evolve to play an important role in the future production in the context of industry 4.0.

Kontakt: wolfgang.holub@iis.fraunhofer.de

## REFERENCES

- [1] Holub, Wolfgang et al.: "XXL-Micro-CT – Comparative Evaluation of Microscopic Computed Tomography for Macroscopic Objects", *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography Conference DIR 2015*
- [2] BMW Group PressClub, 2018, *Computer tomography in automotive construction: BMW Group uses X-ray measurements for vehicle analysis.*
- [3] Holub, Wolfgang et al.: "RoboCT - High Resolution Robot Based CT on Large Components", *CARAT - International Conference on Applied X-Ray Technologies 2019*
- [4] Holub, Wolfgang et al.: "Robot based Radioscopic Inspection and Computed Tomography", *5th International EASN Workshop on Aero-structures, 2015*
- [5] Holub, Wolfgang et al.: "RoboCT – Robot based Computed Tomography and its Transition towards the full scale Car Body", *8th International Conference on Industrial Computed Tomography iCT, 2018*
- [6] Holub, Wolfgang: "RoboCT – Application for in-situ Inspection of Join Technologies of large scale Objects", *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography Conference DIR 2019*
- [7] Holub, Wolfgang: "RoboCT and XXL-CT – X-ray imaging for non-destructive testing of large and complex car components up to the whole car body", *AEE Congress – Automotive Engineering Expo 2019*
- [8] Kerschler, Stefan: "Robot-guided, non-destructive computer tomography on whole automobiles", *AEE Congress – Automotive Engineering Expo 2019*

## BEITRAG 4

## Development of a sensor- and cloud-based condition monitoring system for the detection of gear damage

Andreas Beering<sup>1</sup>, Karl-Ludwig Krieger<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chair for Automotive Electronic Systems (ITEM.ae), University of Bremen

**ABSTRACT** | This paper presents the development of a sensor- and cloud-based condition monitoring system for the detection of gear damage in agricultural machines. Undetected gear damage can result in fatal damage causing huge costs due to downtime and upcoming repairing. Based on the study of synthetically damaged gears, the effect of tooth damage in gearboxes and therefore on the vibration signal is analysed. From these findings we develop a condition monitoring system for the usage in agricultural machines. For the measurement of the resulting vibration signal, caused by the gear, a piezoelectric vibration transducer is used. An application-specific sensor system is developed, which consists of analog filters, analog-to-digital converters, processing units and communication interfaces. The sensor system can analyse data in real-time and transfer it to a cloud computing system over an encrypted connection for more computation intensive calculations and data driven long-term analysis. The cloud computing system receives the transferred data, analyses it and stores significant information, like measurement metadata and analysis results, in a database. The stored data can be viewed by the owner of the agricultural machine and used for planning repairs or maintenance.

### Introduction

During harvest time agricultural machines require a very high level of availability. Due to the harsh environmental conditions, the gearboxes of these machines are exposed to a numerous number of loads. In particular, dust and soil picked up by the agricultural machine can lead to various types of damage and in long term even to total failure of the moving and rotating machine parts. Despite regular maintenance of the machines, heavy-duty machine components such as gearboxes can fail due to this type of damage during harvesting. Figure 1 shows characteristic damage patterns of gearboxes which can result from bearing damage or tooth fractures. In such cases, the repair and downtime of the machine cause enormous costs. Early damage detection via a vibration signal analysis is a solution for this in order to be able to carry out repairs or maintenance in a targeted manner and to minimize machine failures and the associated costs. Current approaches to the condition monitoring of agricultural machines mainly describe the offline analysis of different methods. In the field of temperature monitoring, temperature fluctuations of machine components are investigated in order to detect various problems, such as inadequate lubrication [1].

Another area of analysis is the investigation of oil samples. Here, foreign particles per volume, the input of iron, metals or other impurities, the temperature or the consumption are analysed [2]. Other material or structural defects can be investigated using ultrasonic or X-ray analysis [3]. These are mostly carried out offline and are not very common due to high costs. Damage to bearings is determined by vibration analysis. In particular, damage to bearings can be determined by geometry-dependent damage frequencies [4]. At present, there is no specific vibration-based condition monitoring system available in the agricultural sector that analyses the condition of the existing components and a possible remaining useful lifetime to prevent unforeseen machine failure.

This paper presents the development of a sensor- and cloud-based condition monitoring system for the detection of gear damage in agricultural machines. For this purpose, piezoelectric vibration



Figure 1. Characteristic consequential damage of a gearbox after gear damage or bearing damage

transducers are used to measure the vibration signal of the gearbox on the agricultural machine. The sensors are attached to the gearbox via a screw connection to ensure a good signal coupling for the mechanical vibrations [5]. The recorded signals will be processed in real time on the agricultural machine in order to detect serious damage to machine components, such as tooth fractures. An electronic sensor system is being developed for these investigations on the agricultural machine. In addition, long-term investigations of the components are to be developed in order to derive a possible remaining lifetime estimation from these findings. Since this calculation is considered over a long period of time and a higher computing effort is required for these investigations, the data is analysed by means of a cloud-based calculation server. For this purpose, data from defined vehicle scenarios (such as the residual unloading due to the high speed) is transferred via an established Internet connection from the electronic sensor system to a developed cloud server. After a successful data transmission this server handles the advanced signal processing and stores the results in a database. By accessing the database, repairs and maintenance can be planned better in future

based on the condition of the machine components. The remainder of this paper is organized as follows. In Section 2 the condition monitoring system is described with a focus on the electronic sensor system, which consists of the signal analog-to-digital conversion, the local damage analysis and the communication interface for the data transfer to the cloud system. Section 2 also deals with the cloud computing system, which receives the incoming data and analyses it. Section 3 outlines measurements carried out with the sensor system integrated in the agricultural machine to collect field data. Furthermore, the experimental investigation for the detection of synthetic tooth fractures is described, which serves as a basis for the detection of real damage. Finally, a conclusion is drawn in Section 4.

### Condition monitoring system

The condition monitoring system can be divided into two subcomponents. The first component is the sensor system integrated in the agricultural machine. This is used for data acquisition of the vibration signal, the rotational speed and the inflow and outflow pressures of the gearbox oil engine as well as for local evaluation and data transfer to the cloud computing system. The second component is the cloud computing system, which is responsible for receiving and storing the data in a database as well as for the visualization via a web frontend. In this section both system components are introduced.

#### Sensor system

The sensor system is integrated on the agricultural machine. A total of four sensor values are read via this system. These are the vibration signal, the rotational speed of the gearbox, the inflow and the outflow pressures of the oil engine. The oil engine serves as the drive of the gearbox in the agricultural machine. The block diagram of the sensor system is shown in Figure 2.

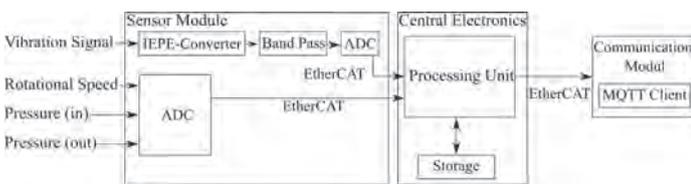


Figure 2. Block diagram of the sensor system for data acquisition, local data analysis and data transfer to the cloud system

The sensor module for the data acquisition is divided into two parts. On the one hand, the rotational speed and the two pressures are sampled via associated sensors and an analog-to-digital converter (ADC) with a sampling rate of 2 Hz. On the other hand, the vibration signal is recorded via a piezoelectric vibration transducer. For this purpose, the signal of the vibration sensor, which is operated via the integrated electronics piezoelectric (IEPE) standard, is first converted into a voltage signal and then filtered via a bandpass as aliasing filter with a lower cut-off frequency of 1 Hz and an upper cut-off frequency of 20 kHz. The cut-off frequency of 20 kHz results from the linear range of the sensor up to approximately 10 kHz. The signal is sampled at 51.2 kHz. The sensor module communicates via EtherCAT with the central electronics. The main components are a processing unit and a storage device. The processing unit can be

used for several analysis and the data management. Furthermore, the processing unit communicates via EtherCAT with a communication module, which establishes an Internet connection via the mobile phone network. With this communication module an upload of data to the cloud computing system is realised via a message queuing telemetry transport (MQTT) client. The pressure and rotational speed recording is already integrated in the vehicle. The recording of the vibration signal is currently being implemented.

#### Cloud computing system

The second key component of the condition monitoring system is the cloud computing system. This receives the data, stores it in a database, analyses and finally visualises it via a web frontend. The block diagram of the cloud computing system is shown in Figure 3. The cloud computing system consists of several components. The core components for the communication to the sensor system are the MQTT server (also called broker) and the MQTT clients, which can both send and receive data. The broker takes over the exchange of the data between the clients. The dispatcher receives and manages the data. The data is first decrypted. Afterwards, the metadata is stored in a MySQL database and the sensor data is transferred to a data server via the SSH file transfer protocol (SFTP). The dispatcher then initiates an analysis request to the analysis client via the MQTT connection. The analysis client performs various calculations with MATLAB, which are then stored in the database and on the data server.

The third central component of the cloud computing system is the web front- and backend. These provide the possibility to read out and display measurement series and analysis with the corresponding metadata of the measurement.

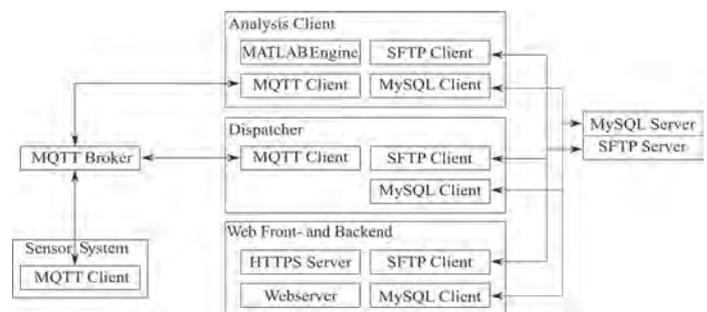


Figure 3. Block diagram of the communication of the cloud computing system for analysis, storage and visualization of the data

### Experimental study

In this section a field study is described in which the developed sensor system was integrated in a loader wagon for grass cuttings for one harvest season to collect field data. Furthermore, a laboratory investigation is described in which synthetic gear damage in a gearbox and the behaviour in the vibration signal is outlined.

#### In-vehicle data acquisition

The vehicle type is a loader wagon, which is used during harvesting to collect grass cuttings from the field and later unload them at a collection point. The sensor system is mounted under the vehicle

as shown in Figure 4. The image on the left side shows the mounted sensor system highlighted in a red box. The entire electronics is built into a splash-proof housing in order to be adapted to possible harsh environmental conditions during harvesting. The image on the right side shows the various components of the sensor system.

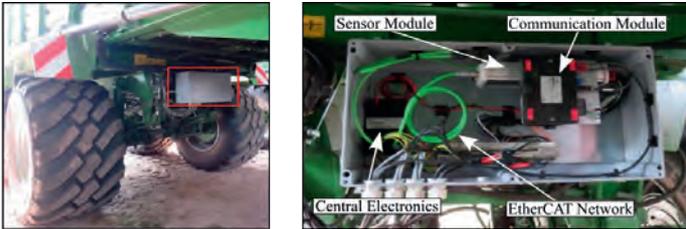


Figure 4. Integration of the sensor and communication electronics under the agricultural machine

Of particular interest for the vibration signal are the rotational speed and the pressure difference at the oil engine, which is equivalent to the converted torque in the gearbox. During operation of the vehicle, a distinction can be made between the three phases loading, unloading and residual unloading. The pressure differences and rotational speeds occurring in these phases are shown in Figure 5. The three phases are separated by trickled lines. During the loading phase an increasing pressure difference and an approximately constant rotational speed can be observed. The drops in pressure difference and rotational speed can be explained by the fact that during this phase the gearbox is only temporarily active to move the chain transport floor and thus distribute the load more evenly over the loading area. During the unloading phase the pressure difference and thus the torque drops. The rotation speed is low and increases only negligibly. Finally, in the residual unloading phase, the rotational speed is increased in order to transport the remaining load from the vehicle. In this phase the pressure difference increases.

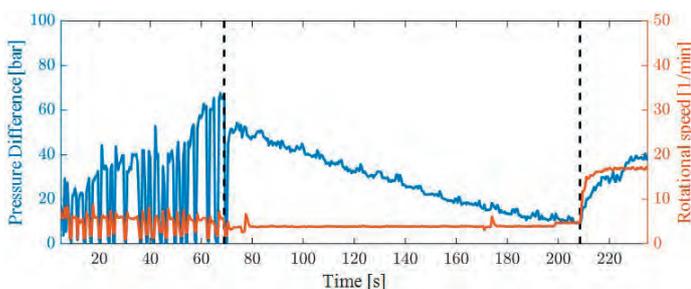


Figure 5. Pressure difference and rotational speed during a loading and unloading cycle

### Detection of gear damage

In order to detect serious damage to machine components, such as gear damage, a detailed investigation on this damage type is needed. For this purpose, a gearbox with a synthetic tooth fracture is studied in a laboratory set up. Figure 6 shows the schematic design of the two-stage gearbox under investigation and the position of the synthetically introduced damage. Figure 7 shows the implementation of the real tooth damage on gear  $G_3$  highlighted. For the investigations, the gearbox was driven in a test setup with an input

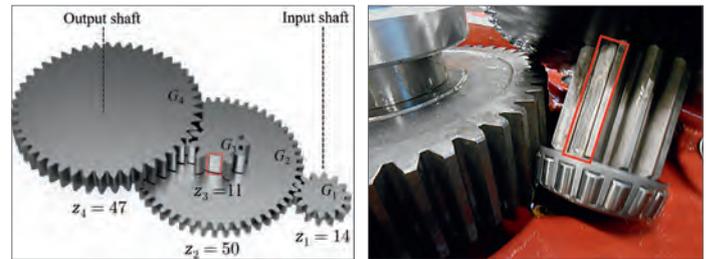


Figure 6. Schematic structure of the investigated gearbox

Figure 7. Real implementation of the synthetic tooth damage at gear  $G_3$

shaft speed of  $n_{in} \approx 104 \text{ min}^{-1}$ . A piezoelectric vibration transducer is attached to the gear housing (material: grey cast iron) via a screw connection. The vibration signal of the piezoelectric transducer is sampled at a sampling rate of  $f_s = 51.2 \text{ kHz}$  and a resolution of 24 bit.

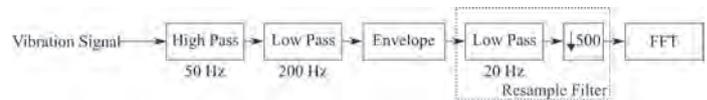


Figure 8. Block diagram of the signal processing for the analysis of tooth fractures.

Figure 8 shows the block diagram of the digital signal processing used. The recorded vibration signal is first filtered via a digital Butterworth band pass filter of the 50<sup>th</sup> order. For the detection of a tooth fracture, the cut-off frequency of the digital high pass filter  $f_{HP1} = 50 \text{ Hz}$  and that of the digital low pass filter  $f_{LP1} = 200 \text{ Hz}$  is used. The frequency range was determined empirically. Following the band pass, the signal envelope is calculated [6]. For this calculation, the spline interpolation of the maximum values of the filtered signal is calculated. After each local maximum, a window of  $k = 10$  values is skipped and then the next local maximum is searched in a window of  $k$  values. A resampling filter is applied to the signal envelope, which consists of a low pass filter with a cutoff frequency  $f_{LP2} = 20 \text{ Hz}$  and down sampling by a factor of 500. This is advantageous because the calculation of the following Fast Fourier Transform (FFT) does not require further calculation of already filtered out high-frequency signal components and a shorter calculation time is required, which is beneficial for a future realtime implementation on the sensor system. Furthermore, there is a gain in dynamics because the quantization noise is distributed over the entire sampled signal bandwidth and is therefore lower in the useful signal bandwidth after the filters have been applied. In order to investigate the characteristic course of the vibration signal caused by the tooth damage in more detail, several successive time windows of the signal peak values caused by the tooth damage are examined. The signal is adjusted by correcting the time offset, which was calculated on the basis of a cross-correlation [7].

Figure 9 shows, on the one hand, the time windows aligned by correcting the time offset in grey and, on the other hand, the signal mean value of the superimposed time windows in red. The illustration shows the characteristic signal curve in the case of a tooth fracture. The signal amplitude increases significantly during tooth engagement with a damaged tooth and shows a recurring course. The characteristic course only occurs once per revolution of the gear.

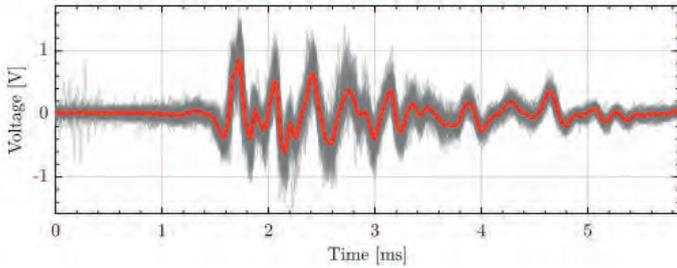


Figure 9. Characteristic vibration signal during tooth engagement following a fracture

Therefore, the condition can be derived for an examination of tooth damage that a complete revolution of a gear must be considered. Figure 10 shows the frequency spectrum of the envelope curve for a measurement series without tooth fracture and one with tooth fracture. A fundamental frequency occurs at  $f_{\text{fund}} = 0.497$  Hz, as well as harmonic oscillations at  $f_{\text{fund}} \cdot n$  for integer multiples  $n$  in the measurement series with tooth fracture. The amplitudes of these frequency bands differ strongly from those of the intact gearbox. These frequency bands, which are clearly different from the spectrum of

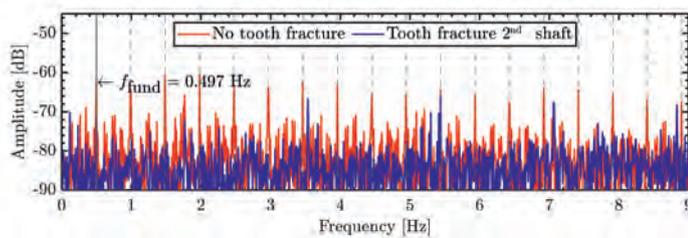


Figure 10. Comparison of the frequency components occurring in the filtered signal of an intact gearbox and a gearbox with tooth fracture

the reference gearbox, correspond to damage frequencies which can be determined on the geometry of the gearbox. For the investigated tooth damage at the gear  $G_3$ , the tooth engagement frequency  $f_{G_3}$  results according to the following equation:

$$f_{G_3} = \frac{n_{in}}{60} \cdot i_1^{-1} = \frac{n_{in}}{60} \cdot \frac{z_2}{z_1} \approx 0.49 \text{ Hz}$$

For the investigation, the gearbox was driven at an input shaft speed of  $n_{in} \approx 104 \text{ min}^{-1}$ . The gear ratio  $i_1^{-1}$  results from the tooth meshing with the number of  $z_2$  of  $G_2$  and  $z_1$  of  $G_1$ . The determined fundamental frequency corresponds approximately to the theoretical frequency for the tooth mesh of the tooth damage at  $G_3$ :  $f_{\text{fund}} \approx f_{G_3}$ . The significantly increased signal power is therefore caused by the tooth fracture. An implementation of this signal processing on the sensor electronics will detect tooth fractures during the use of the agricultural machine in the future.

## Conclusion

This paper presents a developed condition monitoring system for monitoring gear damage. A distinction was made between the sensor system for data acquisition and local evaluation and the cloud computing system. Furthermore, the implementation of the sensor

system in the vehicle was examined and field data, which have a significant impact on the occurring gearbox vibrations, were presented. In parallel, laboratory investigations on synthetic tooth damage were considered and a signal processing system for the detection of this damage was set up. In future investigations, a representative load spectrum will be derived from the field data obtained and, based on this, more realistic investigations of gear damage at variable speeds will be carried out. For this purpose, the detection algorithm will be further developed to provide reliable results in the vehicle in the future. Furthermore, realistic long-term measurements are to be carried out with the load spectrum in order to investigate wear phenomena.

## REFERENCES

- [1] S. Nandi, H. A. Toliyat und X. Li, „Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review,“ *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 719-729, Dezember 2005.
- [2] L. A. Toms und A. M.Toms, *Machinery Oil Analysis: Methods, Automation and Benefits : a Guide for Maintenance Managers, Supervisors & Technicians*, Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 2008.
- [3] L. Guo, Q. Zhang und S. Han, „Agricultural Machinery Safety Alert System Using Ultrasonic Sensors,“ *Journal of agricultural safety and health* 8, pp. 385-396, Dezember 2002.
- [4] M. Saxena, O. O. Bennett und V. Sharma, „Bearing Fault Evaluation for Structural Health Monitoring, Fault Detection, Failure Prevention and Prognosis,“ *Procedia Engineering* 144, pp. 208-214, 2016.
- [5] W. Kuttner, *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015.
- [6] G. Micula und S. Micula, *Handbook of Splines*, Dordrecht: Springer Science & Business Media, B.V., 1999.
- [7] M. Rhudy, „Time Alignment Techniques for Experimental Sensor Data,“ *IJCSES Vol.5 No.2*, 2014.

Kontakt: beerig@uni-bremen.de

## BEITRAG 5

## Dichtheitsprüfung von Produkten mit Druckausgleichselementen

Joachim Lapsien<sup>1</sup><sup>1</sup> CETA Testsysteme GmbH, Hilden

## Einleitung

Produkte, die im Außenbereich eingesetzt werden (z. B. Leuchten, Videokameras, Sensoren), sind temperaturbedingten Druckschwankungen ausgesetzt. Hierdurch kann im Inneren ein Unterdruck entstehen. Bei undichten Systemen kann dann Flüssigkeit in das Innere gezogen werden. Dieses kann zu schweren Störungen führen. Abhilfe schafft die Integration eines Druckausgleichselementes. Deshalb werden zur Belüftung häufig Druckausgleichselemente eingesetzt. Diese ermöglichen einen Druckausgleich. Die bei der produktionsbegleitenden Dichtheitsprüfung von Produkten mit Druckausgleichselementen eingesetzten Verfahren werden praxisnah behandelt.

## 1. Schädlicher Unterdruck im Bauteil

Werden Produkte im Außenbereich eingesetzt, sind diese einer Vielzahl von Umwelteinflüssen ausgesetzt. Durch temperaturbedingte Druckschwankungen kann sich im Inneren des Systems ein Überdruck aber auch ein Unterdruck einstellen. Hierdurch werden die Gehäusedichtungen, Schweiß- und Klebnähte stark belastet und können undicht werden. Herrscht dann im Bauteil Unterdruck, so besteht die Gefahr, dass Feuchtigkeit und Flüssigkeit in das Innere des Systems gezogen werden. Dieses kann zu schweren Störungen an elektronischen Komponenten führen und die Funktion massiv beeinträchtigen.

## 2. Ventilation durch Druckausgleichselemente

Deshalb werden zur Belüftung häufig Druckausgleichselemente (DAE) eingesetzt. Diese ermöglichen einen Druckausgleich bei gleichzeitigem Schutz vor Öl, Wasser und Partikeln. Hinsichtlich der Einbaulage des Bauteils gibt es häufig Vorgaben. So sollte das Druckausgleichselement nicht horizontal positioniert sein, da sich sonst Wasser auf ihm sammeln kann. Das Druckausgleichselement wird häufig hinter einem Kreuzgitter montiert, zum Schutz vor Schmutz und mechanischer Beschädigung. Bei der Dichtheitsprüfung mit Druckluft muss das Prüfteil über das Druckausgleichselement befüllt werden, wenn das Prüfteil nicht anders befüllt werden kann.

## 3. Eigenschaften von Membranen

Weit verbreitet sind Membranen aus expandiertem Polytetrafluorethylen (ePTFE). Das hydrophobe und oleophobe Material wird in dünnen Schichten hergestellt und der Durchfluss durch Reckung eingestellt. Diese Membranen gibt es als schweißbare und als klebbare Ausführungen. Eine grundsätzliche Problematik dieses Typs ist, dass häufig nur der Mindestdurchfluss angegeben wird. Der typische Durchfluss ist um bis zu Faktor 2 bis 3 größer als der Mindestdurchfluss. Zudem können die Durchflüsse von Charge zu Charge variieren. Dieses erschwert die Erkennbarkeit von Fehlerbildern an der Membran. So können die Durchflüsse fehlerbehafteter „dichter“ Membranen mit den Durchflüssen unversehrter „undichter“ Membranen überlappen.

Neben diesem sehr weit verbreiteten Membrantyp, gibt es auch Membranen, die durch Bestrahlung von Ionenstrahlen perforiert werden. Nachfolgend schließt sich ein chemischer Ätzprozess an. Auf diese Weise kann die Porendichte und die Porengröße definiert

„eingestellt“ werden. Diese Kernspur-Membranen zeichnen sich dadurch aus, dass der mittlere Durchfluss inklusive Durchflussstreuung angegeben werden kann und im Datenblatt ausgewiesen wird. Dieses ist für die Auslegung von Projekten sehr hilfreich.

Auch gibt es Membranen, bei denen ein Granulat aus porösem PTFE bei isostatischem Druck gepresst und anschließend gesintert wird. Dieses derart bearbeitete Material wird geschält, so dass sich „3D“-Filterscheiben ergeben. Auch diese Druckausgleichselemente haben einen relativ definierten Durchflussbereich.

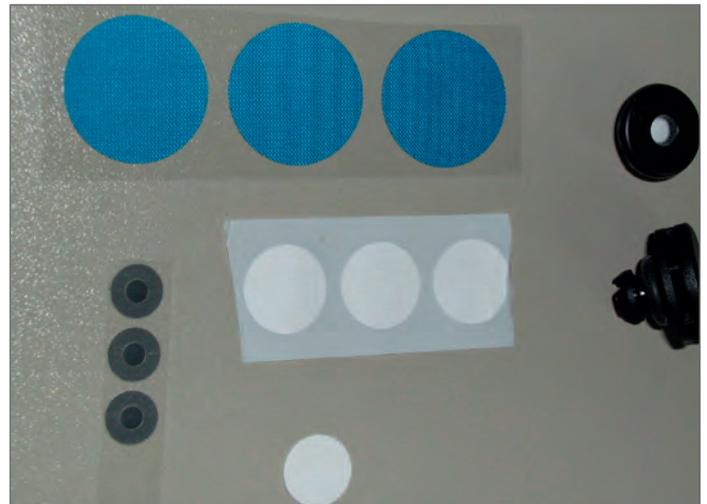


Bild 1: Beispiele für Druckausgleichselemente



Bild 2: Prüfteile mit integrierten Druckausgleichselementen

Während der Entlüftung über die Membran nimmt der Druck exponentiell ab. Die Entlüftdauer hängt von der Größe des zu entlüftenden Volumens ab.

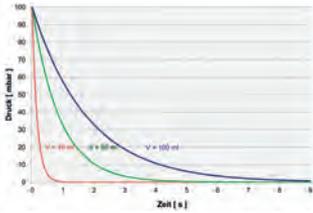


Bild 3: Entlüftkurven für verschiedene Volumina (10 ml, 50 ml, 100 ml) bei einer Membran (5 mm durchflussaktive Öffnung) mit einem spezifischen Luftleitwert von  $17 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{bar})$  bei einem Startdruck von 100 mbar.

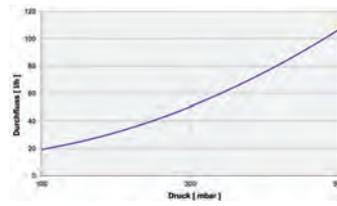


Bild 4: Abhängigkeit des Membrandurchflusses vom angelegten Druck. Innerhalb der reversiblen Druckbelastungsgrenzen der Membran ist die Beziehung zwischen Durchfluss und Druck fast linear.

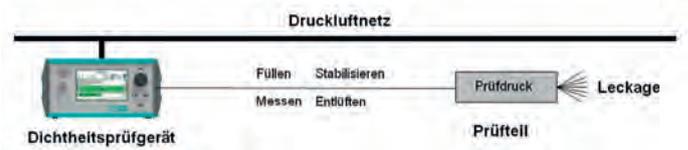


Bild 5: Schematischer Aufbau der Dichtheitsprüfung. Dargestellt ist ein Differenzdruckprüfgerät vom Typ CETATEST 825, das für die Dichtheitsprüfung von Prüfteilen mit Druckausgleichselement geeignet ist.

Volumenabhängige Entlüftdauer (siehe Bild 3)

Volumen	Entlüftdauer bis 50 mbar (50 % Startdruck)	Entlüftdauer bis 1 mbar (1 % Startdruck)
10 ml	0,1 s	0,7 s
50 ml	0,6 s	4,1 s
100 ml	1,3 s	8,3 s

#### 4. Produktionsbegleitende Bauteilprüfung

Während des Produktionsprozesses werden die Produkte häufig zu 100 % auf Dichtheit geprüft (100 % End-of-Line). Neben der Prüfung der Dichtheit des Gehäuses besteht auch der Anspruch, Membrandefekte und Montagefehler zuverlässig zu erkennen.

##### 4.1 Prüfung der Membran auf korrekte Montage

Aufgrund des Handlings des Druckausgleichselements und seiner Montage muss überprüft werden, ob es unversehrt ist und fehlerfrei montiert wurde. Teilweise wird das Druckausgleichselement in den Deckel integriert, der später auf das Gehäuse montiert wird. Teilweise wird das Druckausgleichselement in das fertig bestückte Gehäuse eingesetzt.

Bei dieser Prüfung wird ein prüfgeräteinternes Volumen auf einen definierten Druck gebracht. Bei der Umflutung dieses Volumens in das Prüfteil erfolgt ein verzögerter Druckabbau aufgrund des begrenzten Durchflusses durch die Membran. Die zeitliche Änderung des Druckes hängt vom Zustand der Membran ab (nicht vollständig geschweißt bzw. geklebt, beschädigt, fehlende Membran). Wird der Druck kurz nach dem Start des Umflutprozesses gemessen, kann auf diese Art eine Qualifizierung der Membran stattfinden. Hierbei ist die chargenabhängige Streuung des Membrandurchflusses kritisch zu betrachten. Dieses ist bei Auslegung des Prüfprozesses zu beachten.

##### 4.2 Dichtheitsprüfung

Wenn die Membran auf korrekte Montage geprüft wurde, schließt sich die Dichtheitsprüfung an. Hierbei muss das Produkt über das Druckausgleichselement befüllt werden, das über der Belüftungsöffnung angebracht wurde. Die benötigte Füllzeit hängt von der Durchlässigkeit der Membran, dem Druck und dem zu befüllenden Volumen ab und ist deutlich länger als bei einem volumengleichen Prüfteil, das direkt befüllt werden kann.

Ein kompletter Prüfprozess besteht aus den zeitlich aufeinander folgenden Phasen: Füllen, Stabilisieren, Messen und Entlüften. In der Füllphase wird das Prüfteil auf den Prüfdruck gefüllt. Die Stabilisierungsphase ist notwendig, damit Druckluftstörungen, die durch den Befüllprozess entstehen und durch Schaltvorgänge der internen Ventile des Prüfgerätes erzeugt werden, abklingen können. Zudem muss sich die Temperatur der Druckluft an die Prüfteiltemperatur anpassen. Durch den Füllvorgang wird, im Falle einer Überdruckprüfung, die Druckluft adiabatisch komprimiert, was eine Temperaturerhöhung zur Folge hat. In der Messphase wird der zeitliche Druckverlust mit einem sehr empfindlichen Drucksensor gemessen und mit den zulässigen Toleranzen verglichen.

Liegt der gemessene Druckverlustwert innerhalb der erlaubten Grenzwerte, so handelt es sich um ein Gutteil.

Die beiden Prüfungen (Membrantest und Dichtheitsprüfung) lassen sich mit einem Dichtheitsprüfgerät mit entsprechender Ausstattung in einem Durchgang umsetzen.

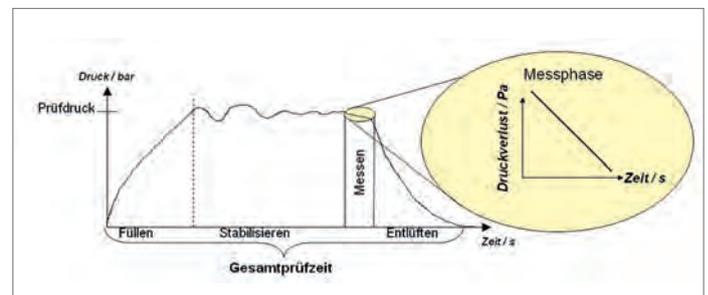


Bild 6: Druck-Zeit-Phasendiagramm der Dichtheitsprüfung

#### 5. Auswahlkriterien für Membranen

- Medienbeständigkeit
- Mechanische Beständigkeit
- Handling (z. B. Schneiden, Vereinzeln)
- Montage (z. B. Schweißen, Kleben, Klemmen)
- Montageposition im Bauteil
- Auftretende thermisch bedingte Druckänderungen im Prüfteil
- Durchflussaktive Fläche der Membran
- Schnelligkeit des Druckausgleiches
- Mindestdurchfluss und Bezugsbedingung
- Typischer Durchfluss
- Chargenstreuung
- Abhängigkeit des Durchflusses vom angelegten Druck
- Maximaler Druck, mit dem die Membran schlagartig belastet werden darf bzw. alternativ Vorgabe eines zulässigen Druckgradienten ohne reversible Veränderung der Membran
- Wassereintrittsdruck

## 6. Praktische Anmerkungen

- Einhaltung der DAE-Montagehinweise des Herstellers.
- Änderungen der Montagebedingungen sollten mit dem Hersteller des DAE dahingehend abgestimmt werden, ob diese Einfluss auf den Durchfluss des DAEs haben können (zum Beispiel geänderte Temperatur beim Schweißen einer Membran).
- Nutzung des Vorfüllens mit höherem Anfangsdruck zur schnelleren Anfüllung des Prüfteils. Hierbei ist zu beachten, dass das DAE nicht irreversibel geschädigt wird.
- Falls die Befüllöffnung gestanzt wird, kann sich der Durchmesser durch Werkzeugverschleiß langsam ändern, was Einfluss auf den Durchfluss hat.
- Bei der Parameterfindung sollten DAEs aus unterschiedlichen Chargen verwendet werden. Der Fall des DAEs mit Mindestdurchfluss sollte ebenfalls betrachtet werden.
- Hinsichtlich des Prüfdruckes (positiver oder negativer Überdruck) ist die Wirkrichtung der Leckage zu beachten, bzw. welche Leckagen in der Praxis auftreten können und erkannt werden sollen.
- Einmessung des Prozesses auf der Grundlage von realistischen Fehlerbildern, die im Produktionsprozess auch wirklich auftreten können.
- Beachtung der Durchfluss-Vorzugsrichtung des DAEs (falls notwendig).
- Die Montagerichtung der Klebmembran sollte der Wirkrichtung des Druckes entsprechen, damit sich die Klebung durch die Druckbelastung nicht löst.
- Automotive Vent Clips haben Vorteile beim Handling und bei der Prüfbarkeit auf korrekte Montage (ein fehlender abdichtender O-Ring kann sehr gut erkannt werden).
- Der Prüfdruck kann nur vor der Membran gemessen und kontrolliert werden. Um sicherzustellen, dass der Prüfdruck im Prüfteilinneren, also hinter der Membran, erreicht wird, bietet sich die Präparation eines Musterprüfteils mit einem zusätzlichen Abgriff zur Kontrolle des Druckes mittels eines Manometers an. Dieses ist besonders wichtig bei der Prüfung der Machbarkeit, bei der Auslegung des Prüfprozesses (Parameterfindung) und ggf. bei der Inbetriebnahme (Festlegung der Parameter).

*Bilder und Diagramme: CETA Testsysteme GmbH, Hilden*

Kontakt: joachim.lapsien@cetatest.com

## Zerstörungsfreie Prüfung von Klebeverbindungen durch den Einsatz unilateraler NMR

Norbert Halmen<sup>1</sup>, Ulrich Hack<sup>1</sup>, Linda Mittelberg<sup>1</sup>, Eduard Kraus<sup>1</sup>, Benjamin Baudrit<sup>1</sup>, Thomas Hochrein<sup>1</sup>, Martin Bastian<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

**KURZFASSUNG** | Angetrieben durch den stetig wachsenden Bedarf an Leichtbau-Lösungen erlangen Klebstoffe einen immer größeren Stellenwert bei industriellen Anwendungen. Bis dato werden Klebeverbindungen zum Erzielen zuverlässiger und reproduzierbarer Ergebnisse lediglich stichprobenartig zerstörend geprüft.

Eines der entscheidenden Kriterien für die Funktionalität von Klebstoffen ist deren richtige Aushärtung. Diese kann im Labor auf unterschiedlichste Weise, u. a. thermisch, rheologisch, dielektrisch oder spektroskopisch, untersucht werden. Sobald zwei Formteile geklebt werden, kann keines dieser Laborverfahren für die Untersuchung des Klebstoffes eingesetzt werden.

Eine zerstörungsfreie Prüfmöglichkeit für Klebeverbindungen stellt die unilaterale Kernspinresonanz (engl. nuclear magnetic resonance, NMR) dar. Dieser Messmethodik liegt die Korrelation der Kernspin-Relaxationszeit mit der Abnahme der molekularen Beweglichkeit von Klebstoffmolekülen zugrunde, wodurch der Aushärtezustand von Klebstoffen zerstörungsfrei bewertet werden kann. Der besondere Aufbau des Messsystems ermöglicht dabei eine Überwachung der Klebstoffaushärtung in unterschiedlichen Tiefenebenen – auch durch die Fügepartner hindurch.

Die Anwendbarkeit des Verfahrens wurde an verschiedenen Klebstoffen erprobt. Hierfür kamen 2K- (polyadditionshärtend) sowie 1K-Klebstoffsysteme (lichthärtend und -aktivierbar) zum Einsatz. Die Klebeverbindungen wurden dabei mit unterschiedlichen Trägermaterialien (Glas und Polycarbonat (PC)) sowie industriell gängigen Klebschichtdicken realisiert.

Die Referenzcharakterisierung der Klebstoffe erfolgte mittels Differenzthermoanalyse (DSC), dielektrischer Analyse (DEA) und rheologisch im Platte/Platte-Rheometer. Die mechanischen Eigenschaften der Klebeverbindungen wurden durch Zugscher- und Centrifugal Adhesion Testing (CAT)-Versuche ermittelt.

Die Ergebnisse der NMR-Messungen an den Klebeverbindungen korrelieren gut mit denen der Referenzverfahren. Somit sind sowohl das Monitoring des Aushärteprozesses direkt in der Klebeverbindung als auch die nachträgliche Bewertung des Aushärtezustandes möglich. Die neue Messmethode zeigt großes Potential für die zerstörungsfreie Qualitätssicherung von Klebeverbindungen direkt im Herstellungsprozess.

### 1. Einleitung

Die Klebtechnik hat sich mittlerweile zu einer der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts entwickelt. Kleben ermöglicht die wirtschaftliche und langzeitstabile Kombination unterschiedlicher Werkstoffe. Treibende Kraft in vielen Industriezweigen ist dabei der Bedarf an Leichtbaulösungen und der Wunsch nach neuartigen Designs. Fügeverfahren wie das Nieten werden dabei immer stärker verdrängt. Eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale – neben der richtigen Vorbehandlung der Fügepartner für eine Klebeverbindung – stellt die Aushärtung des Klebstoffes aufgrund des direkten Zusammenhangs mit den mechanischen Eigenschaften dar. Die Klebstoffaushärtung ist dabei abhängig von den jeweiligen Applikationsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, etc.). Oftmals lassen sich zudem die Herstellerangaben zu Topf- bzw. Verarbeitungszeiten nicht direkt auf die reale Anwendung übertragen. Aus diesem Grund werden für die Aushärtezeit meist große Sicherheitsfaktoren bemessen. Folglich werden nachfolgende Prozessschritte verzögert und die gesamte Wertschöpfung reduziert [1, 2].

Die Klebstoffaushärtung kann im Labor auf unterschiedlichste Weise untersucht werden. Sobald eine Klebeverbindung vorliegt, kann keines dieser Laborverfahren für die Untersuchung des Klebstoffes eingesetzt werden. Ab diesem Moment werden ausschließlich zerstörende Verfahren genutzt. Selbst bei etablierten Methoden der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) sind die Eindringtiefe oftmals zu gering, eine Anwendung bei komplexen Bauteilgeometrien nicht gegeben oder die Kosten zu hoch. Für einen kosteneffizienteren Einsatz von Klebstoffen und ein größeres Anwendervertrauen in die Klebtechnik wird ein ZfP-Verfahren benötigt, welches den Aushärtezustand

zeit- und orts aufgelöst direkt an der Klebeverbindung messen kann [3]. Die berührungslos messende unilaterale NMR hat sich in den letzten Jahren als ein vielversprechendes Prüfverfahren zur Verbesserung der prozessnahen Qualitätssicherung von Klebeverbindungen etabliert. Nachfolgend wird das Verfahren und die Auswertemethoden zur Bestimmung des Aushärtegrads anhand verschiedener Klebstoffe und Klebeverbindungen vorgestellt. Zur Referenzuntersuchung der Klebstoffaushärtung kamen die bewährten Untersuchungsmethoden der DSC, der DEA sowie rheologische Messungen im Platte/Platte-Rheometer zum Einsatz. Die Klebeverbindungen wurden mittels Zugscher-Prüfung und CAT-Verfahren geprüft. Die Ergebnisse der jeweiligen Verfahren werden präsentiert und die Vor- und Nachteile der unilateralen NMR im Vergleich zu den Referenzverfahren diskutiert.

### 2. Stand der Technik und Forschung

Die Charakterisierung und Überwachung der Klebstoffaushärtung erfolgt meist anhand von Labormessmethoden wie der DSC [4–6], DEA [6–8], Infrarot (IR)-Spektroskopie [9–11], Terahertz (THz) [12, 13], Benchtop-NMR [8, 14] sowie der dynamisch-mechanischen Analyse (DMA) [5, 15] bzw. rheologischen Untersuchungen [16, 17]. Diese Verfahren eignen sich aus vielfältigen Gründen (zerstörend, sehr spezifische Probengeometrien, zu geringe Eindringtiefe, fehlende Robustheit gegenüber rauen Produktionsbedingungen, hohe Systemkosten) selten bis gar nicht für die prozessnahe Überwachung der Klebstoffaushärtung an Klebeverbindungen. Auch die bei Harzen

und duroplastischen Faserverbundwerkstoffen mittlerweile etablierte DEA kann aufgrund des Sensors, welcher mit direktem Kontakt zur Fügeebene eingebracht werden muss, nicht für Klebeverbindungen genutzt werden.

Bis dato werden Klebeverbindungen zum Erzielen zuverlässiger und reproduzierbarer Ergebnisse stichprobenartig und zerstörend geprüft. Hierbei stellen die normierte Zugscher-Prüfung und das CAT-Verfahren die etablierten Methoden dar [18].

Einen möglichen Ansatz für eine Prozesskontrolle bietet der Einsatz der Ultraschall (US)-Prüfung. Dabei können sowohl die berührende [4, 8, 15] als auch die berührungsfreie, luftgekoppelte Variante [19, 20] zum Einsatz kommen. Bei dieser Technik liefern die Schalldämpfung und die (longitudinale) Schallgeschwindigkeit materialabhängige Informationen, welche mit dem Aushärtegrad korrelieren.

Eine weitere zerstörungsfreie Prüfmöglichkeit für Klebeverbindungen stellt die unilaterale NMR dar. Dieser Messmethodik liegt die Korrelation der Kernspin-Relaxationszeit mit der Abnahme der molekularen Beweglichkeit von Klebstoffmolekülen zugrunde. Hierdurch kann der Aushärtezustand von Klebstoffen zerstörungsfrei bewertet werden [21]. Der besondere Aufbau des Messsystems ermöglicht dabei eine Überwachung der Klebstoffaushärtung in Tiefen von einigen Millimetern – direkt in der Klebeverbindung und durch die Fügebauteile hindurch.

### 3. Versuchsaufbau und -durchführung

#### 3.1 Untersuchte Klebstoffe und Klebeverbindungen

Für diese Arbeit wurden zwei polyadditionshärtende 2K-Klebstoffe sowie zwei lichtaktivierbare bzw. -härtende 1K-Klebstoffe der Fa. DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA, Windach, verwendet (vgl. Tabelle 1). Die Klebeverbindungen wurden mit Labordeckgläsern (Glas auf Glas) und mit Polycarbonat (PC) (PC auf PC) hergestellt. Die Klebschichtdicke wurde mittels Mikro-Glaskugeln auf eine Dicke von  $(90 \pm 10) \mu\text{m}$  eingestellt. Die PC-Substrate wurden vor dem Kleben gereinigt und die Oberflächen (OF) mittels Vakuum-Ultra-Violet-Strahlung aktiviert.

Tabelle 1. Verwendete Klebstoffe und Herstellerangaben zu Aushärte- und Belichtungszeiten

Klebstoff	Materialbasis	Aushärte- bzw. Belichtungszeiten (bei 23 °C oder *30 °C)
DELO-DUOPOX SJ8665	2K-Epoxidharz	I: Funktionsfestigkeit: 3,5 h II: Funktionsfestigkeit: 5,0 h III: Endfestigkeit: 7 Tage
DELO-PUR 9895	2K-Polyurethan	I: Handfestigkeit: 5,5 h II: Funktionsfestigkeit: 24 h III: Endfestigkeit: 72 h
DELO-KATIOBOND 4594	Modifiziertes Epoxidharz, lichtaktivierbar	*Mind. 11 s (empfohlen 60 s) mit 400 nm und Intensität $200 \text{ mW/cm}^2$
DELO-PHOTOBOND AD491	Modifiziertes Urethanacrylat, lichthärtend	Mind. 3 s mit 400 nm und Intensität $200 \text{ mW/cm}^2$

#### 3.2 LED-Lampe zur Klebstoffaushärtung

Für Aktivierung und Aushärtung der 1K-Klebstoffe wurde die LED-Aushärtelampe DELOLUX 20/400 (Wellenlänge 400 nm) mit dem Steuergerät DELO-UNIPRO Light (beide Geräte von DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA) verwendet. Da das Magnetfeld der unilateralen NMR einen Mindestabstand von ca. 12 cm erfordert, wurde die Lampe in einem sicheren Abstand von 15 cm von den Klebeverbindungen betrieben. Im Vorfeld wurden die Lichtintensitäten bei maximaler Lampenleistung bei Klebeverbindungen mit den verwendeten Substraten mit Dicken von 1,0 mm ermittelt.

Diese betragen für Glas  $(32 \pm 2) \text{ mW/cm}^2$  und für PC  $(29 \pm 2) \text{ mW/cm}^2$ . Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde die Lampe bei den DEA-Messungen ebenfalls in diesem Abstand eingesetzt.

#### 3.3 Referenzprüfungen

Die Klebstoffaushärtung wurde einerseits mittels DSC (DSC 204 F1 Phoenix von NETZSCH-Gerätebau GmbH, Selb, Probenmenge: ca. 15 mg, Heizzyklus: -30 bis +290 °C, Heizrate: 20 K/min) charakterisiert. Die Aushärtung der Klebstoffe erfolgte in den DSC-Tiegeln bei Raumtemperatur (RT). Der Aushärtegrad wurde anhand der Reaktionsenthalpie bestimmt werden. Die rheologischen Untersuchungen wurden mit dem Rheometer Haake Mars III (Thermo Fischer Scientific Inc., Schwerte) durchgeführt. Die Messungen erfolgten im Platte/Platte-Aufbau im Oszillationsmodus (Plattendurchmesser: 20 mm, Messspalt: 0,5 mm, Frequenz: 1 Hz, Deformation: 1 %, Temperatur: 25 °C). Der Aushärtegrad und dessen Kinetik wurden anhand der komplexen Viskosität  $\eta^*$  nachverfolgt.

Die dielektrischen Eigenschaften der Klebstoffe während der Aushärtung wurden mit einer NETZSCH DEA Ionic (NETZSCH-Gerätebau GmbH) bei RT und einer Messfrequenz von 1 Hz untersucht. Dabei wurde die Ionenviskosität als Maß für die Aushärtung verwendet.

Die Festigkeiten der Klebeverbindungen mit den 2K-Klebstoffen wurden mittels Zugscher-Prüfung in Anlehnung an DIN 1465 [22] mit einer Universal-Prüfmaschine Zwick Z250 (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm) geprüft. Weiterhin kam für die CAT-Prüfung der Klebeverbindungen aller Klebstoffe ein Adhesion Analyser LUMiFrac 200 (LUM GmbH, Berlin) verwendet. Bei beiden Verfahren wurden Klebeverbindungen mit PC untersucht. Diese mussten bereits eine gewisse Aushärtung (Handfestigkeit) aufweisen.

Die 2K-Klebstoffe wurden mit allen genannten Referenzverfahren geprüft. Für die lichthärtenden 1K-Klebstoffe kamen aufgrund des fehlenden Zugangs für die Beleuchtung nur die DEA sowie die Zugscher- bzw. CAT-Prüfung zum Einsatz.

#### 3.4 Profilmessungen an Klebeverbindungen mittels unilateraler NMR

Für die Untersuchung der Klebstoffe und Klebeverbindungen wurde die NMR-Mouse (Mobile Universal Surface Explorer) PM5 (Abb. 1 links) mit dem Spektrometer Kea<sup>2</sup> (Magritek GmbH, Aachen) und mit entsprechendem Hochpräzisionslift verwendet. Das Messsystem verfügt über eine besondere Anordnung mehrerer Niederfeld-Permanentmagneten.

Dabei existiert an einer festen Position im Randfeld der Magneten ein sog. sensitives Volumen, in dem die Feldlinien des statischen Magnetfelds parallel zur OF der Magnete verlaufen. Durch Nutzung einer speziellen Hochfrequenz (HF)-Spule können berührungsfrei mit einseitigem Probenzugang NMR-Relaxationsmessungen durchgeführt werden [23], indem die zu untersuchenden Proben in dem sensitiven Volumen platziert oder durch dieses bewegt werden (vgl. Abb. 1 rechts).

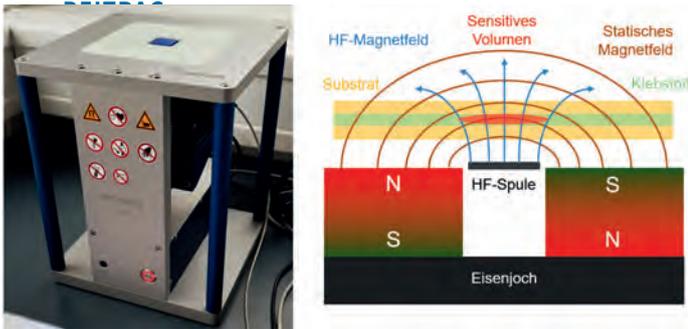


Abb. 1: Links: Versuchsaufbau NMR-Mouse PM5 mit Hochpräzisionslift. Rechts: Funktionsprinzip der unilateralen NMR

Die Magnetfeldstärke der verwendeten NMR-Mouse PM5 beträgt 0,47 T und die HF-Spule wird bei der Frequenz 20,17 MHz betrieben. Die maximale Messtiefe im gewählten Aufbau mit einem 2,0 mm-Spacer zwischen Magneten und Spulenplatte beträgt 3,3 mm mit einer lateralen Auflösung von 13 x 13 mm<sup>2</sup> und einer Tiefenauflösung von bis zu 10 µm.

Bei der Charakterisierung der Klebstoffaushärtung mittels NMR kommt der transversalen Relaxationszeit  $T_2$  die größte Bedeutung zu. Diese ist sensitiv auf die molekulare Beweglichkeit der Polymerketten und wird während der Aushärtung des Klebstoffs durch die Netzwerkbildung ebenso wie die Beweglichkeit verringert. Die  $T_2$ -Relaxationszeiten können mit CPMG-Multi-Echo-Sequenzen (nach Carr, Purcell, Meiboom und Gill) bestimmt werden [24, 25]. Eine alternative Auswertemethode stellt die Verwendung von Echosummen dar [23]. Dabei handelt es sich um Integrale der Signalamplitude über eine definierte Anzahl aufeinanderfolgender Echos. Nach Normierung stellt die Echosumme einen amplitudengewichteten Mittelwert der Relaxationszeit  $T_2$  dar. Dieser direkte Zusammenhang mit der  $T_2$ -Zeit erlaubt die Korrelation der Echosumme mit dem Aushärtgrad von Klebstoffen [21].

Die Position des sensitiven Volumens ist temperaturabhängig und kann sich bei Veränderung der Magnettemperatur verschieben [21, 23]. Aus diesem Grunde wurde die Magnettemperatur mit Thermoelementen und die Probentemperatur zusätzlich mittels IR-Thermometer bzw. IR-Kamera überwacht. Dies war insbesondere bei den sehr reaktiven 1K-Klebstoffen relevant.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Ergebnisse von DSC, Platte/Platte-Rheometer und DEA

Die Ergebnisse der DSC-Messungen und rheologischen Untersuchungen an den 2K-Klebstoffen sind in Abb. 2 gezeigt. Darin ist gut zu erkennen, dass die Peakfläche aus der DSC mit zunehmender

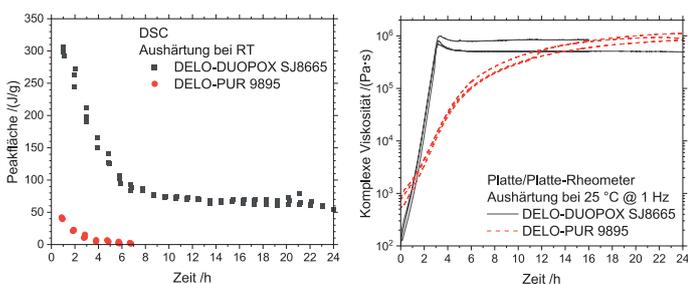


Abb. 2: Ergebnisse der DSC-Messungen (links) und der rheologischen Untersuchungen (rechts) an den 2K-Klebstoffen

Aushärtung abnimmt. Ebenso kann die Kinetik der beiden Klebstoffe anhand der Steilheit des Abfalls charakterisiert werden. Der Verlauf für DELO-DUOPOX SJ8665 ist etwas steiler als bei DELO-PUR 9895. Ähnlich verhält es sich mit der Viskosität im Platte/Platte-Rheometer. Diese steigt je nach Kinetik unterschiedlich steil und erreicht bei Aushärtung ein Plateau. Die Messungen sind gut reproduzierbar, allerdings variiert das finale Viskositätsniveau in Abhängigkeit der Präparation und lokalen Durchmischung der Klebstoffe bzw. der Anhaftung an den Messplatten.

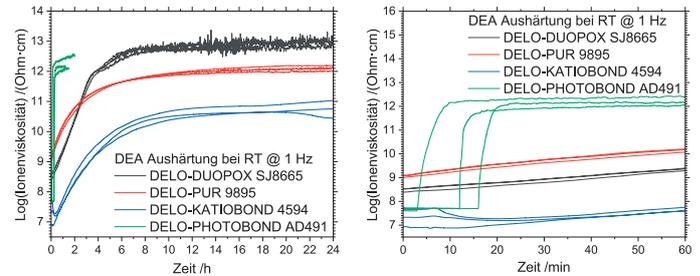


Abb. 3: Ergebnisse der DEA-Messungen an den 2K- und 1K-Klebstoffen (links) und Vergrößerung des Anfangsbereichs (rechts)

Die Resultate der DEA-Messungen für alle verwendeten Klebstoffe sind in Abb. 3 links dargestellt. Die unterschiedliche Aushärtekinetik der Klebstoffe ist ebenfalls gut zu erkennen. In der Vergrößerung des Anfangsbereichs, vgl. Abb. 3 rechts, ist das unterschiedliche Verhalten der jeweiligen Klebstoffe gut zu erkennen. Während die 2K-Systeme direkt einen ansteigenden Verlauf zeigen, kann für DELO-KATIOBOND 4594 nach der Belichtung zunächst ein Signalabfall beobachtet werden. Dieser rührt von der kationischen Reaktion, welche durch die Belichtung aktiviert wird. Die zeitlich versetzten Zeitpunkte des Einschaltens der LED-Lampe sind für DELO-PHOTOBOND AD491 gut zu erkennen, da der Klebstoff direkt mit der Belichtung einen Signalanstieg aufweist. Auch hier ist die gemessene finale Ionenviskosität abhängig von der Klebstoffmenge auf dem DEA-Sensor. Die entstehende Reaktionswärme beim Aushärten größerer Materialmengen beschleunigt den Vorgang zusätzlich. Bei den verwendeten vergleichbaren Klebstoffschichtdicken waren die Messungen aber sehr gut reproduzierbar.

### 4.2. Ergebnisse der Zugscher- und CAT-Prüfungen

In Abb. 4 links sind die Ergebnisse der Zugscher-Prüfungen mit den 2K-Klebstoffen und in Abb. 4 rechts sind die Ergebnisse der CAT-Prüfungen an den PC-Klebeverbindungen aller Klebstoffe zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Aushärtung gezeigt. Obwohl die Klebstoffe wie bei den vorhergehenden Versuchen ausreichend zeitlich aushärten konnten, ist zu erkennen, dass bei allen Versuchen

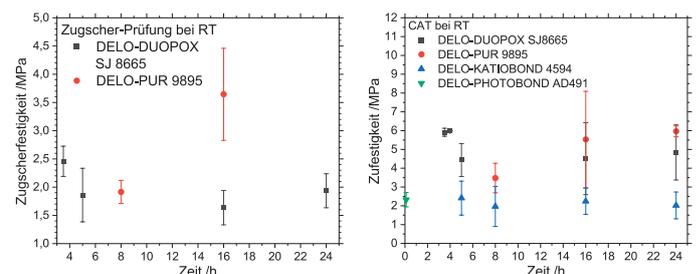


Abb. 4: Ergebnisse der Zugscher- (links) und CAT-Prüfungen (rechts)

dennoch nur geringe Werte (vergleichbar mit der Handfestigkeit) erreicht werden konnten. Insbesondere bei der Bewertung der Bruchbilder zeigte sich, dass die Paarung der Klebstoffe mit PC trotz der durchgeführten OF-Aktivierung nicht ideal war. Bei den 1K-Klebstoffen kann zusätzlich eine unzureichende Lichtintensität für die Ergebnisse mitverantwortlich sein. Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich eine große Häufung unerwünschter Adhäsivbrüche (Klebschicht haftet nicht auf Substrat bzw. Stempel des Lumifrac). Dies unterstreicht somit die Wichtigkeit der richtigen Materialkombination und einer hinreichenden OF-Vorbehandlung. Dieser Aspekt ist daher Gegenstand laufender Forschungsaktivitäten.

#### 4.3 Aushärtungsüberwachung an 2K- und 1K-Klebstoffen mit unilateraler NMR

Bei der Aushärteüberwachung mit der unilateralen NMR wurden die normierten Echosummen von 128 Echos verwendet. Sobald die Echosummen das Rauschlevel erreicht haben, ist der Klebstoff für die NMR unbeweglich und somit ausgehärtet. In Abb. 5 sind die Ergebnisse für alle verwendeten Klebstoffe bei Klebeverbindungen mit Glas und PC sowie exemplarisch die Echosummen bei unterschiedlichen Messtiefen für die Klebeverbindung von PC mit DELO-PUR 9895 gezeigt.

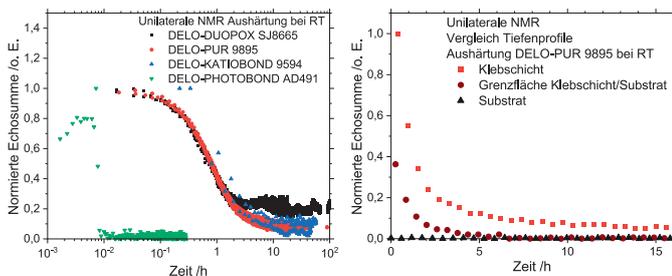


Abb. 5: Normierte Echosummen der untersuchten Klebstoffe (links) und exemplarischer Vergleich unterschiedlicher Messtiefen für Klebeverbindung von PC mit DELO-PUR 9895 (rechts)

Die jeweilige Aushärtekinetik der Klebstoffe kann mit der unilateralen NMR sehr gut unterschieden werden. Die verschiedenen Klebstoffe zeigen dabei wie bereits bei den Referenzverfahren unterschiedliche Signalniveaus beim Erreichen der für die NMR finalen Aushärtung.

Der Klebstoff DELO-PHOTOBOND AD491 zeigt direkt nach der Belichtung zunächst einen Signalanstieg, bevor das Signal schnell abklingt. Grund für das erhöhte Signal ist die entstehende Reaktionswärme beim Aushärten.

Die unterschiedlichen Tiefenprofile stammen aus der Klebschicht, der Grenzfläche von Klebschicht und Substrat sowie direkt aus dem Substrat. Substrat (PC) und Klebstoff unterscheiden sich so stark im Signal, dass eine Trennung problemlos möglich ist. Das Signal der Grenzfläche setzt sich anteilig aus Klebstoff und Substrat zusammen. Der Verlauf ist aber vergleichbar mit dem der Klebschicht. Dabei ist die Trennschärfe für die Grenzfläche PC-Klebstoff abhängig von der Tiefenauflösung (Höhe des sensitiven Volumens).

Die Messungen mit unterschiedlichen Substraten und Klebschichtdicken werden durch eine Normierung vergleichbar. Ohne Normierung sind die Echosummen abhängig vom jeweiligen Klebstoff und der Klebschichtdicke bzw. des Anteils an Klebstoff im sensitiven Volumen im Vergleich zum Substrat. Über Reaktionskinetik und Restbeweglichkeit kann ggf. eine Unterscheidung verschiedener Klebstoffe erfolgen.

Durch Verwendung von dünnen Klebfilmern und ausreichend Abstand der Lampe beim Aushärten konnte auch eine Temperaturproblematik für das Magnet-Messsystem umgangen werden. Während der Messungen schwankten die direkt auf den Magneten gemessenen Temperaturen um maximal 2 K. Die Verfälschung des Messsignals durch die Temperaturen ist somit vernachlässigbar.

Insgesamt ist die unilaterale NMR sehr sensitiv auf Veränderungen der molekularen Beweglichkeit von Klebstoffen. Bei dünnen Klebschichten lassen sich auch exotherme Aushärtereaktionen ohne Beeinflussung des Magnetsystems beobachten. Bei der Wahl der Messparameter gilt es, stets zwischen hoher Sensitivität und kurzer Messdauer abzuwägen. Messungen bei gleichen Parametern sind sehr gut reproduzierbar und auch Variationen in der Klebschichtdicke lassen sich durch Normierung der Daten ausgleichen.

Dies kann zur Erstellung von Vorhersagemodellen für die Prozessüberwachung und -kontrolle genutzt werden und gehört zu den Themenstellungen aktueller Forschungsarbeiten. Dabei kann der vollständige Herstellungsvorgang von der Mischung des Klebstoffs bis zur späteren Endkontrolle des geklebten Bauteils in einem Stück betrachtet werden – und nicht getrennt in Klebstoff (DSC, DEA, Rheometer) und Klebeverbindung (Zugscher-Prüfung, CAT). Für eine Modellbildung müssen die Erkenntnisse der jeweiligen Referenzverfahren und auch der Herstellungsprozess, insbesondere die OF-Vorbehandlung, aber miteinbezogen werden.

#### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendbarkeit des unilateralen NMR zur Überwachung von Klebeverbindungen wurde mit verschiedenen Klebstoffen erprobt. Hierfür kamen 2K- sowie lichterhärtende 1K-Klebstoffsysteme zum Einsatz. Die Klebeverbindungen wurden dabei mit unterschiedlichen Trägermaterialien (Glas und PC) sowie industriell gängigen Klebschichtdicken realisiert.

Die Referenzcharakterisierung der Klebstoffe erfolgte einerseits mittels DSC, DEA und rheologisch im Platte/Platte-Rheometer. Die mechanischen Eigenschaften der Klebeverbindungen wurden durch Zug-Scher- und CAT-Versuche ermittelt.

Die Ergebnisse der NMR-Messungen an den Klebeverbindungen korrelieren gut mit denen der Referenzverfahren. Somit sind sowohl das Monitoring des Aushärteprozesses direkt in der Klebeverbindung als auch die nachträgliche Bewertung des Aushärtezustandes möglich. Die Wichtigkeit der richtigen Kombination von Substratmaterial, OF-Vorbehandlung und Klebstoff konnte im Rahmen von Zugscher- und CAT-Prüfungen demonstriert werden.

Die unilaterale NMR zeigt großes Potential für die zerstörungsfreie Qualitätssicherung von Klebeverbindungen direkt im Herstellungsprozess – v. a. durch die Möglichkeit, durch Fügebauteile hindurch, den Klebstoff zu überwachen. Mit dem Messverfahren können kostenaufwändige und anwendungsferne Laboruntersuchungen perspektivisch substituiert und eine Online-Prozesskontrolle von Klebeverbindungen ermöglicht werden.

Weiterführende Untersuchungen zu einer möglichen Korrelation der Ergebnisse der unilateralen NMR mit der Festigkeit von Klebeverbindungen sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Wahl der richtigen Paarung aus Substrat und Klebstoff. Zudem werden die Einflüsse unterschiedlicher Vorbehandlungsmethoden und Probengeometrie im Detail untersucht. Die Ergebnisse sollen unter Einbeziehung der aktuellen Referenzverfahren zur Erstellung von Prozessmodellen zur beschleunigten Aushärtungsüberwachung genutzt werden bzw. aktuelle Methoden erweitern.

## Danksagung

Das Vorhaben 20564 N der Forschungsvereinigung FSKZ e.V. wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung.

Weiterhin danken wir der Fa. DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA für die Bereitstellung der Klebstoffe und LED-Aushärtelampe.

## LITERATUR

- [1] Adhäsion Kleben & Dichten und Industrieverband Klebstoffe e. V., Hg., *Handbuch Klebtechnik 2018*, 2018. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [2] G. Habenicht, *Kleben – erfolgreich und fehlerfrei: Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie*, 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Vieweg, 2016.
- [3] M. Doobe, Hg., *Kunststoffe erfolgreich kleben: Grundlagen, Klebstofftechnologien, Best-Practice-Beispiele*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [4] A. Maffezzoli, E. Quarta, V. A. M. Luprano, G. Montagna und L. Nicolais, „Cure monitoring of epoxy matrices for composites by ultrasonic wave propagation“, *J. Appl. Polym. Sci.*, Jg. 73, Nr. 10, S. 1969–1977, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1097-4628(19990906)73:10<1969::AID-APP16>3.0.CO;2-Z.
- [5] G. Hülder, C. Dallner, G. W. Ehrenstein und E. Schmachtenberg, „Aushärtung von EP-Haftklebstoffen für die nachträgliche Bauwerksbewehrung mit geklebten CFK-Lamellen“, *Kunststofftechnik/Journal of Plastics Technology*, Jg. 3, Nr. 5, 2007.
- [6] R. Hardis, J. L.P. Jessop, F. E. Peters und M. R. Kessler, „Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 49, S. 100–108, 2013, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.01.021.
- [7] L. H. Garden, D. Hayward und R. A. Pethrick, „Dielectric non-destructive testing approach to cure monitoring of adhesives and composites“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Jg. 221, Nr. 4, S. 521–533, 2007, doi: 10.1243/09544100JAERO158.
- [8] R. E. Challis et al., „Following network formation in an epoxy/amine system by ultrasound, dielectric, and nuclear magnetic resonance measurements: A comparative study“, *J. Appl. Polym. Sci.*, Jg. 88, Nr. 7, S. 1665–1675, 2003, doi: 10.1002/app.11822.
- [9] S. Cholake et al., „Quantitative Analysis of Curing Mechanisms of Epoxy Resin by Mid- and Near- Fourier Transform Infra Red Spectroscopy“, *DSJ*, Jg. 64, Nr. 3, S. 314–321, 2014, doi: 10.14429/dsj.64.7326.
- [10] S. K. Tomlinson, O. R. Ghita, R. M. Hooper und K. E. Evans, „The use of near-infrared spectroscopy for the cure monitoring of an ethyl cyanoacrylate adhesive“, *Vibrational Spectroscopy*, Jg. 40, Nr. 1, S. 133–141, 2006, doi: 10.1016/j.vibspec.2005.07.009.
- [11] S. Radice und M. Bradley, „Time-Based FT-IR Analysis of Curing of Polyurethanes“, *Solvay Solexis; Thermo Fisher Scientific, Application Note 51255*, 2007.
- [12] C. Jansen, S. Wietzke, H. Wang, M. Koch und G. Zhao, „Terahertz spectroscopy on adhesive bonds“, *Polymer Testing*, Jg. 30, Nr. 1, S. 150–154, 2011, doi: 10.1016/j.polymeresting.2010.11.005.
- [13] S. Sommer et al., „Cure monitoring of two-component epoxy adhesives by terahertz time-domain spectroscopy“, *Polym. Sci. Ser. B*, Jg. 58, Nr. 6, S. 769–776, 2016, doi: 10.1134/S1560090416060154.
- [14] H. Kimoto et al., „Pulsed NMR study of the curing process of epoxy resin“ (eng), *Analytical sciences: the international journal of the Japan Society for Analytical Chemistry*, Jg. 24, Nr. 7, S. 915–920, 2008, doi: 10.2116/analsci.24.915.
- [15] F. Lionetto und A. Maffezzoli, „Relaxations during the postcure of unsaturated polyester networks by ultrasonic wave propagation, dynamic mechanical analysis, and dielectric analysis“, *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, Jg. 43, Nr. 5, S. 596–602, 2005, doi: 10.1002/polb.20359.
- [16] C. Russo, X. Fernández-Francos und S. de La Flor, „Rheological and Mechanical Characterization of Dual-Curing Thiol-Acrylate-Epoxy Thermosets for Advanced Applications“ (eng), *Polymers*, Jg. 11, Nr. 6, 2019, doi: 10.3390/polym11060997.
- [17] M. Mravljak und M. Šernek, „The Influence of Curing Temperature on Rheological Properties of Epoxy Adhesives“, *Drvna ind.*, S. 19–25, 2011, doi: 10.5552/drind.2011.1042.
- [18] E. Kraus, B. Baudrit, P. Heidemeyer und M. Bastian, „Neue Methoden zur Prüfung geklebter Kunststoffe: Der Festigkeit schnell auf der Spur“ in *Kunststoffe erfolgreich kleben: Grundlagen, Klebstofftechnologien, Best-Practice-Beispiele*, M. Doobe, Hg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018, S. 170–177.
- [19] G. Schober et al., „Überwachung der Klebstoffaushärtung mittels luftgekoppelten Ultraschalls“ in *DGZfP-Jahrestagung 2018*, Leipzig, 2018.
- [20] G. Schober, L. Orf, B. Baudrit, M. Bastian und T. Hochrein, „In-line-Überwachung der Klebstoffaushärtung mit berührungslosem Ultraschall“, *JOINING PLASTICS*, Jg. 13, Nr. 2, S. 90–95, 2019.
- [21] N. Halmen et al., *Vernetzungsgrad und Aushärtung schnell bestimmt: Prozessnahe Qualitätssicherung mittels unilateraler NMR*, 1. Aufl. Herzogenrath: Shaker, 2018.
- [22] *Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen*, DIN EN 1465:2009-07, 2009.
- [23] F. Casanova, J. Perlo und B. Blümich, Hg., *Single-Sided NMR*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [24] H. Y. Carr und E. M. Purcell, „Effects of Diffusion on Free Precession in Nuclear Magnetic Resonance Experiments“, *Phys. Rev.*, Jg. 94, Nr. 3, S. 630–638, 1954, doi: 10.1103/PhysRev.94.630.
- [25] S. Meiboom und D. Gill, „Modified Spin-Echo Method for Measuring Nuclear Relaxation Times“, *Review of Scientific Instruments*, Jg. 29, Nr. 8, S. 688–691, 1958, doi: 10.1063/1.1716296.

Kontakt: n.halmen@skz.de

BEITRAG 7

# Röntgenographische Spannungsmessung Vergleich von $\sin^2 \psi$ - und $\cos \alpha$ -Verfahren

Lothar Spieß<sup>1</sup>, Sebastian Matthes<sup>1</sup>, Alexander Grüning<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Ilmenau, Inst. Werkstofftechnik, Gustav-Kirchhoff-Str. 5, 98693 Ilmenau

<sup>2</sup> ZF Friedrichshafen AG, Research & Development, Graf-von-Soden-Platz 1, 88046 Friedrichshafen

**KURZFASSUNG** | Röntgenographische Spannungsmessungen werden seit Mitte der 1950er Jahre entwickelt. Bisher wird hier das normierte  $\sin^2 \psi$ -Verfahren [1, 2] eingesetzt. Die vor Ort Messung an konkreten Bauteilen, wie z. B. Verzahnungen an Getrieben, werden immer wichtiger. Nachteil des  $\sin^2 \psi$ -Verfahrens ist, dass es oftmals unmöglich ist, im Zahngrund einer zu messenden Verzahnung alle notwendigen Verkippungen ohne Abschattung vornehmen zu können. Ebenso werden die Winkelbereiche sequentiell abgescannt, so dass für die Ermittlung der röntgenographischen Spannung mindestens 15 min. Messzeit notwendig sind.

Digitale Bildplatten und kompakte Röntgengeneratoren führten zur Entwicklung von transportablen Geräten, die nach dem schon 1978 von TAIRA beschriebenen  $\cos \alpha$ -Verfahren arbeiten [3]. Umfangreiche Tests und die Bestimmung von Einflussparametern wie Probenpositionierung, Abschattung, Brennfleckuntersuchungen und äußerer Lichteinfall wurden von MATTHES durchgeführt [4, 5].

## 1. Einleitung und generelle Anmerkungen zu Spannungsmessungen

Mittels selbst gewählter Vergleichskriterien werden die Diffraktometer Bruker D8 Davinci mit Halbleiter-Streifen-Detektor LynXEye und das Gerät Pulstec  $\mu$ -X360s und die beiden Methoden und deren Ergebnisse an einer Hartmetall Wolframcarbidprobe (WC) verglichen. Zu dieser Probe liegen umfangreiche Messungen mit verschiedenen Konfigurationen des  $\sin^2 \psi$ -Verfahrens vor [2].

Bei röntgenographischen Spannungsmessungen ist immer zu beachten, dass hier Unterschiede im Sub- und Pikometerbereich der Netzebenenabstände gemessen werden. Wichtig ist, den Spannungstyp, also Druckspannungen, im Ergebnis negative Spannungswerte oder positive Spannungswerte, als Zugspannungen zu bestimmen. Bei Metallen wird ein Bereich von  $\pm 50$  MPa als quasi spannungsfrei angesehen. Ein Messfehler im Bereich eines Spannungswertes von  $\approx 10\%$  ist dabei ein sehr guter Wert. In der Praxis werden z. T. selbst Fehler von bis zu 50% vom Spannungswert akzeptiert.

Die Dehnungen  $\epsilon$  der Netzebenen der Kristallite/Körner in unterschiedlichen Raumrichtungen werden dabei gemessen. Über das HOOKSche Gesetz und unter Verwendung der BRAGGSchen Gleichung werden dann die Spannungen bestimmt. Die Absolutwerte der Spannungen hängen von den verwendeten röntgenographischen Konstanten ab. Da bei dem Vergleich mit unterschiedlichen Strahlungen, Cr-, Cu- und Mo-K $\alpha$  Strahlungen gearbeitet wurde, sind auch die untersuchten Netzebenen unterschiedlich und somit die röntgenographischen Konstanten. Für die Untersuchung der Wolframcarbidprobe wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Konstanten verwendet.

Tab. 1: Röntgenografische Spannungskonstanten nach Kröner für die Netzebenen von Wolframkarbid, Dichte 15,63 g/cm<sup>3</sup>, t - Eindringtiefe der Röntgenstrahlung 63%

Strahlung	(h k l)	2 $\theta$ [°]	Poissonzahl	Young [MPa]	$s_1$ [MPa <sup>-1</sup> ]	1/2 $s_2$ [MPa <sup>-1</sup> ]	t [ $\mu$ m]
Cu-K $\alpha$	(2 1 1)	117,303	0,234	665897	$-3,510 \cdot 10^{-7}$	$1,853 \cdot 10^{-6}$	1,715
Cr-K $\alpha$	(1 0 2)	135,886	0,240	755772	$-3,176 \cdot 10^{-7}$	$1,641 \cdot 10^{-6}$	0,686
Mo-K $\alpha$	(1 1 1)	31,829	0,232	686398	$-3,380 \cdot 10^{-7}$	$1,795 \cdot 10^{-6}$	0,994

Tab. 2: Ermittlung Spannungstensor  $\sigma_{ijhkl}$ , Orientierungsvektor  $O\sigma_{ij}$  und Profilmaximum zu Untergrund PMU von WC an z. T. unterschiedlichen Netzebenen mit unterschiedlichen Detektoren (2D: MGEM-Flächendetektor; PSD: Halbleiterstreifendetektor mit 192 Linien; Szinti: Szintillationsdetektor); mit/ohne Nickelfilter; DLB: Doppellochblende Durchmesser; R: Diffraktometerradius (Detektorradius); t: Zählzeit pro Step; SW: Schrittweite; Ges.: Gesamtzeit; mit dem  $\sin^2 \psi$ -Verfahren und Cu-K $\alpha$ -Strahlung

(h k l)	$\sigma_{ijhkl}$ [MPa]	$\pm$ Fehler [MPa]	$O\sigma_{ij211}$	PMU
2D; mit; DLB = 1 mm; R= 420 (200) mm; 100 s pro Frame; Ges. 15 min				
{211}	$\begin{pmatrix} -1051 & -98 \\ -98 & -1040 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 252 & 271 \\ 271 & 276 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 43,3^\circ & 133,3^\circ \\ 46,7^\circ & 46,3^\circ \end{pmatrix}$	2,20
PSD; ohne; DLB = 1 mm; R= 420 mm; t= 96 s; SW = 0,02"; Ges. 75 min				
{211}	$\begin{pmatrix} -1379 & -30 \\ -30 & -1550 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 21 & 20 \\ 20 & 21 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 80,3^\circ & 9,7^\circ \\ 9,7^\circ & 99,7^\circ \end{pmatrix}$	12,00
Szinti; ohne; DLB = 2 mm; R= 300 mm; t = 10 s; SW = 0,04"; Ges. 13 h				
{211}	$\begin{pmatrix} -1225 & 23 \\ 23 & -1206 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 76 & 71 \\ 71 & 76 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 33,8^\circ & 123,8^\circ \\ 56,2^\circ & 33,8^\circ \end{pmatrix}$	1,47

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse an der WC-Probe an der (2 1 1) Netzebene, gemessen mit dem  $\sin^2 \psi$ -Verfahren und Cu-K $\alpha$  Strahlung aufgeführt. Weil hier eine vollständige Bestimmung des Spannungstensors erfolgt ist, sind die Messzeiten sechs mal so hoch, da die Probe auch noch in sechs verschiedenen  $\phi$ -Stellungen gemessen wird. Bei allen Messungen werden Druckspannungen ermittelt. Bei Messungen mit dem 2D-MGEM Flächenzähler war begünstigend, dass mit der gleichen Messung noch die (2 1 0); (2 0 2) und die (1 0 3) Netzebene mit vermessen werden konnte [2]. Generell ist der Fehler aber ca. 10 mal größer als mit der sequentiellen Abtastung. Für Routineuntersuchungen ist aber eine Messzeit nur einer Normalspannung mit PSD von ca. 13 min. noch sehr lang.

Eine Messung an der (2 1 1)-Interferenz in Messrichtung ergibt mit dem  $\sin^2 \psi$ -Verfahren eine Normalspannung von  $(-1127 \pm 81$  MPa). Hier wurden die in Abb. 1a in sechs verschiedenen  $\psi$ -Richtungen aufgenommenen Profile benutzt. Der Wert wird aus der linearen Regression der Interferenzpositionen im  $\sin^2 \psi$ -Plot, Abb. 2a, ermittelt. Wertet man mit Schubspannungen  $\tau_{xy}$  aus, elliptische Regression, Abb. 2a, vergrößert sich die gemessene Spannung auf  $(-1344 \pm 136$  MPa) und es wird eine Schubspannung  $\tau_{xy} = (121 \pm 67$  MPa) ermittelt.

Mit dem Gerät Pulstec  $\mu$ -X360s (Cr-Strahlung), wurde an der Probe eine Normalspannung an der (1 0 2) Netzebene von  $(-1444 \pm 57 \text{ MPa})$  und eine Schubspannung  $\tau_{xy}$  von  $(-29 \pm 25 \text{ MPa})$  in 49 s Messzeit gemessen.

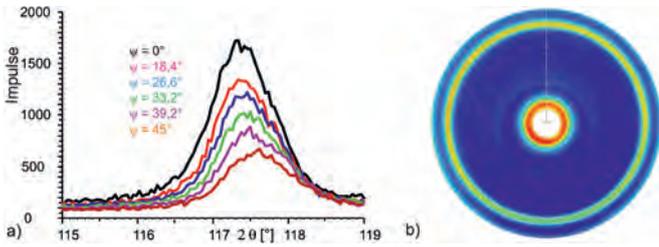


Abb. 1: Messdaten a) von dem  $\sin^2 \psi$ -Verfahren, 6 Interferenzprofile (2 1 1)-WC bei unterschiedlichen Verkipfungswinkeln  $\psi$ , Messzeit 13 min. b) DEBYE-SCHERRER-Ring bei der  $\cos \alpha$ -Methode, (1 0 2)-WC, Messzeit 49 s

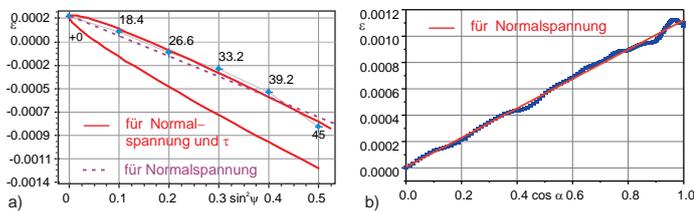


Abb. 2: Regression aus gemessenen Dehnungen in verschiedenen Richtungen a) bei dem  $\sin^2 \psi$ -Verfahren aus sechs Messwerten b) bei dem  $\cos \alpha$ -Verfahren aus 125 Richtungen

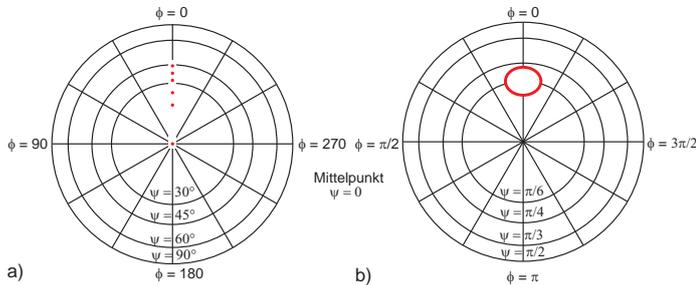


Abb. 3: Stereografische Projektion der Lagenkugel (winkeltreu) inklusive der Messbereiche einer Messung für a) das  $\sin^2 \psi$ -Verfahren - hier mindestens sechs Einzelmessungen notwendig b) die  $\cos \alpha$ -Methode

Nach Wechsel auf Mo-Anode wurde an der WC-Probe an der (1 1 1) Ebene eine Normalspannung von  $(-1173 \pm 21 \text{ MPa})$  und eine Schubspannung  $\tau_{xy}$  von  $(58 \pm 25 \text{ MPa})$  in 101 s Messzeit gemessen.

In Abb. 3 sind für die zwei Messmethoden die unterschiedlichen Bereiche bei der Messdatenaufnahme gezeigt. Bei der  $\psi$ -Verkipfung muss berücksichtigt werden, dass der Messfleck elliptisch verkippt/wandert und dass die Eindringtiefe  $t$  kleiner wird. Dadurch verringert sich das Messvolumen, deshalb werden die Maximalintensitäten bei  $\psi = 0^\circ \approx 1700$  counts zu  $\psi = 45^\circ \approx 600$  counts kleiner.

## 2. Vergleich der $\sin^2 \psi$ - und der $\cos \alpha$ -Methode

Das konventionelle Diffraktometer Bruker D8 Davinci ist allein durch seine Baugröße und Komponenten auf einen stationären Betrieb ausgelegt. Zusätzlich ist der Probenraum begrenzt, wodurch Teile sehr häufig zerstörend bearbeitet werden müssen, um die ge-

wünschte Probenstelle vermessen zu können. Durch das Trennen von Prüflingen ist es möglich, dass die Spannungszustände an der Messstelle verändert werden.

Tab. 3: Vergleich der Methoden an konkreten Geräten

$\sin^2 \psi$ -Methode (Bruker D8 Davinci)	Vergleichskriterium	$\cos \alpha$ -Methode (Pulstec $\mu$ -X360s)
hoch: Wasserkühlung, Goniometer, Strahlenschutzschrank, evtl. Gasflaschen, nicht transportabel	Equipmentumfang	gering: Sensor- und Stromversorgungseinheit; Gesamtgewicht: ca. 11 kg
konstanter $\varphi$ -Winkel bei verschiedenen Einstrahlwinkeln, Abb. 3a	Messbereich	viele $\varphi$ -Winkel bei konstantem Einstrahlwinkel, siehe Abb. 3b
exakte Ausrichtung der Probe erforderlich, im Vergleich hohe Messzeit	Zeitaufwand	Einrichtung der Messung: gering Messzeit + Auswertung: gering
Halbleiter-Streifendetektor: hohe Quantenausbeute	Detektion	zwei-dimensionale Bildplatte mit digitaler Lumineszenzspektroskopie: geringe Quantenausbeute
Probengröße durch Strahlenschutzkabine und Goniometergröße begrenzt, dadurch oftmals aufwendige zerstörende Probenvorbereitung	Einsatzgebiete	jegliche Probendimensionen vermessbar; Gerät auch mobil einsetzbar
sehr viel Erfahrung vorhanden; etabliertes Verfahren; liefert zuverlässige Werte	Know-How	neu entwickelte Technik; Erfahrungen und Erkenntnisse müssen noch gesammelt werden; Vertrauen in die Technik muss aufgebaut werden
LEPTOS V7 (Fa. Bruker)	Auswertesoftware	Geräteintern

Das Pulstec  $\mu$ -X360s ist durch seine geringe Baugröße und das geringe Gewicht für den mobilen Einsatz konzipiert. Somit können Proben von kleinem Ausmaß bis hin zu fertigen Anlagen zerstörungsfrei geprüft werden. Durch die Detektionstechnik mit einer Bildplatte bei der  $\cos \alpha$ -Methode, die im Vergleich einen größeren Messbereich abdeckt, ist eine aufwendige und winkelgenaue Einrichtung der Messung, wie beim  $\sin^2 \psi$ -Verfahren, nicht notwendig. Allerdings ist darauf zu achten, dass während der Messung keine Abschnitte des DEBYE-SCHERRER-Rings durch den Probekörper abgeschattet werden, was zu einem Informationsverlust führen würde. Weiterhin ist der Zeitaufwand einer vollständigen Messung durch eine kurze Expositionszeit von 10 s – 120 s (je nach Kollimator) als sehr gering einzuschätzen. Zusätzlich wäre es möglich einen bestimmten Automatisierungsgrad in diese Technik einzubringen z. B. durch

einen Roboterarm, was sich besonders in der Serienteilprüfung vorteilhaft auswirken würde. Der deutlich geringere Energiebedarf von max. 50 W führt im Vergleich zum Bruker D8 DAVINCI mit ca. 2 000 W zu verminderten Betriebskosten.

Die Gegenüberstellung der wichtigsten Vergleichskriterien der beiden Verfahren (Geräte) ist in Tabelle 3 zu sehen.

Nach dem bisherigen Erkenntnisstand sind die, mit dem Pulstec  $\mu$ -X360s (cos  $\alpha$ -Methode) als gleichwertig anzusehen. Das Gerät weist keine ersichtlichen Nachteile gegenüber dem Bruker D8 DAVINCI (sin<sup>2</sup>  $\psi$ -Methode) auf. Im Gegenteil, die sehr schnellen Messungen machen es besonders für die industrielle Anwendung sehr interessant. Trotz der schon seit einigen Jahren bestehenden Idee der cos  $\alpha$ -Technik (1978 – TAIRA et. al. [3]) wurden die ersten kommerziellen Geräte erst im Jahr 2012 (Pulstec  $\mu$ -X360) vorgestellt. Dementsprechend kann die Methodik noch als „neue Technik“ eingestuft werden. Daraus resultiert, dass Erfahrungen und Erkenntnisse über das Gerät bzw. die Methode erst gewonnen werden müssen. Dem gegenüber steht die etablierte Methode des sin<sup>2</sup>  $\psi$ -Verfahrens, das in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich verbessert wurde (z. B. Detektortechnologie) und zuverlässige Werte liefert.

Die neue Methode ist bezüglich Genauigkeit und Präzision mit dem sin<sup>2</sup>  $\psi$ -Verfahren vergleichbar. Durch die zunehmende Verbreitung der cos  $\alpha$ -Methode wird diese kontinuierlich weiterentwickelt und sich, basierend auf den gewonnen Erfahrungswerten, zu einer wertvollen Ergänzung im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung etablieren.

#### LITERATURVERZEICHNIS

1. *Zerstörungsfreie Prüfung – Röntgendiffraktometrisches Prüfverfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen. In: Deutsche Norm DIN EN 15305 (2008), S. 1-88*
2. *Spiess, L.; Teichert, G.; Schwarzer, R.; Behnken, H.; Genzel, Ch.: Moderne Röntgenbeugung - Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker. 3. Auflage Springer-Spektrum, 2019. – 635 S. – ISBN 978-3-8348-1219-3*
3. *Taira, S.; Tanaka, K.; Yamasaki, T.: A Method of X-Ray Microbeam Measurement of Local Stress and its Application to Fatigue Crack Growth Problems. In: Journal of the Society of Materials Science, Japan 27 (1978), Nr. 294, S. 251–256.  
<http://dx.doi.org/10.2472/j sms.27.251>. – DOI 10.2472/j sms.27.251*
4. *Matthes, S.: Röntgendiffraktometrie mit dem Pulstec -  $\mu$ -x360 - vergleichende Untersuchungen. Masterarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2019. – 117 S.*
5. *Matthes, S.: Röntgendiffraktometrie mit dem Pulstec -  $\mu$ -x360 Gerät - vergleichende Untersuchungen. In: ZfP Zeitung Ausgabe 170 (Juli 2020)*

Kontakt: lothar.spiess@tu-ilmenau.de

**BEITRAG 8**

**Mikrowellenprüfung mit der Pitch-Catch-Methode**

Johann Hinken<sup>1</sup>, Aschwin Gopalan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> fitm Hinken Consult, Magdeburg

<sup>2</sup> Rohmann GmbH, Frankenthal

**KURZFASSUNG** | Polyethylen (PE)-Rohre werden in der Praxis häufig durch Stumpfschweißen (butt welding) verbunden. Für die zerstörungsfreie Prüfung der Schweißnaht wird hier die Pitch-Catch-Methode mit Mikrowellen vorgeschlagen. An einem Beispiel wird die Leistungsfähigkeit gezeigt. Der Entwurf der Ankopplung basiert auf den Eigenwellenanalysen in der Rohrwand und in der herzustellenden Sonde. Diese Eigenwellen sind den Ultraschall-Lamb-Wellen ähnlich. In einer praktischen Untersuchung an einem stumpfschweißten PE-Rohr konnten mit der Mikrowellen-Pitch-Catch-Methode künstliche Defekte mit Abmessungen von wenigen Millimetern nachgewiesen werden.

**1. Einleitung**

Polyethylen (PE)-Rohre werden in der Praxis häufig durch Stumpfschweißung (butt welding) miteinander zu einem Strang verbunden. Die Prüfung der Schweißnähte hat unmittelbar danach und vor dem Vergraben zu erfolgen. Dieser Bericht soll zeigen, dass die in der Ultraschallprüftechnik verwendete Pitch-Catch-Methode, auch Halbtransmissionsmethode genannt, auch auf die Mikrowellenprüfung übertragen werden kann und dass diese für die Prüfung von Butt-Weld-Verschweißungen geeignet ist.

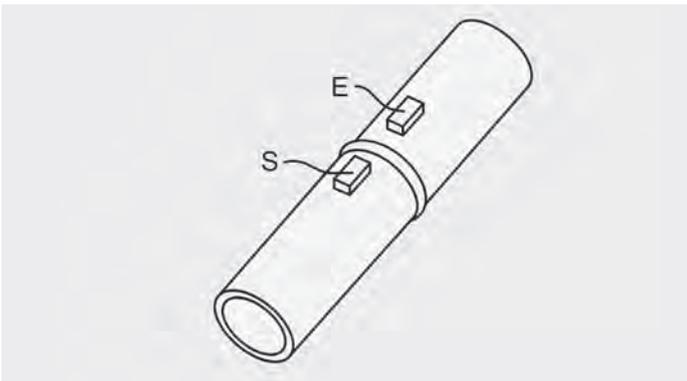


Bild 1: PE-Rohr mit Schweißraupe und Mikrowellenankoppelvorrichtungen für Sender (S) und Empfänger (E)

Bild 1 zeigt die prinzipielle Anordnung des verschweißten Rohres mit zwei Koppelinrichtungen zur Einspeisung der Mikrowelle vom Sender (S) und zum Auskoppeln und Weiterleiten an den Empfänger (E). Die Mikrowelle breitet sich in der Rohrwand durch die Schweißnaht hindurch aus und wird in dieser durch Inhomogenitäten beeinflusst. So kann der Empfänger Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht detektieren.

In [1] wurden erste Tests dazu durchgeführt. Allerdings wurden dabei Koppelinrichtungen verwendet, die radial in das Rohr einstrahlen, sodass nur schwache Streufelder die Schweißnaht passieren können. Die Untersuchungsergebnisse waren daher nicht zufriedenstellend.

Zweckmäßiger ist es, eine Mikrowelle derart anzuregen, dass sie sich in der Rohrwand in Längsrichtung ausbreitet. Sie strahlt dann direkt durch die zu untersuchende Schweißnaht hindurch. Dazu ist zunächst die Wellenausbreitung in der Rohrwand zu untersuchen und dann ist die Ankopplung zweckmäßig zu gestalten. Schließlich sind Tests beschrieben.

**2. Wellenausbreitung in der Rohrwand**

Statt der gekrümmten Rohrwand wird näherungsweise eine unendlich ausgedehnte dielektrische Platte betrachtet, siehe Bild 2.

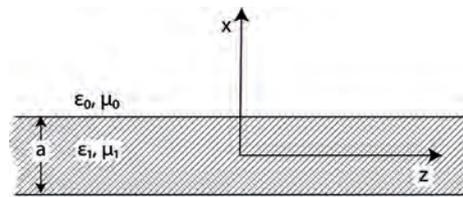


Bild 2: Dielektrische Platte mit unendlich weiter Ausdehnung in y-Richtung, d. h. senkrecht zur Zeichenebene. a: Plattendicke, ε<sub>0</sub>, ε<sub>1</sub>, μ<sub>0</sub>, μ<sub>1</sub>: Permittivitäts- und Permeabilitätskonstanten von Platte und Außenraum. Nach [2]

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in dieser Platte ist in [2] behandelt. Ausgehen von Vektorpotentialen werden die Eigenwellen und z. T. ihre Feldverteilungen berechnet. Die Eigenwellen werden klassifiziert nach geraden und ungeraden Wellen, je nach Ansatz des Vektorpotentials in x-Richtung. Weiterhin gibt es E- und H-Wellen, benannt danach, ob die Welle in der Ausbreitungsrichtung z nur eine elektrische oder nur eine magnetische Feldkomponente hat. Die insgesamt vorhandenen Feldkomponenten sind in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1. Feldkomponenten der Eigenwellen

Eigenwellentyp	Feldkomponenten
Ungerade E-Wellen	Ex, Ez, Hy
Gerade E-Wellen	Ex, Ez, Hy
Ungerade H-Wellen	Ey, Hx, Hz
Gerade H-Wellen	Ey, Hx, Hz

Die Wellen haben unterschiedliche Grenzfrequenzen. Weiterhin haben sie sinusförmige bzw. kosinusförmige Verläufe in x-Richtung mit einer normierten Wellenzahl u innerhalb der Platte und exponentiell abklingende Felder in +x-Richtung oberhalb der Platte und in -x-Richtung unterhalb der Platte, jeweils mit einer normierten Dämpfungskonstante v. Die Betriebsfrequenz f und die Plattendicke a gehen in den Parameter V mit ein:

$$V = \pi * f * a * \sqrt{\mu_1 * \epsilon_1 - \mu_0 * \epsilon_0} \tag{1}$$

Die charakteristischen Gleichungen für die 4 Typen von Eigenwellen sind:

ungerade E-Wellen  $u * \tan(u) = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} * v$  (2)

gerade E-Wellen  $-u * \cot(u) = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} * v$  (3)

ungerade H-Wellen  $u * \tan(u) = \frac{\mu_1}{\mu_0} * v$  (4)

gerade H-Wellen  $u * \tan(u) = \frac{\mu_1}{\mu_0} * v$  (5)

Bei (4) und (5) wurde berücksichtigt, dass es sich um unmagnetische Stoffe handelt, also mit Permeabilitäten  $\mu_1 = \mu_0$ .

Mit der beabsichtigten Betriebsfrequenz  $f = 24,125$  GHz und dem Material Polyethylen ( $\epsilon_{r1}=2,5$ ) ergibt sich das Bild 3 für die Darstellung der charakteristischen Gleichungen zusammen mit dem Parameter  $v$ .

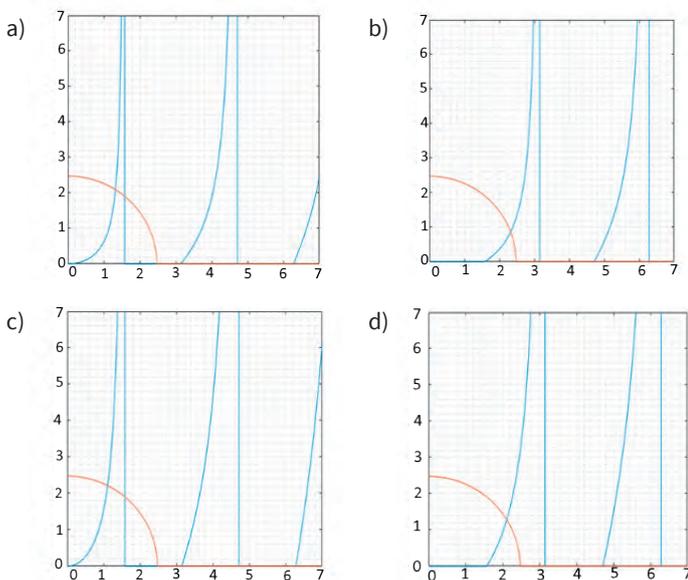


Bild 3: Grafische Darstellung der charakteristischen Gleichungen der a) ungeraden E-Wellen, b) geraden E-Wellen, c) ungeraden H-Wellen und d) geraden H-Wellen. Blau: v über u, rot: u über v.

Für jeden Wellentyp ergibt sich für die vorliegenden Parameter jeweils nur ein Schnittpunkt mit den Ästen der tan- bzw. cot-Funktionen. Das heißt, bei  $f = 24,125$  GHz,  $\epsilon_{r1}=2,5$  und  $a = 8$  mm ist von jedem Wellentyp nur eine Welle ausbreitungsfähig. Die Wellenzahlen  $k_{z1}$  und Wellenlängen  $\lambda_{z1}$  dieser 4 Eigenwellen in Längsrichtung z sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2. Wellenzahlen und Wellenlängen der ausbreitungsfähigen Wellen

	$k_{z1}/1/\text{mm}$	$\lambda_{z1}$ in mm
Ungerade E-Wellen	0,7265	8,649
Gerade E-Wellen	0,5494	11,436
Ungerade H-Wellen	0,7463	8,419
Gerade H-Wellen	0,6021	10,435

Im Folgenden wird die ungerade E-Welle als Nutzwelle verwendet werden. Ihre Feldverteilung ist in einem Längsschnitt in Bild 4 dargestellt.

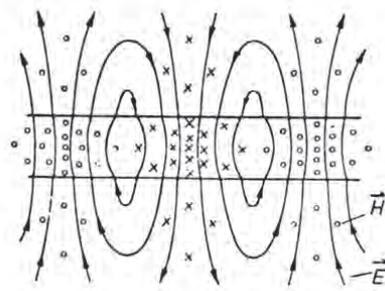


Bild 4: Feldverteilung der ungeraden E-Welle im Längsschnitt. Nach [2].

In der Platte und an den Grenzflächen hat sie vor allem elektrische Feldkomponenten in x-Richtung. Letzteres ist wichtig, um eine geeignete Ankopplung zu entwickeln.

### 3. Ankopplvorrichtung

#### 3.1 Entwicklung der Ankopplvorrichtung

Als Primärstrahler ist ein offener Hohlleiter vorgesehen. Es soll eine Welle nur in +z-Richtung und nicht in -z-Richtung angeregt werden. Das ist nicht über eine punktweise sondern nur über eine verteilte Ankopplung zu erreichen. Die Koppelvorrichtung soll dafür entlang der Oberfläche der dielektrischen Platte ein elektrisches Feld erzeugen, dass als Projektion auf die z-Achse dieselbe Wellenlänge hat wie die Nutzwelle sowie auch ähnliche Feldkomponenten. Dann ist aufgrund konstruktiver Interferenz eine Anregung der Nutzwelle zu erwarten. Eine Schrägeinstrahlung aus einem offenen Hohlleiter ist nicht zielführend, weil von der einfallenden Welle die Projektion auf die Grenzfläche in z-Richtung eine Wellenlänge hat, die stets größer ist als  $\lambda_0 = c_0/f = 12,435$  mm ( $c_0$  = Lichtgeschwindigkeit) und damit größer als 8,649 mm ist.

Die Situation ist physikalisch ähnlich der Anregung von Plattenwellen (Lamb-Wellen) in der Ultraschallprüftechnik. Dabei wird zur Ankopplung ein Prisma verwendet. Ein ähnlicher Weg soll auch hier besprochen werden.

Bild 5 zeigt das Prinzip der Koppelanordnung. Ein nicht eingezeichneter offener Rechteckhohlleiter speist die Welle an der Stirnseite des dielektrischen Stabes mit geeigneter Polarisation ein. Die Welle breitet sich in Längsrichtung des Stabes aus. Der Winkel  $\alpha$  wird so

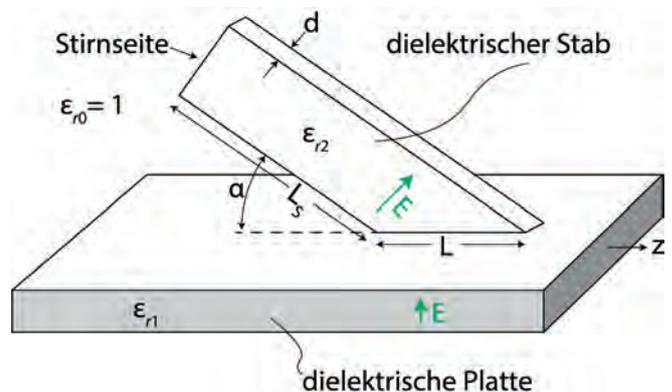


Bild 5: Dielektrischer Stab als Basiselement zur Ankopplung

eingestellt, dass die Projektion der Stabwelle auf die Plattenoberfläche entlang der Koppellänge L der Wellenlänge der anzuregenden Plattenwelle gleicht. Details sind im Folgenden beschrieben.

Eine notwendige Voraussetzung für diese Art der Ankopplung ist, dass  $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1} = 2,5$  ist. Als Material für den dielektrischen Stab wird Plexiglas mit  $\epsilon_r = 3,4$  gewählt.

Zur Feldberechnung wird der Stab nun näherungsweise wiederum als unendlich ausgedehnte dielektrische Platte angesehen. Um die elektrischen Felder der anregenden und der anzuregenden Welle an der Koppelfläche weitgehend in gleicher Richtung vorliegen zu haben, wird im Stab die ungerade H-Welle ausgewählt. Gemäß Tabelle 1 liegt ihr elektrisches Feld in der Plattenebene. Die Feldrichtungen im Bereich der Koppelfläche sind in Bild 5 eingezeichnet. Zur Anregung der ungeraden H-Welle ist der speisende Rechteckhohlleiter so anzuordnen, dass seine Schmalseite parallel zur Breitseite des Stabes ist.

Die Dicke  $d$  des Stabes wird aus der Bedingung bestimmt, dass keine höheren Wellen als die niedrigste ungerade H-Welle im Stab ausbreitungsfähig sind. Dazu wird Gl. 4 für den vorliegenden Fall ausgewertet und wie in Bild 3c dargestellt:

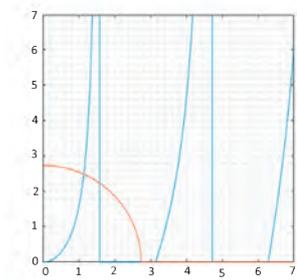


Bild 6: Grafische Darstellung der charakteristischen Gleichungen der ungeraden H-Wellen. Blau:  $v$  über  $u$ , rot:  $V$  über  $u$ . Parameter:  $\epsilon_{r2} = 3,4$ ,  $f = 24,125$  GHz,  $d = 7$  mm

Bild 6 zeigt schon das Ergebnis mit einer Dicke von  $d = 7$  mm, denn dabei schneidet die rote Kurve die blauen tan-Äste nur einmal. Daraus ergibt sich auch die Wellenlänge der Stabwelle in Längsrichtung des Stabes, nämlich zu  $\lambda_2 = 7,20$  mm. Sie ist damit kleiner als die Wellenlänge  $\lambda_{z1} = 8,649$  mm der Nutzwelle in der Platte und mit einem geeigneten Winkel  $\alpha$  ist die Anpassung möglich. Dafür ist

$$\cos(\alpha) = \frac{\lambda_{z1}}{\lambda_2} \quad (6)$$

zu wählen. Der Stabwinkel ergibt sich damit zu

$$\alpha = 34^\circ \quad (7)$$

Damit ist eine konstruktive Interferenz zwischen anregender Welle und Nutzwelle erreicht. Weiterhin wird die Anregung der Nutzwelle durch die Koppellänge  $L$  bestimmt und durch das Maß, in dem sich die beiden Wellen im Querschnitt überlagern. Dieses Maß kann in der Praxis experimentell durch Verändern des Abstandes zwischen Platte und Stab optimiert werden. Aus praktikablen Gründen wurde die Koppellänge zu  $L = 26$  mm gewählt.

Die Stablänge  $LS$  sollte groß genug sein, so dass die lokale Feldverzerrung am einkoppelnden Hohlleiter abgeklungen ist und nur die gewünschte Welle mit definierter Feldverteilung an der Koppelfläche vorliegt. Andererseits sollte die Koppelvorrichtung handhabbar sein. Eine Länge von etwa dreimal der Breite, das heißt von  $LS = 60$  mm scheint angemessen.

### 3.2 Realisierung der Ankoppelvorrichtung

Um Versuche durchführen zu können, wurde die in 3.1 berechnete Ankoppelvorrichtung konstruiert, siehe Bild 7, und in zweifacher Ausfertigung hergestellt. Die dielektrischen Stäbe wurden aus Plexiglas-Plattenmaterial gemäß der Berechnungen CNC-gefräst.

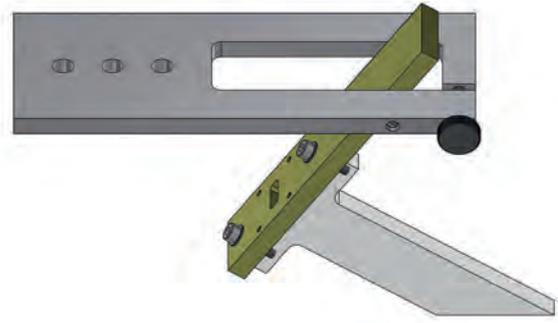


Bild 7: Konstruktion der Ankoppelvorrichtung

Je eine Platte aus Messing dient einerseits als mechanische Halterung und besitzt andererseits ein Bohrbild zur Kontaktierung mit einem Hohlleiter Typ WR42/R220 und eine entsprechende Ausfräsung. Auf der Oberseite der Platte wird ein koaxial-auf-Hohlleiter-Adapter angebracht, auf der Unterseite gegenüberliegend der dielektrische Stab verschraubt. Die Messingplatte ist drehbar gelagert an einer Montageplatte angebracht. So kann die Ankoppelvorrichtung derart an einem Stativ angebracht werden, dass das abgeschrägte Ende des dielektrischen Stabes plan auf der Werkstückoberfläche aufliegt.

### 4. Beispiel: PE-Rohr-Schweißnahtprüfung mit der Mikrowellen-Pitch-Catch-Methode

Zum Testen steht ein PE-Rohrabschnitt mit Stumpfverschweißung zur Verfügung. Der Rohraußendurchmesser und die Wanddicke sind 125 mm bzw. 8 mm. Im Bereich der Schweißraupe, die sich nach außen und innen erstreckt, ist die Wanddicke etwa 12 mm. In die Schweißraupe wurden als künstliche Defekte zwei Durchgangsbohrungen von 3 mm und 5 mm Durchmesser sowie von Innen zwei Sacklochbohrungen mit einem Durchmesser von 3 mm und einer Tiefe von 2 mm bzw. 4 mm eingebracht.

Bild 8 zeigt das Kernstück des labormäßigen Testplatzes mit dem orangefarbenen Rohr. Die beiden Koppelanordnungen sind als Sendebzw. Empfangsantenne gegensinnig angeordnet. Sie sind mit einem Netzwerkanalysator verbunden, der bei 24,125 GHz betrieben



Bild 8: Labormäßiger Testplatz für die Mikrowellenprüfung nach der Pitch-Catch-Methode an einer PE-Rohr-Stumpfverschweißung

wird und als Sender und Empfänger den Betrag des Transmissions-signals als Streuparameter  $|S_{21}|$  misst. In einem angeschlossenen Computer werden die Daten dann aufbereitet und ausgegeben.

Die lichte Weite zwischen den Spitzen der dielektrischen Stäbe wurde variiert. Ein möglichst kleiner Abstand mit der Schweißraupe dazwischen, nämlich etwa 15 mm ergab die Ergebnisse mit den besten Signal-zu-Geräusch-Verhältnissen. Diese ergaben sich auch bei möglichst kleinem Abstand zwischen Rohr und dielektrischen Stäben, also bei Berührung. Es wurde darauf geachtet, dass die unteren Enden der dielektrischen Stäbe möglichst parallel auf das Rohr aufsetzen.

Das Rohr ist auf Rollen gelagert und wird von Hand durchgedreht. Bild 9 zeigt ein typisches Ergebnis.



Bild 9: Umfangsscan durch die Schweißnaht hindurch. Dargestellt ist der unkalibrierte Transmissionsparameter  $|S_{21}|$  über dem Drehwinkel. A, B - Durchgangsbohrungen mit Durchmessern von 5 mm bzw. 3 mm. C, D - Sacklochbohrungen von innen mit einem Durchmesser von 3 mm und Tiefen von etwa 2 mm bzw. 4 mm.

Die Durchgangsbohrungen A und B mit Durchmessern von 5 mm und 3 mm durch die Schweißnaht sind klar zu erkennen. Und auch die von der Innenseite eingebrachten Sacklochbohrungen C und D mit einem Durchmesser von 3 mm und Tiefen von 2 mm bzw. 4 mm stellen sich deutlich dar. Dieses zeigt, dass die in der Rohrwand angeregte, sich in Längsrichtung ausbreitende Welle den Querschnitt komplett durchsetzt. Das zeigt weiterhin, dass die Schweißnaht mit der Mikrowellen-Pitch-Catch-Methode von außen in der kompletten Tiefe prüfbar ist.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die entwickelte Ankoppelvorrichtung ist in der Lage, bei der verwendeten Mikrowellen-Frequenz eine Welle in die Rohrwand eines stumpf verschweißten PE-Rohres einzukoppeln, die sich in Richtung der Längsachse des Rohres in der Rohrwand ausbreitet. Mit Hilfe einer identischen Ankoppelvorrichtung als Empfänger auf der anderen Seite der Schweißnaht konnten als Ersatzfehler eingebrachte Durchgangsbohrungen und auch von der Innenseite eingebrachte Sacklochbohrungen deutlich detektiert werden. Die Prüfung von solchen „Butt-Welds“ in PE-Rohren muss direkt nach der auf der Baustelle durchgeführten Schweißung vor dem Vergraben des Rohres in-situ durchgeführt werden. Das vorgestellte Mikrowellen-Prüfverfahren könnte in einen kompakten und robusten Aufbau integriert werden, der von angelerntem Personal direkt auf der Baustelle für die Prüfung und Dokumentation der Schweißnaht verwendet werden kann. Es ist für die Prüfung keinerlei Koppelmittel erforderlich und es entsteht keine Belastung der Umwelt oder der Prüfer durch Chemikalien oder hochenergetische Strahlung. Das Verfahren ist nicht begrenzt auf die Topologie eines Rohres, so dass auch andere Schweißnähte an Kunststoffplatten oder z. B. Klebungen an Schaumplatten so geprüft werden könnten. Hierzu ist eine Anpassung der Ankoppelvorrichtung an die elektromagnetischen Eigenschaften des zu prüfenden Werkstoffs erforderlich, die auf der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Berechnungsmethode einfach durchgeführt werden kann.

## Danksagung

Die Autoren danken Herrn Andreas Himmelmann für die Vorarbeiten und die Bereitstellung des Testobjektes.

## LITERATUR

- [1] Himmelmann, Andreas: Inbetriebnahme eines Mikrowellen-Prüfsystems mit ersten Anwendungen, Bachelorarbeit an der Hochschule Magdeburg-Stendal, 2019  
 [2] Unger, Hans-Georg: Elektromagnetische Theorie für die Hochfrequenztechnik, Teil I, Abschnitt 3.8, Hüthig-Verlag, 1981

Kontakt: johann.hinken@fitm.de

## Mach-Zehnder-Interferometer Aufbau mit Virtuellem Doppelspalt für Shearografie mit räumlichem Phasenschieben bei variablem Shear

Christopher Petry<sup>1</sup>, Michael Schuth<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Trier, Technikum Ogkb

**KURZFASSUNG** | Das optisch-interferometrische Messverfahren der Shearografie ist eine anerkannte zerstörungsfreie Prüfmethod, die vor allem in der Prototypenentwicklung der Luft- und Raumfahrt eingesetzt wird. Messobjekte werden mit kohärentem Laserlicht beleuchtet und durch Shear-Optiken mittels Kamerabildaufnahme erfasst. Dabei werden bei geringster Anregung des Messobjektes Deformationen im Sub-Mikrometer Bereich sichtbar. Anomalien in diesem Deformationsverhalten lassen auf Materialfehler schließen.

Durch moderne Kamerastandards mit hochauflösenden Sensorchips liefert die shearografische Auswertung mit räumlichem Phasenschieben (spatial phase shift/SPS) erstmals qualitative hochwertige Messergebnisse. SPS erhöht die Messstabilität der Shearografie enorm, wodurch die Fehlerauffindbarkeit z. B. für Impact-Schäden, Risse, Delaminationen und Undulationen stark verbessert wird.

In der Automobilindustrie werden moderne Werkstoffe wie naturfaser-, glasfaser- sowie kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe, Komposite und 3D Druckteile im Rahmen des Leichtbaus zunehmend populär. Die werkstoffunabhängig arbeitende Shearografie ist hier prädestiniert für eine automatisierte 100 % Qualitätsüberwachung. In einem BMWi-geförderten Forschungsprojekt wird die Shearografie nun für die automatisierte Massenproduktion unter rauen Umgebungsbedingungen weiterentwickelt. Die einfache und unempfindliche Umsetzung von SPS Shearografie nach der Trägerfrequenzmethode mit Michelson-Interferometer-Aufbau birgt ein hohes Potential für diese Aufgabenstellung. Jedoch ist hierbei die Messsensitivität mit der Messqualität verknüpft und dadurch nahezu fest vorgegeben, was typische industrielle Anwendungen unpraktikabel macht. Im Paper präsentieren wir einen optischen Aufbau für SPS DS mit Trägerfrequenz am Mach-Zehnder-Interferometer. Bei Erhaltung aller Vorteile des Michelson Interferometer Aufbaus können die Messparameter durch Verwendung eines sog. Virtuellen Doppelspalts voneinander entkoppelt werden. Das sich dadurch ergebende Potential für den industriellen Einsatz wird durch praktische Messversuche aufgezeigt.

### Shearografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren

Die optisch-interferometrische Messmethode der Shearografie, hier speziell die electronic speckle pattern shearing interferometry (ESPSI), hat sich für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) in der Luft- und Raumfahrt sowie Schifffahrt bereits etabliert [1] [2]. Messobjekte werden mit kohärentem Laserlicht beleuchtet, wodurch das sog. körnige Speckle-Muster auf deren Oberfläche sichtbar wird. Dieses Interferenzphänomen wird mittels Kamera durch Shear-Optiken aufgezeichnet. Oberflächenbewegungen verursachen eine Änderung des Speckle-Musters, die mit der Oberflächendeformation im Sub-Mikrometer Bereich korreliert. Mittels Phasenschiebe-Methode wird dabei die benötigte Laserinterferenzphase  $\Phi$  aus der Bildintensität berechnet. Auf diese Weise kann für zwei Oberflächenzustände  $\Phi$  (Bauteil unbelastet) und  $\Phi'$  (Bauteil angeregt) die Differenzphase  $\Delta$ , das sog. Shearogramm, gebildet werden nach  $\Delta = \Phi' - \Phi$ . Dieses liefert charakteristische Muster für Bauteilbereiche, die sich anormal stark verformen und möglicherweise defektbehaftet sind, vgl. Abbildung 1 links. Durch Weiterverarbeitung des Messergebnisses kann die Oberflächenverformung quantitativ dargestellt werden, vgl. Abbildung 1 rechts. Messergebnis hierbei ist erste Ableitung der Verformung in Shearrichtung (s. unten).

Die Shearografie zeichnet sich gegenüber andere ZfP Methoden durch ihre flächenhafte und somit sekundenschnelle Messung aus. Sie arbeitet berührungslos und werkstoffunabhängig, was sie für moderne, inhomogene Leichtbaumaterialien wie faserverstärkte Kunststoffe sowie entsprechende Komposite prädestiniert. Eine Besonderheit der Shearografie ist, dass der namensgebende Shear frei einstellbar ist, wodurch die Messsensitivität und gleichzeitig die

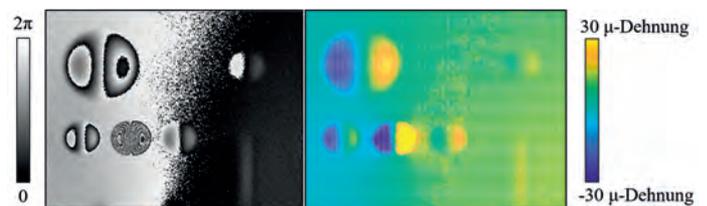


Abb. 1. Links: Shearogramm einer umlaufend eingespannten, rückseitig druckangeregten Platte (ca. 200 mm x 150 mm) zeigt typische Schmetterlingsmuster. Rechts: das Ergebnis der Weiterverarbeitung lässt unterschiedlich starke und verschieden große Verformungsanomalien erkennen, die durch rückseitig eingebrachte Plansenkungen verursacht werden.

Störempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen angepasst werden kann.

Aufgrund der modernen Kamertechnik mit hochauflösenden Sensorchips (z. B. 5 Megapixel bei Taktzeiten bis 40 Hz) liefert das sog. räumliche Phasenschieben (spatial phase shift/SPS) im Bereich der Shearografie erstmals qualitativ hochwertige Ergebnisse [3] Kapitel 7, [4], [5] S. 65 ff. Die Methode erlaubt es, die benötigte Interferenzphase  $\Phi$  im Kameravideotakt zu ermitteln. Bisher waren dazu typischerweise vier Bildaufnahmen notwendig (s. zeitliches Phasenschieben [6] S. 41). So erhöht sich die Messstabilität der empfindlichen Shearografie mit SPS enorm, darüber hinaus können hochdynamische Messungen sehr einfach durchgeführt werden. Letzteres

erlaubt es, transiente Anregungsmethoden einzusetzen (s. lock-in, sweep, burst etc.), wodurch die Fehlerauffindbarkeit z. B. für Impactschäden, Risse und Delaminationen gesteigert werden kann.

**1. Räumliches Phasenschieben**

Seither wurden für die Shearografie viele räumliche Phasenschiebemethoden mit unterschiedlichen optischen Aufbauten entwickelt [5] S. 76 f., [3] S. 127 ff., [7], [8], [9]. Ziel aller ist es, die Interferenzphase  $\Phi$  einer Bildaufnahme zu bestimmen. Sie wird bei digitalen Bildaufnahme pixelweise aus dem jeweiligen Intensitätswert  $I$  der Bildaufnahme berechnet. Der Wert  $I$  ergibt sich aus der interferometrischen Grundgleichung Gl. 1 [5] S. 33. Hierbei sind die Hintergrundintensität  $I_0$ , die Lasermodulation  $\gamma$  sowie die gesuchte Interferenzphase  $\Phi$  unbekannt.

$$I = I_0 (1 + \gamma \cos(\Phi)) \tag{1}$$

mit

- $I$  = Gemessene Intensität eines Pixels
- $I_0$  = Hintergrund Intensität
- $\gamma$  = Lasermodulation
- $\Phi$  = Interferenzphase

**1.1 SPS nach der FFT Methode am Michelson-Interferometer (abgeleitet aus [3])**

SPS nach der Fast-Fourier-Transformation (FFT) Methode hat sich gegenüber anderer SPS Methoden als besonders robust und einfach bzgl. dem optischen Aufbau gezeigt. Gerade der Aufbau von Xie et al. [10], s. Abbildung 2, hat sich für den industriellen Einsatz als gewinnbringend erwiesen.

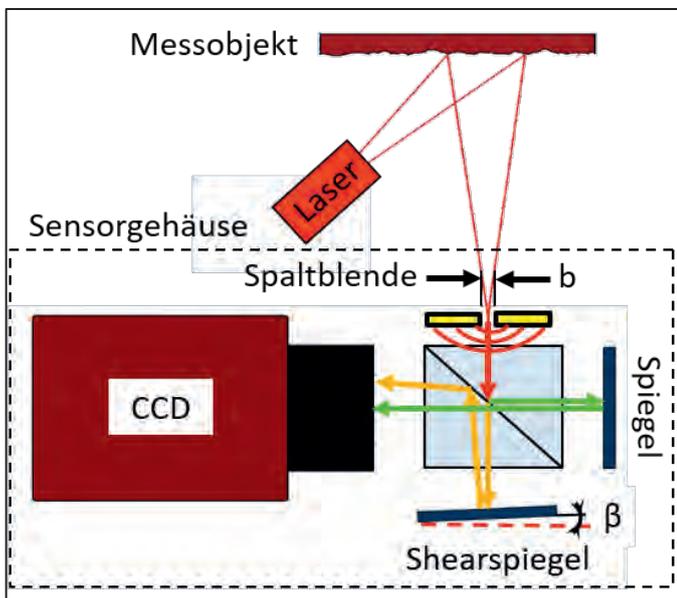


Abb. 2. Michelson-Interferometer Aufbau mit Strahlteiler, festem Spiegel und kippbarem Shearspiegel ermöglicht eine shearografische Kameraauswertung einer laserbeleuchteten<sup>1</sup> Oberfläche. Durch die vorgeschaltete Blende kann SPS nach der FFT Methode durchgeführt werden. Die kohärente Intensitätsmodulation wird durch den Shearwinkel  $\beta$  verursacht, wodurch die Trägerfrequenz erzeugt wird.

Dem weitbekanntesten shearografischen Michelson-Aufbau mit Strahlteiler, festem Spiegel und kippbarem Shear-Spiegel (zur

Sheareinstellung) wird zusätzlich eine Blende vorgeschaltet. Diese verursacht eine Beugung beim Lichteintritt in den Sensor, wodurch die Kamera ein sehr grobkörniges Speckle-Muster erfasst, vgl. Abbildung 3 links. Die beiden am Strahlteiler entstehenden Wellenfronten werden durch die Einstellung (Shearwinkel  $\beta$ ) am Shearspiegel gegeneinander verkippt. So entsteht als Kamerabild das verfahrenstypische vershearerte Doppelbild für die interferometrische Auswertung. Die Verkipfung verursacht im Falle des grobkörnigen Speckle-Musters einen in Shearrichtung linearen Gangunterschied der Fronten. Es macht sich eine dem Speckle-Muster überlagerten räumlichen Trägerfrequenz bemerkbar, vgl. Abbildung 3 rechts. Dabei handelt es sich um eine Intensitätsmodulation des kohärenten Lichtanteils  $I_0 \cdot \gamma \cdot \cos(\Phi)$  (s. Gl. 1), was bedeutet, dass der inkohärente Lichtanteil unbeeinflusst bleibt.

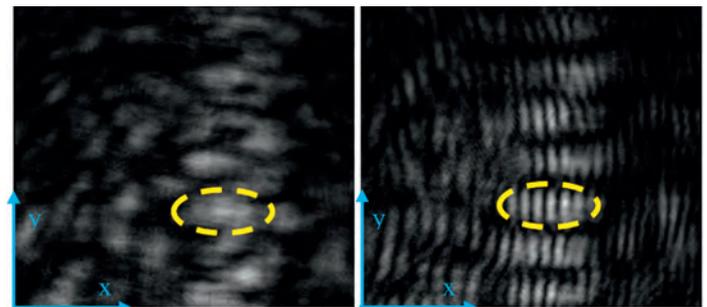


Abb. 3. Links: Bildaufnahme des grobkörnigen Speckle-Musters hinter der Blende ohne vershearerte Wellenfronten, ein Speckle wurde zum Vergleich gelb eingekreist. Rechts: Bildaufnahme des Speckle-Musters mit kohärenter Intensitätsmodulation aufgrund der Verkipfung der beiden Fronten durch den Shearspiegel, der eingekreiste Speckle weist nun eine zusätzliche Trägerfrequenz in x-Richtung auf.

Mittels zweidimensionaler FFT des Speckle-Bildes wird dieses Trägerfrequenzspektrum  $S'$  im Ortsfrequenzraum sichtbar, s. Abb. 4. (Das Spektrum mittig entspricht dem nicht-intensitätsmodulierten, somit inkohärenten Bildanteil. Das Spektrum  $-S'$  links entspricht gleichwertig  $S'$ , jedoch mit negativen Ortsfrequenzen.)

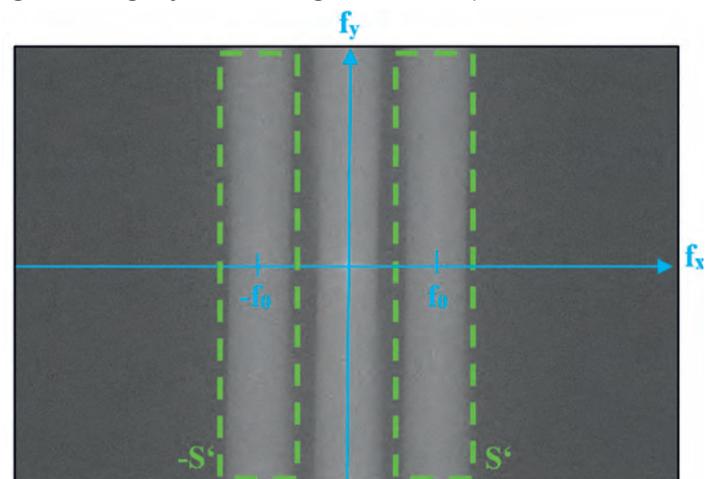


Abb. 4. Zweidimensional Fourier-transformiertes Speckle-Muster mit kohärenter Intensitätsmodulation im Ortsfrequenzraum (logarithmische Darstellung des Amplitudenbildes); das außermittig liegende Spektrum  $S'$  entspricht dem höherfrequenten Bildanteil mit Trägerfrequenz  $f_0$  und enthält die Interferenzphaseninformation, entkoppelt vom nicht-kohärenten Bildanteil

<sup>1</sup> Die variierenden Farben des Lichtstrahlengangs in dieser sowie folgenden Abbildungen wurden lediglich aus Anschaulichkeitsgründen gewählt und stehen nicht im Zusammenhang mit der Wellenlänge.

Durch inverse FFT des Spektrums  $S'$  und Phasenberechnung aus der komplexen Zahlenmenge nach Gleichung 2 ergibt sich so aus einer einzigen Bildaufnahme die gesuchte Interferenzphase  $\Phi$ . Der Trägerphasenanteil  $2\pi f_0 x$  bleibt während der Messung konstant und wird daher bei der Differenzphasenberechnung des Shearogramms  $\Delta$  eliminiert.

$$\Phi + 2\pi f_0 x = \arctan \frac{\text{Im}(S')}{\text{Re}(S')} \quad (2)$$

mit

- $f_0$  = Trägerfrequenz
- $x$  = Räumliche Variable
- $\text{Im}$  = Imaginärteil
- $S'$  = Trägerfrequenzspektrum
- $\text{Re}$  = Realteil

## 1.2 Nachteile von SPS nach der FFT Methode am Michelson-Interferometer

An erster Stelle beim SPS mit Blende sei die reduzierte Messlichtintensität genannt, da die Lichteingangsfläche verringert wird. Wird als Blende ein Spalt (statt beispielsweise eine Kreisapertur) verwendet, ist die Anwendbarkeit durch die moderne Kameratechnik mit hoher Quanteneffizienz soweit gegeben.

An zweiter Stelle ist die reduzierte laterale Auflösung beim SPS allgemein gegenüber dem zeitlichen Phasenschieben (*temporal phase shift/TPS*) zu nennen, da die notwendige Interferenzphaseninformation aus nur einer Bildaufnahme (statt vier) gewonnen wird. Die beim SPS nach der FFT Methode bestmöglich erreichbare laterale Auflösung entspricht theoretisch 1/12 derjenigen erreichbar beim TPS [11]. Hierbei muss jeweils ein spezieller Wert für die Blendenaperturgröße  $b$  und den Shearwinkel  $\beta$  (s. Abbildung 2) eingehalten werden. Abweichungen davon gehen mit einer starken Reduktion der lateralen Auflösung einher, wodurch das Messergebnis für den praktischen Einsatz unzureichend ist. Letzteres raubt der Shearografie den besonderen Vorteil, dass ihre Sensitivität mit dem Shear angepasst werden kann.

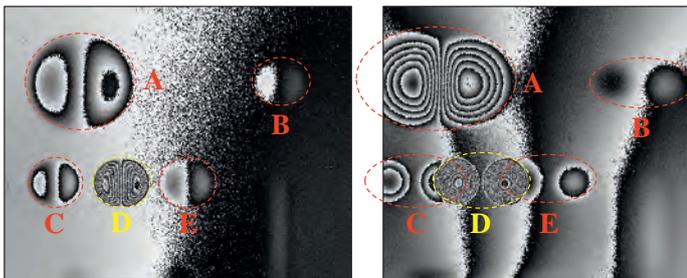


Abb. 5. Shearogramm der Platte nach Abbildung 1, Bohrungsdurchmesser  $A = 30 \text{ mm}$ ,  $B = C = D = E = 15 \text{ mm}$ . Links: Messung bei einem Shearbetrag von 2 mm. Rechts: bei einem Shearbetrag von 15 mm unter sonst selben Parametern. Die Messbreite rechts fällt geringer aus, die stark verzerrten Schmetterlingsmuster von Defekt C, D und E überlagern sich, die Phasenstreifen von Ergebnis D sind dekorreliert und den Defektmustern sind trotz geringer Belastung aufgrund der zu hohen Sensitivität vertikal verlaufende, globale Verformungsstreifen überlagert.

Unter typischen Messbedingungen beträgt der Shearbetrag auf der Bauteiloberfläche beim SPS Michelson-Aufbau ca. 35 mm, was viel zu hoch ist. Resultierende Defizite sind somit eine zu starke Sensitivität und dadurch hohe Stör- und Dekorrelationsempfindlichkeit, eine schwierige Ergebnisinterpretation aufgrund der stark verzerrten Schmetterlingsmuster sowie eine starke Verringerung des Messbe-

reichs an den Probenrändern, s. Abbildung 5. Darüber hinaus muss die Shearrichtung orthogonal zur Spalthöhe, begrenzt auf x- oder y-Richtung, gewählt werden, damit die FFT Methodik korrekt abgebildet werden kann (vgl. Abbildung 4). Defekte mit geometrischer Orientierung [12] S. 127, wie Risse o. Ä., können nur bedingt und nur mit Anpassung des optischen Aufbaus detektiert werden.

## 2. SPS ESPSI nach der FFT Methode am Mach-Zehnder-Interferometer

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie durch einen optischen Aufbau am Mach-Zehnder-Interferometer für SPS ESPSI nach der FFT Methode alle Vorteile des Michelson-Interferometers (vgl. Kapitel 1) genutzt werden können, während die Nachteile vollständig eliminiert werden. Hierzu wird ein **Virtueller Doppelspalt** (VDS) erzeugt, um die kohärente Intensitätsmodulation auf dem Speckle-Muster zu erzeugen. Die so erzeugte Trägerfrequenz ist vom Shear entkoppelt, die Sensitivitätsanpassung der Shearografie steht demnach uneingeschränkt zur Verfügung.

Darüber hinaus kann die Messlichtintensität mit dem neuen Aufbau mithilfe von Polarisationsoptiken verdoppelt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, durch den einfachen Einsatz eines Diffusorglases holografische Interferometrie (bzw. *eletronic speckle pattern interferometry/ESPI*) mit SPS zu betreiben.

### 2.1 Mach-Zehnder Interferometer mit Virtuellem Doppelspalt (VDS)

Abbildung 6 links zeigt den optischen Aufbau für Shearografie am Mach-Zehnder-Interferometer [13]. Das vom Messobjekt reflektierte Laserlicht wird beim Eintritt in den Sensor am ersten Strahlteiler in zwei Wellenfronten aufgeteilt. Diese werden an jeweils einem folgenden Spiegel abgelenkt, wobei einer der Spiegel kippbar ist. Hierdurch wird der Shearwinkel  $\beta$  eingestellt, wodurch später in der Kamera das vershearerte Doppeltbild entsteht.

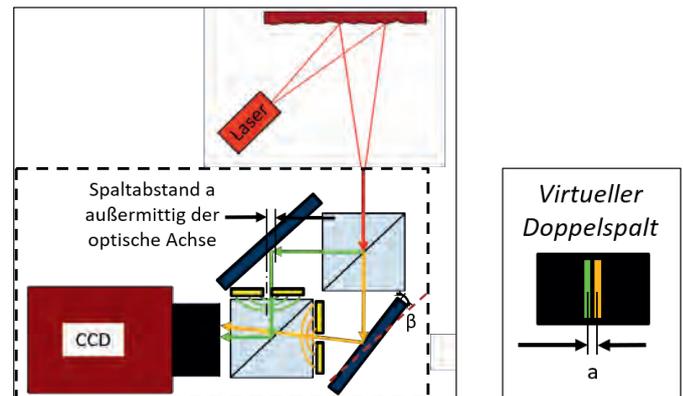


Abb. 6. Links: Mach-Zehnder-Interferometer Aufbau mit zwei Strahlteilern, festem Spiegel und kippbarem Shearspiegel ermöglicht eine shearografische Kameraauswertung einer laserbeleuchteten Oberfläche (Komponentenbezeichnungen vgl. Abb. 2). Durch die beiden Blenden (gelb) kann SPS nach der FFT Methode durchgeführt werden. Die kohärente Intensitätsmodulation wird durch den Spaltabstand  $a$  verursacht, wodurch die Trägerfrequenz entkoppelt vom Shearwinkel  $\beta$  erzeugt wird. Rechts: Aus Blickrichtung der Kamera ist mit einer Fokusebene auf die Blendenebene ein **Virtueller Doppelspalt** (VDS) mit Spaltabstand  $a$  zu sehen, der aus der Wellenfrontzusammenführung aus dem beiden Interferometer-Armen im Strahlteilerwürfel resultiert.

<sup>2</sup> Ideal: Shearbetrag maximal gleich dem halben Defektdurchmesser, für typische kleine Defekte demnach ca. 1 mm bis 2 mm.

Die gespiegelten Wellenfronten werden in einem zweiten Strahlteilerwürfel wieder auf eine gemeinsame optische Achse in Richtung der Kamera gebracht.

Die Besonderheit dieses optischen Aufbaus liegt in den zwei Blenden, die dem kameranahen Strahlteiler im jeweiligen Interferometer-Arm vorgelagert sind. Dabei wird eine der Blenden außermittig zur optischen Achse um den Abstand  $a$  verschoben. Im Falle von Spaltblenden, wie hier gewählt, erfolgt die Verschiebung in Richtung orthogonal zur Spalthöhe. Würde der Kameraobjektivfokus nun auf die Ebene der Spaltblenden eingestellt werden, wäre im Kamerabild ein **Virtueller Doppelspalt** (VDS) zu sehen, wie in Abbildung 6 rechts dargestellt. Dieser entsteht durch die Wellenfrontzusammenführung der beiden Interferometer-Arme mit Einfachspaltblenden im kameranahen Strahlteiler.

Der VDS verursacht eine interferometrische Überlagerung der beiden durch die Einfachspaltblenden gebeugten Wellenfronten, und damit eine zusätzliche Intensitätsmodulation des kohärenten Lichtanteils. Somit kann durch Einstellung des Spaltabstandes  $a$  eine Trägerfrequenz auf das im Kamerabild resultierende Speckle-Muster aufgebracht werden. Gleichung 3 für den Gangunterschied  $\Delta s$  am Doppelspalt unter der Kleinwinkelnäherung und Gleichung 4 für die Umrechnung eines Gangunterschiedes  $\Delta s$  in einen Phasenunterschied ergeben die Trägerphase  $\Phi_0$  abhängig von der Trägerfrequenz  $f_0$  nach Gleichung 5.

$$\frac{\Delta s}{a} = \frac{x}{d} \quad (3)$$

mit  
 $\Delta s$  = Gangunterschied  
 $a$  = Doppelspaltabstand  
 $x$  = Räumliche Variable  
 $d$  = Abstand zwischen Doppelspalt und Kamerachip

$$\frac{\Delta s}{\lambda} 2\pi = \Phi_0 \quad (4)$$

mit  
 $\lambda$  = Laserwellenlänge  
 $\Phi_0$  = Phasenunterschied (hier: Trägerphase)

$$\Phi_0 = 2\pi \frac{a}{\lambda d} x = 2\pi f_0 x \quad (5)$$

mit  
 $f_0$  = Trägerfrequenz

## 2.2 Entkoppelter Shearvektor durch VDS

Durch den VDS kann nun, wie in 2.1 beschrieben, vor der Messung mit dem neuen Aufbau einmalig die optimale Trägerfrequenz für SPS nach der FFT Methode durch Anpassung des Spaltabstandes  $a$  eingestellt werden. Anschließend können fortlaufend shearografische Messungen bei frei wählbarem Shear entsprechend der erforderlichen Messsensitivität durchgeführt werden. Abbildung 7 zeigt beispielsweise die Shearogramme und Demodulationsergebnisse bei der Prüfung eines naturfaserverstärkten Kunststoffstabs mit horizontalem Bruch unter variiertem Shear. Das beste Ergebnis lässt sich typischerweise mit Shearrichtung orthogonal zum Defektverlauf, somit vertikal in  $y$ -Richtung, erzielen.

## 2.3 Messlicht-Intensitätssteigerung durch Polarisationsoptiken

Grundsätzlich kann am Mach-Zehnder-Interferometer, gegenüber dem Michelson-Interferometer, durch den Einsatz von Polarisationsoptiken die Messlichtintensität verdoppelt werden zu theoretisch

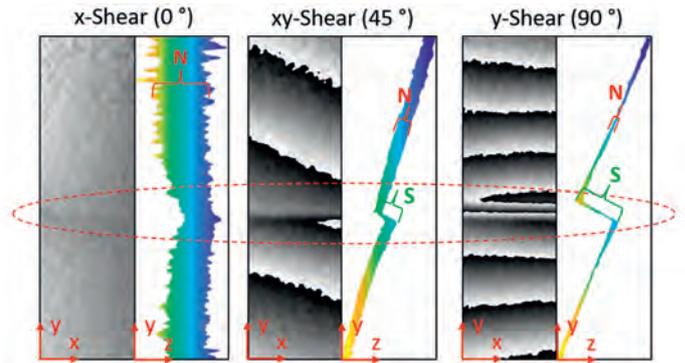


Abb. 7. Shearografische Messung eines naturfaserverstärkten Kunststoffstabes mit einer Breite von ca. 38 mm und Dicke von ca. 2,5 mm; gemessen wird für eine Sekunde das Abkühlverhalten nach 5 Sekunden optischer Anregung mit einer 60 W Lampe. Die Schnittmenge der Messbereiche unter verschiedenem Shear wurden dargestellt (bzgl. dem Verlust der Randbereiche in Shearrichtung), die Demodulationsergebnisse werden rein qualitativ betrachtet. Der Shearbetrag ist immer ca. 3 mm. Links: Das Shearogramm bei Shear in  $x$ -Richtung ergibt nur einen minimalen Phasenkontrast im Defektbereich (dieser ist rot gestrichelt eingekreist für alle Ergebnisse), das Demodulationsergebnis weist bzgl. der Fehlerdetektion eine hohe Rausch-Amplitude  $N$  (noise) auf. Mitte: Das Shearogramm bei Shear in  $xy$ -Richtung (mathematisch positiv  $45^\circ$  von der  $x$ -Achse aus) weist im Defektbereich einen leichten Sprung auf, der sich auch im Demodulationsergebnis widerspiegelt. Das Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise ratio/SNR) mit  $S/N$  beträgt ca. 2. Rechts: Das Shearogramm bei Shear in  $y$ -Richtung (orthogonal zur Defektausrichtung) weist im Defektbereich eine erhöhte Streifenkonzentration auf. Das Demodulationsergebnis weist einen eindeutigen Sprung als Signal-Amplitude auf, das SNR beträgt ca. 10.

100 % der Eingangsintensität (ungeachtet der Verluste durch die Blenden). Abbildung 8 zeigt die Verhältnisse schematisch. Während am Michelson-Interferometer zwangsläufig 50 % des Eingangslichts zurückgeworfen wird, kann am Mach-Zehnder-Interferometer 100 % des Lichts nach Durchlaufen der Interferometer-Arme wieder auf eine optische Achse gebracht werden. Hierbei kommen zwei polarisationsabhängige Strahlteiler zum Einsatz. Das typischerweise linear polarisierte Laserlicht ist nach der Reflexion an der rauhen<sup>3</sup> Messobjekttoberfläche nahezu vollständig unpolarisiert. Der kameraferne Strahlteiler transmittiert den  $p$ -polarisierten Lichtanteil, während der  $s$ -polarisierte reflektiert wird. Am kameranahen Strahlteiler geschieht gleiches, wodurch das gesamte Eingangslight in Richtung der Kamera verläuft. Dieser Vorteil kann auch für den hier vorgestellten, neuen Aufbau genutzt werden. Es gilt zu beachten, dass bzgl. der nötigen interferometrischen Überlagerung der beiden Wellenfronten diese eine gleichmäßige Polarisation aufweisen müssen. Andernfalls ist der Interferenzkontrast herabgesetzt, im Falle der orthogonalen Polarisation auf null [14] S. 409. Hierzu wird dem kameranahen Strahlteiler ein Depolarisator nachgeschaltet, der beide Wellenfronten unpolarisiert und damit maximal interferenzfähig macht.

Abbildung 9 zeigt einen Vergleichsversuch mit und ohne Polarisationsoptiken.

Im FFT Amplitudenbild fällt auf, dass die Spektren moduliert sind (hier in  $y$ -Richtung). Das bedeutet, dass einige Ortsfrequenzen im Bildbereich nicht vorhanden sind, die laterale Auflösung des Phasenbildes somit herabgesetzt ist. Als Grund kann der optische

<sup>3</sup> entsprechend dem Einsatzgebiet der ESPI und ESPSI, Grund der Entstehung des Speckle-Musters

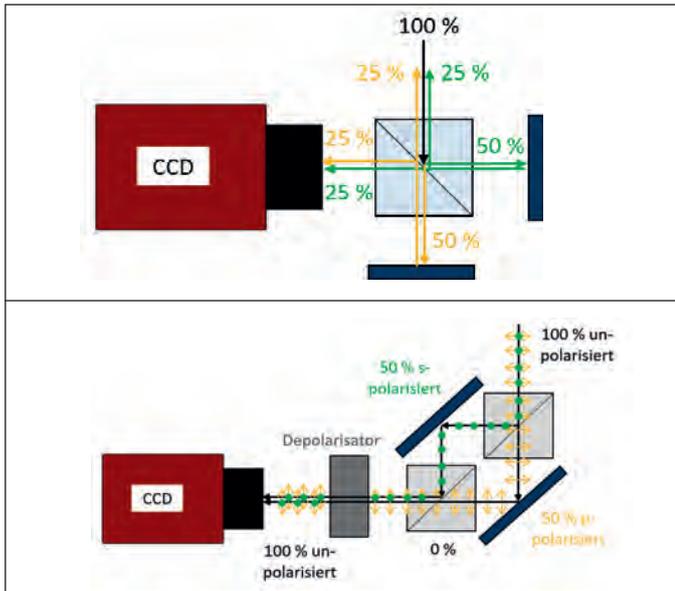


Abb. 8. Oben: Am Michelson-Interferometer werden 50 % des Eingangslicht zurückgeworfen. Unten: Am Mach-Zehnder-Interferometer können durch polarisationsabhängige Strahlteilerwürfel 100 % des Eingangslichts zur Kamera geleitet werden. Zur Sicherstellung des benötigten Interferometrie-Kontrasts muss die Polarisation der Wellenfronten aus den beiden Interferometer-Armen wieder angeglichen werden, hier durch einen Depolarisator unmittelbar vor der Kamera.

Aufbau des Depolarisators<sup>4</sup> identifiziert werden. Die Messqualität wurde nicht weiter analysiert und wird durch die Messlichtverdopplung als verbessert beurteilt.

## 2.4 SPS Holografie durch Groundglas

Der neue Mach-Zehnder-Interferometer Aufbau mit VDS bietet die Möglichkeit, holografische Speckle Interferometrie, bzw. ESPI, mit SPS zu betreiben. Hierzu wird einfach ein Groundglas in den Aufbau eingesetzt, wie Abbildung 10 links zeigt. Eine der beiden Wellenfronten wird somit zur Referenzfront, die bei einer Messobjektverformung nahezu unverändert bleibt. Das Messergebnis ist somit

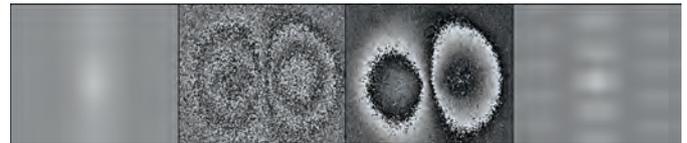


Abb. 9. Gegenüberstellung von FFT Amplitudenbild und Shearogramm (Bildausschnitt) bei Verwendung von Standardoptiken und Polarisationsoptiken mit dem neuen Aufbau, zur Veranschaulichung bei sehr kurzer Belichtungszeit (hier 5 Millisekunden), alle anderen Messparameter bleiben unverändert (lediglich die Objektbelastung ist leicht unterschiedlich). Der Vergleich der leicht gefilterten Shearogramme zeigt den hohen Rauschanteil für das Ergebnis mit Standardoptiken (mittig links) aufgrund der geringen Lichtausbeute, wobei das Ergebnis mit Polarisationsoptiken (mittig rechts) kontrastreich ist. Verglichen zum typischen FFT Amplitudenbild mit Standardoptiken (links außen) weist das Bild mit Polarisationsoptiken eine überlagerte, hier vertikale Frequenz aufgrund des optischen Aufbaus des Polarisators auf.

die Verformung selbst, wie Abbildung 10 mittig und rechts zeigt. Die ESPI misst weitaus empfindlicher als die Shearografie (Tiefenauflösung bis ca. 2 Nanometer) und eignet sich nur bedingt für die ZfP. Stattdessen sind typische Anwendungsbereiche hochgenaue Verformungsmessungen oder optische Modalanalysen.

Der besondere Vorteil dieses ESPI Aufbaus ist die externe, flexible Beleuchtung. Es gibt, verglichen zu typischen ESPI Geräten, keine geräteinterne Laserführung zur Referenzwellenfront-Erzeugung. Von daher ist die optische Pfadlänge von Messobjekt- und Referenzwellenfront immer nahezu gleich. Somit können günstige Laser (z. B. Laserdioden) mit geringer Kohärenzlänge eingesetzt werden. Zudem ist die Messstabilität höher, da die Objekt- und die Referenzwellenfront vor Sensoreintritt gleich sind, und somit gleichen Einfluss durch Umgebungsstörungen (Vibrationen, Luftdichteschwankungen durch Wärme, ...) erfahren.

## 3. Fazit

Die Shearografie ist eine optisch-interferometrische Messmethode, die vor allem im Bereich der Luft- und Raumfahrt besondere Vorteile bei der zerstörungsfreien Prüfung von Leichtbauwerkstoffen aufweist. Die moderne Kamertechnik erlaubt den Einsatz von schnellen räumlichen Phasenschiebemethoden, welche die Messstabilität

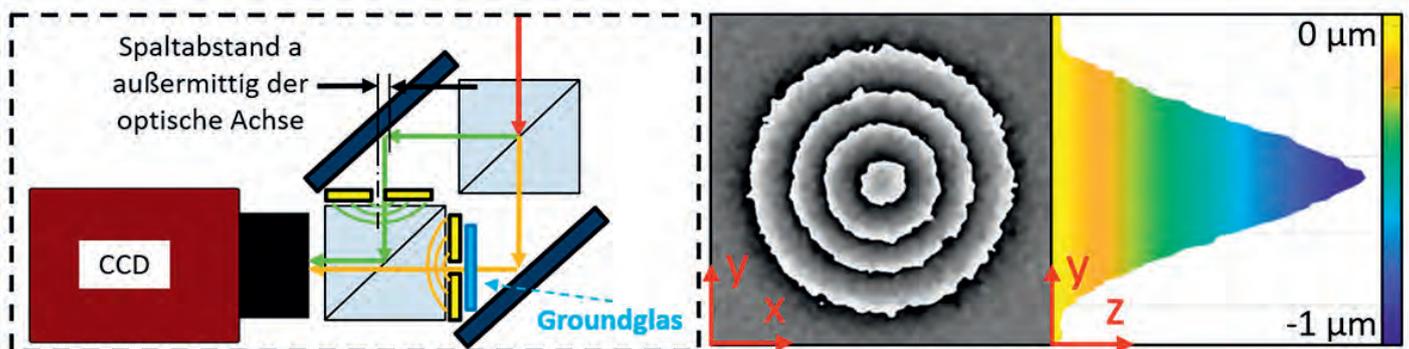


Abb. 10. ESPI Messung mit dem neuen Aufbau, links, durch Einsatz eines Groundglases. Das Hologramm, mittig, zeigt (Bildausschnitt) die Verformung (hier: Entlastung) einer Aluminiumplatte mittels Mikrometerschraube im Zentrum einer rückseitig eingebrachten Sacklochbohrung, Durchmesser 50 mm, Restwandstärke 1 mm, inkl. dem Demodulationsergebnis, hier die Verformung in Mikrometern (vgl. auch Abbildung 1 für ein entsprechend shearografisches Messergebnis).

<sup>4</sup> hier: bestehend aus zwei Kristallquarz-Keilprismen

des sensiblen Verfahrens enorm steigern. Die Methode mit Fast-Fourier Transformation und Trägerfrequenz am Michelson-Interferometer Aufbau liefert dabei äußerst vielversprechende Ergebnisse. Es wird ein neuer shearografischer Aufbau am Mach-Zehnder-Interferometer vorgestellt, der den Hauptnachteil des Michelson-Aufbaus eliminiert. Hierbei wird die Trägerfrequenz mittels *Virtuellem Doppelspalt*, statt über eine Spiegelverkipfung, eingeleitet. Auf diese Weise kann der Shear immer passend zur Messaufgabe, ohne Mess-Qualitätseinbußen, eingestellt werden. Dies wird an einem Praxisbeispiel verdeutlicht. Des Weiteren wird gezeigt, wie die Messlichtstärke mithilfe von Polarisationsoptiken verdoppelt und wie der Aufbau mittels Diffusorglas-Einsatz für schnelle holografische Auswertungen genutzt werden kann.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Unterstützung des Projektes.



### REFERENZEN

- [1] Prof. Dr. M. Schuth und Dr. W. Buerakov, *Handbuch Optische Messtechnik*, München: Karl Hanser Verlag, 2017.
- [2] Dantec Dynamics A/S, „Non-Destructive-Inspection on Bonded Sandwich Structures using Shearography,“ [www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com), [Online]. Available: <https://www.dantecdynamics.com/non-destructive-inspection-on-bonded-sandwich-structures-using-shearography>. [Zugriff am 10 07 2018].
- [3] Prof. Dr. L. Yang und Dr. X. Xie, *Digital Shearography - New developments and applications*, Oakland University, USA: SPIE PRESS, 2016.
- [4] C. Petry und Prof. Dr. M. Schuth, „Spatial Phase Shift Shearography for Enhanced NDT,“ Rolf Diederichs, [www.ndt.net](http://www.ndt.net), 2018.
- [5] Dr. W. Buerakov, *Interferometrische Bauteilprüfung, Schadenserkenntnis und Ermittlung der modalen Parameter mittels dynamischer Belastung*, Saarbrücken: Shaker Verlag Aachen, 2016.
- [6] H. Gerhard, *Dissertation: Entwicklung und Erprobung neuer dynamischer Speckle-Verfahren für die zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung*, Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik: Universität Stuttgart, 2007.
- [7] B. Basanta, M. N. Krishna und M. P. Kothiyal, „Use of spatial phase shifting technique in digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital shearography (DS),“ *Optical Society of America, Applied Optics Laboratory, Department of Physics, Indian Institute of Technology Madras, Chennai TN 600 036, India.*; R.S. Sirohi, Barkatullah University, Bhopal, MP 422026, India, 2006.
- [8] G. Pedrini, Y.-L. Zou und H. J. Tiziani, „Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method,“ *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, Volume 5, Number 3, DOI:10.1088/0963-9659/5/3/008, 1996.
- [9] A. Fernández, A. F. Doval, A. Dávila, J. Blanco-García, C. Pérez-López and J. L. Fernández, „Double-pulsed carrier speckle-shearing pattern interferometry for transient deformation analysis,“ *Proceedings of SPIE; The International Society for Optical Engineering* 3478; DOI: 10.1117/12.312955, Universidade de Vigo, Departamento de Física Aplicada ETSEIM Lagoas-Marcosende, 9. E-36200 Vigo (SPAIN); Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. Apartado Postal 1-948. 37150 León-Gto (MEXICO), 1998.
- [10] X. Xie, Prof. Dr. L. Yang, N. Xu and X. Chen, „Michelson Interferometer based spatial phase shift shearography,“ *Optical Society of America, APPLIED OPTICS* Vol. 52 No. 17, 2013.
- [11] C. Petry und Prof. Dr. M. Schuth, „Multi-Wavelengths Michelson Interferometer Based Spatial Phase Shift Shearography with Color Camera,“ in *SAE International - WCX World Congress Experience, Cobo Center, Detroit Michigan, USA, April 9-11, 2019*.
- [12] Dr. M. Schuth, *Aufbau und Anwendung der Shearografie als praxisgerechtes, optisches Prüf- und Messverfahren zur Dehnungsanalyse, Qualitätssicherung und Bauteiloptimierung*, Universität Kassel: VDI Fortschrittsberichte Reihe 8 Nr. 539, 1996.
- [13] Prof. Dr. M. Schuth und C. Petry, „Vorrichtung zum optischen Messen einer Oberfläche“. Deutschland Patent Patent Nr. 10 2019 103 814, 02 07 2020.
- [14] X. Gao<sup>1</sup>, Y. Wang<sup>1</sup>, X. Dan<sup>1</sup>, B. Sia<sup>2</sup> und Prof. Dr. L. Yang<sup>1,2</sup>, „Double Imaging Mach-Zehnder Spatial Carrier Digital Shearography,“ *Journal of Modern Optics*, Vol. 66 Issue 2; <https://doi.org/10.1080/09500340.2018.1513173>, <sup>1</sup>School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, People's Republic of China; <sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester, MI, USA, Dez 2018.
- [15] H. Naumann, G. Schröder und M. Löffler-Mang, *Handbuch Bauelemente der Optik*, 7. Auflage, Karlsruhe: Carl Hanser Verlag München Wien, 2014.

Kontakt: [petryc@hochschule-trier.de](mailto:petryc@hochschule-trier.de)

## Pulverbettüberwachung bei der Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen durch aktive Thermografie

Fabian Herzer<sup>1</sup>, Johannes Schilp<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer IGCV, Augsburg

**KURZFASSUNG** | Additive Fertigungstechnologien finden zunehmend Anwendung in der industriellen Fertigung. Das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (engl. Laser Beam Melting, LBM) gewinnt hierbei insbesondere in der Luft- und Raumfahrt-industrie auch für die Serienfertigung an Bedeutung. Um die geforderten hohen Qualitätsstandards erfüllen zu können, rücken Technologien und Systeme zur Qualitätssicherung innerhalb der Prozesskette immer mehr in den Fokus. Die Überwachung der Pulveraufbringung spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da Ungängen bzw. Defekte im verfestigten Schichtaufbau meist hier ihre Ursache haben. Aktuelle Forschungen befassen sich mit der Herstellung von laseradditiv gefertigten Multimaterialbauteilen, bei denen mehrere Werkstoffe innerhalb einer Schicht verarbeitet werden. Durch diese Prozessmodifikation ergibt sich für die Pulverbettüberwachung neben der bereits bestehenden Herausforderung, der Erkennung von Beschichtungsfehlern, zusätzlich die neue Anforderung der Materialunterscheidung. Im Rahmen des Multimaterialzentrum Augsburgs wird im Forschungsprojekt Multisurv untersucht, welches Potenzial die aktive Thermografie zur Erfüllung dieser Anforderungen besitzt. Durch Voruntersuchungen außerhalb der Anlage konnte bereits nachgewiesen werden, dass Pulver unterschieden, Beschichtungsfehler ab 100 µm und Schichtdickenunterschiede ab 50 µm im Pulverbett detektiert werden können. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse für den Prozess überprüfen zu können, wurde die aktive Thermografie in eine Laserstrahlschmelzanlage integriert und Versuche in der realen Prozessumgebung durchgeführt. Nachfolgend wird daher dargestellt, inwieweit Beschichtungsfehler im Pulverbett und Pulverschichtdickenunterschiede auf bereits verfestigten Schichten mit dem gewählten Ansatz während des Prozesses detektiert werden können.

### Einleitung

Additive Fertigungsverfahren können aufgrund vielfältiger spezifischer Vorteile, wie beispielsweise der Designfreiheit und der Möglichkeit zur direkten Funktionsintegration, in vielen Bereichen der Produktion einen Mehrwert bieten. Für Unternehmen ergeben sich unter anderem in der Konstruktion neue Möglichkeiten, um die Bauteilfunktionen weiter zu optimieren und Entwicklungszeiten durch Prototypenbau zu reduzieren. Im Bereich der Supply Chain stehen Ersatzteile durch das CAD-Modell und dem Wegfall produkt-spezifischer Werkzeuge sowohl örtlich als auch zeitlich unbegrenzt zur Verfügung [1]. Diese technologiespezifischen Vorteile sowie die stetige Weiterentwicklung der einzelnen Verfahren haben in den letzten Jahren zu einem durchschnittlichen Wachstum der additiven Fertigungsbranche von knapp 25 % geführt. Insbesondere der Metallbereich konnte in Bezug auf die verkauften Fertigungsanlagen und Materialien deutlich zulegen, was die wachsende Bedeutung und Etablierung metallbasierter Verfahren widerspiegelt [2].

Um diese Entwicklung weiter vorantreiben zu können, müssen die aktuellen Herausforderungen der Branche angegangen werden. Dazu zählen neben einer Reduktion der laufenden Kosten unter anderem auch die Erhöhung der Produktivität, sowie deutliche Fortschritte im Bereich der Qualitätssicherung und Zertifizierung, um Teile für stark reglementierte Industrien wie Luft- und Raumfahrt oder Medizin produzieren zu können. Additive Bauteile müssen dabei dieselben Standards erfüllen wie konventionell gefertigte Produkte, wofür aktuell noch in Teilen die entsprechenden Ansätze und Technologien fehlen bzw. diese noch nicht ausgereift sind [2, 3].

Im Bereich der Qualitätssicherung stellt einer der großen Vorteile der additiven Fertigung, die Designfreiheit, gleichzeitig eine große Herausforderung dar. Zerstörungsfreie Prüftechnologien die zur Detektion prozessbedingter Ungängen wie Poren, Risse, Delaminationen oder Bindefehler eingesetzt werden können, stoßen durch komplexe

Strukturen an ihre Grenzen. Einzig die Computertomografie (CT) ist in der Lage auch komplexe Strukturen zu untersuchen. Allerdings sind CT-Scans sowohl kosten- als auch zeitintensiv und Risse können mit dieser Technologie nicht erkannt werden. Dadurch ist es technisch und wirtschaftlich nicht möglich, komplette Bauteile nach dem Prozess auf mögliche Defekte zu untersuchen [3, 4]. Eine Möglichkeit dies zu umgehen, ist die Überwachung der einzelnen Prozessschritte sowie der sich einstellenden Prozessbedingungen beim Laserstrahlschmelzen. Dadurch ist es möglich, Prozessabweichungen und potenzielle Gefügeungängen direkt bei der Entstehung zu erkennen. Für den Prozessschritt der Pulverschichterzeugung haben die Anlagenhersteller bereits Systeme entwickelt, welche mehrheitlich off-axis CMOS-Kameras in Kombination mit einer optimierten Ausleuchtung des Bauraums nutzen. Dadurch können Beschichtungsfehler erkannt und Gegenmaßnahmen wie eine Neubeschichtung oder eine Anpassung des Dosierfaktors durchgeführt werden [3].

Durch die Befähigung des Laserstrahlschmelzens, mehrere Materialien gleichzeitig in einem Baujob verarbeiten zu können, entstehen auch neue Anforderungen an die Pulverbettüberwachung [5]. Die Unterscheidung der Materialien ist dabei die zentrale Herausforderung. Je nach eingesetztem Auftragsmechanismus müssen diese innerhalb einer Schicht oder in unterschiedlichen Schichten erkannt werden [5–7]. Im Rahmen des MULTIMATERIAL-Zentrum Augsburgs wird im Teilprojekt Multisurv die Eignung der aktiven Thermografie für diese Prüfaufgabe untersucht. Der nachfolgende Beitrag beschreibt die Vorgehensweise, wie die Erkenntnisse aus ex-situ Untersuchungen [8, 9] an einem, für dieses Prüfzenario erstellen, Teststand für die Erstellung und Umsetzung eines Konzepts zur Anlagenintegration genutzt und mit Ergebnissen aus der realen Prozessumgebung verglichen wurden.

## 1. Ex-situ Untersuchungen

### 1.1 Prüfkonzept und Messaufbau

Für das Laserstrahlschmelzen stellt die korrekte Aufbringung der Pulverschicht einen der entscheidenden Prozessschritte im gesamten Prozessablauf dar. Bereits geringe Abweichungen in der Schichtstärke können zu einer Veränderung des Energieeintrags führen und beeinflussen somit die resultierende Bauteilqualität [10]. Neben einer fehlerhaften Prozessvorbereitung, beispielsweise durch die falsche Wahl des Zustellfaktors des Pulvers oder einer ungenauen Einstellung des Beschichters, können auch im Verlauf des Prozesses Störungen auftreten, welche die korrekte Schichtaufbringung verhindern. Dazu zählen neben dem Verschleiß des Beschichtungsmechanismus, der unter anderem durch einen Bauteilverzug aufgrund fehlerhaft ausgewählter Stützstrukturen und der daraus resultierenden Kantenerhöhung entstehen kann, auch die unerwünschte Spratzerbildung [11].

Um diese Prozessabweichungen simulieren und erste Erkenntnisse zum Leistungsvermögens der aktiven Thermografie für diese Prüfaufgabe gewinnen zu können, wurde ein Prüfstand gebaut [8] (Abbildung 1). Durch das Absenken der, auf dem Positioniertisch angebrachten, Bauplattform (125 x 125 mm) konnten in 10 µm-Schritten unterschiedliche Schichtstärken generiert werden. Das Aufrakeln des Pulvers wurde dabei manuell mit einer Beschichterbürste der Zielanlage, einer AconityOne der Aconity GmbH, durchgeführt.

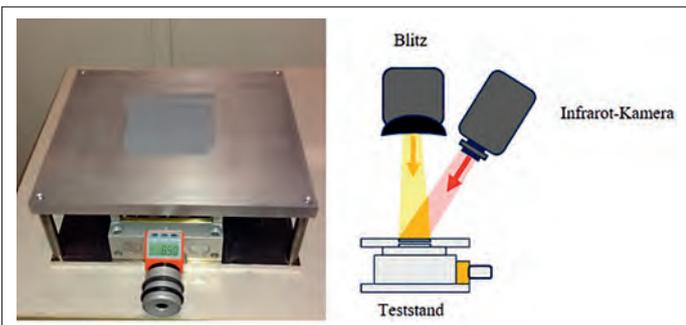


Abb. 1. Pulverteststand mit absenkbarer Bauplatte sowie thermografische Prüfanordnung (Abstand Kamera - Bauplatte = 370 mm, Winkel Kamera - Pulverbett = 65°, Abstand Anregung - Bauplatte = 320 mm)

Inhalt der durchgeführten Ex-situ Untersuchungen waren Schichtdickenunterschiede auf bereits verfestigten Schichten, die Vermessung von Einzelspuren, welche durch beschädigte Beschichterbürsten während des Prozesses auftreten können und Werkstoffunterscheidung.

Für die Versuche zur Erkennung von Schichtdickenunterschieden wurden zwei bereits gefertigte Proben (L x B x H: 20 x 10 x 10 mm) auf der Bauplattform fixiert, deren letzte Schicht auf dieselbe Höhe wie die Platte des Prüfstandes gebracht und die restliche Bauplatte mit Pulver des Edelstahl 316L (Werkstoffnummer: 1.4404) aufgefüllt. Anschließend wurde schrittweise die Pulverschicht auf einer der beiden Proben um 10 µm bis maximal 60 µm erhöht und mit einer Blitzleistung von 3000 J angeregt.

Um die Fehlergrößen beschädigter Beschichterbürsten mittels Laser-Scanning-Mikroskop vermessen zu können, wurde eine entsprechende Bürste verwendet, um bereits auf Metallblättchen appliziertes Pulver zu entfernen. Aufgrund der Beschädigungen verblieben die zu untersuchenden Spuren nach diesem Abrakelvorgang.

Bei allen Untersuchungen kam eine Infrarot (IR) Kamera mit einem gekühlten InSb-Detektor zum Einsatz, welche im mittleren Infrarotbereich (2,5 bis 5,1 µm) sensitiv ist. Der Detektor mit 640 x 512 Pixeln

wurde für die Untersuchungen zu den Beschichtungsfehlern im Vollbildmodus bei 100 Bildern pro Sekunde verwendet und bei den Untersuchungen zu Schichtdickenunterschieden in den Teilbildmodus versetzt (208 x 200 Pixel), um Bildwiederholraten von 500 Bildern pro Sekunde erzielen zu können. Bei allen Messungen wurde zudem der Hochpassfilter LP4090 eingesetzt.

### 1.2 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Für die Auswertung der Versuche zu den Schichtdickenunterschieden wurden rechteckige ROIs über den Proben platziert und die Zeitverläufe der Intensitäten hinsichtlich eines maximalen Kontrastes untersucht (Abbildung 2).

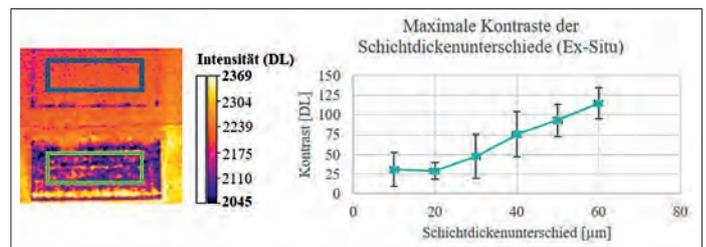


Abb. 2. Untersuchungen zur Schichtdickenunterscheidung. Links: Thermogramm mit platzierten ROIs bei 40 µm Schichtdickenunterschied Rechts: Verlauf des maximalen Kontrastes bei steigenden Schichtdickenunterschieden

Anhand der Versuchsdaten ist zu erkennen, dass die Kontraste bei Schichtdickenunterschieden < 30 µm sehr gering ausfallen. Dieser Umstand und die großen Schwankungen in den Messungen führen dazu, dass eine eindeutige Identifikation von Schichtdickenunterschieden nicht möglich ist. Ab einem Unterschied von 40 µm zeichnen sich stärkere Kontraste ab und die Schwankungen zwischen den einzelnen Messwerten reduzieren sich.

Bei der Bestimmung der Fehlergrößen beschädigter Beschichterbürsten konnten Spurbreiten im Bereich von 120 µm bis hin zu mehreren Millimetern festgestellt werden. Die in der Abbildung 3 dargestellte Rille weist eine Breite von ca. 500 µm auf.

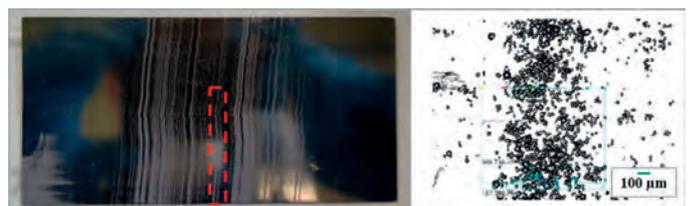


Abb. 3. Vermessung von Einzelspuren beschädigter Beschichterbürsten, Links: Verbleibende Rillen nach dem Pulverabrakeln, Rechts: Laser-Scanning-Mikroskop-Aufnahme einer Spur.

## 2. In-situ Untersuchungen

### 2.1 Integrationskonzept für In-situ Untersuchungen

Um den Einfluss von Prozessbedingungen, wie beispielsweise die Schutzgasströmung oder Temperaturentwicklungen innerhalb der Prozesskammer, untersuchen zu können, wurde ein Modul entwickelt, welches die Integration der Kamera und eines Blitzes in die Prozesskammer der AconityOne ermöglicht (Abbildung 4). Für einen möglichst steilen Betrachtungswinkel der Kamera auf die Bauplatte, wurde der Einkoppelbereich des Lasers von 394 mm auf 150 mm

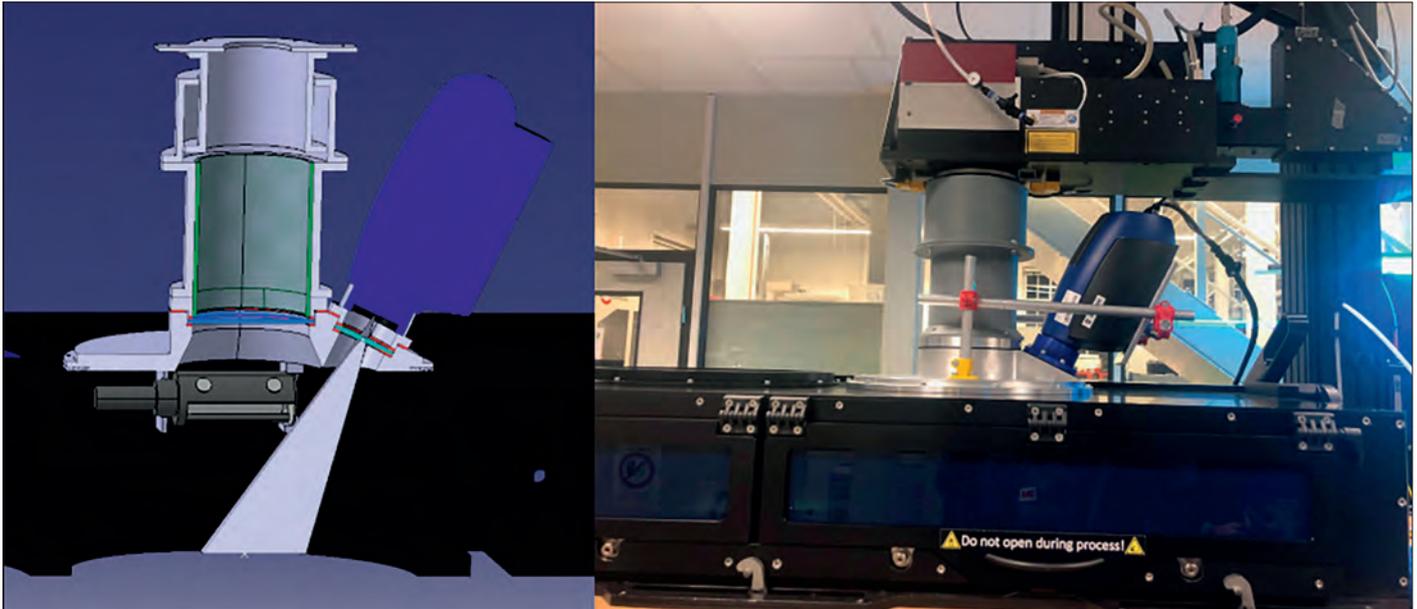


Abb. 4. Thermografiemodul für die Integration in die AconityOne (Abstand Kamera - Bauplatte = 370 mm, Winkel Kamera - Pulverbett = 65°, Abstand Anregung - Bauplatte = 320 mm)

reduziert. Somit war es möglich, die Kamera in einem Winkel von 65° zum Zentrum der Bauplatte zu positionieren. Um keine Prozess- bzw. Streustrahlung zu erfassen, wurde ein Germanium-Glas als Prozessfenster vor der Kamera installiert.

## 2.2 Untersuchungen

Für die Erzeugung von Beschichtungsfehlern aufgrund beschädigter Beschichterbürsten, wurden Baujobs regulär vorbereitet. Nach Ausrichtung der Bauplatte und Applikation der initialen Pulverschicht, wurde die zuvor eingesetzte unbeschädigte durch eine beschädigte Beschichterbürste ersetzt und die Schichtaufbringung durchgeführt. Aufgrund begrenzter Möglichkeiten, Schichtdickenunterschiede wie bei den Vorversuchen auf bereits verfestigten Schichten im Prozess erzeugen zu können, wurde nach fehlgeschlagenen Versuchen der Ex-Situ-Prüfstand um das Thermografiemodul erweitert und die Maschinengegebenheiten berücksichtigt. Versuche innerhalb der Anlage hatten keine nennenswerten Störeinflüsse z. B. durch die Schutzgasströmung oder bisher unbekannte Temperaturentwicklungen hervorgebracht. Hierbei ist anzumerken, dass zur Verarbeitung des untersuchten Werkstoffes 316 L keine Vorheizung der Bauplatte notwendig ist.

Zur direkten Vergleichbarkeit wurden die bereits erwähnten Parametereinstellungen für die Anregung und Bildaufnahme der Vorversuche verwendet.

## 3. Messergebnisse der Blitzthermografie

### 3.1 Beschichtungsfehler durch beschädigte Beschichterbürsten

Die Untersuchungen innerhalb der Anlage brachte hervor, dass Beschichtungsfehler ab ca. 300 µm detektiert werden können. Durch den Einsatz des Sobel X-Kantenerkennungsfilters, können diese auch in schlechter angeregten Bereichen des Kamerabildfeldes erkannt werden (s. Abbildung 5).

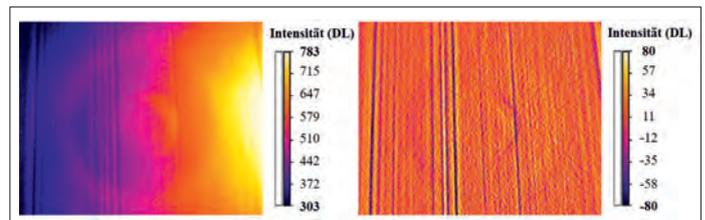


Abb. 5. Rillenbildung durch beschädigte Beschichterbürste, Links: Bild nach Hintergrundsubtraktion, Rechts: Anwendung des Sobel X-Filters

### 3.1 Schichtdickenunterschiede

Die Ergebnisse der Testreihen mit Integrationsmodul weisen einen ähnlichen Trend wie die Voruntersuchungen auf. Auch hier stellen sich ab 40 µm höhere Kontraste ein (s. Abbildung 6).

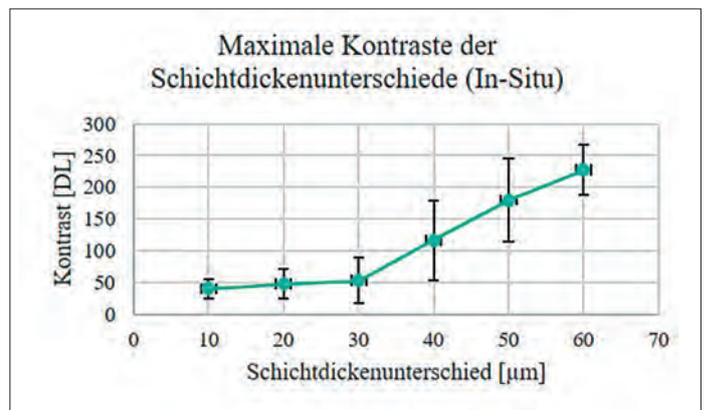


Abb. 6. Verlauf des maximalen Kontrastes bei steigenden Schichtdickenunterschieden

Durch das Germanium-Glas, sowie der Unterschiede bei der Positionierung der Anregungsquelle, stellen sich andere Intensitätswerte ein und es kommt zu größeren Abweichungen bei den einzelnen Messungen.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der durchgeführten Versuche konnte festgestellt werden, dass mittels des Prüfaufbaus Beschichtungsfehler durch beschädigte Beschichterbürsten ab einer Breite von ca. 300 µm und Schichtdickenunterschiede ab 50 µm detektiert werden können. Das Modul besitzt in der aktuellen Form noch Optimierungspotenzial, insbesondere im Hinblick auf die Anregung. Dies gilt es zu überarbeiten und die Auswirkungen auf das Detektionsergebnis zu erfassen.

Im weiteren Verlauf des Projektes Multisurv soll die AconityOne für die Multimaterialverarbeitung befähigt und der Prüfansatz zur Kontrolle des Pulverauftrags angewendet werden.

#### REFERENZEN

- [1] M. Lutter-Günther, C. Seidel, G. Reinhart und A. Baader, Hg., *Geschäftsmodelle für den Einsatz der additiven Fertigung in der industriellen Praxis*, 2015.
- [2] W. Associates, *Wohlers report 2019: 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Fort Collins (Colo.): WOHLERS Associates, 2019.
- [3] M. Grasso und B. M. Colosimo, „Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review“, *Meas. Sci. Technol.*, Jg. 28, Nr. 4, S. 44005, 2017, doi: 10.1088/1361-6501/aa5c4f.
- [4] B. Dutton, M. H. Rosli und D. Ross-Pinnock, „NDT Standards for Additive Manufacturing“. Grenoble, 10. Apr. 2018.
- [5] C. Anstaett und C. Seidel, „Multi-Material Processing in Laser Beam Melting: Next step in laser-based powder bed fusion“, *Laser technik Journal*, Nr. 4, S. 30–31, 2016.
- [6] X. Zhang, C. Wei, Y.-H. Chueh und L. Li, „An Integrated Dual Ultrasonic Selective Powder Dispensing Platform for Three-Dimensional Printing of Multiple Material Metal/Glass Objects in Selective Laser Melting“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Jg. 141, Nr. 1, S. 761, 2019, doi: 10.1115/1.4041427.
- [7] A. Beodret, M. Hick und K. Eckes, „DEVICE AND METHOD FOR MANIPULATING PARTICLES,“ US 2019 / 0240902 A1, Okt 8, 2019.
- [8] F. Herzer und J. Schilp, „Aktive Thermografie als In-Prozessüberwachungsmethode für Selektives Laserstrahlschmelzen“ in *Thermographie-Kolloquium 2019, Halle (Saale)*, 2019.
- [9] M. Binder et al., „Potentials and challenges of multi-material processing by laser-based powder bed fusion“, *Texas*, 2018.
- [10] R. Li, J. Liu, Y. Shi, L. Wang und W. Jiang, „Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process“, *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 59, 9-12, S. 1025–1035, 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3566-1.
- [11] B. K. Foster, E. W. Reutzel, A. R. Nassar, B. T. Hall und S. W. Brown, „Optical, layerwise monitoring of powder bed fusion“ in *Solid Freedom Fabrication Symposium Proceedings 2015*, S. 295–307.

Kontakt: [fabian.herzer@igcv.fraunhofer.de](mailto:fabian.herzer@igcv.fraunhofer.de)

## Zerstörungsfreie Bauteilprüfung von großflächigen, glasfaserverstärkten Schienenfahrzeug-Komponenten

Moritz Kaczmarek<sup>1</sup>, Marco Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup> RCS GmbH Rail Components and Systems, Königsbrück, Deutschland

Grundlage des Beitrages ist meine eigens angefertigte Diplomarbeit. Diese beinhaltet sensible Informationen aus der Industrie und ist derzeit für eine Veröffentlichung gesperrt. Im Folgenden ist der Inhalt der wissenschaftlichen Arbeit grob zusammengefasst dargestellt.

Die Frontverkleidung unterstreicht das charakteristische Aussehen des Schienenfahrzeuges. Solche Komponenten mit ihren ausgeprägten Freiformflächen werden in der Regel aus faserverstärkten Kunststoffen hergestellt. Bewährt haben sich dabei die glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK), die auch bei hochdynamisch belasteten Rotorblättern von Windenergieanlagen Anwendung finden. Beispiele für etablierte GFK-Lösungen im Schienenfahrzeugbau sind Innen- und Außenverkleidungen, Führerpulte und Nasszellen. Der Bedarf an gegenüber den klassischen metallischen Werkstoffgruppen vergleichsweise neuartigen Bauweisen und Werkstoffen nimmt in der Schienenfahrzeugindustrie zu. Begründet liegt dies in den steigenden Fahrzeugmassen, die aus den Anforderungen an die Mehrsystemfähigkeit, den Fahrgastkomfort und den alternativen Antrieben herrühren.

Die Herstellung von GFK-Strukturen ist von komplexen und manuellen Formgebungsprozessen geprägt. Für die Bewertung der resultierenden Laminatqualität stehen bislang lediglich erfahrungsbasierte und sehr grob auflösende Verfahren zur Verfügung. Unter Umständen bleiben durch das fertigungsbedingt höhere Risiko entstehende Strukturdefekte wie z. B. Luftporen, Trockenstellen oder sogar flächige Laminatablösungen unerkant. Im weiteren Verlauf können solche Defekte während der Nutzungsdauer von mehreren Jahrzehnten zu hohen Folgekosten führen und im schlimmsten Fall die Fahrgastsicherheit im Betrieb gefährden. Mit dem Maße der Beschaffung solcher GFK-Bauteile aus sogenannten low-cost-countries steigt auch die Bedeutung für eine objektive, werkstoffspezifische und dauerhaft nachweisbare Dokumentation der tatsächlichen GFK-Qualität. Aus der Notwendigkeit die i. O.-Laminatqualität im Serienprozess unter qualitätssichernden Gesichtspunkten zu verdeutlichen, wurden bereits in den zurückliegenden Jahren im Zuge grundlegender Vergleichsmessungen verschiedene ZfP-Methoden (Terahertz, Ultraschall, aktive Thermografie) untersucht und bewertet. Ziel war es ein geeignetes Prüfverfahren zu identifizieren, welches im industriellen Produktionsumfeld zuverlässig für großflächige GFK-Komponenten von bis zu 25 m<sup>2</sup> zur Anwendung gebracht werden kann.

Konkret wurden in der ersten Stufe des Versuchsprogramms GFK-spezifische Aufbauten ausgewählt und als großflächige Musterplatten von 1 m x 1 m gefertigt. Darin wurden bereichsweise typische Fehlerbilder, wie etwa Porenfelder, Trockenstellen, Delamination sowie Laminatablösungen in unterschiedlicher Größe und Tiefenlage eingebracht.

Gemessen an den Anforderungen an ein solches Verfahren, bestehend aus der Defektdetektion sowie den eingangs festgelegten industriellen Anforderungen (z. B. einseitige Bauteilzugänglichkeit, Kosten, großflächig effiziente Prüfung), hat sich die aktive Thermografie in Form der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) durchgesetzt. Unter Einsatz der PPT wurden alle Defekte nachweislich detektiert.

Diesen orientierenden Versuchen zur Untersuchung der Verfahrenseignung und Ermittlung der groben Verfahrensgrenzen hat eine Prüfmatrix zu Grunde gelegen. Ziel war es, die zeitliche Dimension (Anregungsdauer, Gesamtmessdauer) sowie räumliche Dimension (Abstand Vorrichtung zu Prüfobjekt) voneinander möglichst losgelöst zu betrachten. Das Ergebnis sind vorläufig optimierte Prüfparameter für die Anwendung der PPT an GFK-Materialien.

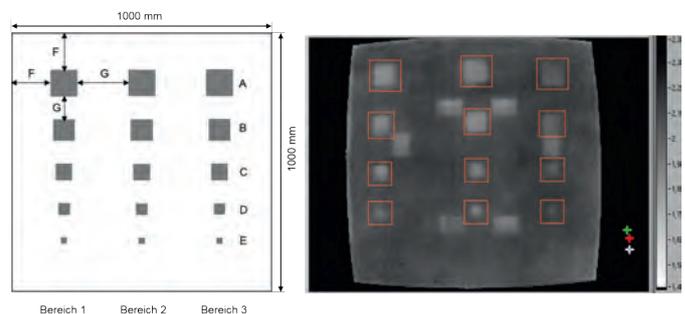


Abbildung 1: Beispielbild Fehlerdetektion Trockenstellen

Nachdem die Wirksamkeit des Verfahrens für die Musterplatten erbracht wurde, schloss sich die Übertragung dieser ZfP-Methode auf Großkomponenten an. Bei der Planung der weiterführenden Versuche kristallisieren sich die folgenden Sachverhalte als zentrale Fragestellungen heraus:

- Einfluss geometriebedingter Bauteilkrümmungen,
- Einfluss struktureller Materialverteilungen (verschiedene Laminatbereiche, monolithische und Sandwich-Aufbauten, Dickenunterschiede etc.),
- Einfluss Faser-Volumen-Gehalt (Anisotropie der Materialeigenschaften).

Die Bauteilkrümmungen begrenzen den maximal möglichen Messbereich mittels der Thermografie. Da der Einfallswinkel des optischen Feldes der IR-Kamera zu groß wird, entsteht in der Thermografie-Aufnahme in den Randbereichen des Bildes ein sehr großes Rauschen. Im Gegensatz zu den rauscharmen Bildbereichen ist hier keine aussagekräftige Bewertung der Randbereiche möglich. Unterschiedliche Materialverteilungen beeinflussen zwar die Bildqualität und Darstellung der Thermografie-Aufnahme, wirken sich aber nicht negativ auf die Detektion der Defekte aus. Aus den Untersuchungen bei der RCS GmbH konnte ermittelt werden, dass lediglich der Parameter der notwendigen Anregungszeit beeinflusst wird, was Auswirkungen auf die Gesamtmessdauer hat.

Auf Grundlage der vorgestellten Arbeiten an der strukturspezifischen Defektdetektion an GFK-Komponenten wurde bei der RCS GmbH ein geeignetes Prüfsystem implementiert. Mit dieser reproduzierbaren Methode wird die Laminatqualität feinmaschig und dauerhaft dokumentiert und gleichzeitig reduzierte sich der Zeitaufwand zur Überprüfung der Laminatqualität pro Großkomponente um ca. 25 %. Neben dem Einsatz zur Absicherung der Laminatqualität im Fertigungsprozess unterstützt der RCS-Service Fahrzeughersteller, Betreiber und Instandhaltungswerke bei der Schadensbefundung

von GFK-Komponenten, die im Betrieb beschädigt wurden. Bislang konnten solche Beschädigungen nur oberflächlich bewertet werden. Allerdings treten beispielsweise bei einer Baumkollision Schlagbeanspruchungen (Impact) auf, die bei GFK gegenüber metallischen Werkstoffen zu anderen mechanischen Zusammenhängen führen. Deren Auswirkungen sowie das tatsächliche Schadensausmaß in der Fläche und in der Tiefe sind bei einer rein oberflächlichen Betrachtung nicht oder nur unzureichend bewertbar. Im Zweifelsfall werden solche Bauteile gegen ein Ersatzteil getauscht, was neben Kapazitäten beim Rückbau der Anbauteile eben auch Ressourcen bei der Ersatzteilbeschaffung bindet und die Fahrzeug-Ausfallzeit weiter verlängert.

Daraus ergibt sich der Bedarf, fehlerhafte oder verunfallte Strukturen mittels ZfP fundiert abzuprüfen und daraus zweckdienliche Reparaturmaßnahmen zur Werterhaltung und Ressourcenschonung abzuleiten (Abbildung 2). Damit kann die Strukturintegrität und die einwandfreie Funktion des Bauteils über mehrere Jahrzehnte sichergestellt werden. Die elementaren industriellen Anforderungen an eine effiziente Untersuchung betroffener Komponenten werden mit dem berührungslosen, großflächig bildgebenden und einseitig zugänglichen ZfP-Verfahren erfüllt.

Ergänzend ist es dem RCS-Service möglich, die PPT im Rahmen von Schadensbefundungen an sich in Betrieb befindlicher, d. h. am Schienenfahrzeug verbauter Komponenten mobil zum Einsatz zu



Abbildung 2: Prozessablauf der Schadensbefundung inklusive Anwendung geeigneter Reparaturmaßnahmen

bringen (Abbildung 3). Durch die mobile Anwendung ist es uns möglich, den Zeitaufwand für den Betreiber, bis ein verunfalltes Fahrzeug wieder betriebsbereit ist, um mehrere Wochen oder sogar Monate zu verkürzen. Gleichzeitig werden Kosten bei der Bereitstellung des notwendigen Materials sowie durch den Wegfall aufwendiger Demontage- und Montageprozesse eingespart.

Falls Sie Fragen zur technischen Umsetzung oder der Organisation der Durchführung in Deutschland und Europa haben, stehen wir Ihnen gerne als Ansprechpartner zur Verfügung.



Abbildung 3: Mobile Schadensbefundung mittels ZfP/aktiver Thermografie

Kontakt: Moritz.Kaczmarek@railcomsys-gmbh.de

## BEITRAG 12

## Grenzen und Potenziale der Thermografie für die Qualitätssicherung beim Ultraschallschweißen

Christopher Pommer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Zum Verbinden von Kunststoffbauteilen werden zur Bewältigung hoher Stückzahlen meist Serienschweißverfahren, wie das Ultraschallschweißen eingesetzt. Obwohl das Ultraschallschweißen ein sehr verbreitetes Fügeverfahren ist, können dennoch Qualitätsschwankungen auftreten, die nicht mittels üblicher Überwachungsparameter der Schweißmaschine erkannt werden können.

Ziel eines abgeschlossenen Forschungsprojektes am Kunststoff-Zentrum – SKZ war es daher, die Grenzen und Potenziale einer inline Qualitätskontrolle mittels Thermografie zu untersuchen. Im Rahmen des Projekts wurde eine Qualitätssicherungsmöglichkeit geschaffen, mit der die Lücke nicht detektierbarer Fehlerquellen durch die Maschinenüberwachung mit Hilfe der Thermografie geschlossen werden konnte. Hiermit wurde ein weiterer Schritt Richtung 100 % Kontrolle durch zerstörungsfreie Prüfung gegangen.

Beim Ultraschallschweißen entsteht die Wärme durch Dissipation (innere molekulare Reibung) und Grenzflächenreibung der Fügeflächen. Das Prinzip des Aufschmelzens beruht darauf, Energie in Form einer mechanischen Schwingung in das zu schweißende Bauteil einzuleiten und den Kunststoff in der vorgesehenen Schweißnahtgeometrie aufzuschmelzen. Im theoretischen Idealfall wird die gesamte Energie ohne Verluste in die Fügezone zum Schweißen eingebracht. Aus ästhetischen Gründen ist bei Serienprodukten die Schweißnaht durch Designs der Bauteile häufig nicht sichtbar und kann daher thermografisch nicht direkt erfasst werden. Als neuartigen wissenschaftlichen Ansatz zur zerstörungsfreien Prozessüberwachung wurde daher die oberflächennahe Absorption der Schallenergie durch das Dämpfungsverhalten der Kunststoffe und dem damit erhöhten Energiebedarf beim Schweißen bewertet. Es wurde demnach nicht die Erwärmung der Schweißnaht selbst oder die Wärmeleitung der Schweißnaht an die Oberfläche betrachtet, sondern die Erwärmung der Bauteiloberfläche durch Schallabsorption. Die Temperaturverteilung sollte dabei einen Hinweis auf die Energieeinbringung in das Bauteil während des Schweißprozesses wiedergeben. Hierbei war weniger die Bestimmung einer Absoluttemperatur relevant, sondern vielmehr die Änderung der Bauteiltemperatur im Vergleich zu einer Referenzschweißung.

Üblicherweise werden zur Erfassung eines Thermogrammes sog. Histogramme erstellt, mit deren Hilfe zahlenmäßig erfasst werden kann, wie häufig eine Temperatur in einem Thermogramm vorhanden ist. Um effizient eine Vielzahl an Schweißungen thermografisch auswerten zu können, wurde vom SKZ eine Auswertungssoftware weiterentwickelt. Mit dieser Software können schnell rechnerische und visuelle Mittelwerte aus mehreren Schweißungen erzeugt werden (Abbildung 1, oben). Diese Software ermöglicht neben der klassischen Temperaturmessung und -aufzeichnung zudem die Erstellung von sog. Differenzbildern. Anhand von Temperaturunterschieden einzelner Pixel können visuelle Unterschiede nachvollziehbar dargestellt und messtechnisch erfasst werden. Hierdurch kann beispielsweise eine schnelle Gegenüberstellung von verschiedenen Schweißungen zu einer Referenz (z. B. Mittelwert eines Prozesses) erfolgen (Abbildung 1, unten). Eine solche Auswertungsmethode war Grundvoraussetzung, um schnell eine Vielzahl an Schweißungen betrachten zu können, wie es für den Ultraschallschweißprozess bei Schweißzeiten von unter einer Sekunde erforderlich ist.

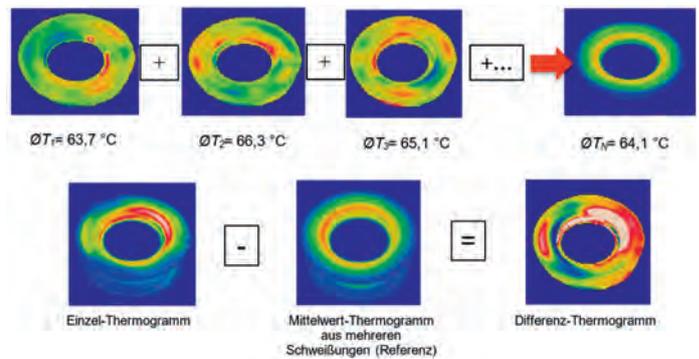


Abbildung 1: Mittelwertbildung aus mehreren Einzelschweißungen (oben) sowie Darstellung eines Ist-Thermogramms, eines Referenz-Thermogramms und Berechnung eines Differenzthermogramms (unten)

Im Rahmen des Projektes konnten viele Einflüsse auf den Schweißprozess und auf die resultierende Oberflächentemperatur ermittelt werden. Die Ergebnisse ließen Zusammenhänge zwischen der Oberflächentemperatur von Bauteilen und der Schweißnahtqualität erkennen. Diese waren jedoch u. a. sehr abhängig von den Prozessparametern, der Materialien und der Schweißnahtgeometrie. Mittels der im Projekt festgelegten Auswertungsmethode von Thermogrammen konnten vergleichbare Aussagen bezüglich des Schweißprozesses getroffen werden, wie mit den Maschinenüberwachungsparametern Schweißenergie und -zeit. Somit ist eine Bewertung des Schweißprozesses mittels Thermografie prinzipiell geeignet und aussagefähig. Ein großer Vorteil der Thermografie liegt in der bildhaften Darstellung und der Vielzahl an unterschiedlichen Auswertungsmöglichkeiten. So konnten insbesondere Prozesseinflüsse visuell bewertet und Unregelmäßigkeiten am Bauteil lokal zugeordnet werden.

Im Rahmen des Projektes konnten noch nicht alle Abhängigkeiten und Einflüsse des Ultraschallschweißprozesses auf die thermografische Erfassung endgültig untersucht bzw. erklärt werden. Dennoch steht aktuell dank dieser Erkenntnisse bereits jetzt eine weitere Möglichkeit zur Fehleranalyse des Ultraschallschweißprozesses zur Verfügung und ermöglicht neue Ansätze für die Forschung und industrielle Anwendungen.

Das SKZ ist Mitglied der Zuse-Gemeinschaft. Diese ist ein Verbund unabhängiger, industrienaher Forschungseinrichtungen, die das Ziel verfolgen, die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der Industrie, insbesondere des Mittelstandes, durch Innovation und Vernetzung zu verbessern. Die gesamten Forschungsergebnisse können einem umfangreichen Forschungsbericht entnommen und über das SKZ erhalten werden.

Kontakt: C.Pommer@skz.de

BEITRAG 13

# Bindungsprüfung an Verbundgleitlagern im Pumpspeicherkraftwerk mit Phased-Array-Ultraschall

Stefan Berner<sup>1</sup>, Anne Jüngert<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MPA – Materialprüfungsanstalt, Stuttgart

**KURZFASSUNG** | In Wasserkraftwerken kommen an verschiedenen Stellen Verbundgleitlager zum Einsatz. Die Lagerschalen werden in Verbundbauweise aus einem Stützkörper und einem aufgegossenen Lagermetall hergestellt. Die Haftung des Verbundes ist für einen sicheren Betrieb essenziell. Deshalb wird die Haftung der Schichten der Lagerschalen bei den regelmäßig stattfindenden Revisionen zerstörungsfrei überprüft. Entsprechend der Norm wird die Haftungsprüfung über eine Ultraschallhandprüfung durchgeführt. Diese hat den Nachteil, dass die Prüfergebnisse nicht gespeichert werden und eine bildgebende Darstellung nicht möglich ist. Deshalb ist der Vergleich mit vorangegangenen Prüfungen schwierig.

Im Folgenden wird eine teilmechanisierte Prüfung von Verbundgleitlagerschalen vorgestellt, die bereits bei einer Revisionsprüfung eingesetzt wurde. Für die Prüfung wird ein Phased Array Prüfkopf verwendet, dessen Schallbündel in die Verbundebene fokussiert. Durch die Teilmechanisierung ist eine bildgebende Darstellung der Haftung möglich.

## 1. Motivation

Bei wiederkehrenden Prüfungen in Pumpspeicherkraftwerken werden auch die Lagerschalen verschiedener Verbundgleitlager (Generatorlager, Pumpenlager, Kupplungslager) geprüft. Diese Verbundgleitlager bestehen in der Regel aus einem Lagermetall, das auf einen Stützkörper aufgegossen wird [1]. Neben Oberflächenrissprüfungen kommt eine Ultraschallprüfung zur Überprüfung der Bindung zwischen den Komponenten des Verbundgleitlagers zum Einsatz. Die Prüfung erfolgt entweder nach speziellen Betreiberangaben oder nach Norm [2][3][4]. Als Prüfverfahren ist in der Norm eine Impuls-Echo-Prüfung mit geeigneten Senkrechtprüfköpfen spezifiziert. Bei fehlender Bindung zwischen Lagermetall und Stützkörper treten charakteristische Echos, sogenannte Bindungsechos, auf. Durch Abfahren der Prüffläche werden Bindungsfehler im A-Bild registriert und am Bauteil markiert. Die Ergebnisse werden fotodokumentarisch festgehalten. Die Prüfungen sind sehr zeitaufwendig und die Dokumentation für wiederkehrende Prüfungen nur über Fotos realisiert.

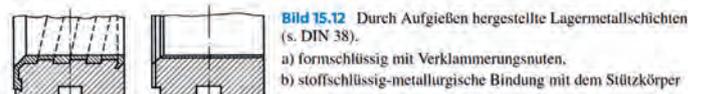
Die Norm geht in manchen Punkten nicht weit genug [5] und vernachlässigt Vorteile, die moderne Prüfverfahren, wie die Ultraschall Phased Array Prüfung, für die Prüfaussage bieten. Die Verwendung von Phased Array Prüfköpfen hat den Vorteil, dass über die Modellierung des Schallfelds der Fokus des Prüfkopfs in die Tiefenlage der Bindungsschicht gelegt werden kann und die Fehlerauflösung verbessert wird. Wird die Prüfung mechanisiert durchgeführt, kann statt der A-Bilder eine B-Bild oder C-Bilddarstellung gewählt werden und die Fehlstellen können anhand der Koordinaten den Bereichen im Bauteil zugeordnet werden.

Im Folgenden wird beschrieben, wie eine teilmechanisierte Phased Array Prüfung für die Prüfung an Lagerschalen angepasst wurde. Das Verfahren wurde zunächst im Labor qualifiziert und im Rahmen einer Revisionsprüfung in einem Pumpspeicherkraftwerk erfolgreich eingesetzt.

## 2. Beschreibung der Prüfobjekte

Die Anpassung des Verfahrens so wie die Prüfung vor Ort wurde an Lagerschalen eines Pumpspeicherkraftwerks mit horizontal orientiertem Maschinensatz durchgeführt. Lagerschale Nr. 1 ist die Unterschale eines mehrteiligen kombinierten Axial- und Radiallagers mit

geschmiedetem Stützkörper. Lagerschale Nr. 2 ist die Unterschale eines Radiallagers mit Schwalbenschwanzverzahnung (vgl. Abbildung 1) und gegossenem Stützkörper.



**Bild 15.12** Durch Aufgießen hergestellte Lagermetallschichten (s. DIN 38).  
a) formschlüssig mit Verklammerungsnuten.  
b) stoffschlüssig-metallurgische Bindung mit dem Stützkörper

Bindungsformen in Verbundgleitlagern. Quelle [1] Abbildung 15-12

Die Lagerschalen enthalten jeweils mittig eine vertiefte Öltasche zur Wellenanhebung. In Randbereichen der Lagerschalen ist der Öleinzug durch eine Änderung des Radius ausgeführt. Die Öltaschen sind in den Fotos in Abbildung 5 und Abbildung 7 deutlich zu erkennen. Die teilmechanisierte Ultraschallprüfung ist in diesen Bereichen nur eingeschränkt möglich.

## 3. Voruntersuchungen im Labor

Ultraschallprüfungen an Lagerschalen werden der Norm entsprechend mit Senkrechtprüfköpfen als Handprüfung durchgeführt. Bei schlechter Bindung des Verbundgleitlagers, entsteht eine typische Folge von Wiederholungsechos am Übergang vom Lagermetall zum Stützkörper. Der Einsatz von Phased Array Prüfköpfen kann die Prüfaussage verbessern, wenn das Schallfeld in Tiefe der Bindungsschicht fokussiert ist. Um Vorversuche und Vergleiche mit Phased Array Prüfungen und den üblichen Handprüfungen durchzuführen, wurde aus einem anzeigenfreien Bereich einer ausgemusterten Lagerschale mit einer Lagermetallschicht von 3 mm ein Testkörper entnommen (Abbildung 2). Von der Grundkörperseite ausgehend wurden Flachbodenbohrungen (FBB) mit Durchmessern von 2 und 5 mm bis an die Trennschicht zum Lagermetall eingebracht. Am Testkörper wurden zunächst als Referenz Ultraschallhandprüfungen mit einem Senkrechtprüfkopf entsprechend der Norm DIN ISO 4386 (2015-12) [2] durchgeführt. Anschließend wurden die Messungen mit einem Phased-Array-Senkrecht-Prüfkopf (Linienarray, 64 Elemente, 5MHz) wiederholt und die Ergebnisse mit denen der konventionellen

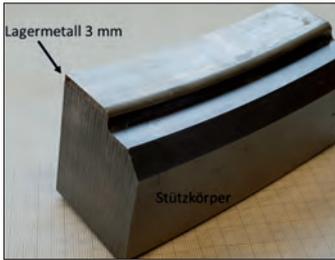


Abbildung 2:  
Teil einer Lagerschale zur  
Herstellung eines Testkörpers für  
die Ultraschallprüfung

Prüftechnik verglichen. Die Ergebnisse konnten mit dem Phased-Array-Prüfkopf vollständig reproduziert werden. Der Testkörper mit Flachbodenbohrungen wurde für die Untersuchung an den realen Bauteilen als Referenz verwendet.

#### 4. Prüfaufbau für die Vor-Ort-Prüfung

Die Prüfung der Lagerschalen erfolgt im ersten Schritt teilmechanisiert, langfristig ist die vollständige Mechanisierung geplant. Für die teilmechanisierte Prüfung wurde ein Rahmen gebaut, der sich auf die Lagerhalbschale auflegen lässt (vgl. Abbildung 3). Auf dem Rahmen ist beweglich ein Schlitten mit einer Rotationsachse gelagert, an deren Ende federgelagert der Prüfkopf angebracht ist. Sowohl am Schlitten als auch an der Rotationsachse sind Wegaufnehmer für die räumliche Zuordnung und spätere Darstellung der Messergebnisse montiert.

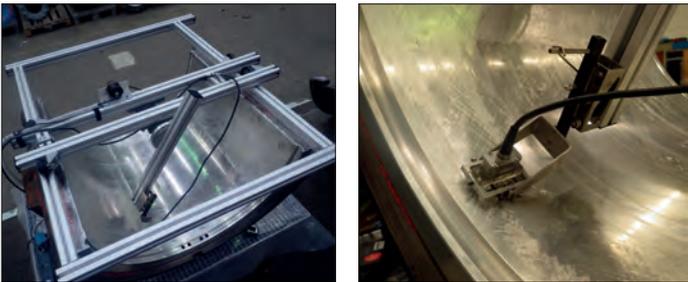


Abbildung 3: a) Präfrahmen zur teilmechanisierten Prüfung,  
b) Prüfkopfhalterung mit UT-PA-Prüfkopf

#### 5. Prüfdurchführung und Ergebnisse

Die Prüfung wurde mit dem beschriebenen Präfrahmen, während einer Revisionsprüfung in einem Pumpspeicherkraftwerk, an verschiedenen Lagerschalen durchgeführt. Beispielhaft sind im folgenden zwei Unterschalen unterschiedlicher Gleitlager dargestellt, von denen eine Lagerschale deutliche Bindungsprobleme aufwies. Die Prüfung erfolgte mit einem Phased-Array-Prüfkopf mit 64 Elementen, 5 MHz Frequenz, mit Longitudinalwellen in Senkrechteinschallung. Die Fokussierung wurde über die Modellierung des Schallfelds in die Tiefenlage der Bindungsschicht gelegt. Hierfür wurden jeweils 15 Elemente zu insgesamt 13 virtuellen Prüfköpfen gebündelt. Dadurch konnte eine Spurbreite von 30 mm erreicht werden. Die Datenaufzeichnung erfolgte über ein Olympus Omniscan MX2. Als Justierkörper für die Messungen wurde der in Kapitel 3 vorgestellte Testkörper mit Flachbodenbohrungen (FBB) verwendet. Die Registrierungsschwelle (80% Bildschirmhöhe BSH) wurde auf einen FBB-Durchmesser von 2 mm justiert.

Die Ergebnisse der teilmechanisierten Ultraschallprüfung an Lagerschale 1 sind in Abbildung 4 dargestellt. Zu sehen ist die Innenabwicklung der Lagerhalbschale, die y-Achse entspricht der Längsachse des Gleitlagers, die x-Achse gibt die Umfangsrichtung an. In der

Ultraschalldraufsicht werden die Amplituden aus einem Blendenbereich dargestellt, der den Bindungsbereich abbildet. In Abbildung 5 ist ein Foto der bei der vorangegangenen Revision an der Lagerschale durchgeführten Ultraschallhandprüfung zu sehen. Im Foto ist die mittige Öltasche deutlich zu erkennen und als Detailaufnahme nochmals vergrößert dargestellt.

Bei der teilmechanisierten Prüfung werden in den im Bild markierten Bereichen A und B Anzeigen aufgrund von Kippbewegungen des Prüfkopfs registriert, die auf die Geometrieänderungen an Öltasche und Öleinzug zurückzuführen sind. Diese Bereiche wurden zur Sicherheit mit einer Handprüfung nachgeprüft, deren Ergebnisse in der Abbildung nicht enthalten sind. Die mit C markierten Bereiche zeigen eine verminderte Bindung. Eine verminderte Bindung ist auch im Bereich der Öltasche nachweisbar, obwohl die Ankopplung des Prüfkopfs hier teilweise schwierig war.

Vergleicht man die Ergebnisse der teilmechanisierten Prüfung mit den Ergebnissen der Handprüfung mit Einschwingerprüfkopf (Abbildung 5), so sieht man, dass alle Bereiche verminderter Haftung, die mit der Handprüfung mit Einschwingerprüfkopf registriert wurden, mit der teilmechanisierten Phased-Array-Prüfung ebenfalls detektiert werden konnten. Es ist außerdem zu sehen, dass im oberen Bereich seit der letzten Revision eine Zeile mit verminderter Haftung hinzugekommen ist.

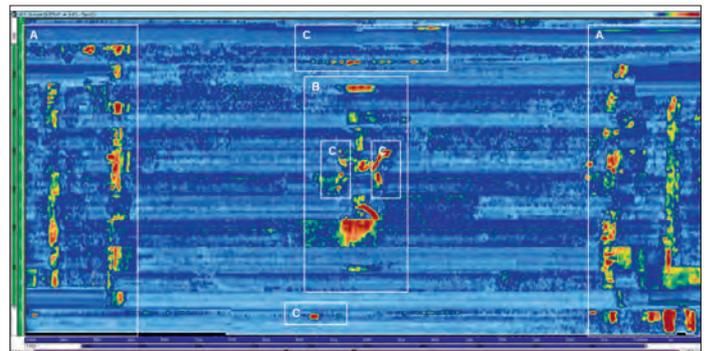


Abbildung 4: Ergebnisse der teilmechanisierten PA-UT-Prüfung an Lagerschale 1. Auffällige Bereiche sind A: Anzeigen aufgrund Kippbewegungen am Öleinzug (Änderung des Radius), B: Anzeigen aufgrund Kippbewegungen durch vertiefte Öltasche zur Wellenanhebung, C: Anzeigen aufgrund verminderter Bindung zwischen Lagermetall und Grundkörper

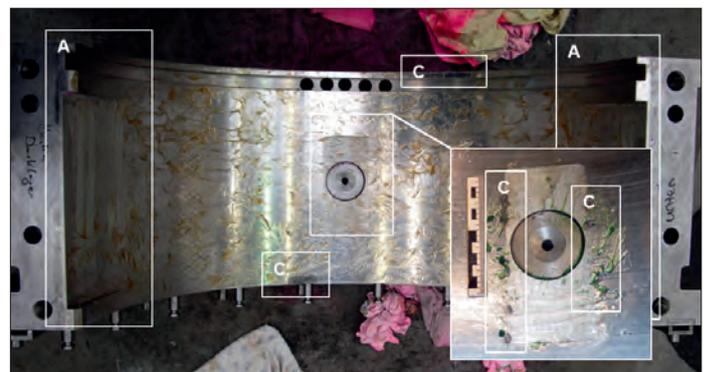


Abbildung 5: Ergebnisse der Ultraschall-Handprüfung mit Einschwingerprüfkopf an Lagerschale 1. Markierte Bereiche sind A: Öleinzug (Änderung des Radius), B: Öltasche zur Wellenanhebung, C: Bereiche, in denen verminderte Bindung registriert wurde.

Die teilmechanisierten Ultraschallprüfungen an Lagerschale 2 wurden analog zu den Messungen an Lagerschale 1 durchgeführt. Die Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 6 wurde ebenfalls identisch wie an Lagerschale 1 durchgeführt. Die Lagerschale zeigt viele Bereiche verminderter Haftung, die zeilig angeordnet sind. Die Ergebnisse der Handprüfung in Abbildung 7 sind vergleichbar mit denen der teilmechanisierten Prüfung. Durch die bildgebende Darstellung der teilmechanisierten Prüfung können jedoch zusammenhängende Bereiche verminderter Bindung besser dargestellt werden als durch die punktuelle Darstellung bei der Handprüfung.

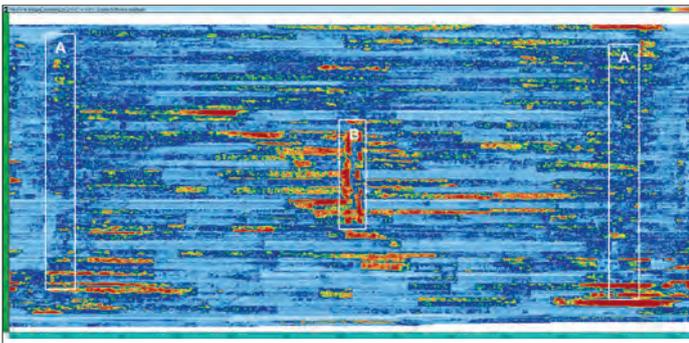


Abbildung 6: Ergebnisse der teilmechanisierten PA-UT-Prüfung an Lagerschale 2. Auffällige Bereiche sind A: Anzeigen aufgrund Kippbewegungen am Öleinzug (Änderung des Radius), B: Anzeigen aufgrund Kippbewegungen durch vertiefte Öltasche zur Wellenanhebung, Bereiche verminderter Bindung sind als zeilige Anzeigen zu erkennen.

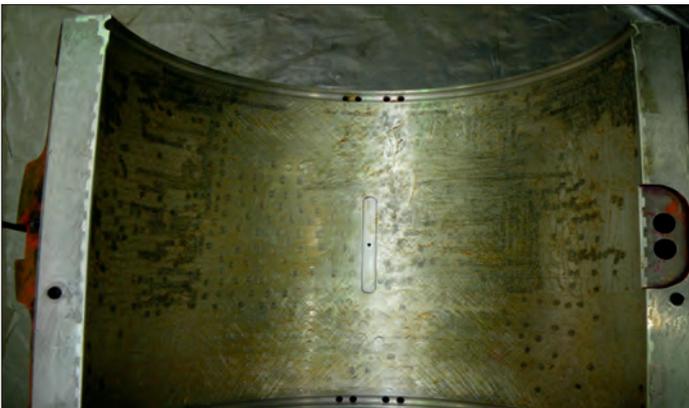


Abbildung 7: Ergebnisse der UT-Handprüfung mit Einschwingerprüfkopf an Lagerschale 2. Bereiche verminderter Bindung sind als Punkte gekennzeichnet.



Abbildung 8: Eindringprüfung der Lagerschale 2: umlaufende lineare Anzeige im Bereich der Bindung

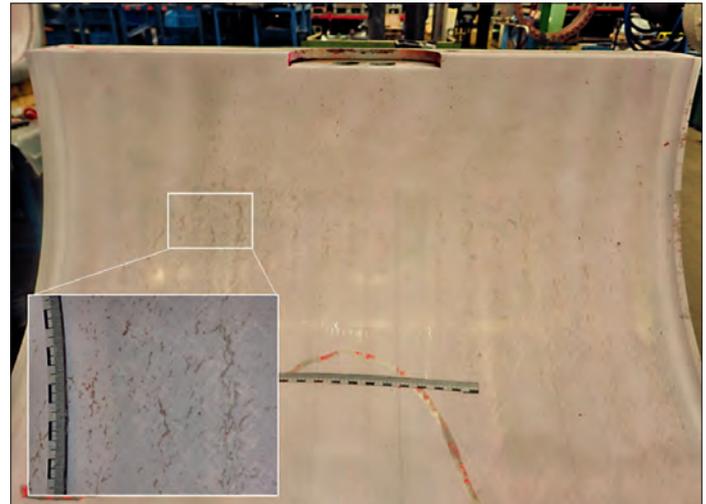


Abbildung 9: Eindringprüfung der Lagerschale 2: rissartiges Anzeigenfeld dem Verlauf der Schalbenschwanzverzählung folgend

Die Zeiligkeit der Bereiche verminderter Bindung ist auf die Konstruktion der Lagerschale mit einer Schwalbenschwanzverzählung zu erklären. In Abbildung 8 und Abbildung 9 sieht man, dass von diesen Verzählungen auch bei der Eindringprüfung zeilige Anzeigen ausgehen.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Bindungsprüfung an Lagerschalen aus Verbundgleitlagern wird bisher als Ultraschallhandprüfung mit Einschwingerprüfköpfen durchgeführt. Der Einsatz (teil-) mechanisierter Ultraschall Phased Array Prüfung verbessert die Prüfaussage. Für die Anwendung bei Revisionsprüfungen im Wasserkraftwerk wurde ein Prüfaufbau für die teilmechanisierte Prüfung entwickelt und angewandt. Die Ergebnisse vorhergehender Ultraschallhandprüfungen mit Einschwingerprüfkopf konnten mit der teilmechanisierten Phased-Array-Prüfung sehr gut reproduziert werden. Aus der teilmechanisierten Phased-Array-Prüfung ergeben sich zusätzlich entscheidende Vorteile zur bisher verwendeten konventionellen Handprüfung:

Durch die Teilmechanisierung werden den Ultraschalldaten bei der Aufzeichnung genaue Prüfkopfkoordinaten zugeordnet, was die spätere Auswertung durch Erstellen von C-Bilder-Projektionen wesentlich erleichtert. Die Lagerschalen müssen nicht mehr Punkt für Punkt abgetastet und Fehlstellen auf dem Bauteil markiert werden. Die Ergebnisse können so besser mit Messungen, die bei künftigen Revisionen durchgeführt werden, verglichen werden.

Durch die Verwendung von Phased Array Prüfköpfen als Senkrechtlinienarray rastern mehrere virtuelle Prüfköpfe die Prüffläche mit geringer Überlappung ab. Die Prüfgeschwindigkeit wird gegenüber der Verwendung eines Einschwingerprüfkopfes erhöht. In diesem Fall wurde statt eines 5MHz Ø 6 mm Einschwingerprüfkopfes ein 5 MHz 64-Elemente Linienarray-Prüfkopf verwendet und jeweils 15 Elemente zu insgesamt 13 virtuellen Prüfköpfen gebündelt. Dadurch konnte eine Spurbreite von 30 mm erreicht werden. Ebenso kann durch die zeitversetzte Ansteuerung der Elemente der Fokuspunkt direkt auf den Übergang von Lagerwerkstoff zu Grundkörper gelegt werden. Hierdurch ergibt sich eine Detailerkennbarkeit von Ø 2 mm in einem Messraster von 2x2 mm in der Bindungsebene.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich, da die Prüfergebnisse als digitaler Datensatz vorliegen und sich in den Prüfprotokollen auch für das ungeschulte Auge visuell aufarbeiten lassen. Die Ergebnisse liegen

in Datenform für den Vergleich mit künftigen Prüfungen vor. Der Vergleich mit fotodokumentierten Ergebnissen früherer Prüfungen ist ebenfalls möglich.

Die teilmechanisierte Haftungsprüfung an Lagerschalen lässt sich künftig zur vollmechanisierten Prüfung ausbauen, was zu einer zusätzlichen Zeiteinsparung und Reproduzierbarkeit führt.

#### LITERATUR

- [1] *Wittel H., Jannasch D., Voßiek J., Spura C. (2019) Gleitlager. In: Roloff/ Matek Maschinenelemente. Springer Vieweg, Wiesbaden*
- [2] *DIN ISO 4386 Gleitlager – Metallische Verbundgleitlager: Teil 1: Zerstörungsfreie Ultraschallprüfung der Bindung für Lagermetall-Schichtdicken  $\geq 0,5$  mm; Ausgabedatum 2015-12*
- [3] *DIN ISO 4386 Gleitlager – Metallische Verbundgleitlager: Teil 2: Zerstörende Prüfung der Bindung für Lagermetall-Schichtdicken  $\geq 2$  mm, Ausgabedatum 2015-12*
- [4] *DIN ISO 4386 Gleitlager – Metallische Verbundgleitlager: Teil 3: Zerstörungsfreie Prüfung nach dem Eindringverfahren, Ausgabedatum 2020-04*
- [5] *Heck, G., Greimel, F., Jungbauer, G.: Fertigung und Prüfung metallischer Verbundgleitlager im Wandel der Zeit. In: DACH-Jahrestagung, Graz, 2012.*

Kontakt: [Anne.Juengert@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:Anne.Juengert@mpa.uni-stuttgart.de)

BEITRAG 14

# Prüfung von Hochtemperatur-Wasserstoffangriffen (HTHA) mittels der FMC/TFM-Methode und die Auswahl des richtigen Prüfkopfes

Chi-Hang Kwan<sup>1</sup>, Victor Chumillas<sup>2</sup>, Florin Turcu<sup>3</sup>, Heiko Küchler<sup>4</sup>, Reinbert Rosenberg<sup>4</sup>, Anton Schönbauer<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Olympus NDT Canada, <sup>2</sup> Olympus Iberia, <sup>3</sup> Olympus Europe – OEKG, <sup>4</sup> Olympus SSD Deutschland, <sup>5</sup> Olympus Austria

## 1. Einführung

Ein typisches Chemiewerk stellt hinsichtlich der Wanddickenabnahme und Korrosion eine große Herausforderung an die Zustandsüberwachung dar. Die Bedingungen von Chemiewerken, wie erhöhte Verfahrenstemperaturen, Entmischungen, Strömungsdynamik und Variationen metallographischer Eigenschaften, gestalten die Entwicklung und Ausbreitung von Korrosion unvorhersehbar.

Wartungen werden gewöhnlich in regelmäßigen Abständen in einem begrenzten Zeitrahmen durchgeführt, einschließlich Beurteilung der Integrität und Reparatur. Ausfallzeiten durch Wartungsarbeiten verursachen hohe Kosten für den Werkbetreiber. Allerdings kann eine fehlende Vorhersage zur Korrosionsausbreitung zu Wanddickenabnahme mit Folgen führen, wie zu Kesselimplosion oder Produktionsabgängen an die Umwelt.

Betriebsbegleitende Prüfungen können in diesen Fällen zur Verhinderung von Unfällen beitragen und Ausfallzeiten minimieren. Industrieanforderungen für betriebsbegleitende Prüfungen umfassen eine hohe Erkennungswahrscheinlichkeit von einzelnen Löchern, eine hohe Empfindlichkeit und eine gute Auflösung nahe der Oberfläche zur Erkennung von starkem Wanddickenverlust sowie Prüffähigkeiten bei heißen Oberflächen. Einige dieser Anforderungen, einschließlich einer Auflösung nahe der Oberfläche und hoher Empfindlichkeit, können mit herkömmlichen Ultraschallwanddickmessern durchgeführt werden. Eine hohe Nachweiswahrscheinlichkeit wird jedoch mittels Phased-Array erreicht.

Diese Präsentation erläutert die allgemeine Korrosionsdarstellung und ihre Herausforderungen mit Fokus auf spezifischen Problemen, die während der Prüfung bei heißen Oberflächen mit Phased-Array (inkl. Sensoren, Vorlaufkeilen, Koppelmittel, Prüfmethode) auftreten.

## 2. Funktionsweise FMC/TFM

Ultraschallbildgebungstechniken wie die Total-Focusing-Methode (TFM) sind zusammen mit Full Matrix Capture (FMC) in der zerstörungsfreien Prüfung immer mehr akzeptiert – wegen der potentiell verbesserten Empfindlichkeit, des größeren Sichtfeldes, der geometrietreueren Darstellung und einer damit besseren Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD).

FMC/TFM kann als der nächste Schritt in der bildgebenden Ultraschallprüfung angesehen werden. Ergänzend zur Phased-Array-Technologie besteht eine weitere Notwendigkeit der Schulung des Personals für die korrekte Anwendung dieser Technologie. Hier kommen der Auswahl der richtigen Wellenmodi und des passenden Prüfkopfes und des Vorlaufkeiles eine hohe Bedeutung zu.

Fotal-Focussing-Methode – TFM

TFM ist ein Verfahren zur Rekonstruktion von Schallfeldern mit einer synthetischen Apertur, das in den vergangenen Jahren kontinuierlich weiterentwickelt wurde [1]. Weiterentwicklung und Miniaturisierung von Gerätetechnik haben dazu geführt, dass diese Technologie auch in tragbaren Geräten verfügbar gemacht wurde. Wie bei der

Phased-Array-Technologie basiert die TFM-Bildgebung in der Aufzeichnung von Daten, die von jedem aktiven Element eines Phased-Array-Prüfkopfes erfasst wurden [2]. Abbildung 1 zeigt den Datenerfassungsprozess (FMC). Abbildung 2 zeigt die TFM-Verarbeitung für einen einzelnen Punkt im zu rekonstruierenden Bild. Die Iteration wird je nach gewählter räumlicher Auflösung für alle Elemente des Prüfkopfes in einer gewählten Auswertezone wiederholt.

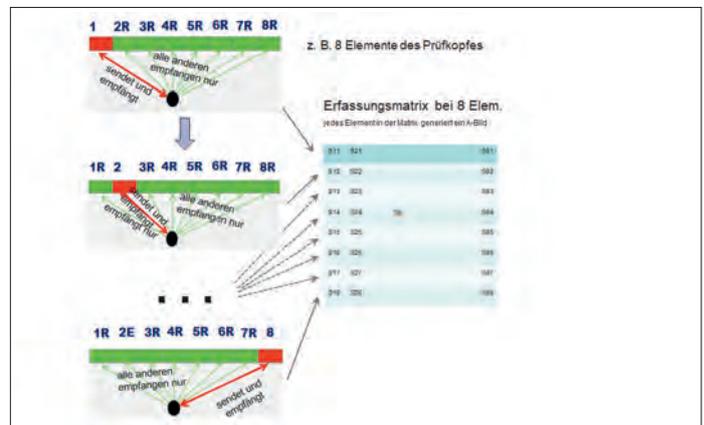


Bild 1: der FMC-Prozess: Jedes Element der Matrix speichert ein A-Bild, ein Element sendet, alle Elemente empfangen

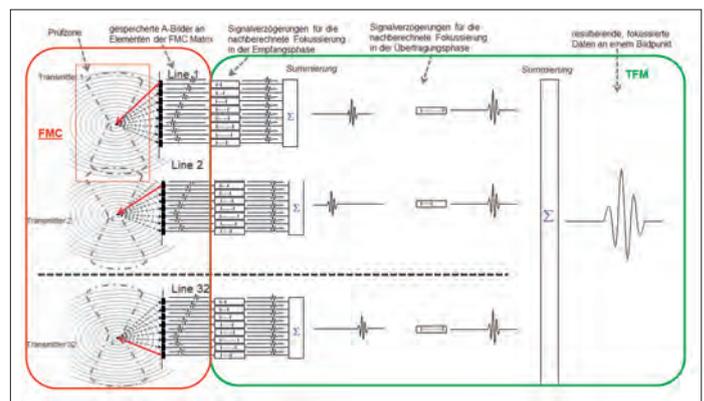


Bild 2: links die FMC-Datenaufnahme, rechts der TFM-Prozess

Der TFM-Verarbeitungsalgorithmus kann sowohl verschiedene Schallwege als auch Wellenmodi berücksichtigen. Das Prüfverfahren kann transversale (T) und longitudinale (L) Moden entweder in Impuls-Echo- oder in Self-Tandem-Konfiguration (Pitch-Catch) umfassen, abhängig von der jeweiligen Anwendung. Abbildung 3 zeigt Beispiele für verschiedene Schallpfade, die vom TFM-Algorithmus berücksichtigt werden können. Für jede spezielle

Situation muss ein spezifischer Schallweg berücksichtigt werden, um die Darstellung zu optimieren. Im Falle einer Doppel-V-Schweißnaht werden Anzeigen von Flankenbindefehlern oder Porennestern im LL/TT- oder LL-LL/TT-TT-Modus gut dargestellt (Bild 3a und 3b). Risse in der Wurzel werden besser im Self-Tandem-Modus LLL/TTT/ TTL/TLT dargestellt (Bild 3c).

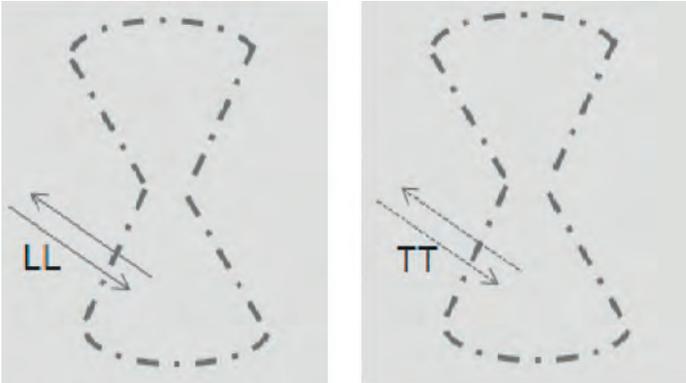


Bild 3a: LL und TT, halber Sprung

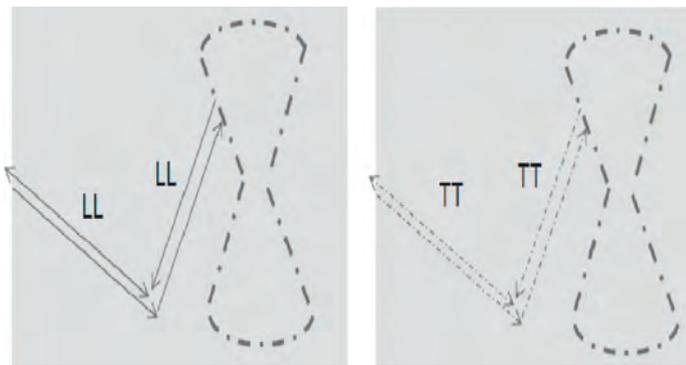


Bild 3b: LL-LL und TT-TT, ganzer Sprung

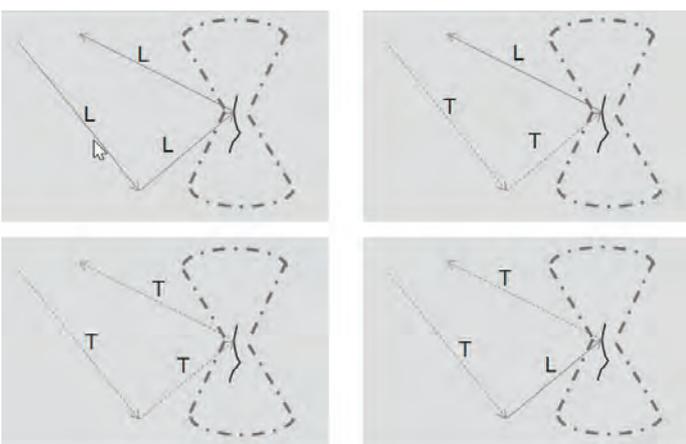


Bild 3c: LLL und TTT im Self-Tandem-Pfad, Bild 3d: TTL und TLT, Self-Tandem und Modenumwandlung

Wichtig ist: Die Modenumwandlung findet nicht nur in der Brechung, sondern auch in der Reflexion statt, im gleichen Material an der Materialtrenngrenze.

Bild 4 zeigt das Snell'sche Gesetz. TFM kann bei der Berechnung neben den Moden T und L auch die modenkonvertierten Schallwege berücksichtigen.

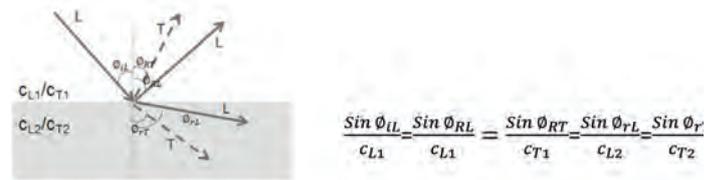


Bild 4: Snell'sches Gesetz

Es gilt:

- $\theta_{iL}$  – Einschallwinkel L-Welle
- $\theta_{rL}$  – Reflexionswinkel L-Welle
- $\theta_{rT}$  – Reflexionswinkel T- Welle
- $\theta_{rL}$  – Brechungswinkel L-Welle
- $\theta_{rT}$  – Brechungswinkel T-Welle
- $c_{L1}$  – Schallgeschwindigkeit Longwelle im Material 1
- $c_{T1}$  – Schallgeschwindigkeit Transversalwelle im Material 1
- $c_{L2}$  – Schallgeschwindigkeit Longwelle im Material 2
- $c_{T2}$  – Schallgeschwindigkeit Transversalwelle im Material 2

Modenumgewandelte Ausbreitungen bewirken nicht nur eine erhöhte Komplexität, sondern bringen auch eine bessere Empfindlichkeit für spezifische Fehlerorientierungen und -positionen mit sich. Abbildung 5 zeigt eine von einer Rückwand reflektierte Longwelle. Aufgrund des größeren Reflexionswinkels ist diese besser geeignet, die Anzeige auf der Unterseite zu erkennen, während Transversalwellen besser Anzeigen auf der Oberseite darstellen. Die richtige Auswahl des Ausbreitungsmodus ist deshalb entscheidend für die gute Erkennbarkeit von Anzeigen im zu prüfenden Material.

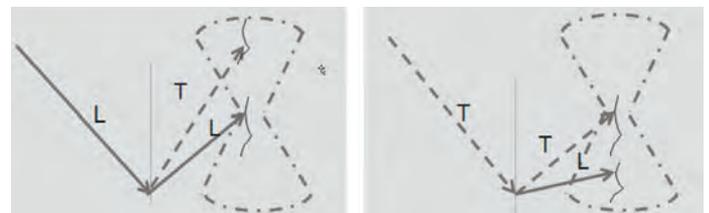


Bild 5: Auswirkungen der Moden

### 3. Betrachtungen zur Sondenwahl

Neben den Ausbreitungsmodi hat auch die Wahl des Prüfkopfes und des Vorlaufkeiles einen hohen Einfluss auf das Prüfergebnis. Die meisten derzeit verwendeten Phased-Array-Prüfköpfe können auch für die TFM-Methode verwendet werden. Abhängig von der Anwendung und den zu erwartenden Ergebnissen kann die Prüfkopfauswahl optimiert werden, wenn die wichtigsten physikalischen Parameter wie Frequenz, Pitchabstand, Elevation und die Anzahl der Elemente berücksichtigt werden. Wie diese Parameter die Schallfelder beeinflussen, ist durch die Gesetze der Akustik vorgegeben. So ist der Bereich, in dem die TFM-Methode am effektivsten ist, durch das Nahfeld des akustischen Schallfeldes beschrieben. Dieses berechnet sich aus der Schwingerfläche (Elevation x Anzahl der Elemente x Pitchabstand) und der Prüfkopffrequenz. Die Prüfkopf- und Vorlaufkeilparameter, die Prüfkopfposition in Bezug auf die Prüfzone haben zusammen mit den Moden und Schallausbreitungswegen Einfluss auf die Prüfung nach der TFM-Methode.

**A.I.M – Akustische Einflusszone**

In [3] wurde ein neuer semianalytischer Algorithmus beschrieben, der eine schnelle Simulation des Schallfeldes unterhalb des Prüfkopfes ermöglicht, abhängig von den Prüfkopf- und Vorlaufkeilparametern, der Sondenposition, des Schallweges, der Schallmodi und der erwarteten Fehlerorientierung. Die Akustische Einflussmappe (A.I.M) hilft dem Prüfer nicht nur bei der Erstellung des Prüfplanes, sondern trägt auch mit der richtigen Anwendung der TFM-Technologie zum kontinuierlichen Lernen und Erfahrungsaufbau bei. Ein Beispiel für die A.I.M zeigt Bild 6 für einen 5L64-A32-Prüfkopf mit Vorlaufkeil SA32-N55S, der in eine 15 mm dicke Stahlplatte mit V-Naht einschallt ist und im TLT-Modus Anzeigen sucht.

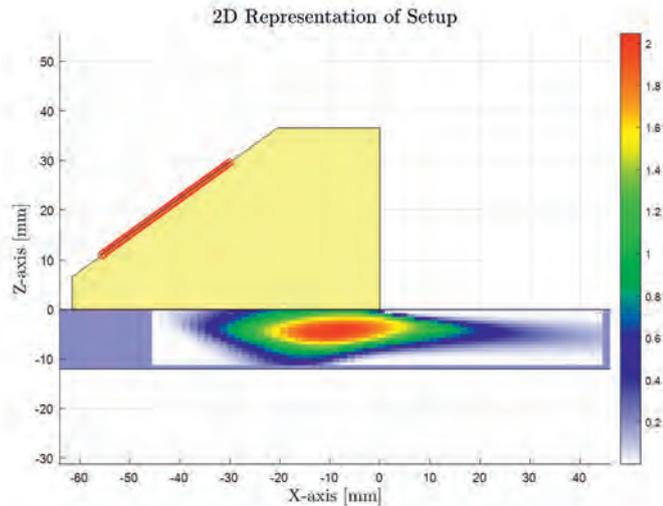


Bild 6: A.I.M-Simulation

Es wurden mehrere Tests im Zusammenhang mit 3 verschiedenen Anwendungen durchgeführt:

- Korrosionserkennung
- Prüfung dickwandiger Bleche
- Erkennen vertikaler Anzeigen in geschweißten Blechen

Die Tabelle 1 beschreibt die durchgeführten Prüfungen, bewertete Parameter, Prüfkopf- und Vorlaufkeilanordnung, geprüfetes Teil, Schallausbreitung und erwartete Reflektoren. Die für die aktuellen Arbeiten verwendeten Prüfköpfe sind in [4] ausführlich beschrieben. Die Prüfungen wurden mit A.I.M unterstützt, um Nutzen und Anwendbarkeit von A.I.M für die FMC/TFM-Methode zu demonstrieren.

**4. Nahfeld, Aperturgröße und Pitchabstand**

Es wurden 3 verschiedene Phased-Array-Prüfköpfe auf einem Testblock mit Querbohrungen mit 1,5 mm Durchmesser benutzt. Unter Bezugnahme auf Bild 6a, b und c erstreckt sich das Nahfeld, bezogen auf die gesamte aktive Apertur des Prüfkopfes, näherungsweise auf 200 mm, 400 mm und 700 mm. Es wird erwartet, dass die Prüfung in 2/3 Eindringtiefe des Nahfeldes nicht beeinflusst wird. Es ist zu erwarten, dass der Pitchabstand die Nahfeldempfindlichkeit und die Auflösung nahe des Prüfkopfrandes beeinflusst.

Die Pitchgröße allein kann ebenfalls einen Einfluss auf die Qualität von TFM-Bildern haben. Die Pitchgröße, die direkt abhängig vom Pitchabstand ist, diktiert die Divergenz der ausgesendeten Schallwelle (Elementarstrahl), welche von jedem einzelnen Element erzeugt wird. Das bedeutet, dass jedes Einzelelement in der Lage ist, zu einem akustischen Bereich beizutragen, der sich in der Nähe der Sondenfläche, aber relativ weit von ihrem Standort entfernt befindet. Bei einer Null-Grad-Einschallung wäre der Beitrag von Element 64 zur Erkennung einer Anzeige, die sich unterhalb von Element 1 befindet, sehr begrenzt und ist von der Pitchgröße abhängig.

Fig.#	Application	Parameter to asses	Probe	Wedge	Material	Part Thickness	Propagation	Reflector	Orientation
9-10	Corrosion/ zero degree inspection	Pitch and aperture	5L64-A32	SA32-0L	steel	9	LL	backwall	Horizontal
		Pitch and aperture	5L64-NW1	SNW1-0L	steel	9	LL	backwall	Horizontal
7-8	Weld/ Metal manuf.	Near field zone	5L64-A32	contact	steel	100	LL	volumetric	Horizontal
			10L64-A32	contact	steel	100	LL	volumetric	Horizontal
			5L60-A14	contact	steel	100	LL	volumetric	Horizontal
11-13	Weld crack detection	Sound path and mode	5L64-A32	SA32-N55S	AL	25	TLT	directional	vertical
			5L60-A14	SA14-N55S	AL	25	TLT	directional	vertical
14	Weld lack of fusion	Sound path and mode	10L64-A32	SA32-N55S	steel	12	TTTT	directional	30 deg
			5L64-A32	SA32-N55S	steel	12	TTTT	directional	30 deg

Tabelle 1

Für die Prüfung wurde der Prüfbereich in 3 Zonen eingeteilt: oberflächennah, mittlerer und entfernter Bereich.

Betrachtet man die Empfindlichkeit im oberflächennahen Bereich, so stellt man fest, dass die beste Leistung von der Sonde mit der kleinen Teilung und niedriger Frequenz erzielt wird, was sich durch eine größere Strahlausbreitung und damit eine bessere Abdeckung unter der Sonde für jedes Einzelelement erklärt. Die Darstellung in Bild 8 zeigt dies in der A.I.M-Simulation für Sonden vom Typ A-32.

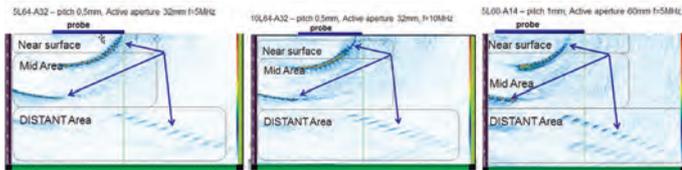


Bild 7: Prüfung am ASME-Testblock

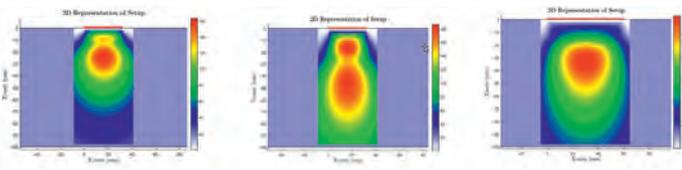


Bild 8: Schallfeldsimulation, links 5L64-A32, Mitte 10L64-A32, rechts 5L60-A14

Die Schlussfolgerung stimmt mit den 3 Simulationen durch A.I.M überein. Die Prüfköpfe mit dem kleineren Pitchabstand im A32-Gehäuse erzeugen eine höhere Amplitude im oberflächennahen Bereich.

Im mittleren Bereich zeigen der 10L64-A32 (höhere Frequenz) und der 5L60-A14 (größerer Pitchabstand als der 5L64-A32) eine bessere Empfindlichkeit.

### Einfluss von Pitchabstand und Aperturgröße bei der Korrosionsprüfung

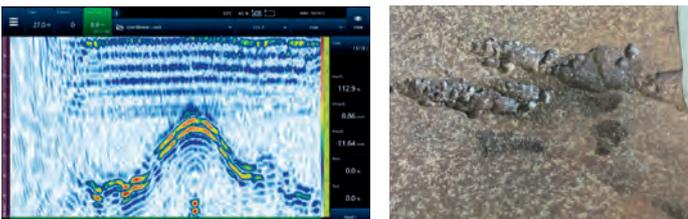


Bild 9a und 9b zeigen Korrosionsprüfung

Der Vorteil von TFM für die Korrosionsprüfung liegt an der guten Darstellung des Profils der Wanddickenreduzierung und des großen Prüfbereiches. Die aktive Apertur und der Pitchabstand gehören zu den wichtigen Parametern, um eine gute Darstellung zu erhalten. Eine kleine Apertur ermöglicht auch nur ein kleines Sichtfeld, ein großer Pitchabstand kann oberflächennahe Anzeigen nicht darstellen.

Bild 10c1 und 10c2 zeigen die Ergebnisse der TFM-Prüfung. Erwartungsgemäß zeigt der Prüfkopf mit der kleineren Apertur und dem kleineren Pitchabstand das bessere Signal-Rauschverhalten (SNR), kann aber aufgrund der Aperturgröße nicht den gesamten Bereich darstellen. Der Prüfkopf 5L64-NW1 erzeugt das größere Sichtfeld, das die gesamte Defektzone überdeckt.

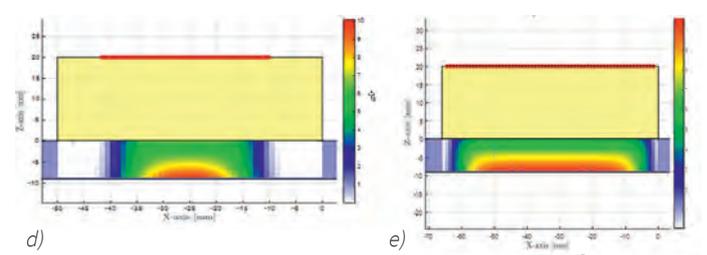
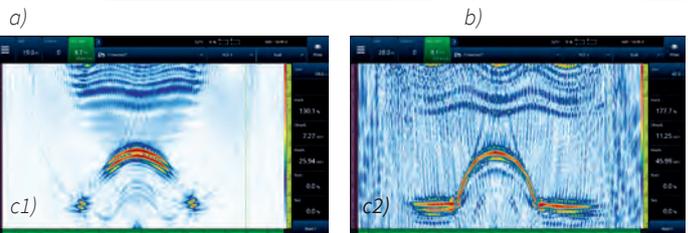


Bild 10a: Teil- und Prüfkopf-Positionierung, Bild 10b: TFM-Bild mit Prüfkopf A32, Bild 10c: TFM-Bild mit Prüfkopf NW1, Bild 10d: A.I.M-Simulation für Prüfkopf 5L64-A32 im LL-Mode, Bild 10e: A.I.M für Prüfkopf 5L64-NW1 im LL-Mode

### 5. Prüfung von Hochtemperatur-Wasserstoffangriffen (HTHA) mit FMC/TFM

HTHA bezeichnet den Angriff von Wasserstoff in Kohlenstoffstählen und niedrig legierten Edelmetallstählen. Diese Änderungen im Material entstehen durch eindringenden Wasserstoff in den Stahl bei hohen Temperaturen. Dort reagiert der Wasserstoff mit dem Kohlenstoff und dekarbonisiert den Stahl und es entsteht Methan in der Kornstruktur des Stahls. Diese Methanblasen wachsen mit der Zeit und es entstehen Mikrorisse. Dieser Prozess kann zu größeren Anrissen im Stahl und damit zum Ausfall der Anlage führen.

Mittels der FMC/TFM-Technologie werden sehr viel mehr Datenpunkte im Volumen des Stahls gesammelt als mit einem Linienscan mit der Phased-Array-Technik. Im Auswertefenster bei dem FMC-Prozess wird eine Matrix mit 1 Million Datenpunkten gesammelt. Die räumliche Auflösung kann bis 50 µm zwischen den Datenpunkten betragen. Damit lassen sich bei 10 MHz auch kleine HTHA-Anzeigen auffinden. Für die HTHA-Prüfung wird der Omniscan X3 verwendet. Dieses moderne Phased-Array-Prüfergerät kann im FMC/TFM-Modus bis zu 1 Million Datenpunkte berechnen. Um die kleinen Anzeigen der



Bild 11: Omniscan X3

HTHA-Schädigung gut darstellen zu können, verfügt der X3 über die Möglichkeit, die FMC-Darstellung mit einer Hüllkurve (Envelope) darzustellen. Dadurch werden die Anzeigen geschärft und sind besser trennbar, weil mit niedrigeren Verstärkungswerten gearbeitet werden kann.

**Neueste Innovationen beim Omniscan X3:**

- Total-Focusing-Methode (TFM) in Verbindung mit Full Matrix Capture (FMC) mit 64 Elementen
- bis zu 4 TFM-Gruppen
- Live-TFM-Filter
- A.I.M(Acoustic Influence Map)-Simulator
- 25 GB Dateigröße, interne 64-GB-Festplatte, externe Speicherkapazitäten
- optimierte Bedienung für den Prüfer
- Onboard-Prüfplan
- schnelle Justierung
- 800 % Amplitudenerfassung

Die Bildschirmauflösung beträgt 1024 x 1024 Bildpunkte. Damit wird eine bestmögliche Bildqualität sichergestellt. TFM-Anzeigen können mit einer Hüllkurve geglättet werden, so dass sie für den Prüfer klarer zur Anzeige kommen.

In der ASME 2019 wird die geforderte Amplitudengenauigkeit (Amplitude Fidelity) mit besser als 2 dB beschrieben. Das bedeutet, dass die Abweichung von Pixel zu Pixel 2 db nicht überschreiten darf, da ansonsten das Risiko besteht, Anzeigen in Bezug zur Prüfkopffrequenz zu übersehen.

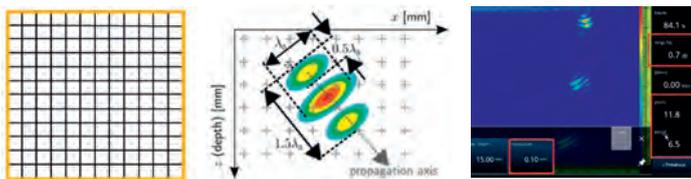


Bild 12: Amplitudengenauigkeit

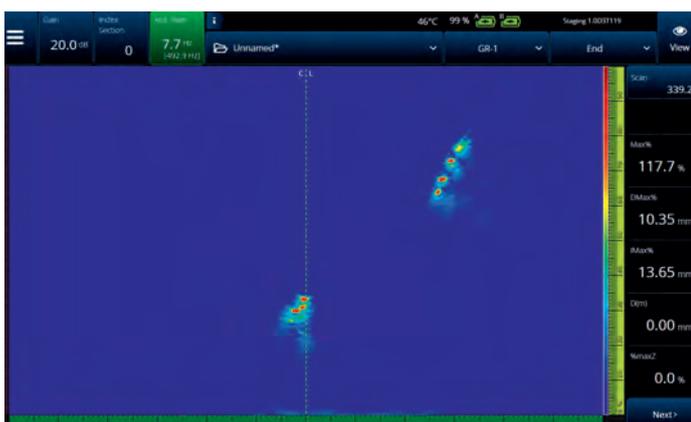


Bild 13: Darstellung einer 0,2-mm-Querbohrung in einem 1 mm dicken Blech mit FMC/TFM

Um auch die Entstehung von HTHA im frühen Stadium darstellen zu können, eignet sich die TFM-Methode aufgrund ihrer hohen Ortsauflösung gut. Wichtig ist, einen geeigneten Prüfkopf mit guter Auflösung auszuwählen. Wie in Abschnitt 4 beschrieben, wird FMC/TFM im Nahfeld benutzt. Der Pitchabstand und die Prüfkopffrequenz haben einen hohen Einfluss auf die Qualität der Prüfung. In dem Fall wird

ein 10-MHz-Prüfkopf mit einem Pitch von 0,31 mm und 64 Elementen verwendet. Die Elevation beträgt 10 mm (Apertur 19,84 x 10). Damit ist eine Überdeckung unterhalb des Prüfkopfes von 40 mm in einem Tiefenbereich bis 80 mm gegeben. Die Amplitudengenauigkeit beträgt 1,7 dB, die Auflösung 70 µm.



Bild 14a und Bild 14b: A.I.M-Prüfbereich und daraus resultierende Auflösung

Der Test wurde an einem HTHA-Testblock von ECOSCAN mit dem Prüfkopf 10L32-A10 (Apertur 9,9 x 7mm) durchgeführt.



Bild 15: Testblock mit Prüfkopf und Schlibbild der Anzeigen

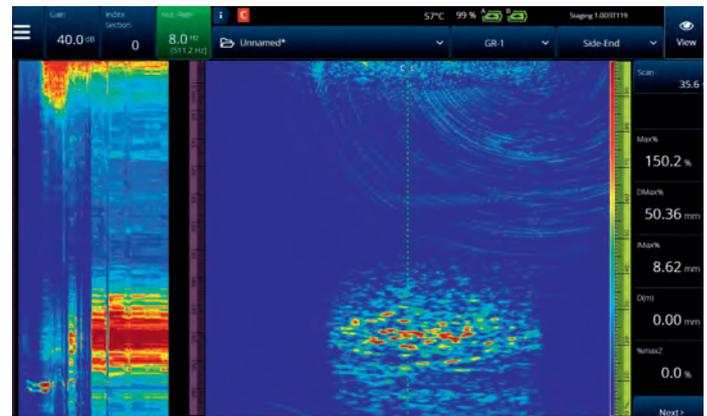


Bild 16: reeller HTHA

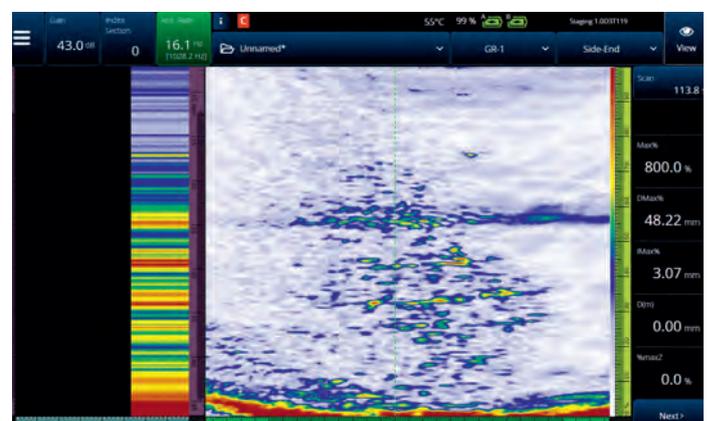


Bild 17: advanced Stage

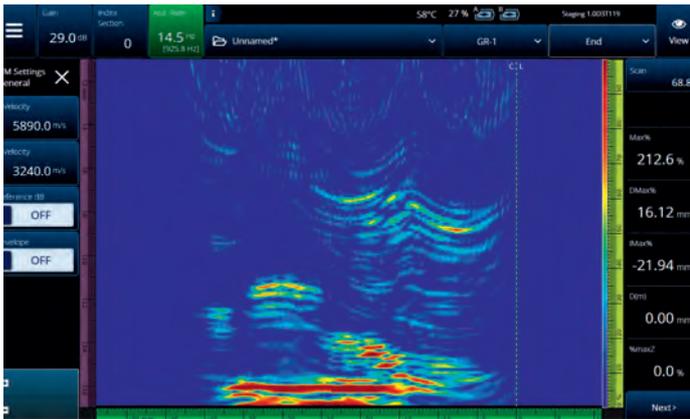


Bild 18: HIC

### Ausblick:

Die Ultraschallprüfmethode FMC/TFM ist gut geeignet, um HTHA-Anzeigen besser als in der Vergangenheit darzustellen. Somit ist es mit dieser Prüfmethode möglich, ein besseres Monitoring in Anlagen mit diesen möglichen Schädigungen durchzuführen.

### REFERENZEN.

- [1] C. Holmes, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox, "Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation," *NDT E Int.*, vol. 38, no. 8, pp. 701–711, Dec. 2005.
- [2] K. Sy, P. Bredif, E. Iakovleva, O. Roy, and D. Lesselier, "Development of methods for the analysis of multi-mode TFM images," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1017, p. 012005, May 2018.
- [3] Chi-Hang Kwan, Guillaume Painchaud-April, Benoit Lepage, *TFM Acoustic Region of Influence*, ASNT Spring Research Symposium.
- [4] Olympus, *Phased Array Probe catalogue*.

Kontakt: Heiko.Kuechler@olympus.de

## BEITRAG 15

## Prüfung von Faserverbundwerkstoffen aus Luftfahrtanwendungen mit elektromagnetischem Ultraschall (EMAT)

Frank Niese<sup>1</sup>, Tobias Roelfes<sup>1</sup>, Michael Koerdt<sup>2</sup>, Marcel Rennoch<sup>2</sup>, Björn Maack<sup>2</sup>, Elisabeth Hardi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Rosen Technology And Research Center GmbH, Lingen

<sup>2</sup> Faserinstitut Bremen e. V., Bremen

**KURZFASSUNG** | In der Luftfahrt, aber auch in anderen Industriebereichen werden seit einigen Jahren vermehrt Faserverbundwerkstoffe (CFK (carbonfaserverstärkter Kunststoff) und GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff)) eingesetzt, um besonders leichte Konstruktionen verwirklichen zu können. Durch das geringe Leergewicht eines Flugzeuges können der Treibstoffverbrauch als auch die damit verbundenen Betriebskosten minimiert werden. Andererseits sind diese Werkstoffe deutlich schwieriger als klassische Metallwerkstoffe sowohl während des Fertigungsprozesses aber auch bei den wiederkehrenden Inspektionen zu prüfen. Nach dem aktuellen Stand der Technik werden Faserverbundkomponenten vorwiegend mit konventionellen Ultraschallprüftechniken untersucht.

In diesem Beitrag wird eine innovative Ultraschallprüftechnik vorgestellt, die geführte Ultraschallwellen nutzt, um Delaminationen und Porenfelder in Faserverbundwerkstoffen zu lokalisieren und die Fehlerausdehnung abzuschätzen. Dazu werden koppelmittelfrei arbeitende elektromagnetische Ultraschallprüfköpfe (EMAT: ElectroMagnetic Acoustic Transducer) für die Anregung und den Empfang eingesetzt. Im Gegensatz zu konventionellen piezoelektrischen Prüfköpfen können diese Ultraschallwandler besonders gut modenrein und selektiv Plattenwellenmoden generieren.

Da der Messeffekt nicht auf einer Amplitudenbewertung der am Fehler reflektierten bzw. transmittierten Signalanteile beruht, sondern Modenumwandlungseffekte ausgenutzt werden, ist eine zuverlässige Detektion selbst bei schlechtem Signal-Rausch-Verhältnis gegeben. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass Fehler bis zu einem minimalen Flächendurchmesser von ~3 mm detektiert werden können.

### Einführung

Faserverbundwerkstoffe sind aufgrund ihres Schichtaufbaus und der starken Anisotropie eine Herausforderung für die zerstörungsfreie Prüfung. Zusätzlich wird die häufig verwendete Ultraschallprüfung durch eine starke Schallschwächung besonders bei höheren Arbeitsfrequenzen erschwert. Andererseits eröffnen die sehr vorteilhaften mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften ein breites Anwendungsfeld für ressourcenschonende und zukunftsweisende Leichtbaukonstruktionen im Luftfahrt-, Automobil- und Energiebereich.

Im Rahmen des öffentlich geförderten Projektes ENEMAC wurde eine Inspektionsmethode auf Basis von geführten Ultraschallwellen entwickelt und optimiert, um typische praxisrelevante Defekte in Faserverbundwerkstoffen (hauptsächlich Delaminationen und Porenfelder) zu detektieren und in Flächen- und Tiefenlage zu lokalisieren. Für die Ultraschallwandlung kommt dabei sowohl sende- als auch empfangsseitig die EMAT-Technik zum Einsatz.

### 1. Messprinzip

#### 1.1 Verwendung der EMAT-Technik

Bei der EMAT-Technik nutzt man im Gegensatz zur konventionellen Ultraschalltechnik elektromagnetische Wechselwirkungen, um Ultraschallsignale in einen Testkörper einzukoppeln bzw. abgreifen zu können. Im Wesentlichen tragen dabei Lorentzkraft und bei ferromagnetischen Testkörpern auch die Magnetostraktion bei. Schematisch besteht ein EMAT-Prüfkopf aus einer speziell geformten Hochfrequenz-Spule (HF-Spule) und einer Magnetisierungseinrichtung. Im Sendefall wird die HF-Spule mit einem Strom-Burst-Signal beaufschlagt, dieses induziert in der leitfähigen Testkörperoberfläche Wirbelströme. Durch die Überlagerung mit dem statischen Magnetfeld

wirken auf die Ladungsträger oszillierende Lorentzkraft. Die Kräfte koppeln an das Gitter und dienen so als Quelle der Ultraschallsignale. Im Empfangsfall läuft es reziprok [1].

Aber warum funktioniert diese Technik auch an nicht oder nur sehr schlecht leitenden Faserverbundwerkstoffen? Die Antwort ist, dass bei Luftfahrtanwendungen die Oberfläche mit einem gut leitenden Blitzschutz versehen wird. Dazu wird in der Regel ein Kupfergitter als oberste Lage mit eingebettet [2,3]. Unsere Untersuchungen zeigen, dass diese Blitzschutzschichten für eine ausreichende Kopplung sorgen können. Dabei müssen folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Die Materialstärke der elektrisch leitfähigen Komponente muss auf die Ultraschallarbeitsfrequenz abgestimmt sein, da sie dicker als die Skin-Tiefe (Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder) sein sollte.
- Eine hohe Leitfähigkeit verbessert die Wandlungseffizienz.
- Das leitfähige Material muss an der Oberfläche platziert und akustisch angekoppelt sein.

#### 1.2 Verwendung von geführten Wellen

In räumlich begrenzten Objekten wie z. B. Platten können sich geführte Wellenmoden als spezielle Lösungen der Wellengleichung ausbilden und ausbreiten. Dabei ist charakteristisch, dass es einen komplizierten Zusammenhang, auch Dispersionskurve genannt, zwischen Plattendicke, Wellenlänge, Frequenz sowie Phasen- und Gruppengeschwindigkeit gibt [4,5]. Diese Moden lassen sich besonders gut mit der EMAT-Technik anregen und abgreifen. Das Messprinzip beruht auf der Erfassung der lokalen Phasengeschwindigkeit bzw. lokalen Wellenlänge [6,7,8,9].

Trifft ein Ultraschallsignal einer (dispersiven) geführten Welle auf eine Inhomogenität in der Platte, ändern sich die physikalischen Randbedingungen so, dass es Auswirkungen auf die Ausbreitung der Moden gibt. Da die Frequenz in einem linearen System als Erhaltungsgröße gilt, verändert sich also zwangsläufig die Phasengeschwindigkeit, dies ist gleichbedeutend mit einer Änderung der Spurwellenlänge, da beide Größen gekoppelt sind.

Im Fall einer Delamination teilt sich das Ultraschallsignal auf und läuft oberhalb und unterhalb an dem Defekt vorbei. Dabei „sieht“ das Ultraschallsignal je nach Pfad eine kleinere Plattendicke gegenüber der Dicke im fehlerfreien Bereich. Eine Änderung der Plattendicke führt zur Arbeitspunktverschiebung im Dispersionsdiagramm und somit zu einer anderen Phasengeschwindigkeit bzw. Wellenlänge (siehe Abb. 1). Die damit verbundene Änderung der Phasengeschwindigkeiten kann im Dispersionsdiagramm (Abb. 2) abgelesen werden. Als Beispiel dient hier eine Delaminationstiefenlage von 25 %.

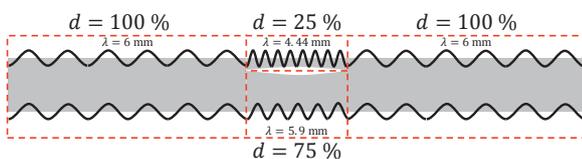


Abb. 1. Wellenlängenänderung der geführten Welle an einer Delamination in einer Tiefenlage von 25 %. Das  $d$  steht hierbei für Plattendicke in den jeweils rot umrandeten Bereichen,  $\lambda$  entspricht der lokalen Wellenlänge.

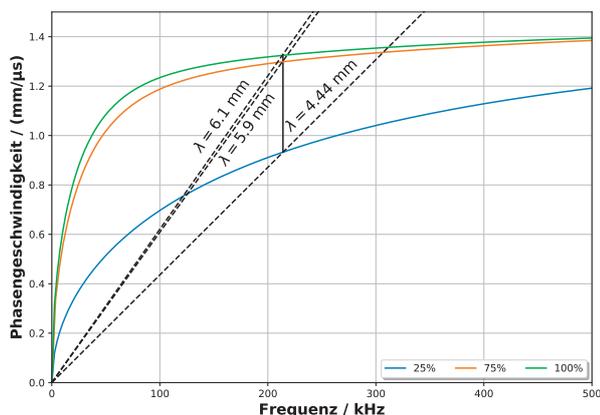


Abb. 2. Dispersionskurve der A0-Mode für 100 %, 75 % und 25 % Plattendicke

## 1.2 Testkörper und Testfehler

Bisher wurden circa 30 Testkörper angefertigt und untersucht. Bei etwa der Hälfte wurden Testfehler in Form von Delaminationen und/oder Porenfelder in unterschiedlichen Größen und Tiefenlagen eingebracht. Künstliche Delaminationen wurden durch Einlegen von Teflon-Folienabschnitten oder durch Einbringen eines Trennmittels zwischen einer oder mehreren Faserlagen erzeugt. Die Porenfelder konnten durch die lokale Zugabe von Schaumbildnern (Zitronensäure, Schaumharzsystem, usw.) erzeugt werden [10].

Es wurden unterschiedlich dicke Platten von 2 bis 8 mm Dicke gefertigt, wobei der Schwerpunkt auf einer Dicke von 4 mm liegt. Alle Platten sind quadratisch und haben Kantenlängen von 600 mm. Die Fehlerflächen variieren dabei von 7.5 mm<sup>2</sup> bis 3000 mm<sup>2</sup>. Sie können runde oder anders geformte Grundflächen besitzen oder als

Custer aus mehreren kleinen Einzelfehlern zusammengesetzt sein. In Dickenrichtung wurden die Fehler in abgestuften Tiefenlagen eingebracht. Dabei wurden die künstlichen Fehler definiert sowohl nur zwischen zwei benachbarten Faserlagen, als auch über mehrere Faserlagen bis hin zur kompletten Plattendicke erzeugt. Zusätzlich wurden auch fehlerfreie Testplatten durch Impacts mit definierter Aufprallenergie zwischen 10 und 20 J gezielt geschädigt.

## 2. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Um die lokale Phasengeschwindigkeit zu bestimmen, gibt es mehrere Möglichkeiten. In der vorliegenden Arbeit wurden die folgenden Techniken genutzt:

- Ein Ultraschallempfänger wird in Ausbreitungsrichtung der geführten Welle definiert verschoben und an jeder Position wird ein A-Bild aufgenommen, die Position des Sendewandlers bleibt dagegen unverändert. Die A-Bilder werden zu einer Datenmatrix zusammengeführt und eine zeitlich-räumliche Fourier-Transformation durchgeführt. Als Ergebnis erhält man die Dispersionsrelation am Arbeitspunkt und somit die gewünschten Größen. Nachteilig ist dabei, dass ein erhöhter Aufwand bei der Prüfkopfmanipulation nötig ist, um eine Komponente vollflächig abzuscannen.
- Um die Relativbewegung des Empfängers zum Sender zu vermeiden, kann auch ein entsprechendes Linear-Array von Ultraschallempfängern genutzt werden (vgl. Abb. 3). Dadurch ist die Datenmatrix mit einem einzigen Schuss gefüllt. Die räumliche Auflösung ist ggf. geringfügig reduziert, da sie durch die Elementanzahl und den Pitch-Abstand des Arrays vorgegeben ist. Anschließend verfährt man analog. Es ist bei geeigneter Arbeitspunktwahl und leicht eingeschränktem Wellenlängenbereich sogar möglich, mit nur zwei Empfängern auszukommen. Allerdings kann eine geringe Empfängeranzahl bei Reflektionen an den Defekträndern zu einer eingeschränkten Zuverlässigkeit führen [11].

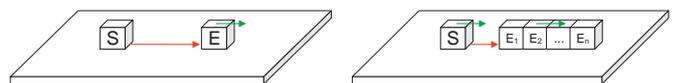


Abb. 3. Schematische Prüfkopfarrangements; links: ortsfester Sendeprüfkopf mit manipuliertem Empfangsprüfkopf; rechts: Sendeprüfkopf und Empfänger-Array sind starr verbunden und werden gemeinsam manipuliert. Der rote Pfeil ( $\rightarrow$ ) deutet die Schallausbreitung und der grüne ( $\rightarrow$ ) die Manipulationsbewegung der Prüfköpfe an, S Sendeprüfkopf, E Empfangsprüfkopf.

Für die Untersuchungen wurden bisher ausschließlich A0-Lamb-Moden verwendet. Andere Lamb-Moden und Moden geführter SH-Wellen (shear horizontal waves) scheinen aber auch geeignet zu sein.

Aus den unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten bzw. Wellenlängen bei unterschiedlicher Plattendicke ergibt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Tiefenlage der Delamination [12,13]. Die Abb. 4 und 5 zeigen exemplarisch für einen oberflächennahen und einen tief liegenden Defekt die Auswirkungen auf den Signalverlauf im B-Bild und die ermittelten Wellenzahlenspektren für fehlerfreie und beschädigte Bereiche. Man erkennt deutlich (Abb. 5), dass sich die Wellenzahl bzw. Wellenlänge des tief liegenden Defekts (75 %) kaum noch von denen in fehlerfreien Bereichen unterscheiden, so dass die Grenze für eine Tiefenbestimmung dieser Methode erreicht ist. Die farbigen Rechtecke deuten die jeweiligen Auswertebereiche an, wobei gleiche Farben für alle Teilabbildungen immer für den gleichen Mess- bzw. Auswertebereich stehen

(rot: fehlerfrei, vor dem Defekt; gelb: geschädigter Bereich; blau: fehlerfrei hinter dem Defekt). Zusätzlich sind im geschädigten Bereich der oberflächennahen Delamination (Abb. 4) die an den Defekt-rändern reflektierten Signalanteile sowie die daraus resultierenden Interferenzmuster zu erkennen

Für eine A0-Lamb-Mode ergibt sich somit, dass je näher die Delamination an der Oberfläche positioniert ist, desto kleiner ist die Wellenlänge und umso stärker ist die Wellenlängenänderung bzw. Phasengeschwindigkeitsänderung der geführten Ultraschallwelle. Die Abb. 6 zeigt diesen Zusammenhang beispielhaft für eine 4 mm CFK-Platte und A0-Lamb-Mode. Diese Kurve ist gleichbedeutend mit der Dispersionskurve der verwendeten Wellenmode und kann auch als Kalibrierkurve zur Bestimmung der Tiefenlage bei unbekanntem Defekten herangezogen werden.

In Abb. 7 sind exemplarisch die Messungen für einen Impact-Defekt mit 15 J Aufprallenergie dargestellt. In die Fotografie des Testkörpers (links) wurden zusätzlich die Positionen des Sende- und der Empfängerprüfköpfe für die dargestellten Auswertungen eingezeichnet. Das B-Bild (Mitte) zeigt den kompletten Scan-Bereich, man erkennt die Änderung der Steigung im Defektbereich. Während die Steigung der Signalpunkte gleicher Phase der reziproken Phasengeschwindigkeit entspricht, ist die Steigung der Signalhüllkurve gleich der reziproken Gruppengeschwindigkeit. Aus der Wellenzahl im Defektbereich ergibt sich mit der Kalibrierkurve aus Abb. 6 eine realistische Tiefenlage von etwa 1.5 mm.

Untersuchungen zur Sensitivität gegenüber der flächigen Fehlerausdehnung der verwendeten Messmethode zeigen, dass minimale Fehler mit einem Durchmesser von nur 3 mm detektiert werden können (Abb. 8). Dieses Ergebnis kann sogar mit zwei Empfängern in starrer

Anordnung zusammen mit dem Sendewandler erzielt werden. Aber es zeigt sich hier auch deutlich die Einschränkung durch die geringe Empfängeranzahl: Die Wellenlänge im Defektbereich konnte nicht korrekt ermittelt werden, so dass eine Aussage zur Tiefenlage nicht zuverlässig möglich ist. Der Anzeigebereich ist aufgrund der Wandlerapertur im C-Bild verbreitert dargestellt.

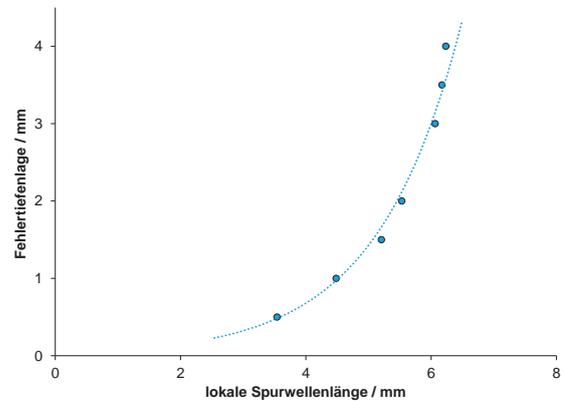


Abb. 6. Defekttiefenlage in Abhängigkeit von der Wellenlänge für eine 4 mm dicke CFK-Platte. Für die experimentelle Ermittlung wurde ein A0-Lamb-Mode verwendet

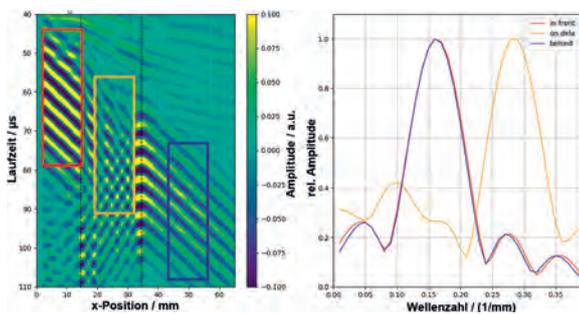


Abb. 4. Ermittlung der Wellenzahl an einer oberflächennahen Delamination (Tiefenlage 12.5 %): Ultraschall-B-Bild (links) und ermittelte Wellenzahl (rechts); rot: fehlerfrei, vor dem Defekt; gelb: geschädigter Bereich; blau: fehlerfrei, hinter dem Defekt

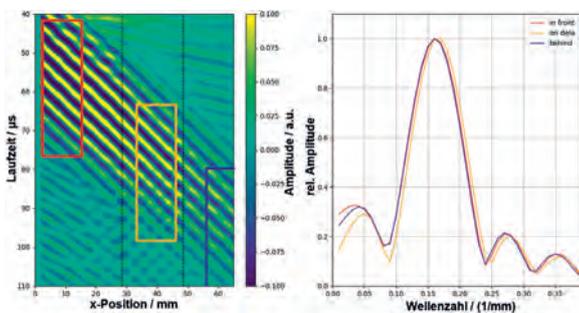


Abb. 5. Ermittlung der Wellenzahl an einer tief liegenden Delamination (Tiefenlage 75 %): Ultraschall-B-Bild (links) und ermittelte Wellenzahl (rechts); rot: fehlerfrei, vor dem Defekt; gelb: geschädigter Bereich; blau: fehlerfrei, hinter dem Defekt

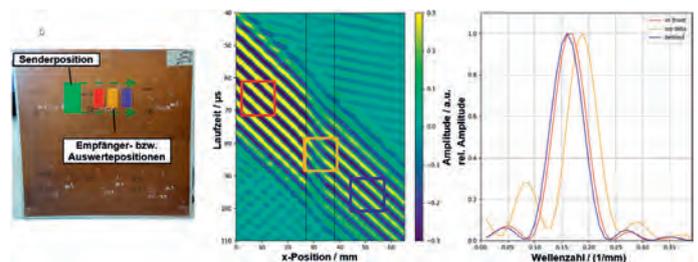


Abb. 7. Bestimmung der Tiefenlage eines Impact-Defektes mit 15 J Aufprallenergie: Testkörper (links), Ultraschall-B-Bild (Mitte) und ermittelte Wellenzahl (rechts); rot: fehlerfrei, vor dem Defekt; gelb: geschädigter Bereich; blau: fehlerfrei, hinter dem Defekt

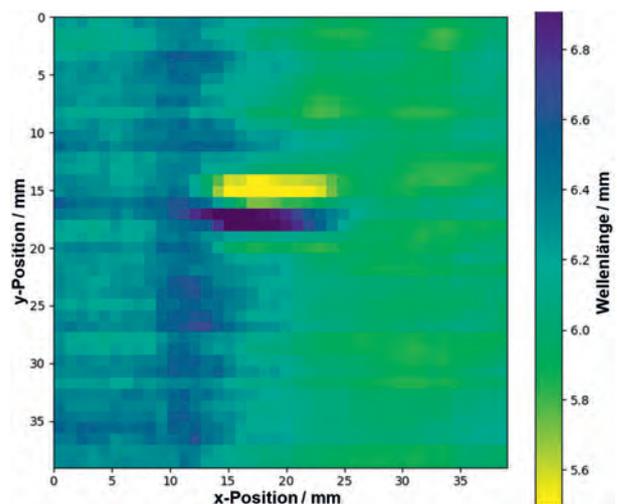


Abb. 8. Experimentell ermittelte räumliche Wellenlängenverteilungen in C-Bild-Darstellung eines A0-Lamb-Moden an einer kreisrunden Delamination mit 3 mm Durchmesser bei 25 % Fehlertiefenlage (Bildmitte)

### 3. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass luftfahrtrelevante Defekte in Faserverbundwerkstoffen (lokale Delaminationen, Porenfelder, usw.) mit Hilfe selektiver geführter Ultraschallwellenmoden detektiert und die Tiefenlagen erfasst werden können. Dabei wird allerdings in vorteilhafter Weise keine Amplitudenbewertung reflektierter und/oder transmittierter Ultraschallsignale vorgenommen, sondern es werden Modenumwandlungseffekte und Arbeitspunktverschiebungen im Modenspektrum lokal erfasst. Dieser Ansatz lässt sich auch bei kleinen Empfangsamplituden realisieren und auswerten. Somit ist man weitgehend unabhängig vom Signal-Rausch-Verhältnis. Dabei können Defekte bis zu einem minimalen Durchmesser von 3 mm erkannt werden. Die Bestimmung der Defekttiefenlagen wurde erfolgreich an Impacts validiert.

Prüfkopfseitig wurde die EMAT-Technik eingesetzt, da sie besonders geeignet ist, selektiv und modenrein geführte Wellenmoden in den Teststrukturen anregen und abgreifen zu können. Zusätzlich kann ohne ein Koppelmedium gearbeitet werden, wodurch die Inspektion durchführung deutlich vereinfacht wird. Allerdings muss eine gut leitfähige Oberfläche, wie bei Luftfahrtkomponenten das Blitzschutzgitter, vorhanden sein.

#### Danksagung

Das zugrundeliegende Forschungsvorhaben ENEMAC wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 20W1703 gefördert.

Die Autoren danken dem BMWi für die finanzielle Unterstützung des Projektes.



Kontakt: troelfes@rosen-group.com

#### REFERENZEN

- [1] M. Hirao, H. Ogi: *EMATS for Science and Industry* Kluwer Academic Publishers
- [2] *Dexment Corporation: Lightning Strike Protection for Carbon Fiber Aircraft* Wallingford, CT 06492, USA, 2007.
- [3] C. Metzner, C., Karch, C.: *Lightning Protection of Carbon Fibre Reinforced Plastics — An Overview in 33rd International Conference on Lightning Protection*; Estoril, Portugal, 2019.
- [4] I. A. Viktorov: *Rayleigh and Lamb waves: Physical theory and applications* New York: Plenum Press, 1967. (Ultrasonic technology – a series of monographs).
- [5] J. D. Achenbach: *Wave propagation in elastic solids* Amsterdam; New York; Oxford; Tokyo: North-Holland, 1973. (North-Holland Series in Applied, Mathematics and Mechanics; 16).
- [6] M. D. Rogge, P. H. Johnston: *Wavenumber Imaging for Damage Detection and Measurement Review of Progress in QNDE 31 (2012) 761–765.*
- [7] G. Petculescu, S. Kirshnaswamy, J. D. Achenbach: *Evaluation of Delaminations and impact damage in composites using the A0 Lamb Mode* U.S. Department of Transportation, Evanston, IL, 60208, USA, 2011.
- [8] L. Schubert, M. Barth, T. Klesse, B. Köhler und B. Frankenstein: *Guided elastic waves and their impact interaction in CFRP structures characterized by 3D laser scanning vibrometry Health Monitoring of Structural and Biological Systems*, p. 69350G, 2008.
- [9] R. Chennamsetti, K. Balasubramaniam und K. C. Venkata: *Interaction of the primary anti-symmetric Lamb mode (A0) with symmetric delaminations: Numerical and experimental studies Smart Materials and Structures*, 2009.
- [10] M. Koerdt, M. Rennoch, T. Roelfes, N. Rauter, R. Lammering und A. S. Herrmann: *Fabrication and characterization of discontinuities in aircraft composites as reference flaws for guided wave based ultrasonic testing In: ICCM22 2019*. Melbourne, VIC: Engineers Australia, 2019: 2952–2958. Availability: <<https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=911474759388294;res=I-ELENG>> ISBN: 9781925627220. [cited 17 Mar 20].
- [11] T. Hayashi und K. Kawashima: *Multiple reflections of Lamb waves at a delamination Ultrasonics 197 (2002) 193–197*
- [12] C. Leckey, P. Johnston, H. Harold und D. Perey: *Ultrasonic Characterization of Aerospace Composites* NASA Langley Research Center, 2016.
- [13] O. Mesnil, C. A. Leckey und M. Ruzzene: *Instantaneous wavenumber estimation for damage quantification in layered plate structures* NASA Langley Research Center, 2014.

## BEITRAG 16

## Pulskompression mit luftgekoppeltem Ultraschall

Pierre Pfeffer<sup>1</sup>, Christian Kolb<sup>1</sup>, Daniel Hoffmann<sup>1</sup>, Giovanni Schober<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SKZ – KFE gGmbH, Würzburg

**KURZFASSUNG** | Die luftgekoppelte und damit kontaktlose Luftultraschalltechnik hat sich in den letzten Jahren mehr und mehr zu einer industrietauglichen Prüftechnik entwickelt, zeigt aber hinsichtlich der angewandten Signalverarbeitungsmethoden Defizite gegenüber bereits etablierten Messverfahren. Wir übertragen das besonders in der Radar- und Sonartechnik weitverbreitete Verfahren der Pulskompression auf den luftgekoppelten Ultraschall und vergleichen die dadurch erzielten Ergebnisse mit herkömmlichen Amplitudenmessungen bei der Aushärtungsüberwachung an einem aushärtenden Klebstoffsystem sowie der Defektdetektion an einem Kunststoffaserverbund mit Impactschaden. An Untersuchungen mit verschiedenen Signalformen (Chirps und Golay-Codes) stellen wir deren jeweilige Besonderheiten und Vorteile heraus. Es zeigt sich, dass die nutzbare Signalreichweite bei der Anregung von Lamb-Wellen erhöht werden kann. Letzteres kann sich, wie es hier demonstriert wird, für die Überwachung von Klebstoffaushärtungen als gewinnbringend erweisen, kann aber beispielsweise auch für die Detektion von Fehlern über einen gemittelten Bereich in sehr langen Probekörpern wie etwa Rohren relevant sein.

## 1. Einführung

Pulskompression (PK) ist eine Signalverarbeitungstechnik, die insbesondere in den Bereichen Radar und Sonar schon seit Jahrzehnten weitverbreitet Anwendung gefunden hat, sich aber auch auf Ultraschallverfahren oder die Thermographie übertragen lässt. Anstelle von kurzen Signalpulsen werden dabei längere, modulierte Sendesignale verwendet. Durch Korrelation der empfangenen Daten mit dem Sendesignal lässt sich eine deutliche Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses sowie der zeitlichen Auflösung erzielen. [1, 2, 3, 4, 5]

Als Signalform werden bei der PK häufig frequenzmodulierte Signale wie Chirps oder phasenmodulierte binäre Signale wie Golay-Codes, Barker-Codes oder sogenannte pseudozufällige Sequenzen eingesetzt. [6, 7, 8, 9] Bei der Verwendung von Chirps wird dabei ein Signal emittiert, dessen Frequenz linear oder nichtlinear von einer Startfrequenz bis zu einer Endfrequenz variiert und dabei idealerweise die Bandbreite der Schallwandler abdeckt. Die Korrelation des Empfangssignals mit dem Sendesignal führt anschließend zu einer „Erkennung“ des Sendesignalmusters im Empfangssignal. Dort, wo das Sendesignal somit „erkannt“ wurde, entsteht in den Ausgangsdaten ein kurzer, intensiver Puls. Bei richtiger Abstimmung des Sendesignals auf die verwendete Hardware führt dieser zu einer höheren zeitlichen Auflösung und einem größeren Signal-zu-Rausch-Verhältnis als die Empfangssignale herkömmlicher Signalpulse. [10, 11]

Der Einsatz von komplementären Golay-Codes ist etwas aufwändiger: Eine einzelne Golay-Sequenz bietet bereits sehr gute Autokorrelationseigenschaften, führt also zu hohen und schmalen Signalen nach der Korrelation, weist jedoch noch sogenannte Nebenkeulen, kleinere Signalmaxima neben dem Hauptmaximum, auf. Ein komplementäres Golay-Code Paar bietet zwei komplementäre Sequenzen, deren Summe der jeweiligen Autokorrelationen diese Nebenkeulen stark minimieren. Um dies zu nutzen, müssen jedoch zwei Signale, eines pro Golay-Code, ausgesandt werden. Weiterhin bestehen Golay-Codes (aber auch Barker-Codes und pseudozufällige Sequenzen wie z. B. Maximum Length Sequences) aus binären Zeichenfolgen (also Folgen von a und b). Da es für die Senderhardware im Regelfall nicht praktikabel ist, solche Signale auszusenden, lässt sich hier die Möglichkeit der Phasenmodulation nutzen, bei der in einem einfachen Beispiel ein a etwa durch eine Sinus- bzw. Rechteckschwingung und ein b durch eine um  $\pi$  dazu verschobene Schwingung dargestellt wird (vgl. Abb. 1). [12]

Ob die Anwendung von Chirps oder die von binären Sequenzen gewinnbringender ist, hängt von den verwendeten Sendern und -empfängern ab: In Simulationen hat sich beispielsweise gezeigt, dass Chirps einen Vorteil bieten, wenn die Bandbreite des Systems kleiner ist als dessen Zentralfrequenz. Liegt hingegen ein breitbandigeres System vor, so führen binäre Codes zu besseren Ergebnissen. [8]

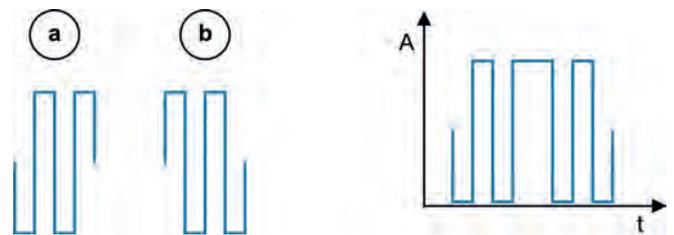


Abb. 1. Prinzip der Phasenmodulation. Links: Mögliche Darstellung der beiden zweizyklischen Elemente eines phasencodierten Signals. Rechts: Sequenz eines binären Codes der Länge 2 (a, b). Amplitude A über Zeit t.

Im Folgenden wird die PK auf das Prüfverfahren des luftgekoppelten Ultraschalls angewandt und anhand zweier praxisnaher Beispiele, der Defektdetektion an einer Platte aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit eingefügten Impactschaden und der Aushärtungsüberwachung an einer zweikomponentigen Klebstoffverbindung, untersucht.

## 2. Anwendung und Vergleich der Pulskompressionsmethoden

### 2.1 Verwendete Hardware und Methoden

Für die Ultraschallmessungen wurde das Luftultraschallsystem SonoInspect der Firma Forschungszentrum Ultraschall gGmbH in Kombination mit zwei speziell für einen breitbandigeren Einsatz konzipierten Schallwandlern verwendet. Bei der Untersuchung der CFK-Platte wurden der Prüfkörper in einem Abstand von etwa 2 cm zwischen den Schallwandlern angebracht und die Messungen

in Transmissionsanordnung durchgeführt. Die Schrittweite bei der Abrasterung der Platte betrug 0,5 cm, die Verstärkungsspannung der Anregung 200 V und die Empfangsverstärkung 58 dB. Bei der Überwachung der Klebstoffaushärtung betrug die Empfangsverstärkung 90 dB. Auf die Messanordnung letzterer Untersuchungen wird im entsprechenden Abschnitt näher eingegangen.

Zur Durchführung der Pulskompression wurden der Sender mit idealisierten Signalformen angeregt und die empfangenen Signale anschließend mit diesen Signalformen kreuzkorreliert.

## 2.2 Defektdetektion an einer CFK-Platte mit Impactschaden

Zunächst wurde eine Platte aus einem in ein Epoxidharz eingebetteten Gewebe aus Kohlefasern mit einem Impactschaden (20 J) versehen und für die Defektdetektion herangezogen. Abb. 2 zeigt sowohl den verwendeten Probekörper als auch eine herkömmliche Messung ohne PK bei einer Mittenfrequenz von 300 kHz an einem Punkt in der Mitte der CFK-Platte. Es sind dabei zwei bis drei Pulszüge (etwa bei 120, 210 und 320  $\mu\text{s}$ ), die durch den direkt transmittierten Ultraschall sowie durch Mehrfachreflexionen an Platte und Schallwandlern zustande kommen, zu erkennen.

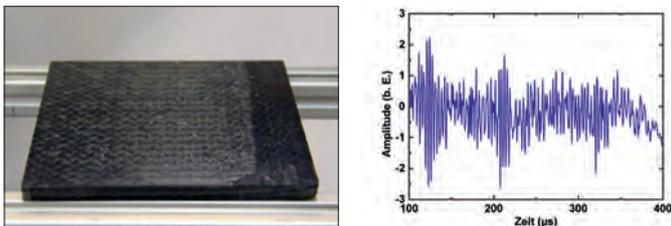


Abb. 2. Links: Untersucher CFK Probekörper. Rechts: In der Mitte des Probekörpers herkömmlich gemessenes Luftultraschallsignal ohne PK.

Wird als Anregungssignal der in Abb. 3 links zu sehende, linear von 200 kHz bis 625 kHz reichende Chirp benutzt, so entsteht das in der selben Abbildung rechts dargestellte Signal, welches zunächst ein schlechteres Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) aufweist als die konventionelle Messung (1,2 im Vergleich zu 1,8). Das SNR wird hier und im Folgenden als Verhältnis zwischen maximaler Amplitude des Signalteils und maximaler Amplitude des Rauschanteils berechnet.

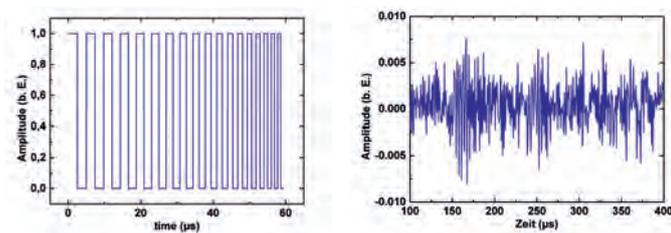


Abb. 3. Links: Verlauf der Anregungsspannung bei Verwendung des Chirps. Rechts: Empfangssignal bei Chirpanregung.

Der im Anschluss an die Kreuzkorrelation von Empfangssignal und idealem Sendesignal entstehende Signalverlauf (Abb. 4) hingegen zeigt insbesondere für das direkt transmittierte Signal eine deutliche Verbesserung des SNR (2,4). Der zweite und dritte Pulszug sind jedoch kaum von den bei der Kreuzkorrelation entstehenden

Nebenkeulen zu unterscheiden und müssten für jede neue Messung zunächst durch Vergleich mit dem konventionell aufgenommenen Messsignal identifiziert werden.

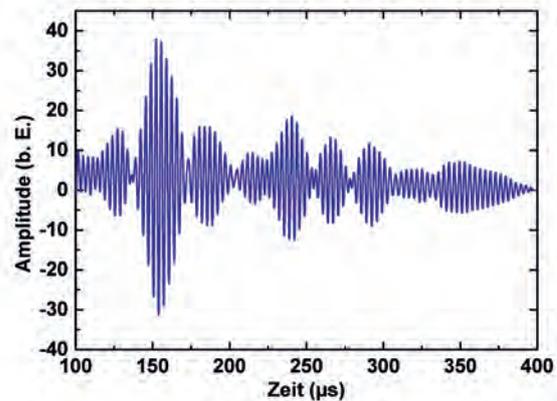


Abb. 4. Pulskomprimiertes Signal nach Kreuzkorrelation des Empfangssignals bei Chirpanregung (Abb. 3 rechts) mit dem idealisierten Chirp-Anregungssignal (Abb. 3 links).

Zum Vergleich des Chirp-Ergebnisses mit denen binärer Codes wurden zwei komplementäre, aus zehn Elementen bestehende Golay-Codes ausgewählt. Die einzelnen Elemente wurden dabei mittels der Phasenmodulation durch Rechteckschwingungen ersetzt. Hierbei wurden zwei verschiedene Längen der Rechteckschwingungen ausgewählt: Bei der ersten wird ein Element eines Golay-Codes durch zwei Schwingungszyklen, beim zweiten durch sieben Zyklen repräsentiert. Es ergeben sich dabei also zwei Gruppen von jeweils zwei komplementären, phasenmodulierten Golay-Codes, die im Folgenden mit Golay 2-1 und Golay 2-2 (in Abb. 5 graphisch dargestellt) sowie Golay 7-1 und 7-2 bezeichnet werden.

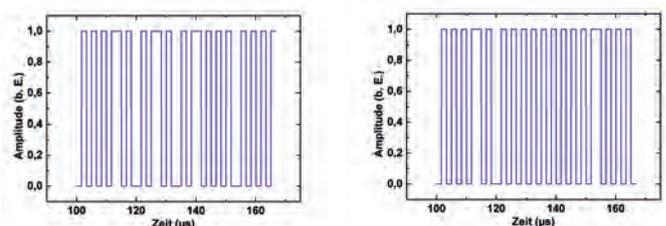


Abb. 5. Idealverläufe der Golay 2-1 (links) und Golay 2-2 (rechts) Anregungs-Codes.

Die Resultate der Kreuzkorrelationen der Messsignale der beiden zweizyklisch repräsentierten Golay-Codes mit den idealen Anregungsverläufen sind in Abb. 6 zu sehen und stechen mit durch im Vergleich zur Chirp-PK zeitlich deutlich schmalere Pulse hervor. Die SNRs betragen 2,2 respektive 2,9.

Eine weitere Verbesserung des SNR (4,0) und der zeitlichen Auflösung kann durch Summation der pulskomprimierten Signale von Golay 2-1 und Golay 2-2 erreicht werden (Abb. 7). Aufgrund der komplementären Eigenschaften der beiden Golay Codes und daraus entstehender Phasenverschiebungen löscht sich hierbei ein Teil der Nebenkeulen aus.

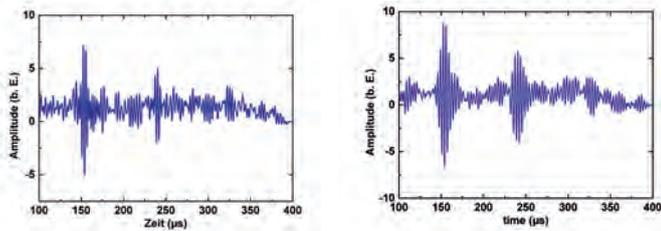


Abb. 6. Pulskomprimierte Signale unter Verwendung der Golay 2-1 und Golay 2-2 Anregungs-Codes (links bzw. rechts).

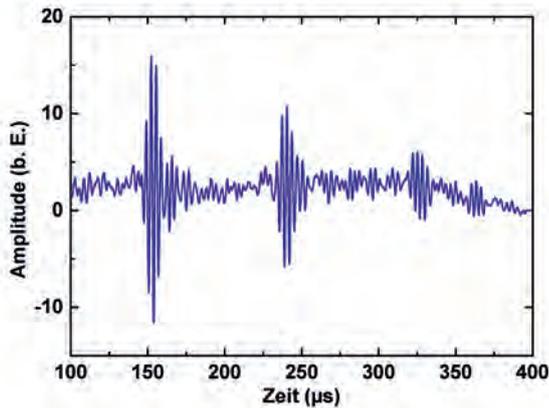


Abb. 7. Summe der puls-komprimierten Signale der Golay 2-1 und Golay 2-2 Codes aus Abb. 6.

Die zu Abb. 6 und Abb. 7 äquivalenten Ergebnisse der sieben zyklisch codierten Golay-Codes sind in Abb. 8 und Abb. 9 abgebildet. Auffällig sind die im Vergleich zu Golay 2-1 und Golay 2-2 hohen Nebenkeulen und breiten Pulse der einzelnen Kreuzkorrelationen. Das SNR ist 2,4 für Golay 7-1, bei Golay 7-2 nicht sinnvoll bestimmbar.

Die Summierung führt hier zu deutlich weniger Nebenkeulen und lässt die einzelnen Pulse noch klarer als in Abb. 7 hervortreten (SNR 5,2), erreicht jedoch nicht dessen zeitliche Auflösung.

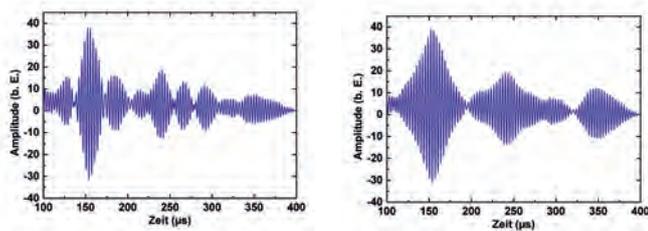


Abb. 8. Pulskomprimierte Signale nach Pulskompression der Golay 7-1 bzw. Golay 7-2 Anregungs-Codes (links bzw. rechts).

Um schließlich die zuvor beschriebenen Messmethoden hinsichtlich der Erkennbarkeit des Impactschadens beurteilen zu können, sind in Abb. 10 die Ergebnisse der entsprechend durchgeführten 2D-Scans gezeigt. In Graustufen ist dabei die maximale Amplitude der A Scans dargestellt (schwarz: niedrige Amplitude, weiß: hohe Amplitude). Die deutlichste Visualisierung und der stärkste Kontrast wird bei Verwendung von Golay 2-1 sowie der Summe aus Golay 2-1 und Golay 2-2 erreicht, wobei die Summe ein homogeneres und rauschfreieres Bild erzeugt.

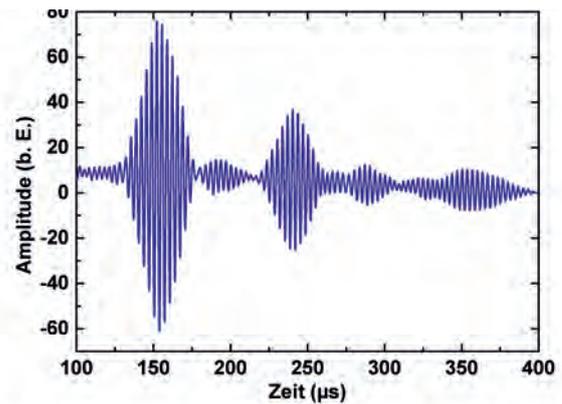


Abb. 9. Summe der puls-komprimierten Signale der Golay 7-1 und Golay 7-2 Codes aus Abb. 8.

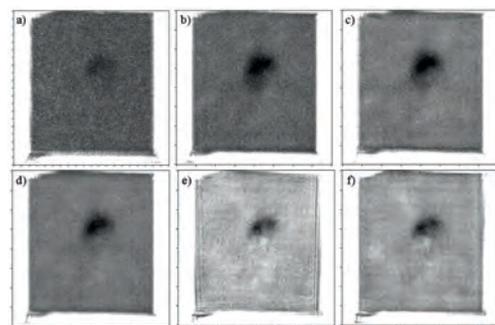


Abb. 10. 2D-Darstellung der Ergebnisse der Probekörperscans. a) Ohne PK, b) Chirp, c) Golay 2-1, d) Summe aus Golay 2-1 und Golay 2-2, e) Golay 7-1 sowie f) Summe aus Golay 7-1 und Golay 7-2.

### 2.3 Untersuchung einer Klebstoffaushärtung

Ein weiterer Bereich neben der Defektdetektion in Faserverbundkunststoffen, der in Zukunft von einer Anwendung der PK profitieren könnte, ist die Überwachung der Klebstoffaushärtung. Um die Tauglichkeit der PK zur Verbesserung der Datenaufnahme bei der Klebstoffaushärtung abschätzen zu können, wurden zwei Platten aus Polymethylmethacrylat (PMMA) überlappend mittels des 2-K MMA Klebstoffes technicoll 9409-1 verklebt und anschließend die Aushärtung durch Anregung geführter Ultraschallwellen mittels luftgekoppelten Ultraschalls überwacht. Die Messgeometrie ist in Abb. 11 links fotografisch und rechts schematisch verdeutlicht.

Da die beste Ergebnisqualität einzelner, nicht kombinierter Messungen im vorgehenden Abschnitt durch Verwendung des Golay 2-1 Codes erzielt werden konnte, wurde dieser für die Ultraschallanregung gewählt.

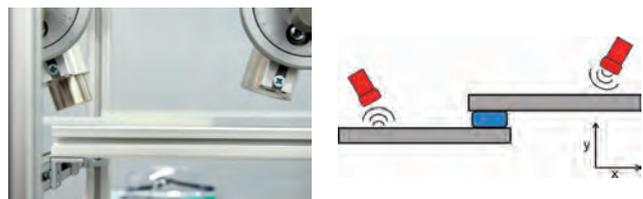


Abb. 11. Links: Foto des Messaufbaus für die Klebstoffaushärtung. Rechts: Schema des Messaufbaus (Ultraschallwandler in Rot, PMMA-Platten in Grau und Klebstoff in Blau).

Zunächst wurde direkt nach Aufbringen des Klebstoffes bei unterschiedlichen Sender-Empfänger-Abständen sowohl mit herkömmlicher Anregung ohne PK bei einer Mittenfrequenz von 300 kHz als auch mittels des Golay 2-1 Codes gemessen. Abb. 12 und Abb. 13 zeigen hierfür die Messergebnisse bei 10 cm, beziehungsweise 13 cm Abstand zwischen Sender und Empfänger. Während bei 10 cm ohne PK noch ein recht klares Signal bei etwa 140  $\mu\text{s}$  zu erkennen ist (das Signal nach etwa 250  $\mu\text{s}$  wird durch die Luft übertragen und ist zur Analyse der Aushärtung nicht relevant), lässt sich bei 13 cm Abstand das entsprechende Signal bei etwa 160  $\mu\text{s}$  kaum noch vom Rauschen unterscheiden. Die Pulskompression führt in beiden Fällen dazu, das SNR von 1,3 auf 2,1 bzw. von ca. 1,1 auf 1,9 deutlich zu erhöhen und ermöglicht somit auch Messungen über Wegstrecken hinweg, bei denen ohne PK aufgrund der Dämpfung des Signals keine sinnvollen Aussagen mehr getroffen werden können.

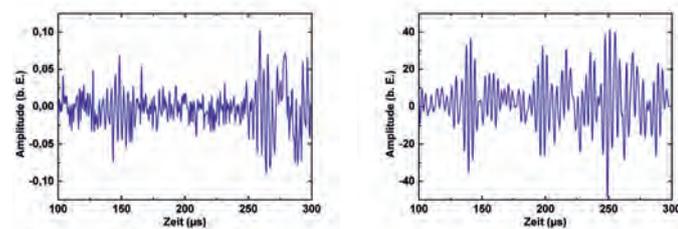


Abb. 12. Messung mittels geführter Wellen an technicoll 9409-1. Abstand zwischen den Wandlerpaaren: ca. 10 cm. Links: Ohne PK. Rechts: Mit Golay 2-1 Pulskompression.

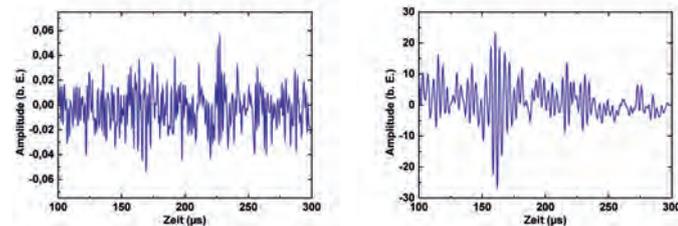


Abb. 13. Messung an einem technicoll Klebstoff. Abstand zwischen den Wandlerpaaren: ca. 13 cm. Links: Ohne PK. Rechts: Mit Golay 2-1 Pulskompression.

In Abb. 14 ist schließlich der Verlauf des Signalmaximums über die Dauer der Klebstoffaushärtung aufgetragen. Es wurde dabei alle 20 s ein A-Scan aufgezeichnet und nach Abschluss der Messung über einen Zeitraum von fünf Minuten gemittelt. Der Verlauf des pulskomprimierten Ultraschallsignals zeigt anfänglich einen steilen Anstieg und nach ca. einer Stunde eine im Rahmen des Messrauschens konstant bleibende Amplitude. Laut Herstellerangaben beträgt beim technicoll 9409-1 die Anfangsfestigkeit ca. 40 Minuten und die Endfestigkeit etwa 8 Stunden. Es liegt somit nahe, anzunehmen, dass ein Abflachen des PK-Amplitudenverlaufs mit dem Erreichen der Anfangsfestigkeit einhergeht. Tiefere Untersuchungen sind jedoch nötig, um konkrete Einflüsse einzelner Phasen der Klebstoffaushärtung auf das Ultraschallsignal bestimmen zu können. Hierzu bestehen bereits umfangreiche Arbeiten, die die prinzipielle Eignung der luftgekoppelten Ultraschalltechnik zum Monitoring des Aushärteverhaltens belegen [13], deren Anwendung in der Praxis jedoch häufig aufgrund der nur geringen Reichweite geführter Wellen bei dämpfenden Klebstoffsystemen limitiert ist. Abhilfe bieten die vorgestellten PK-Methoden.

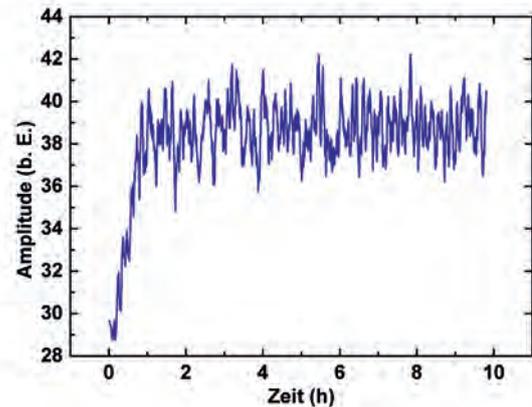


Abb. 14. Maxima des Golay 2-1 Pulskompressions-Signals während der Aushärtung des technicoll Klebstoffes.

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurden die Vorzüge des Einsatzes von PK-Verfahren bei der Defektdetektion sowie der Klebstoffaushärtungsüberwachung mittels luftgekoppelten Ultraschalls dargelegt. Am Beispiel eines Impactschadens an einer CFK-Platte wurde ein Vergleich zwischen konventioneller Ultraschallanregung, einem Chirp und unterschiedlich phasenmodulierten Golay-Codes angestellt. Für den speziellen Fall der vorliegenden Ultraschallwandler zeigte sich dabei eine Verwendung von durch zwei Rechteckzyklen phasenmodulierten komplementären Golay-Codes als am vorteilhaftesten für die Defektdetektion. Weiterhin wurde demonstriert, dass PK-Methoden für den Einsatz bei der Überwachung von Klebstoffaushärtungen geeignet sind und in Kombination mit geführten Ultraschallwellen zu einer deutlichen Steigerung der Signalreichweite führen können. Die Überprüfung und Überwachung von Klebstoffaushärtungsprozessen hat bisher nur wenig praxisnahe Betrachtung gefunden. Durch einen Ausbau der hier gezeigten Vorversuche an einer beispielhaften Klebstoff-Werkstoff-Kombination besteht großes Potential, dass in Zukunft die luftgekoppelte Ultraschalltechnik in Zusammenspiel mit Methoden der PK zu einem praxistauglichen Verfahren zur Überwachung von Klebeverbindungen über größere Wegstrecken hinweg heranwachsen.

#### REFERENZEN

- [1] Achim Hein, *Processing of SAR Data: Fundamentals, Signal Processing, Interferometry*, Springer, 2004, ISBN 3-540-05043-4
- [2] Richards, Mark A. 2014. *Fundamentals of radar signal processing*. New York [etc.]: McGraw-Hill Education.
- [3] Le Chevalier, F. (2002). *Principles of radar and sonar signal processing*. Artech House.
- [4] Gan, T. H., Hutchins, D. A., Billson, D. R., & Schindel, D. W. (2001). *The use of broadband acoustic transducers and pulse-compression techniques for air-coupled ultrasonic imaging*. *Ultrasonics*, 39(3), 181-194.
- [5] Laureti, S., Silipigni, G., Senni, L., Tomasello, R., Burrascano, P., & Ricci, M. (2018). *Comparative study between linear and non-linear frequency-modulated pulse-compression thermography*. *Applied Optics*, 57(18), D32-D39.
- [6] Strickland, D., & Mourou, G. (1985). *Compression of amplified chirped optical pulses*. *Optics communications*, 55(6), 447-449.

- [7] Levanon, N., Cohen, I., Arbel, N., & Zadok, A. (2016). *Non-coherent pulse compression—Aperiodic and periodic waveforms*. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 10(1), 216-224.
- [8] Hutchins, D., Burrascano, P., Davis, L., Laureti, S., & Ricci, M. (2014). *Coded waveforms for optimised air-coupled ultrasonic nondestructive evaluation*. *Ultrasonics*, 54(7), 1745-1759.
- [9] Sarwate, D. V., & Pursley, M. B. (1980). *Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences*. *Proceedings of the IEEE*, 68(5), 593-619.
- [10] Merrill I Skolnik, *Radar Handbook, Third Edition*, McGraw-Hill Education, 2008
- [11] Zavelani-Rossi, M., Cerullo, G., De Silvestri, S., Gallmann, L., Matuschek, N., Steinmeyer, G., & Tschudi, T. (2001). *Pulse compression over a 170-THz bandwidth in the visible by use of only chirped mirrors*. *Optics letters*, 26(15), 1155-1157.
- [12] Garcia-Rodriguez, M., Yañez, Y., Garcia-Hernandez, M. J., Salazar, J., Turo, A., & Chavez, J. A. (2010). *Application of Golay -Codes to improve the dynamic range in ultrasonic Lamb waves air-coupled systems*. *NDT & e International*, 43(8), 677-686.
- [13] Schober, G. & Pfeffer, P. (2018). *A new non-contact measuring method for the evaluation of the curing status of glued lightweight components based on ultrasound*. *Proceedings of the 10th International Symposium on NDT in Aerospace, Oct 2018, Dresden, Germany*.

Kontakt: p.pfeffer@skz.de

## Entwicklung eines Ultraschallsystems zur Überwachung des Lotverhaltens während eines Lötprozesses

Reiner Zielke<sup>1</sup>, Wolfgang Tillmann<sup>1</sup>, Arne Eilers<sup>2</sup>, Julia Bültena<sup>2</sup>

<sup>1</sup> RIF e.V., Dortmund; <sup>2</sup> Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund

**KURZFASSUNG** | Ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, welches in der Löttechnik im Bereich der Qualitätskontrolle von bereits gefertigten Fügeverbindungen zur Detektion von Imperfektionen eingesetzt wird, ist die Ultraschallprüfung. Aufgrund der schnellen Messwerterfassung eignet sich dieses Prüfverfahren allerdings auch zur in-situ Überwachung des gesamten Lötprozesses. Im Beitrag wird ein Prüfsystem vorgestellt, welches auf der Ultraschalltechnik basiert, in eine konventionelle Induktionsanlage integriert ist und zur in-situ Betrachtung der Fügezone eingesetzt wird. Die Ergebnisse der Untersuchungen können zur Qualitätskontrolle als auch zur Optimierung des Lötprozesses herangezogen werden. Die Versuche wurden an RAB-gelöteten (engl. Reactive Air Brazing) Metall-Keramik-Verbunden durchgeführt, wobei das Ultraschallsignal über den metallischen Fügepartner in das Gesamtsystem eingeleitet wurde. Mit Hilfe der Messvorrichtung wurden den Lötprozess beeinflussende Faktoren, wie das Verhalten des metallischen Fügepartners während der Erwärmung und das Aufschmelzen sowie Erstarren des Lotes bzw. Lötguts in der Fügezone, auf das reflektierende Ultraschallsignal untersucht.

### 1. Einführung

Ein Vorteil des fügetechnischen Verfahrens Löten ist das Verbinden artfremder Werkstoffe. Dadurch ist es möglich auch nichtmetallische an metallische Werkstoffe zu fügen. Zu diesen Werkstoffkombinationen zählen auch die Metall-Keramik-Fügeverbunde, die die vorteilhaften Eigenschaften von Keramiken und Metallen verbinden. Um diese artfremden Fügeverbunde herzustellen, werden bestimmte Herausforderungen an das Lot und den Lötprozess gestellt. Dabei steht die Benetzungsfähigkeit der Keramik im Vordergrund. Aufgrund der unterschiedlichen Atombindungsarten gegenüber den Metallen müssen entweder die Keramiken metallisiert werden oder dem Lot sogenannte Aktivelemente hinzugefügt werden, die eine Anbindung zwischen Keramik und Lot schaffen. Ein mögliches Herstellungsverfahren für Metall-Keramik-Fügeverbunde ist das RAB-Löten (engl.: Reactive Air Brazing). Das RAB-Löten erfolgt an Luft, so dass kein Vakuum und keine Schutzgasatmosphäre notwendig ist. Dementsprechend zeichnet sich dieses Verfahren durch eine hohe Wirtschaftlichkeit aus. Die Lote basieren auf Edelmetall, meistens Silber, sowie einem Metalloxid, v.a. Kupferoxid. Einige Lote weisen zusätzlich noch ein Aktivelement, z.B. Titan, auf. Sowohl das Aktivelement als auch das Metalloxid dienen der Benetzung auf der Keramik. Der RAB-Lötprozess kann sowohl im Ofen als auch durch induktive Erwärmung erfolgen. Aufgrund der hohen erreichbaren Aufheiz- und Abkühlraten ist das Induktionslöten durch die geringen Prozesszeiten sehr produktiv und wirtschaftlich [1].

Zerstörungsfreie Prüfungen, wie z.B. die Ultraschalltechnik, werden bei gelöteten Fügeverbunden vor allem zur Qualitätskontrolle nach dem Lötprozess eingesetzt. Hierdurch können festigkeitsmindernde Fehlstellen, wie Lunker, Poren oder Sprödphasen, detektiert und lokalisiert werden. Allerdings lässt sich die Ultraschallprüfung auch in-situ während des Lötprozesses durchführen. Somit können die Veränderungen in der Fügezone während des Prozesses bestimmt werden. Hierzu zählen insbesondere das Aufschmelzen und das Erstarren des Lotes. In ersten Untersuchungen zeigte Berthold die Machbarkeit einer In situ Ultraschallprüfung während des Lötprozesses mit Widerstands-, Induktions-, und Flammlöten [3]. Dabei wurde der Zusammenhang zwischen den Lötnahtqualitäten und den reflektierten Ultraschallsignalen aufgezeigt. Eine Beschreibung des Lotzustands während des Lötprozesses erfolgte jedoch nicht. Die

Änderung des Lotzustands wurde von den Autoren dieses Beitrags anhand von Metall-Keramik-Fügeverbunden während eines RAB-Lötprozesses untersucht [4]. In diesen Untersuchungen wurde der eigenentwickelte Prüfstand für die In-situ-Ultraschallprüfung erstmals verwendet. Als Lotwerkstoff diente das Lot Ag4CuO ohne Aktivelement. Als metallischer Fügepartner wurde ein unlegierter Stahl verwendet. Mit Hilfe des Prüfstandes konnten erste Aussagen über den veränderten Lotzustand während des Lötprozesses nachgewiesen werden. Hierzu zählen vor allem das Aufschmelzen und das Erstarren des Lotes. Allerdings entstand eine stahlseitige Oxidschicht, die während der Abkühlphase zum Abplatzen und dadurch zum Versagen des Fügeverbundes führte. In diesem Beitrag wird daher zum einen ein korrosionsbeständiger ferritischer Stahl und zum anderen ein Lot mit dem Aktivelement Titan verwendet. Durch diese Grundwerkstoff-Lot-Kombination entstanden feste Fügeverbunde, die nicht während des Lötprozesses in der metallseitigen Oxidschicht versagten. Weiterhin wurden die Temperaturprofile der Lötprozesse variiert und dessen Einfluss auf die Methodik der In-situ-Ultraschallmessung untersucht.

### 2. Experimenteller Aufbau und Durchführung

Für die Experimente werden Metall-Keramik-Fügeverbunde verwendet, deren Geometrie in Abb. 1a dargestellt ist. Der metallische Fügepartner besteht aus dem ferritischen Stahl X10CrSiAl18-1-1 (1.4742). Dieser wird als Zylinder mit einem Durchmesser von  $d = 15$  mm und einer Länge von  $l = 50$  mm verwendet. Der keramische Fügepartner besteht aus Aluminiumoxid ( $Al_2O_3$ ) mit einer Reinheit von 97,6 % (Fa. Haldenwanger). Die Maße des verwendeten Quaders sind:  $18 \times 18 \times 10$  mm. Als Lot wird die RAB-Lotpaste Ag8CuO0,5Ti der Fa. Innobraze verwendet. Ein beispielhaftes Temperatur-Zeit-Profil des Lötprozesses ist in Abb. 1b dargestellt. In diesen Experimenten wird das Temperatur Zeit Profil jedoch variiert. Daher sind in den jeweiligen Abbildungen im Ergebnisteil die unterschiedlichen Temperatur Zeit Profile hinterlegt. Die Aufheizrate beträgt in der Regel  $\Delta T = 5$  K/s, wobei abweichende Aufheizraten angegeben werden. Die Abkühlrate beträgt bis  $T = 300$  °C  $\Delta T = 3$  K/s. Unterhalb einer Temperatur von  $T = 300$  °C erfolgt eine freie Abkühlung.

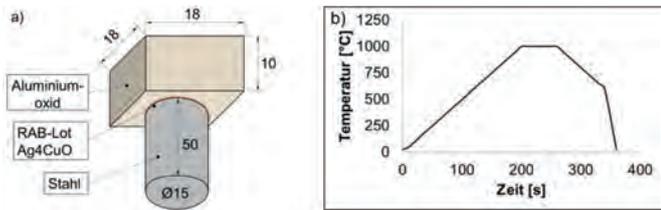


Abb. 1. a) Schematische Darstellung der gelöteten Probengeometrie; b) Temperatur-Zeit-Profil

Die Experimente wurden an einer eigenentwickelten Prüfvorrichtung durchgeführt, an der die Erwärmung durch Induktion erfolgt. Hierzu wurde eine Induktionsanlage der Fa. Himmel (Typenbezeichnung HA5-2/22 HG54-15) verwendet, die eine Betriebsfrequenz von  $f = 300 \text{ kHz}$  besitzt. Durch die Prüfvorrichtung, die in Abb. 2 dargestellt ist, wird eine In situ Ultraschallprüfung während des Lötprozesses realisiert. Die Vorrichtung dient neben der Positionierung der Fügepartner vor allem dem Zweck der Kühlung. Hierzu ist die Stahlprobe zum Teil von einer Wasserkühlkammer umschlossen. Durch den Zu- und Ablauf des Kühlwassers wird eine stetig gleichbleibende Kühlung erreicht. An der unteren Stirnseite des Stahlzylinders befindet sich der Ultraschallprüfkopf, dessen maximale Einsatztemperatur bei  $T = 60 \text{ °C}$  liegt. Das obere Ende der Stahlprobe ragt aus der Wasserkühlkammer heraus, so dass in diesem Bereich die Induktionsspule positioniert wird.

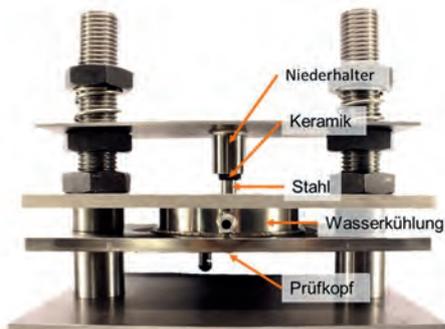


Abb. 2. Prüfvorrichtung für die In-situ-Ultraschallmessungen

Die Fügepartner werden vor den Versuchen geschliffen (1200er Körnung) und gereinigt. Zu Beginn der Versuche wird die Stahlprobe in der Prüfvorrichtung platziert, die Lotpaste appliziert und anschließend der keramische Fügepartner aufgelegt. Der Niederhalter sorgt für einen definierten Anpressdruck, so dass eine definierte Position der Probekörper gewährleistet wird und somit reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Der freiliegende Bereich der Stahlprobe wird von der Spule der Induktionsanlage umschlossen und induktiv erwärmt. Durch Wärmeleitung wird so das Aufschmelzen des Lotes ermöglicht. Die Temperaturmessung und -regelung erfolgt mit Hilfe eines Thermoelements in der Stahlprobe in der Nähe der Fügezone. Alle angegebenen Temperaturen beziehen sich auf dieses Thermoelement. Der verwendete Prüfkopf ist ein Sende-Empfänger(SE)-Prüfkopf mit einer Prüffrequenz von  $f = 2,25 \text{ MHz}$ . Das A Bild wird mit einem Ultraschallgerät der Marke Karl Deutsch GmbH & Co. KG dargestellt.

Für die weitere Auswertung wird der Peak im A Bild betrachtet, der das Ende der Stahlprobe repräsentiert. Dort befindet sich das Lot und dementsprechend die Fügezone. Anhand der Amplitude dieses

Peaks können Aussagen über die Veränderungen des Lotes getroffen werden.

Die Amplitude wird jedoch nicht nur vom Zustand des Lotes beeinflusst. Während des gesamten Lötprozesses ändert sich die Amplitude in Abhängigkeit der Temperatur. Da die Ultraschallwellen die gesamte Stahlprobe durchlaufen, werden die Wellen auch von den temperaturabhängigen Vorgängen im Stahl beeinflusst. Daher wird zunächst ein Konzept erarbeitet, um den Einfluss des Lotes zu bestimmen. Das prinzipielle Vorgehen zur Ermittlung des Loteinflusses ist in Abb. 3 dargestellt. Zunächst wird der Einfluss des Stahls auf die Amplitude bestimmt (oben). Hierzu werden Lötprozesse ohne Lot durchgeführt. Anschließend werden „normale“ Lötprozesse mit Lot durchgeführt und die Amplitudenänderung gemessen (unten). Durch die Bildung der Differenz zwischen den Amplituden-Zeit-Kurven der Experimente mit sowie ohne Lot kann der reine Loteinfluss ermittelt werden (rechts). Durch dieses Vorgehen wird der temperaturabhängige Stahleinfluss auf die Amplitude herausgerechnet.

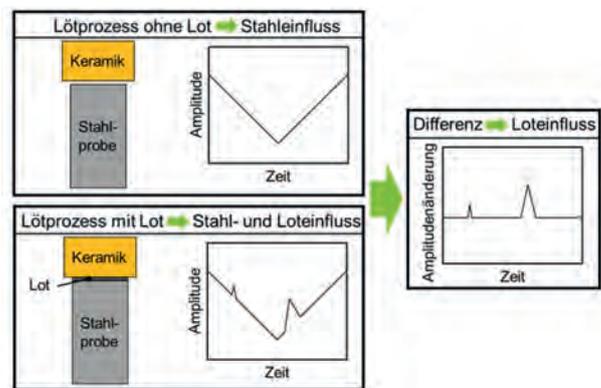


Abb. 3. Schematisches Vorgehen zur Bestimmung des Loteinflusses

### 3. Ergebnisse und Diskussion

In dieser Arbeit werden die Erkenntnisse unterschiedlicher Temperaturprofile dargestellt, beschrieben und verglichen. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Zusammenhang zwischen der Amplitude und dem Lotzustand, so dass der Lotzustand sowie dessen Änderung während des Lötprozesses beschrieben werden kann. Weiterhin wird untersucht inwiefern unterschiedliche Temperaturprofile die Möglichkeit der Detektion von Lotzustandsänderungen mittels Ultraschall beeinflussen.

#### 3.1. Temperatur $T = 930 \text{ °C}$ , Haltezeit $t = 1 \text{ min}$

Zunächst werden die Erkenntnisse aus den Experimenten mit einer Temperatur  $T = 930 \text{ °C}$  und einer Haltezeit von  $t = 1 \text{ min}$  dargestellt. In Abb. 4 sind die Amplituden Zeit Diagramme mit und ohne Lot sowie die Differenz dieser beiden Kurven, die den Loteinfluss repräsentiert, dargestellt. Die Werte für die Diagramme ergeben sich aus den Mittelwerten von drei einzelnen Proben. Im Folgenden wird die Änderung der Amplitude durch das Lot anhand der Differenzkurve (unten) beschrieben. Die erste auffällige Amplitudenänderung entsteht bei einer Temperatur von etwa  $T = 200 \text{ °C}$  (Bereich 1 in Abb. 4). Dies ist auf den Einfluss des Binders der Lotpaste zurückzuführen. Aufgrund der Temperatur und der beobachteten Dampfentwicklung kann diese Amplitudenänderung mit dem Verdampfen des Binders erklärt werden. Somit zeigt sich ein erster Einfluss der Zustandsänderung des Lotes auf die Amplitude.

Im weiteren Verlauf der Aufheizphase ändert sich die Amplitude unregelmäßig (Bereich A in Abb. 4). In vorherigen Untersuchungen [4] wurde eine Amplitudenänderung im Temperaturbereich der Curie-Temperatur sowie der Phasenumwandlung des Fe-Gitters von kubisch-raumzentriert zu kubisch-flächenzentriert festgestellt ( $T = 700 - 780 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Da dies ein Stahleinfluss darstellt, ist dieser in der Regel nicht im Diagramm des Loteinflusses zu sehen. Allerdings können leichte (Phasen-)Verschiebungen der Kurven mit und ohne Lot zueinander zu einer Änderung des Loteinfluss-Diagramms führen. Aufgrund dieser (Vor-)Erkenntnisse sowie des Temperaturbereichs, in dem keine Änderung des Lotes zu erwarten ist, wird im Bereich A kein Loteinfluss auf die Amplitude angenommen.

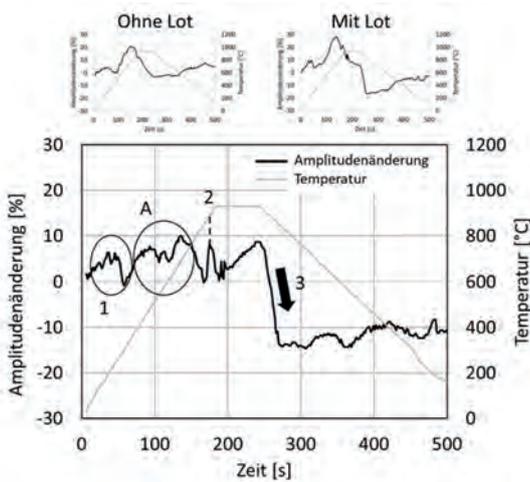


Abb. 4. Amplituden-Zeit-Diagramm und Temperatur-Zeit-Profil der Experimente bei einer Temperatur von  $T = 930 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Haltezeit von  $t = 1 \text{ min}$ : Kurven mit und ohne Lot (oben) sowie Differenz der Proben mit und ohne Lot (unten).

An der Position 2 in Abb. 4 ist eine weitere Amplitudenänderung zu erkennen. Aufgrund der Erkenntnisse aus den vorherigen Untersuchungen [4] sowie der Temperatur von etwa  $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$  wird diese Amplitudenänderung dem Aufschmelzen des Lotes zugeordnet. Hierbei gilt es zu beachten, dass sich die Temperaturangaben auf das Thermoelement beziehen und nicht die exakte Temperatur in der Fügezone beschreiben.

Während der Haltezeit bei einer Temperatur von  $T = 930 \text{ }^\circ\text{C}$  steigt die Amplitude kontinuierlich an. Dieses Verhalten kann zum einen mit der Bildung einer stahlseitigen Oxidschicht und zum anderen mit dem Fließen des Lotes begründet werden. Da die Diffusion von Sauerstoffatomen in der flüssigen Schmelze gegenüber dem festen Zustand deutlich erhöht ist, gelangt mehr Sauerstoff zur Lötfläche des Stahls. Dies führt zur Bildung einer Oxidschicht, die wiederum eine höhere Reflexion der Ultraschallwellen verursacht. Daher steigt die Amplitude an. Weiterhin kommt es zum Fließen des flüssigen Lotes. Insbesondere aufgrund der geringen Benetzungsfähigkeit des Lotes auf der Keramik neigt das Lot zum Fließen bzw. Zusammenziehen. Die Folge des Fließens ist die Ansammlung des Lotes am Umfang der Stahlprobe außerhalb der Lötnaht. Dementsprechend entstehen großflächig Poren in der Lötnaht, deren Folge ebenfalls eine erhöhte Reflexion der Ultraschallwellen ist und sich in einer Erhöhung der Amplitude widerspiegelt. Sowohl die Ansammlung von Lötgut am Umfang der Stahlprobe als auch die Poren in der Lötnaht konnten an der Probe bzw. an der Bruchfläche identifiziert werden.

Nach dem Ende der Haltezeit fällt die Amplitude im Temperaturbereich von  $T = 900$  bis  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  stark ab (Pfeil 3 in Abb. 4). In diesem Bereich findet die Erstarrung des zuvor flüssigen Lotes statt. Durch die Erstarrung entsteht eine Anbindung zwischen dem Grundwerkstoff und dem erstarrten Lötgut. Durch die Anbindung werden weniger Ultraschallwellen reflektiert, so dass eine sinkende Amplitude die Folge ist. Im weiteren Verlauf der Kurve ändert sich das Niveau der Amplitude nur geringfügig. Da ein fester Fügeverbund hergestellt wurde, ist die Amplitude am Ende des Lötprozesses geringer als vor dem Lötprozess.

### 3.2. Temperatur $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , Haltezeit $t = 1 \text{ s}$

Um das Verhalten der Amplitude bei nicht vorhandener Haltezeit zu untersuchen, werden die Ergebnisse der Experimente bei einer Temperatur von  $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer minimalen Haltezeit von  $t = 1 \text{ s}$  betrachtet. In Abb. 5 sind die Amplituden-Zeit-Diagramme der Experimente mit und ohne Lot sowie die Differenzkurve dargestellt. Das Verdampfen des Binders (Bereich 1) kann hier ebenso wie in Kapitel 3.1 nachgewiesen werden. Der weitere Verlauf unterscheidet sich jedoch von den vorherigen Erkenntnissen. Aufgrund der geringen Prozess- bzw. Haltezeit kann eine Differenzierung zwischen der Amplitudenänderung durch das Aufschmelzen und das Erstarren nicht mehr erfolgen. Das kurze Plateau während der Amplitudenabnahme deutet zwar auf einen kurzen Zeitraum der Flüssigphase hin. Eine eindeutige Zuordnung ist allerdings kaum möglich.

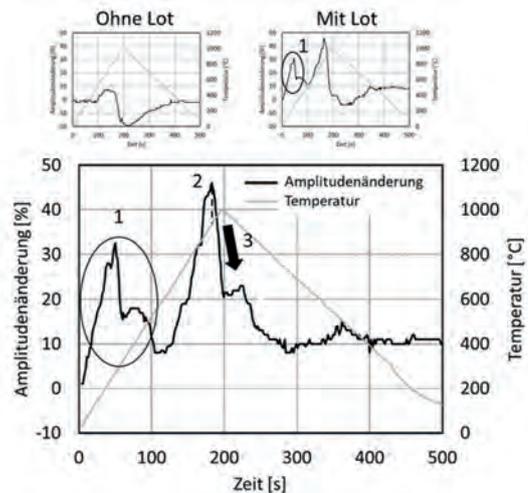


Abb. 5. Amplituden-Zeit-Diagramm und Temperatur-Zeit-Profil der Experimente bei einer Temperatur von  $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Haltezeit von  $t = 1 \text{ s}$ : Kurven mit und ohne Lot (oben) sowie Differenz der Proben mit und ohne Lot (unten).

### 3.3. Temperatur $T = 930 \text{ }^\circ\text{C}$ , Haltezeit $t = 1 \text{ min}$ , Aufheizrate $\Delta T = 0,25 \text{ K/s}$

Um den Vorgang des Aufschmelzens eindeutig einer Prozesstemperatur und einer Amplitudenänderung zuordnen zu können, werden im Folgenden die Erkenntnisse aus den Experimenten mit einer geringen Aufheizrate dargestellt. Diesen Experimenten gingen Voruntersuchungen voraus, die der Bestimmung der Prozesstemperatur zum Zeitpunkt des Aufschmelzens dienen. Diese ergaben, dass das Lot bei einer Prozesstemperatur von  $T = 875 \text{ }^\circ\text{C}$  noch nicht aufgeschmolzen ist. Dementsprechend wurde ab dieser Temperatur eine

geringe Aufheizrate von  $\Delta T = 0,25 \text{ K/s}$  verwendet. Aufgrund der längeren Prozesszeit und stetigen Temperaturerhöhung kann das Aufschmelzen eindeutig bestimmt und näher beschrieben werden.

In Abb. 6 ist der vergrößerte Ausschnitt des Amplituden-Zeit-Diagramms mit der geringen Aufheizrate und der anschließenden Haltezeit dargestellt. Während der geringen Aufheizrate ändert sich die Amplitude in einem Temperaturbereich von  $T = 910 - 920 \text{ °C}$  für eine Dauer von ca.  $t = 40 \text{ s}$  (Bereich 2). Diese Amplitudenänderung entsteht infolge des Aufschmelzvorganges des Lotes und war auch in den vorherigen Experimenten in diesem Temperaturbereich nachweisbar. Im Bereich 3 fällt die Amplitude aufgrund der Erstarrung und Anbindung des Lötguts stark ab.

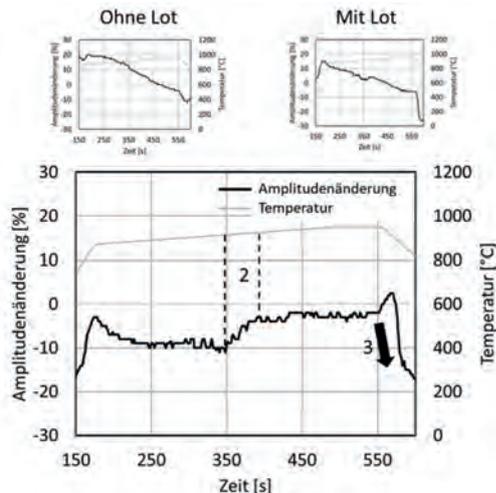


Abb. 6. Ausschnitt des Amplituden-Zeit-Diagramms und Temperatur-Zeit-Profiles der Experimente bei einer Temperatur von  $T = 930 \text{ °C}$  und einer Haltezeit von  $t = 1 \text{ min}$  mit einer Aufheizrate von  $\Delta T = 0,25 \text{ K/s}$ : Kurven mit und ohne Lot (oben) sowie Differenz der Proben mit und ohne Lot (unten).

#### 4. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde mit Hilfe eines eigenentwickelten Prüfstandes Experimente zur In situ Ultraschalluntersuchung während des RAB Lötprozesses von Metall-Keramik-Fügeverbindungen durchgeführt. Um den Loteinfluss auf die Änderung der Ultraschallamplitude zu bestimmen, wurden Experimente mit und ohne Lotapplikation durchgeführt. Durch die anschließende Bildung der Differenz der Amplitudenwerte ergibt sich der Loteinfluss.

Mit dieser Methodik konnten Änderungen des Lotzustandes während des Lötprozesses detektiert werden. Dabei zeigt sich durch die Änderung der Amplitude zunächst das Verdampfen des Binders, das zusätzlich von einer Rauchentwicklung während der Versuche begleitet wurde. Im weiteren Verlauf des Lötprozesses konnte das Aufschmelzen des Lotes bei Prozesstemperaturen von ca.  $T = 900 - 920 \text{ °C}$  in allen Experimenten nachgewiesen werden. Die größte Amplitudenänderung zeigte sich bei der Erstarrung und der damit einhergehenden Anbindung des Lötguts an den Grundwerkstoff.

Um diese Vorgänge in der Fügezone mittels Ultraschalltechnik darzustellen, sollte eine ausreichende Prozesszeit gewählt werden. Bei zu geringer Prozesszeit können sich die Effekte des Aufschmelzens und Erstarrens überlagern. Ab welcher Prozesszeit eine Überlagerung auftritt, gilt es noch zu untersuchen. Eine Haltezeit von  $t = 1 \text{ min}$  ist jedoch ausreichend, so dass die gängigen Lötprozesse mit dieser Methodik geprüft werden können.

#### REFERENZEN

- [1] K. Bobzin, F. Ernst, A. Schlegel, N. Kopp: Löten von Keramiken mit Metall-Metalloxid-Loten an Luft. In: Wielage, B. (Hrsg.): Werkstoffe und Werkstofftechnische Anwendungen, Tagungsband 11. Werkstofftechnisches Kolloquium, Chemnitz, 2008
- [2] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer-Verlag, Berlin, 1980 (4. Auflage)
- [3] M. Berthold: Diagnose des Lötprozesses mittels Ultraschall, Verlag Dr. Hut, München, 2001
- [4] A. Eilers, J. Bültena, S. Basbayandur, W. Tillmann, R. Zielke: „In-situ-Ultraschall-Betrachtung der Fügezone während des RAB-Lötprozesses“, Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand, Inventum GmbH, 2019

Kontakt: [reiner.zielke@udo.edu](mailto:reiner.zielke@udo.edu)

## Entwicklung einer Prüfmaschine zu In-Situ Untersuchungen mit Hilfe der Computertomografie

Reiner Zielke<sup>1</sup>, Wolfgang Tillmann<sup>1</sup>, Maximilian Ambaum<sup>1</sup>, Siegfried Schmauder<sup>2</sup>, Yanling Schneider<sup>2</sup>

<sup>1</sup> RIF e.V., Dortmund; <sup>2</sup> IMWF, Universität Stuttgart, Stuttgart

**KURZFASSUNG** | Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Schädigungsmechanismus<sup>1</sup> von Verbundwerkstoffen ist eine definierte mechanische Belastung der Probe, die dann nach dieser Belastung mit Hilfe der Computertomografie auf Fehler geprüft wird. Eine effektivere Methode wäre die Durchführung der Computertomografie während der Belastung, da sich so Risse nicht aufgrund der Entlastung wieder schließen können. Diese Methode, welche eine Computertomografie während der Belastung ermöglicht, erfordert jedoch eine spezielle Prüfmaschine, die die Probe unter Belastung definiert drehen kann und sich dabei keine Anbauteile der Zugprüfmaschine in den Strahlengang bewegen.

Im Rahmen des Beitrages wird eine speziell für Computertomografieuntersuchungen entwickelte Zugprüfmaschine vorgestellt. Weiterhin werden Ergebnisse an Metallmatrix-Verbundwerkstoffen präsentiert.

### Einführung

Eine mechanische Belastung von Metallen kann zu einer Spannungskonzentration führen, welche mikrostrukturelle Prozesse auslösen und Mikroschäden im Bauteil verursachen. Diese mikrostrukturellen Prozesse verändern somit das mechanische Verhalten der Bauteile während der Belastung. Um solche mikrostrukturellen Prozesse zu beeinflussen, eignen sich metallische Werkstoffe, die zum Beispiel durch harte Partikel verstärkt sind. Solche Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (MMCs) werden immer attraktiver, da ihre mechanischen Eigenschaften für verschiedene Anwendungen angepasst werden können [1-3].

In den letzten zehn Jahren wurden umfangreiche theoretische und experimentelle Studien durchgeführt, um die Mechanismen, die dem makroskopisch-mechanischen Verhalten von MMCs zugrunde liegen, zu erforschen [4-7]. Ein Schwerpunkt hierzu ist die Untersuchung der Anbindung der Partikel zur Matrix. Hierzu wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Proben plastisch belastet wurden und anschließend mit Hilfe von Verfahren wie der Computertomografie gemessen wurden. So ließen sich Delaminationen zwischen Partikel und Matrix detektieren. Da sich die gebildeten Risse nach der Belastung wieder schließen können und somit nicht mehr nachweisbar sind, wurde im Rahmen des DFG-Projektes TI 343/113-1 eine Prüfmaschine entwickelt, welche eine Computertomografie unter Belastung ermöglicht. Mit diesem neuen Ansatz lassen sich Schädigungen im Vergleich zu der bisher eingesetzten Methode schneller und sicherer erkennen.

Im Rahmen der Arbeiten wurde daher eine Zugmaschine entwickelt, die eine Computertomografie unter mechanischer Belastung ermöglicht. Eingesetzt wurde die Anlage für die Untersuchung an einem Co/WC/Diamant MMC Werkstoff. Zur Auswertung der Daten wurde abschließend eine Bildkorrelation durchgeführt, um die Dehnungsänderungen auch im Volumen zu bestimmen.

### 1. Entwicklung der In-Situ-Prüfmaschine

Für die Untersuchungen wurde eine Zugmaschine erstellt, welche eine Rotation der Zugprobe unter Last ermöglicht. Dadurch kann bei anliegender mechanischer Belastung eine hochauflösende Computertomografie durchgeführt werden. Der schematische Aufbau ist in der Abbildung 1a) skizziert. In gelb eingezeichnet ist die Röntgenröhre, deren Austrittsfenster vor der Zugprobe positioniert ist. Die Probe selbst wird mit Hilfe des Motors, der die beiden Spindeln antreibt,

mechanisch belastet. Die anliegende Kraft wird mit der Kraftmessdose gemessen und aufgezeichnet. Ebenso wird der Verfahrensweg mit Hilfe eines Wegaufnehmers aufgenommen. Die vorgegebene Belastung kann, wie bei einer herkömmlichen Zugmaschine, entweder kraft- oder weggeregelt über einen beliebigen Zeitraum gehalten werden.

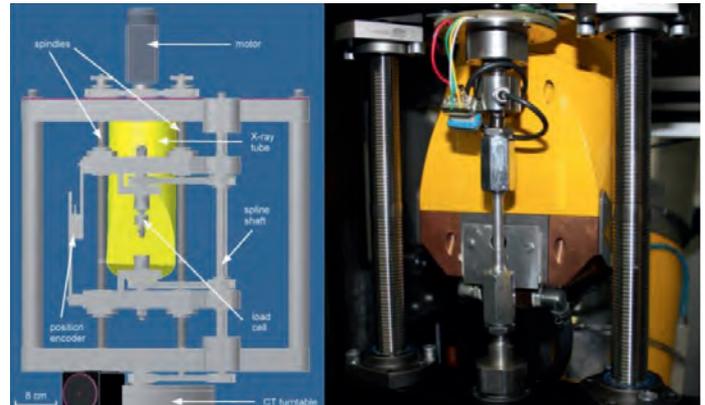


Abb. 1. a) Schematischer Aufbau der Prüfmaschine, b) Erstellte Prüfmaschine

Die Probenhalterung ist an der oberen und unteren Befestigung drehbar gelagert und kann mit Hilfe einer seitlich angebrachten Achse und einem Riemenantrieb gedreht werden. Um einen weiteren elektrischen Antrieb sowie Winkelsensoren zur Rotationsbestimmung der Probe und einer Anpassung der Computertomografie-Messsoftware zu vermeiden, wurde zum Antrieb der Drehtisch der eingesetzten Computertomografieanlage GE vto me 240 genutzt, indem über einen Riemen die Drehung auf die Probe übertragen wird. Somit ist keine Änderung oder Anpassung der Computertomografie-Messsoftware notwendig. Die auf diese Art erstellte Zugmaschine zeigt Abbildung 1b).

Wie die Abbildung zeigt, kann die Röntgenröhre sehr nah an den zu untersuchenden Bereich der Zugprobe positioniert werden. Dadurch ist eine für die Untersuchungen notwendige Vergrößerung realisierbar.

## 2. Messergebnisse

Die für die nachfolgenden Untersuchungen genutzten Zugproben zeigt die Abbildung 2. Links im Bild sind die Abmaße der Proben in Form einer technischen Zeichnung abgebildet. Die Proben selber zeigt das mittlere Bild. Die Materialzusammensetzung in Vol% des MMCs ist rechts in der Abbildung 2 angegeben, wobei das Material für Trennwerkzeuge eingesetzt wird. Das Matrixmaterial ist Cobalt, in das WC-Partikel mit einem Durchmesser von ca. 4  $\mu\text{m}$  und Diamanten mit einem Durchmesser von 40  $\mu\text{m}$  eingelagert sind.



Abb. 2. Untersuchte Probekörper

Das Material wurde zunächst mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops und eines Röntgenmikroskops (Zeiss XRADIA 520Versa) auf seinen Aufbau hin untersucht. Hierzu zeigt die Abbildung 3a) das Ergebnis der Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop. Hier sind in Diamanten in schwarz und die WC-Partikel in weiß zu erkennen. Mit dem Röntgenmikroskop wurde zunächst eine Übersichtsaufnahme b) aufgenommen, in der neben der Verteilung der Diamanten (schwarz) auch größere WC-Partikel (ca. 100  $\mu\text{m}$  Durchmesser) gefunden wurden. Bild c) zeigt eine Detailaufnahme in der insbesondere die Verteilung der WC-Partikel zu sehen ist. Anhand der Messungen wurden die Vol% der einzelnen Komponenten berechnet.

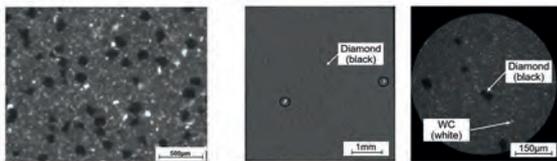


Abb. 3. Aufbau des Probenmaterials

a) REM Aufnahme, b) CT-Aufnahme 5,2  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ ,  
c) CT-Aufnahme 0,7  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$

Abgesehen von einzelnen größeren WC-Partikeln entsprechen die mit dem Röntgenmikroskop ermittelten Verteilungen denen des Herstellers. Um die Probekörper bei elastischer und plastischer Belastung zu untersuchen, wurde zunächst eine Spannungsdehnungskurve des Materials mit Hilfe einer konventionellen Zugmaschine aufgenommen (siehe Abbildung 4). Anhand dieser Kurve wurden nun Zugbelastungen für den elastischen und plastischen Bereich ausgewählt, die im Diagramm mit 1 bis 4 durchnummeriert sind.

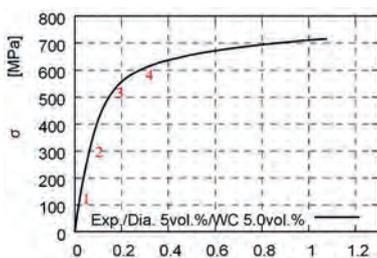


Abb. 4. Spannungsdehnungskurve des Probenmaterials und Belastungspunkte

Als erstes wurde bei sehr geringer Zugbelastung eine Computertomografie durchgeführt, die bei der späteren Auswertung als Referenz (Ausgangszustand) genutzt wurde. Die geringe Belastung ist notwendig, um eine Bewegung der Probe in Belastungsrichtung während der Rotation zu vermeiden. Danach wurde die Belastung bis zum Punkt 2 (elastischer Bereich) erhöht und dann unter dieser Belastung eine weitere Computertomografie durchgeführt. Der Vorgang wurde für die Punkte 3 und 4 (plastischer Bereich) wiederholt. Die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse sind in der Abbildung 5 dargestellt.

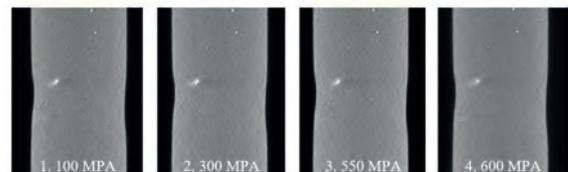


Abb. 5. CT-Aufnahmen bei den vier ausgewählten Belastungen

Von den aufgenommenen Computertomografien wurde jeweils ein 2D-Schnitt aus der Probenmitte gewählt, der parallel zur Zugbelastung liegt. Bei allen Belastungen sind die Einschnürung sowie die Lage der Diamanten und WC-Partikel zu erkennen. Zur weiteren Auswertung insbesondere der Dehnungsverteilung wurde die digitale Bildkorrelation eingesetzt.

## 4. Einsatz der digitalen Bildkorrelation

Für die digitale Bildkorrelation wurden ein selbstentwickeltes Programm genutzt und zum Vergleich wurden die Daten von der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH ebenfalls ausgewertet. Beide Programme nutzen die natürliche Struktur des Probekörpers, um Dehnungen zu berechnen. Bei den hier untersuchten MMCs haben wir aufgrund der Vielzahl der WC-Partikel und Diamanten ein gutes Muster, um die Verformung der Struktur zu messen und daraus die Dehnung zu berechnen. Vor der Auswertung mit Hilfe der Bildkorrelation wurden die Bilder digital aufbereitet, um die Strukturen deutlicher auszuarbeiten und einen gleichmäßigen Kontrast für alle Bilder zu gewährleisten.

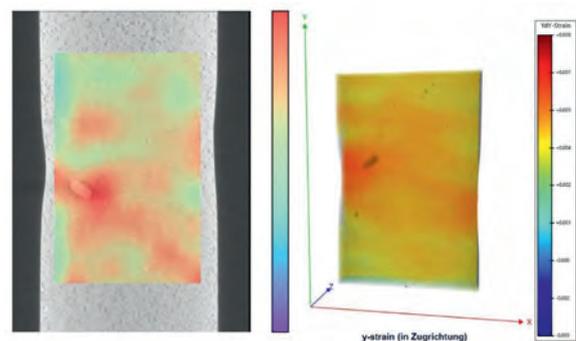


Abb. 6. Ergebnisse der Bildkorrelation, links: selbstentwickelte Software, rechts: Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH

Die Ergebnisse der Bildkorrelationen sind in der Abbildung 6 zusammengefasst. In beiden Fällen ist die Dehnung in Belastungsrichtung farblich codiert aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist der große WC-Partikel innerhalb der Probe. In diesem Bereich liegt auch eine höhere Dehnung vor. Somit stellt dieser Bereich wegen der höheren Belastung auch einen Ort für eine Rissentstehung dar. Nach Abschluss

der Untersuchungen wurde die Probe bis zum Bruch belastet und die Bruchfläche der Probe mit einer Computertomografie untersucht (siehe Abbildung 7).

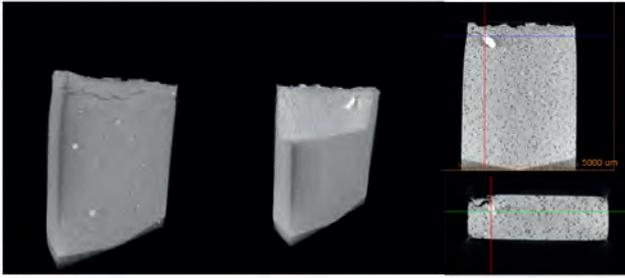


Abb. 7. CT-Aufnahme des Bruchbereichs der Probe

Die WC-Partikel sowie die Diamanten sind wiederum deutlich zu erkennen. Zusätzlich sind der Riss und sein Verlauf zu sehen. Dieser geht von dem größeren WC-Partikel aus. In dem Bereich wurde auch mit Hilfe der Bildkorrelation eine hohe Dehnung bestimmt. Somit bestätigt die Computertomografie des Bruchbereichs die zuvor durchgeführten Berechnungen zur Dehnungsverteilung.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung des Schädigungsverhaltens von Metallmatrix-Werkstoffen wurde eine Prüfmaschine entwickelt, die unter Last die Durchführung einer Computertomografieaufnahme ermöglicht. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Probe möglichst nah an der Röntgenquelle positioniert werden kann und keine Komponenten der Prüfmaschine die Aufnahme stören. Erste Untersuchungen mit dem System wurden an einem Metallmatrix-Verbundwerkstoff (MMC), welcher bei Trennwerkzeugen eingesetzt wird, durchgeführt. Hierzu wurden vier Computertomografieaufnahmen bei unterschiedlicher Zugbelastung durchgeführt und nach einer Aufbereitung der Computertomografiedaten eine digitale Bildkorrelation durchgeführt, um die dreidimensionale Dehnungsverteilung zu berechnen. Dabei wurde die natürliche Struktur des Werkstoffs (Verteilung der WC-Partikel und Diamanten) genutzt, welche sich unter Belastung ändert. Abschließend wurde die Probe bis zum Bruch belastet, um den Ort der Rissentstehung zu bestimmen. Die Rissentstehung stimmt mit der zuvor berechneten Dehnungsverteilung überein und bestätigt somit das Verfahren.

Weitere Untersuchungen wurden bereits an recycelten Metallen wie Kupfer oder Aluminium durchgeführt, die Eisenphasen beinhalten. Diese Eisenphasen sind in der Metallmatrix Aluminium oder Kupfer eingebunden und haben abhängig von ihrer Konzentration einen Einfluss auf das mechanische Verhalten.

## Danksagung

Die Autoren danken der „Deutschen Forschungsgemeinschaft“ für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projektes TI 343/113-1. Weiterhin möchten wir uns bei der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH bedanken, die uns mit den durchgeführten Bildkorrelationsberechnungen unterstützt hat.

## REFERENZEN

- [1] W. Tillmann, C. Kronholz, M. Ferreira, and A. Knote. Diamond-metal matrix interaction in tools fabricated by conventional and current induced sintering. *Int. J. Powder Metall.*, 47(4):29–36, 2011.
- [2] S.V Emani, Ch.Wang, L.L. Shaw, and Zh. Chen. On the hardness of sub-micrometer-sized WC-Co materials. *Mat. Sci. Eng. A*, 628:98–103, 2015.
- [3] J.S. Konstany and D. Tyralla. Wear mechanism of iron-base diamond-impregnated tool composites. *Wear*, 303:533–540, 2013.
- [4] K. Jiang, A. Bezold, and Ch. Broeckmann. Numerical modeling of the progressive damage in the microstructure of wc-co hardmetals under fatigue loading. *Procedia Structural Integrity*, 23:451–456, 2019.
- [5] W. Tillmann, M. Ferreira, A. Steffen, K. Rüster, J. Möller, Paulus M. Bieder, S., and M. Tolan. Carbon reactivity of binder metals in diamondmetal composites – characterization by scanning electron microscopy and x-ray diffraction. *Diamond Relat. Mater.*, 38:118–123, 2013.
- [6] H.A. Crostack, J. Nellesen, G. Fischer, U. Weber, S. Schmauder, and F. Beckmann. 3D Analysis of MMC microstructure and deformation by  $\mu$ CT and FE simulations. In *Developments in X-ray tomography VI*, volume 7078, page 707811. *Proc. of PSIE*, 2008.
- [7] Y. Schneider, E. Soppa, C. Kohler, R. Mokso, and E. Roos. Numerical and experimental investigations of the global and local behaviour of an Al(6061)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composite under low cycle fatigue. *Procedia Engineering*, 10:1515–1520, 2011.

Kontakt: [reiner.zielke@udo.edu](mailto:reiner.zielke@udo.edu)

BEITRAG 19

# Einfluss der Ultraschall-Prüfparameter auf die Detektion von Imperfektionen in gelöteten Fügeverbunden

Reiner Zielke<sup>1</sup>, Wolfgang Tillmann<sup>1</sup>, Arne Eilers<sup>2</sup>, Julia Bültena<sup>2</sup>, Katharina Schmidt<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> RIF e.V., Dortmund; <sup>2</sup> Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund

**KURZFASSUNG** | Die Ultraschallprüftechnik wird für die zerstörungsfreie Detektion von Fehlstellen sowie zur Bestimmung von Schicht- oder Wanddicken verwendet. Auch in der Fügezone thermisch gefügter Bauteile, z.B. in Schweiß- oder Lötverbindungen, können mit diesem Prüfverfahren Fehlstellen detektiert werden. Für gelötete Fügeverbunde ist, neben der Detektion von Fehlstellen, auch die Bestimmung von Sprödphasen von Interesse. Diese Sprödphasen können die Festigkeit eines Fügeverbundes deutlich reduzieren. Aufgrund der Unterschiede der Schallimpedanzen zwischen Sprödphase und restlichem metallischen Lötgut sind diese Phasen prinzipiell mit der Ultraschallprüftechnik nachweisbar. Im Rahmen dieses Beitrages werden die Ergebnisse von Ultraschallprüfungen an gelötete Fügeverbunde mit unterschiedlichen Grund- und Lotwerkstoffkombinationen dargestellt. Abhängig von der Verstärkung und der Prüffrequenz wird die Möglichkeit der Detektion von Sprödphasen und das Auflösungsvermögen des Prüfverfahrens untersucht. Weiterhin wird der Einfluss der Lötgutbreite auf das Ultraschallsignal bei unterschiedlichen Prüfparametern betrachtet.

## 1. Einführung

In der Qualitätssicherung wird die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung häufig zur schnellen und berührungslosen Prüfung wie z. B. zur Schichtdickenmessungen an beschichteten Bauteilen oder zur Detektion von Poren, Rissen oder Lunkern in urgeformten oder gefügten Bauteilen eingesetzt. Die Grundlage der Ultraschallprüfung ist die Reflexion der Ultraschallwellen, die an Materialübergängen höher ist als im homogenen Werkstoff. Dies ermöglicht auch den Einsatz der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung an gelöteten Bauteilen. Somit können Fehlstellen, wie z.B. Lunker oder Poren, aber auch Sprödphasen detektiert werden. Fügeverbunde aus Aluminium und Stahl, die mit einem Lot auf Aluminiumbasis gefügt werden, neigen während des Lötprozesses zur Ausbildung von AlxFey Sprödphasen. Die Art der auftretenden Sprödphase hängt u.a. von der Löttemperatur, der Haltezeit und der Lötgutbreite ab. [1-4].

Neben der Detektion der Fehlstellen bietet die Ultraschalltechnik auch potentiell die Möglichkeit die Lötgutbreite zu bestimmen. Da Grundwerkstoff und Lot häufig aus unterschiedlichen Legierungen bestehen, reflektieren die Ultraschallwellen bei gelöteten Fügeverbunden an den beiden Übergängen vom Grundwerkstoff zum Lötgut. Einflussfaktoren sind dabei u.a. die Lötgutbreite sowie der Impedanzunterschied der Werkstoffe [5].

Für die Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Fügeverbunde hergestellt. Zum einen wurden artfremde Fügeverbunde aus der Aluminiumlegierung AW6060 und dem austenitischen Stahl X5CrNi18-10 gefertigt. Mit diesen wurde der Einfluss der Sprödphasen auf die Ultraschallmessung sowie die Auflösungsmöglichkeit anhand der Drahtdetektion untersucht. Des Weiteren wurden artgleiche Fügeverbunde aus dem WC-Co-Hartmetall K20 mit unterschiedlichen Lötgutbreiten hergestellt. Anhand dieser wurde der Einfluss der Lötgutbreite auf das Ultraschallsignal untersucht. Diese

Kombination wurde verwendet, da die Reflexionsgrade der Ultraschallwellen beim Übergang von Hartmetall in Silber sehr hoch sind. Bei hohen Reflexionsgraden lassen sich Veränderungen der Reflexionen deutlicher darstellen.

## 2. Experimentelles

### 2.1 Artungleiche Fügeverbunde

Als Grundwerkstoffe der artfremden Fügeverbunde wurden die Aluminiumlegierung AW6060 (3.3206) und der austenitische Chrom-Nickel-Stahl X5CrNi18-10 (1.4301) verwendet. Die Lotfolien bestehen aus dem Lotwerkstoff Al 112 (L-ALSi12). Die chemischen Zusammensetzungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Aus den angelieferten Blechen mit den unterschiedlichen Blechdicken  $t = 3 \text{ mm}$  und  $t = 5 \text{ mm}$  wurden aus beiden Grundwerkstoffen Proben mit den Maßen  $25 \times 25 \text{ mm}$  getrennt. Die Lötflächen der Proben wurden unmittelbar vor dem Lötprozess mit einer Körnung von 1200 geschliffen. Für die definierten Lötgutbreiten wurden Wolframdrähte mit unterschiedlichen Dicken ( $t = 42, 70$  und  $90 \mu\text{m}$ ) zwischen dem Stahlgrundwerkstoff und dem Lot platziert. Dies wurde mit Hilfe einer Lötvorrichtung realisiert. Abhängig vom Durchmesser der Wolframdrähte wurden die Lotfoliendicke bzw. -Anzahl variiert. Die Proben wurden mit einem Anpressdruck von  $p = 40 \text{ N/mm}^2$  pro Probe bei Raumtemperatur versehen. Der Lötprozess wurde in einem Vakuumofen der Fa. Torvak durchgeführt. Die Aufheizrate betrug  $\Delta T = 20 \text{ K/min}$ . Um eine Durchwärmung der Proben und des Probenhalters zu gewährleisten, wurde bei einer Temperatur von  $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$  eine Haltezeit von  $t = 10 \text{ min}$  eingefügt. Anschließend wurde bei einer Temperatur von  $T = 605 \text{ }^\circ\text{C}$  für  $t = 15 \text{ min}$  gehalten und anschließend im Vakuum frei abgekühlt.

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung der Grundwerkstoffe und des Lotes

Massen-%	Fe	Cr	Ni	Al	Si	Mn	C	Cu	Zn	Ti
1.4301 (GW)	Rest	17,5-19,5	8,0-10,5		<1,0	<2,0	<0,07			
3.3206 (GW)	0,1-0,3	<0,05		Rest	0,3-0,6	<0,1		<0,1	<0,15	<0,1
Al 112 (Lot)				88	12					

## 2.2 Artgleiche Fügeverbunde

Für die artgleichen Fügeverbunde wurde das Hartmetall MG18 der Fa. Ceratizit (K20) verwendet. MG18 ist ein feinstkörniges ( $d = 0,7 \mu\text{m}$ ) WCCo-Hartmetall mit einem Binderanteil von 10 % Kobalt. Der Grundwerkstoff lag in den Maßen  $25 \times 30 \times 9 \text{ mm}$  vor. Als Lot wurde das Silberbasislot Ag 449 der Fa. BrazeTec mit der chemischen Zusammensetzung aus Tabelle 2 verwendet. Da der Lötprozess an Luft durchgeführt wurde, wurde das Flussmittel „BrazeTec spezial h“ eingesetzt.

Tabelle 2. Chemische Zusammensetzung des Lotes Ag 449

Massen-%	Ag	Zn	Cu	Mn	Ni
Ag 449 (Lot)	49	23	16	7,5	4,5

Zur Herstellung des Fügeverbundes wurden drei Lotfolien mit einer Dicke von jeweils  $d = 100 \mu\text{m}$  verwendet. Die Proben wurden mit einem Druck von  $p = 0,033 \text{ N/mm}^2$  belastet. Der Lötprozess wurde in einem Wärmebehandlungsofen der Fa. Nabertherm an Luft durchgeführt. Die Proben wurden mit einer Aufheizrate von  $\Delta T = 5 \text{ K/min}$  auf eine Temperatur von  $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$  erhitzt. Nach einer Haltezeit von  $t = 30 \text{ min}$  erfolgte eine freie Abkühlung im Ofen.

## 2.3 Ultraschalluntersuchungen

Die Ultraschalluntersuchungen wurden in Tauchtechnik durchgeführt. Hierzu wurde die Anlage „LS100“ der Fa. Vogt verwendet. In Tabelle 3 sind die drei verwendeten Prüfköpfe der Fa. Panametrics mit Punktfokus aufgelistet. Für die Referenzmessungen wurden Grundwerkstoffplatten ungelötet aufeinandergelegt. Mit Hilfe dieser Messungen kann die Verstärkung so angepasst werden, dass in den späteren Ultraschallmessungen der gelöteten Fügeverbunde eine Aussage über die Anbindung getroffen werden kann.

Tabelle 3. Eingesetzte Ultraschallprüfsensoren

Sensor	V319	V317	V324
Prüffrequenz [MHz]	15	20	25
Fokuslänge [mm] in Wasser	12,7	25,4	50,8
Fokusbereich [mm]	1	0,3	0,48

Um den Einfluss der Lötgutbreite auf die Ultraschallmessung zu untersuchen, werden die A Bilder verwendet. Jeder Punkt auf der Probe besitzt ein eigenes A Bild, das die Amplitudenreflexion über der Zeit bzw. den Weg beschreibt. Der Wert der Amplitude, die den Bereich des Lötguts beschreibt, wird für die Auswertung verwendet. Für die Betrachtung der artgleichen Fügeverbunde wird das C Bild verwendet. Im C Bild wird die Fläche der Lötnaht dargestellt und anhand einer Farbskala einem Amplitudenwert zugeordnet. Eine hohe Amplitude entsteht bei einer starken Reflexion der Ultraschallwellen und lässt auf eine geringe Anbindung der Lötnaht schließen.

## 2.4 Metallographische Untersuchungsmethoden

An ausgewählten Fügeverbunden wurden im Anschluss an die Ultraschalluntersuchungen metallographische Untersuchungen durchgeführt. Die Proben wurden getrennt, eingebettet, geschliffen und poliert. Die mikroskopischen Untersuchungen erfolgten an dem Rasterelektronenmikroskop „JSM 7001F“ der Fa. Jeol. Anhand der

Querschliffe können Aussagen über die vorhandene Lötgutbreite getroffen werden. Dies ist insbesondere für die Hartmetall-Fügeverbunde von Interesse. Zum anderen kann das Gefüge und dessen Fehlstellen mit Hilfe der Querschliffe beschrieben werden. (an Positionen, die im Ultraschallbild auffällig waren)

## 3. Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 AlMgSi0,5-X5CrNi18-10-Fügeverbunde

Die Ergebnisse für die artfremden Fügeverbunde werden in zwei Bereiche eingeteilt. Zunächst wird der Einfluss der Sprödphasen auf die Ultraschallbilder aufgezeigt. Anschließend wird die Detektionsmöglichkeit der Wolframdrähte mit unterschiedlichen Durchmessern betrachtet.

#### 3.1.1 Detektion der Ausprägung der Sprödphasen

Um den Einfluss der Sprödphasen auf die Ergebnisse der Ultraschallmessung zu beschreiben, werden die C Bilder der Ultraschallmessung den metallographischen Querschliffen gegenübergestellt. In Abb. 1a ist das C Bild eines Fügeverbundes mit einem Wolframdrahtdurchmesser von  $d = 42 \mu\text{m}$  dargestellt. Eine gute Anbindung zeigt sich in einem außermittigen Bereich (blaue/grüne Färbung). Der rote Bereich entspricht einer mangelnden Anbindung. In Abb. 1b und c sind REM Aufnahmen der Querschliffe für die beiden Bereiche dargestellt. In beiden Fällen bildet sich eine intermetallische Phase aus. Im Allgemeinen besitzt die intermetallische Phase hohe Anteile von Aluminium, Eisen und Silizium (Pos. 1 und 2). Im Fe-Al-Si-System treten eine Vielzahl von unterschiedlichen intermetallischen Phasen auf. Eine exakte Bestimmung der hier vorliegenden Phase ist allein mit Hilfe der EDX Analyse nicht möglich.

Im Bereich guter Anbindung (Abb. 1b) tritt die intermetallische Phase gleichmäßig mit einer Dicke von etwa  $t = 10 \mu\text{m}$  auf. Sowohl stahl- als auch aluminiumseitig ist eine Anbindung vorhanden. Bei näherer Betrachtung anhand der Abb. 1d lässt sich die intermetallische Phase in zwei Bereiche mit unterschiedlicher Zusammensetzungen einteilen. Am Stahl befindet sich eine ca.  $1 \mu\text{m}$  dünne Schicht, die höhere Anteile der Elemente des Stahlwerkstoffs (Fe, Cr, Ni, Mn) aufweist (Pos. 3). In einigen Bereichen der Probe zeigt sich bereits durch die Präparation der Probe ein Versagen in der Grenzschicht zwischen diesen Phasen (s. Abb. 1e).

In Abb. 1c wird eine REM-Aufnahme des Bereiches der Probe mit nicht vorhandener Anbindung (roter Bereich in Abb. 1a) dargestellt. Die intermetallische Phase tritt, im Gegensatz zu Abb. 1b, inhomogen auf. Weiterhin zeigt sich eine fehlende Anbindung zwischen der Aluminiumlegierung und der intermetallischen Phase bzw. dem Stahl. Auch wenn bei spröden Phasen ein Versagen nachträglich durch die Probenpräparation verursacht werden kann (vgl. Abb. 1e), zeigte sich in diesem Fall bereits im festen Fügeverbund während der Ultraschallmessung keine Anbindung in diesem Bereich (rote Färbung). Die unterschiedliche Ausbildung der Sprödphasen sowie die unterschiedliche Anbindung kann auf den Lötprozess bzw. die Lötvorrichtung zurückgeführt werden. Mit der verwendeten Lötvorrichtung wurden vier Fügeverbunde zeitgleich gelötet. Da der Anpressdruck in der verwendeten Lötvorrichtung durch vier Schrauben aufgebracht wurde, entsteht eine elastische Durchbiegung der Lötvorrichtung. Diese kann zu einer ungleichmäßigen Belastung der einzelnen Proben, abhängig von ihrer Lage in der Lötvorrichtung, führen. Neben der unterschiedlichen Druckverteilung existiert eine inhomogene Temperaturverteilung, insbesondere beim Aufheizen sowie beim Abkühlen. Beide Einflüsse können zu einer unterschiedlich stark ausgeprägten Diffusion und somit zur unterschiedlichen Phasenentstehung beitragen.

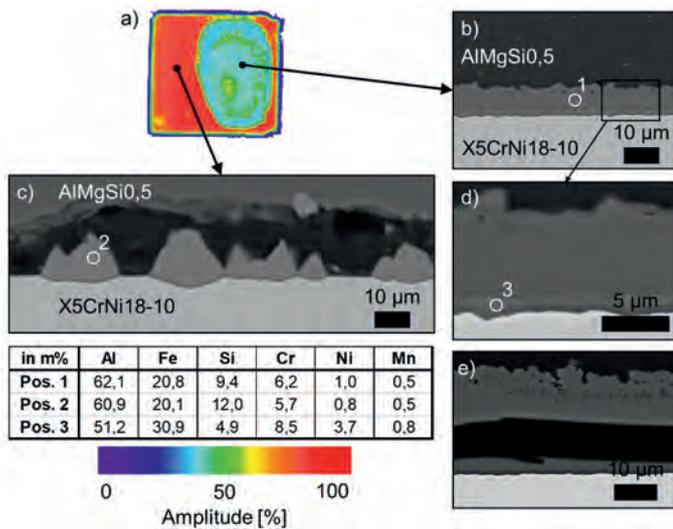


Abb. 1. Artfremder Fügeverbund aus AlMgSi<sub>0,5</sub> und X5CrNi18-10 mit einem Wolframdrahtdurchmesser von  $d = 42 \mu\text{m}$  inklusive Elementanalyse: a) C Bild bei Durchschallung des Stahls und einer Prüffrequenz von  $f = 20 \text{ MHz}$  (V317); b) REM-Aufnahme im Bereich mit geringer Amplitude; c) REM Aufnahme im Bereich einer hohen Amplitude; d) Nahaufnahme der intermetallischen Phasen aus b); e) REM-Aufnahme aus dem blauen Bereich der Probe mit Versagen in der intermetallischen Phase durch die Probenpräparation

### 3.1.2 Detektion der Wolframdrähte

Die Durchmesser der Wolframdrähte in den gelöteten Fügeverbunden variieren zwischen  $d = 42 - 90 \mu\text{m}$ . In dieser Untersuchung wurden für die Ultraschallbilder (C Bilder) zwei Prüffrequenzen ( $f = 20$  bzw.  $25 \text{ MHz}$ ) verwendet. Generell ist die Detektionsmöglichkeit der Wolframdrähte abhängig von der Prüffrequenz und dem Drahtdurchmesser. In diesen Untersuchungen existieren jedoch noch weitere Einflüsse, die auf die artfremde Fügeverbindung und deren Folgen zurückzuführen sind. Hierzu zählt zum einen das Eindringen der Wolframdrähte in die verhältnismäßig weiche Aluminiumlegierung, deren Schmelzbereich nahe der Prozesstemperatur liegt. Weiterhin ist die Anbindung der Drähte nicht immer gegeben, so dass die Ultraschallwellen in diesen Fällen nicht bis zum Draht vordringen, sondern zuvor reflektiert werden. Daher ist die Detektion der Drähte zum Teil vom durchschallten Grundwerkstoff (aluminium- oder stahlseitig) abhängig.

In Abb. 2 wird ein repräsentativer Fügeverbund (Drahtdurchmesser  $d = 42 \mu\text{m}$ ) anhand von C Bildern und einem Querschliff betrachtet. In Abb. 2a ist das C Bild des Fügeverbundes mit aluminiumseitiger Durchschallung dargestellt. In diesem C Bild wird der Wolframdraht mit einem Durchmesser von  $d = 42 \mu\text{m}$  detektiert. Die Abb. 2b zeigt den C Scan desselben Fügeverbundes mit stahlseitiger Durchschallung. In diesem Bild ist der Wolframdraht nicht nachweisbar. Die Erklärung liefert die REM Aufnahme des Querschliffs in Abb. 2c. Während des Lötprozesses ist der Wolframdraht in die Aluminiumlegierung (bzw. das Lot) eingedrungen. Die Aluminiumlegierung besitzt bei den Prozesstemperaturen, die nahe des Schmelzbereiches der Legierung liegen, eine deutlich geringere Festigkeit als der Stahl-Grundwerkstoff. Zwischen dem Draht und dem Stahl besteht keine Anbindung. Das Verhalten der Ultraschallwellen ergibt sich daraus wie folgt:

Im Ultraschallbild der aluminiumseitigen Durchschallung (Abb. 2a) ist der Draht als eine Linie mit geringerer Amplitude sichtbar. Eine

geringe Amplitude deutet im Allgemeinen auf eine gute Anbindung hin, da nur ein geringer Anteil der Ultraschallwellen reflektiert wird. In diesem Fall werden die Ultraschallwellen jedoch an der runden Oberfläche des Drahtes gestreut und gelangen daher nicht zurück zum Prüfkopf, so dass eine geringe Amplitude entsteht. Bei einer stahlseitigen Durchschallung (Abb. 2b) reflektieren die Ultraschallwellen am Ende der Stahlprobe und gelangen nicht bis zum Wolframdraht. Dementsprechend ist der Draht im C Bild nicht ersichtbar. Sofern eine gute Anbindung des Fügeverbundes vorliegt (linke Seite in Abb. 2a), kann der Draht nicht ohne Weiteres detektiert werden. Dies ist darin begründet, dass bei guter Anbindung nur ein geringer Teil der Ultraschallwellen reflektiert werden. Da auch am Wolframdraht nur ein geringer Teil reflektiert wird, ist eine Unterscheidung zwischen Wolframdraht und angebundener Fügezone nicht möglich.

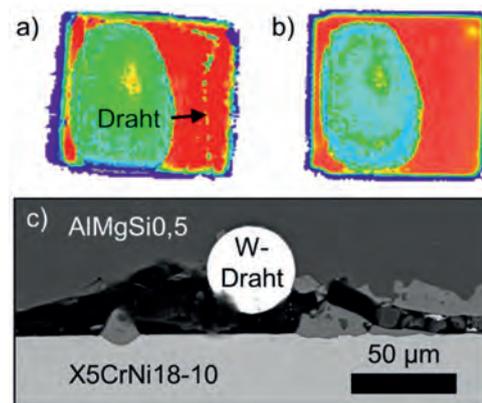


Abb. 2. Fügeverbund mit einem Drahtdurchmesser von  $d = 42 \mu\text{m}$ : a) C Bild bei aluminiumseitiger Durchschallung bei einer Prüffrequenz von  $f = 20 \text{ MHz}$ ; b) C Bild bei stahlseitiger Durchschallung bei einer Prüffrequenz von  $f = 20 \text{ MHz}$ ; c) REM Aufnahme vom Querschliff im Bereich des Drahtes.

Bezüglich der Auflösbarkeit der unterschiedlichen Drahtdurchmesser mit Hilfe der Ultraschallprüfung zeigte sich, dass alle Drahtdurchmesser mit beiden Prüffrequenzen nachgewiesen werden können. Auch hier ist die Abb. 2 repräsentativ, da hier der geringste Drahtdurchmesser mit der geringsten Prüffrequenz nachgewiesen werden konnte. Allerdings sind die Drähte aufgrund von mikrostrukturellen Gegebenheiten, z.B. Eindringen der Wolframdrähte und Ausprägung der Sprödphasen, nicht in allen C Bildern sichtbar.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen gehen einher mit den bisherigen Erkenntnissen zur Detektionsmöglichkeit der Wolframdrähte. Eine detailliertere Betrachtung der Auflösbarkeit von Wolframdrähten mit Durchmessern zwischen  $d = 28 - 256 \mu\text{m}$  mit unterschiedlichen Prüffrequenzen ( $f = 5 - 25 \text{ MHz}$ ) wird in [6] dargestellt.

### 3.2 Hartmetall-Stahl-Fügeverbunde (Einfluss der Lötgutbreite auf die Ultraschallamplitude)

Dem Einfluss der Lötgutbreite auf die Ultraschallamplitude liegt eine theoretische Berechnung zugrunde, die eine Interferenzbedingung am Lötspalt beschreibt. Der Reflexionsfaktor ergibt sich demnach aus der nachfolgenden Gleichung:

$$R_p = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}{1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m}\right) \sin^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}}$$

Dabei ist  $m$  das Verhältnis der Schallkennimpedanzen  $Z_1/Z_2$  der beiden Werkstoffe,  $d$  die Breite des Lötguts und  $\lambda$  die Wellenlänge im Lötgut. Die graphische Darstellung dieser Formel für die verwendeten Frequenzen befindet sich in Abb. 4a. Je nach Prüffrequenz ergeben sich bei unterschiedlichen Lötgutbreiten hohe bzw. geringe Reflexionsgrade durch Interferenz der Ultraschallwellen am Spalt. Die Untersuchungen zum Einfluss der Lötgutbreite auf die Ultraschallmessung wurden anhand der Hartmetall-Fügeverbunde durchgeführt. Die Kombination aus Hartmetall als Grundwerkstoff und einem Silberbasislot wurde gewählt, da in diesem Fall ein hoher Reflexionsgrad entsteht. Während für die Hartmetall-Fügeverbunde mit Silberlot ein Reflexionsgrad bis zu 58 % erreicht wird, ergibt sich beispielsweise bei Stahl Fügeverbunden mit Kupferlot nur ein Reflexionsgrad von ca. 12 %.

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, wurden drei Lotfolien (je  $d = 100 \mu\text{m}$ ) verwendet. Dadurch ergibt sich vor dem Lötprozess eine Lötspaltbreite von  $b = 300 \mu\text{m}$ . Anhand der in Abb. 3 dargestellten REM Aufnahme des Querschliffs zeigt sich, dass die tatsächlich erreichten Lötgutbreiten nach dem Lötprozess etwa  $b = 155 - 165 \mu\text{m}$  beträgt. Diese Lötgutbreite ist in der Graphik in Abb. 4a anhand einer Linie eingetragen.

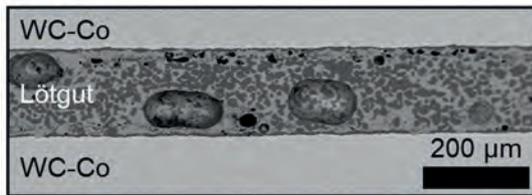


Abb. 3. REM-Aufnahme des Querschliffs mit einer Lötgutbreite von  $b = 160 \mu\text{m}$ .

In diesen Untersuchungen wird das Impuls-Echo-Verfahren verwendet. Da Interferenzen durch Überlagerung erst entstehen können, wenn der Ultraschallimpuls eine ausreichende Länge besitzt, wird im Folgenden die Impulslänge für den hier vorhandenen Spalt mit der Breite  $b = 160 \mu\text{m}$  berechnet.

Demnach können ab einer Impulslänge von ca.  $t = 56 \text{ ns}$  Interferenzen

$$t = \frac{s}{v} = \frac{2 \cdot b_{\text{Lötgut}}}{c_{\text{Lötgut}}} = \frac{2 \cdot 160 \mu\text{m}}{5,7 \cdot 10^9 \frac{\mu\text{m}}{\text{s}}} = 56 \text{ ns}$$

am Lötspalt auftreten. In diesen Untersuchungen wurden die Impulslängen in einem Bereich von  $t = 20 - 100 \text{ ns}$  variiert.

In der Abb. 4a ist die im untersuchten Fügeverbund vorhandene Lötgutbreite von  $b = 160 \mu\text{m}$  gekennzeichnet. Demnach ist bei einer Prüffrequenz von  $f = 15 \text{ MHz}$  eine destruktive Interferenz (Auslöschung) und bei  $f = 20 \text{ MHz}$  eine konstruktive Interferenz (Verstärkung) zu erwarten. In den Abb. 4b und c sind die gemessenen Reflexionsgrade über der Impulslänge für beide Prüffrequenzen aufgetragen. Weiterhin ist die Impulslänge von  $t = 56 \text{ ns}$  gekennzeichnet, ab der eine Interferenz auftreten kann. Bei beiden Frequenzen tritt die Interferenz mit einer leichten Verzögerung (ab etwa  $70 - 80 \text{ ns}$ ) auf. Die theoretisch berechnete Impulslänge von  $t = 56 \text{ ns}$  ist die minimal notwendige Länge für eine Überlagerung des Impulses. Die Abweichung zwischen der theoretischen ( $56 \text{ ns}$ ) und der experimentellen Impulslänge ( $70 - 80 \text{ ns}$ ) entsteht durch diverse Einflussfaktoren, wie die Breite des Lötguts und Zusammensetzung des Lötgutwerkstoffs. Weiterhin steigt die überlagerte Impulslänge mit zunehmender gesamten Impulslänge, so dass die Wahrscheinlichkeit von Interferenzen steigt.

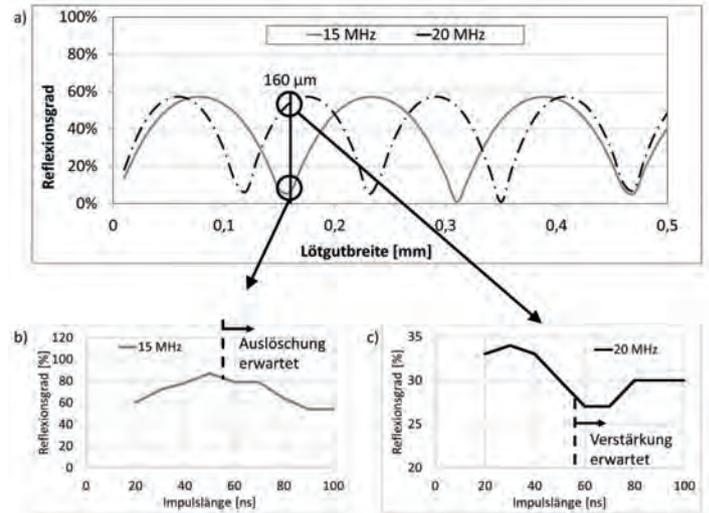


Abb. 4. a) Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Reflexionsgrad und Lötgutbreite in Abhängigkeit der Prüffrequenz; b und c) Gemessener Reflexionsgrad über der Impulslänge für die beiden verwendeten Prüffrequenzen.

Eine weitere Erkenntnis dieser Untersuchung ergibt sich aus dem unterschiedlichen Niveau des Reflexionsgrades bei den unterschiedlichen Prüffrequenzen. Die Abb. 5 zeigt, dass bei einer Prüffrequenz von  $f = 15 \text{ MHz}$  deutlich höhere Reflexionsgrade erreicht werden als bei  $f = 20 \text{ MHz}$ . Dies hängt mit dem großen Fokussdurchmesser des Prüfkopfes  $d = 1000 \mu\text{m}$  zusammen. Der Prüfkopf mit der Prüffrequenz von  $f = 20 \text{ MHz}$  besitzt einen deutlich geringeren Fokussdurchmesser von  $d = 300 \mu\text{m}$ . Durch den größeren Bereich des Lötguts, aus dem die Informationen gewonnen werden, ergibt sich eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass eine Pore zu einer hohen Reflexion führt. Die REM Aufnahme in Abb. 3 zeigt, dass Poren mit einem Durchmesser von ca.  $d = 100 - 150 \mu\text{m}$  im Lötgut vorhanden sind.

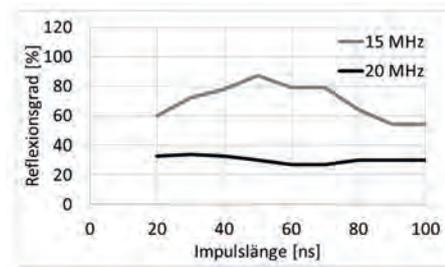


Abb. 5. Vergleich der Reflexionsgrade in Abhängigkeit der verwendeten Prüffrequenzen.

#### 4. Zusammenfassung

Im ersten Teil dieser Untersuchung wurde der Einfluss der Sprödphasen in gelöteten Aluminium-Stahl-Fügeverbunden auf die Ultraschallmessung bestimmt. Anhand der Ultraschallbilder wurde ein Bereich mit einer Anbindung und ein Bereich ohne Anbindung nachgewiesen. In Bereichen ohne Anbindung erwies sich die Sprödphase im Querschliff als inhomogen verteilt. In den Bereichen mit Anbindung zeigte sich eine gleichmäßige Ausbreitung der Sprödphase. Die Entstehung der unterschiedlichen Bereiche ist auf den Probenhalter (vier Proben) zurückzuführen. Sowohl eine ungleichmäßige Druckverteilung infolge der Durchbiegung des Probenhalters als auch die

unterschiedliche Aufheiz- und Abkühlrate innerhalb einer Probe können die Diffusionsprozesse beeinflusst haben. Die Detektion von Wolframdrähten mit einem Durchmesser von  $d = 42 - 90 \mu\text{m}$  sind prinzipiell möglich. Aufgrund des runden Wolframdrahtes werden die Ultraschallwellen nur geringfügig zum Prüfkopf zurückreflektiert. Daher sind die Drähte in Bereichen mit guter Anbindung nicht nachweisbar. Weiterhin ist die Detektion vom durchschallten Grundwerkstoff abhängig. Während des Lötprozesses dringen die Drähte in den Aluminium-Grundwerkstoff ein, so dass eine aluminiumseitige Durchschallung eine Detektion ermöglicht. Stahlseitig zeigt sich häufig eine nicht vorhandene Anbindung zwischen Grundwerkstoff und Draht. Dementsprechend können die Drähte stahlseitig nicht immer nachgewiesen werden.

Der zweite Teil der Untersuchung beschreibt die Möglichkeit der Bestimmung der Lötgutbreite mittels Ultraschallprüfung. Abhängig von der Lötgutbreite entstehen bei unterschiedlichen Prüffrequenzen unterschiedliche Reflexionsgrade (Interferenzen) am Lötspalt. Zunächst wurde anhand einer theoretischen Berechnung die notwendige Impulslänge, die zur Interferenzbildung notwendig ist, bestimmt. Anhand der Experimente konnte eine Abhängigkeit zwischen Prüffrequenz, Impulslänge und den Berechnungen zur konstruktiven sowie destruktiven Interferenz (Verstärkung bzw. Auslöschung) nachgewiesen werden. Um aus den in dieser Untersuchung dargestellten Zusammenhängen eine zuverlässige Bestimmung der Lötgutbreite zu erhalten, müssen weitere Daten ermittelt werden. Weiterhin müssen hierzu Einflüsse, die die Reflexion beeinflussen, (v. a. Poren im Lötgut) ausführlich bewertet werden.

**Danksagung** – Die Autoren danken der „Deutschen Forschungsgemeinschaft“ für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projektes TI 343/133-1.

#### REFERENZEN

- [1] H. Jank, H. Staufer, J. Bruckner: *Schweißverbindungen von Stahl mit Aluminium – eine Perspektive für die Zukunft*, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, S. 189-192, Heft 5, 2008.
- [2] M. Roulin, J. W. Luster, G. Karadeniz, A. Mortensen: *Strength and Structure of Furnace-Brazed Joints between Aluminum and Stainless Steel*, *Welding Research Supplement*, S. 151 – 155, Mai 1999.
- [3] M. Steiners: *Lichtbogenfügen von beschichteten Stahlblechen an Aluminiumlegierungen*, Shaker, Aachen, 2011.
- [4] V. R. Ryabov: *Welding of aluminium alloys to steels*, Harwood, Amsterdam, 1998.
- [5] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer-Verlag, Berlin, 1980 (4. Auflage).
- [6] A. Eilers, W. Tillmann, R. Zielke: *Einfluss der Ultraschall-Prüfparameter auf die Detektion von Imperfektionen im 1.4301 / Ni620-Fügeverbund mit unterschiedlichen Lötspaltbreiten*, *Tagungsband Werkstoffprüfung*, 2019.

Kontakt: reiner.zielke@udo.edu

## Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen – von der Theorie zur Anwendung

Sebastian Joas<sup>1</sup>, Marc Kreuzbruck<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart

**KURZFASSUNG** | Obwohl das Wirbelstromverfahren bereits seit vielen Jahren für die Prüfung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) eingesetzt wird, sind die grundlegenden physikalischen Effekte aufgrund der komplexen Eigenschaften von CFK nicht abschließend geklärt. Im Bereich der Wirbelstromprüfung sind wir gewohnt, dass nur die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  von Bedeutung ist. Die durch den technischen Fortschritt ermöglichten höheren Prüffrequenzen rufen aber auch Verschiebungsströme im Matrixwerkstoff hervor, die für die Charakterisierung permittivitätsassoziierter Fehlstellen genutzt werden können. Kapazitive Wechselwirkungen der Fasern verstärken auftretende Verschiebestrome dabei weiter und es resultiert ein chaotisches elektrisches Netzwerk im Bauteilinneren. Im Rahmen dieser Veröffentlichung sollen die grundlegenden physikalischen Effekte ausgehend von den Maxwell-Gleichungen sowohl analytisch als auch mittels FEM untersucht werden. Dies soll eine realitätsnahe Modellierung von CFK für die Simulation der Hochfrequenz (HF)-Wirbelstromprüfung ermöglichen. Abschließend wird das Potenzial des Wirbelstromverfahrens für die CFK-Prüfung anhand der Detektion realitätsnaher Fehlstellen demonstriert.

### Einleitung

Das Wirbelstromverfahren zählt seit Jahrzehnten als äußerst zuverlässiges, aussagesicheres und auch wirtschaftliches Oberflächenprüfverfahren, das nach dem Stand der Technik aber auf die Charakterisierung elektrisch leitfähiger Werkstoffe beschränkt ist [1]. Dieses wird industriell zu Mess- und Prüfzwecken bis hin zur Serienfertigung eingesetzt und bietet ein hohes Potenzial als Qualitätssicherungsverfahren für die Produktion der Zukunft. Insbesondere für künftige Mobilitätslösungen spielt die Entwicklung neuer Werkstoffe zur Gewichtsreduktion des Gesamtsystems eine entscheidende Rolle. Oft sind jedoch reine Werkstoffe, wie beispielsweise Kunststoffe, Metalle oder Keramiken durch ihre definierten Eigenschaftsspektren nicht optimal für die jeweilige Anwendung geeignet. Verbundwerkstoffe, wie beispielsweise CFK, ermöglichen ein Maßschneiden der Werkstoffeigenschaften an die jeweilige Anwendung. Gleichzeitig stellt CFK aufgrund des komplexen Eigenschaftsprofils die Verfahren der ZfP aber vor immense Herausforderungen. So existieren im Bereich der Wirbelstromprüfung an CFK zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten, allerdings sind die grundlegenden physikalischen Mechanismen äußerst komplex und bislang nicht abschließend geklärt. Insbesondere die bei höheren Prüffrequenzen von vielen MHz auftretenden Verschiebestrome im Matrixwerkstoff oder kapazitive Effekte zwischen den elektrisch leitfähigen Fasern scheinen nicht mehr vernachlässigbar zu sein.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung sollen die grundsätzlichen Phänomene ausgehend von den Maxwell-Gleichungen sowohl analytisch als auch mittels FEM-Simulationen näher betrachtet werden. Dies umfasst die mathematische Herleitung der Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung der Permittivität, sowie deren numerische Validierung. Weiterhin wird ausgehend von einer Betrachtung der Faser-Matrix-Ebene eine Möglichkeit zur realitätsnahen Simulation von Laminaten dargestellt.

Abschließend wird das Potenzial des eingesetzten Prüfsystems anhand von Prüfkörpern mit Referenzdefekten dargestellt.

### Theoretische Betrachtung der HF-Wirbelstromprüfung

Im Bereich der konventionellen Wirbelstromprüfung wird meist der Einfluss der Permittivität auf das Prüfergebnis vernachlässigt. Es ist allgemein anerkannt, dass die Standardeindringtiefe  $\delta$  von der

Frequenz  $f$ , der magnetischen Permeabilität  $\mu$  und der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  abhängig ist:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

Für die Herleitung des Skin-Effekts wird dabei  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0$  vorausgesetzt und somit der Verschiebungsstrom vernachlässigt. Im Folgenden soll, analog zur Herleitung des Skin-Effekts [2,3], ein Ausdruck zur Berechnung der Standardeindringtiefe unter dessen Berücksichtigung ermittelt werden. Dies ermöglicht sowohl eine Einordnung der Bedeutung der Permittivität in hohen Frequenzbereichen, als auch eine kritische Beurteilung der darauf aufbauenden Simulationen. Nach Maxwell gilt der nachfolgende Zusammenhang zwischen Magnetfeld  $\mathbf{H}$ , den zeitlich veränderlichen elektrischen Strömen  $\mathbf{J}$ , der elektrischen Flussdichte  $\mathbf{D}$  und dem elektrischen Feld  $\mathbf{E}$  [2]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \epsilon \mathbf{E} = \mathbf{E} \cdot (\sigma + j\omega \epsilon), \quad (2)$$

wobei  $\omega$  die Kreisfrequenz darstellt. Aufgrund von  $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{J}}{\sigma}$  und  $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$  folgt:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} \left( \mu + j \cdot \frac{\omega \epsilon \mu}{\sigma} \right). \quad (3)$$

Im Folgenden wird angenommen, dass der Stromdichtevektor parallel zur Oberfläche verläuft und dessen y-Komponente lediglich von der Tiefe  $z$  abhängt. Aus dem Biot-Savart-Gesetz [4] folgt somit, dass  $\mathbf{B}$  nur eine x-Komponente aufweist. Der definierte Zusammenhang ist in Bild 1 dargestellt.

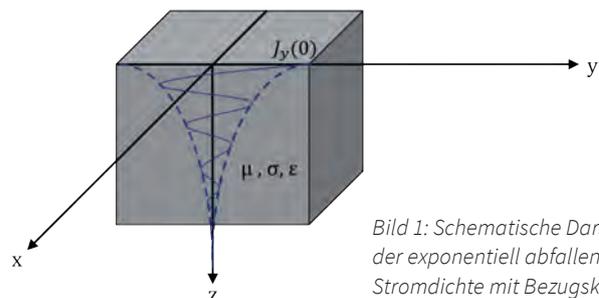


Bild 1: Schematische Darstellung der exponentiell abfallenden Stromdichte mit Bezugskoordinationssystem

Es folgt somit:

$$\frac{dJ_y}{dz} = -j\omega\sigma B_x \tag{4}$$

$$\frac{dB_x}{dz} = J_y \cdot \left( \mu + j \cdot \frac{\omega\epsilon\mu}{\sigma} \right) \tag{5}$$

Nach Kombination und Ableitung ergibt sich hieraus eine lineare, homogene Differentialgleichung zweiter Ordnung:

$$\frac{d^2J_y}{dz^2} - J_y \cdot (j\omega\sigma\mu - \omega^2\epsilon\mu) = 0. \tag{6}$$

Diese lässt sich mit einem allgemeinen Ansatz lösen und es folgt  $c_1 = 0$  unter Verwendung der Randbedingung  $\lim_{z \rightarrow \infty} J_y(z) = 0$ . Unter Verwendung der Randbedingung  $J_y(0) = J_0$  resultiert schließlich:

$$J_y(z) = J_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu \cdot \sqrt{\epsilon^2\omega^2 + \sigma^2} - \omega^2\epsilon\mu}{2}} \cdot z} \left( \cos\left(-\sqrt{\frac{\omega\mu \cdot \sqrt{\epsilon^2\omega^2 + \sigma^2} + \omega^2\epsilon\mu}{2}} \cdot z\right) + j \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{\omega\mu \cdot \sqrt{\epsilon^2\omega^2 + \sigma^2} + \omega^2\epsilon\mu}{2}} \cdot z\right) \right) \tag{7}$$

Zur Ermittlung der Standardeindringtiefe wird  $J_y(z) = \frac{1}{e} \cdot J_0$  angenommen und es ergibt sich:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu \cdot \sqrt{\epsilon^2\omega^2 + \sigma^2} - \omega^2\epsilon\mu}} \tag{8}$$

Diese Gleichung kann nach Umformung durch [5] bestätigt werden. Unter der Voraussetzung  $\omega\epsilon \gg \sigma$  handelt es sich, wie beispielsweise bei Kunststoffen, um einen schlechten elektrischen Leiter. Dies ist für  $\omega \rightarrow \infty$  erfüllt. Hierfür ergibt sich folgende Grenzwertbetrachtung und es resultiert nach Vereinfachung schließlich

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \delta_v(\omega) = \sqrt{\lim_{\omega \rightarrow \infty} \left( \frac{\sqrt{4\epsilon^2\omega^2}}{\sqrt{\omega^2\sigma^4\mu^2}} \right) + \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left( \frac{\sqrt{4\sigma^2}}{\sqrt{\omega^2\sigma^4\mu^2}} \right) + \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left( \frac{2\omega^2\epsilon\mu}{\omega^2\sigma^2\mu^2} \right)} = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \tag{9}$$

Die elektrische Leitfähigkeit geht hierbei invers mit ein und steht gegenüber der konventionellen Formel für die Standardeindringtiefe nicht mehr unter der Wurzel. Es wird somit deutlich, dass die Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung von Verschiebestömen bei sehr hohen Prüffrequenzen oder sehr geringer elektrischer Leitfähigkeit asymptotisch gegen einen Grenzwert strebt, der lediglich von den Werkstoffparametern bestimmt wird.

**Numerische Simulation der HF-Wirbelstromprüfung  
Validierung der Standardeindringtiefe**

Um die Ergebnisse der analytischen Betrachtungen zu validieren, werden im Folgenden numerische Simulationen unter Verwendung von ANSYS® Maxwell 3D (Version 19.0) durchgeführt. Vorteil gegenüber anderen Softwaremodulen ist hierbei die vollständige Implementierung der Maxwell-Gleichungen hinsichtlich auftretender Verschiebestöme [6], was insbesondere bei höheren Frequenzen relevant ist. Für alle durchgeführten Simulationen wird der virtuelle Raum, für welchen mittels des Eddy Current Solvers die Lösungen berechnet werden, zu allen Seiten noch einmal genau so groß gewählt, wie alle Objekte des Modells selbst. Es ist somit ein Offset von 100 % in alle Raumrichtungen vorhanden, wobei die Umgebung stets als Luft definiert wird. An den Außenseiten des virtuellen Raums gelten Neumann-Grenzbedingungen. Für die Vernetzung des erstellten Modells wird auf das adaptive Meshing zurückgegriffen, das bei Aus-

wahl eines statischen Solvers zur Verfügung steht. Die einzelnen Objekte werden hierbei mittels Tetraedern in finite Elemente unterteilt. Auf diese Weise wird zunächst ein grobes Netz mit vergleichsweise wenigen Elementen generiert. In Bereichen mit hohen Änderungen der zu berechnenden Felder wird das Netz anschließend lokal schrittweise verfeinert, bis der zulässige Fehler unterschritten wird. Als zulässiger Fehler wird ein Wert von 0,1 % gewählt. Für die Simulationen wurde ein Intel® Core i7-9700 Prozessor mit 16 GB Arbeitsspeicher und 64-Bit-Betriebssystem eingesetzt. Um die analytischen Berechnungen zu validieren und die Standardeindringtiefe von Verschiebestömen in Isolatoren zu ermitteln, wird eine Ringspule auf dem Prüfkörper ( $\sigma = 0$ ;  $\mu_r = 1$ ;  $\epsilon_r = 1$ ) platziert. Diese weist einen Innenradius von 2 mm, einen Außenradius von 4 mm sowie eine Höhe von 5 mm auf und wird als stranded coil simuliert, was die erforderlichen Rechenzeiten deutlich reduziert. Die 28 Windungen der Spule werden von einem Wechselstrom mit 100 mA durchflossen. Zunächst wird hierbei die Stromdichte ausgehend vom Mittelpunkt zwischen Außen- und Innenradius in Tiefenrichtung für unterschiedliche Prüffrequenzen ermittelt. Die resultierenden Verläufe sind nachfolgend in Bild 2 dargestellt.

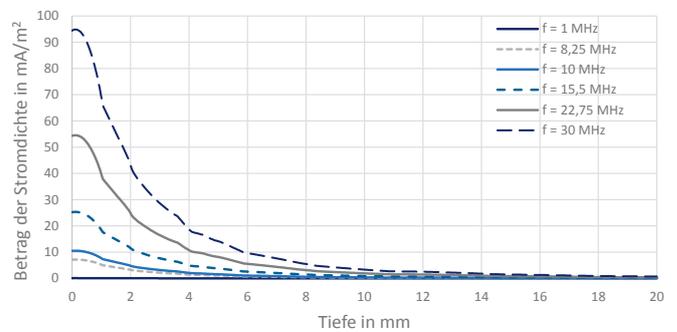


Bild 2: Stromdichte in Abhängigkeit von der Tiefe für unterschiedliche Prüffrequenzen

Ausgehend hiervon kann die Standardeindringtiefe für unterschiedliche Prüffrequenzen ermittelt werden. Es resultiert der in Bild 3 (a) abgebildete Verlauf. Somit wird deutlich, dass entgegen der Formel für die Standardeindringtiefe bei elektrisch leitfähigen Werkstoffen, in diesem Fall keine Beeinflussung der Eindringtiefe über die Prüffrequenz möglich ist. Qualitativ bestätigt werden kann dies durch die vorangegangene mathematische Herleitung, wonach sich die Standardeindringtiefe für hohe Frequenzen an ein Plateau annähert, das ausschließlich durch die Werkstoffparameter gegeben ist. Weiterhin kann gezeigt werden, dass die Standardeindringtiefe maßgeblich über den Spulenaußenradius bestimmt wird.

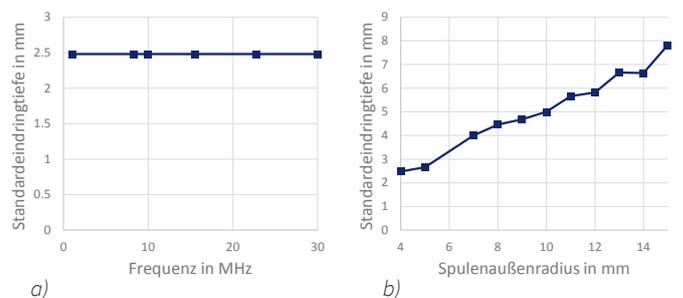


Bild 3: Standardeindringtiefe für eine Ringspule in Abhängigkeit von der Prüffrequenz (a) sowie in Abhängigkeit vom Spulenaußenradius bei einer Frequenz von 30 MHz (b)

Dies kann exemplarisch anhand der Standardeindringtiefe als Funktion des Spulenaußenradius bei einer Frequenz von 30 MHz verdeutlicht werden, wie in Bild 3 (b) dargestellt.

### Kapazitive Kopplungseffekte

Nach der Betrachtung homogener Werkstoffe soll im Folgenden näher auf einzelne faserförmige Einschlüsse in diesen und Wechselwirkungseffekte zwischen mehreren Fasern sowie deren Frequenzabhängigkeit eingegangen werden. Hierfür wird eine Ringspule aus Kupfer mit einem Außenradius von 4 mm und einem Innenradius von 2,25 mm in einem Abstand von 0,1 mm oberhalb der Prüfkörperoberfläche platziert. Die Spulenhöhe beträgt 3 mm und wird als stranded coil simuliert. Ihre 28 Windungen werden dabei mit einem Strom von 100 mA durchflossen. Als Prüfkörper wird eine Platte ( $l = 80 \text{ mm}$ ,  $b = 80 \text{ mm}$ ,  $h = 5 \text{ mm}$ ) mit denselben Werkstoffparametern wie zuvor verwendet. Zusätzlich wird ein weiterer Fall mit einer abweichenden relativen Permittivität von  $\epsilon_r = 4$  modelliert. Der dielektrische Verlustfaktor ist für den Prüfkörper gegeben zu  $\tan(\delta) = 0,02$ . Im jeweiligen Prüfkörper befinden sich zylinderförmige Kohlenstoffeinschlüsse ( $\sigma = 70 \text{ kS/m}$ ,  $\mu_r = \epsilon_r = 1$ ) unterschiedlicher Anzahl. Für die nachfolgend genauer dargestellten Fälle wird jeweils unter Verwendung des Field Calculators als Indikator für die in der Spule induzierte Spannung der magnetische Fluss im Spulenquerschnitt analog zu [7] berechnet. Zu den betrachteten Kombinationen von Faser und Matrix zählt ein homogener Prüfkörper ohne Faser sowie derselbe Prüfkörper mit einer oder zwei Fasern. Mehrere Fasern sind dabei so angeordnet, dass eine kapazitive Struktur in einer Ebene parallel zur Prüfkörperoberfläche oder orthogonal hierzu resultiert. Eine Übersicht hierüber ist unter Angabe der relevanten Abmessungen in Bild 4 dargestellt. Es resultieren folglich insgesamt acht Szenarien.

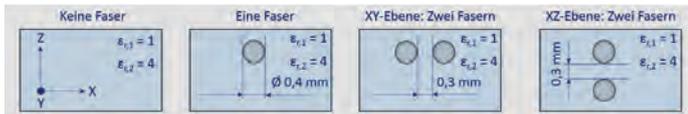


Bild 4: Schematische Darstellung der untersuchten Faser-Matrix-Kombinationen

Für jede der dargestellten Varianten wird der magnetische Fluss im Spulenquerschnitt für die Frequenzen 1 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz und 30 MHz berechnet. Im Anschluss wird jeweils die Differenz des magnetischen Flusses im Spulenquerschnitt eines Szenarios mit höherer Permittivität bei einer bestimmten Frequenz und des entsprechenden Szenarios mit niedriger Permittivität bei derselben Frequenz ermittelt. Dies ermöglicht eine Aussage darüber, ob die Permittivität einen Einfluss auf den magnetischen Fluss und damit

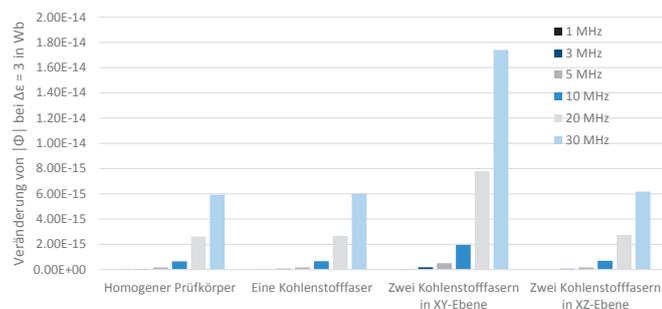


Bild 5: Änderung der magnetischen Flussdichte des Matrixwerkstoffs bei  $\Delta\epsilon = 3$

die induzierte Spulenspannung aufweist und wie hoch der Einfluss kapazitiver Effekte zwischen Fasern verglichen mit der reinen induzierten Verschiebungsstromdichte ist. Die ermittelten Änderungen der magnetischen Flussdichte sind für die unterschiedlichen Szenarios und Frequenzen in Bild 5 dargestellt.

Es wird somit deutlich, dass kapazitive Wechselwirkungen bei hohen Frequenzen von einigen MHz vor allem innerhalb der einzelnen Lagen auftreten. Zwischen einzelnen Lagen ist dieser Effekt nahezu vernachlässigbar. Dies kann qualitativ auch durch [7] bestätigt werden und ist auf die Orientierung des elektrischen Felds in der Ebene der Fasern zurückzuführen. Eine Ausnahme hierbei stellen jedoch geringere Prüffrequenzen, wie beispielsweise in der Größenordnung von 1 MHz oder geringer, dar. Hier kommt es auch zwischen einzelnen Lagen zu kapazitiven Wechselwirkungen. Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, wird die jeweilige Änderung im Folgenden auf die Änderung des magnetischen Flusses für einen homogenen Prüfkörper normiert, d. h. diese entspricht 100 % und repräsentiert auf diese Weise die rein durch Verschiebungsströme im Matrixwerkstoff hervorgerufene Änderung des magnetischen Flusses. Werden alle weiteren Szenarios auf diesen Wert normiert, so resultieren ausschließlich die Einflüsse kapazitiver Wechselwirkungen bezogen auf den Einfluss der induzierten Verschiebungsströme. Dieser Zusammenhang ist in Bild 6 dargestellt.

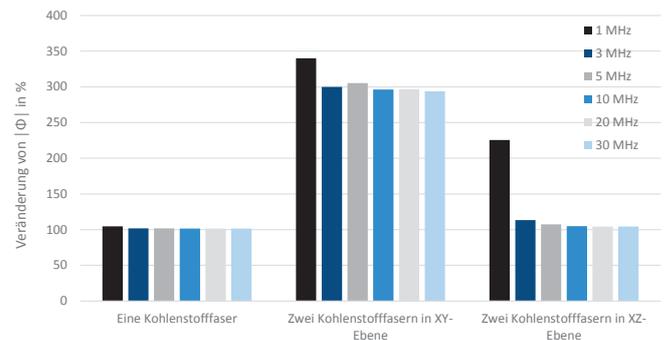


Bild 6: Prozentuale Veränderung des magnetischen Flusses bezogen auf einen homogenen Prüfkörper bei  $\Delta\epsilon = 3$  (entspricht 100 %)

Für eine einzelne Kohlenstofffaser zeigt sich gegenüber einem homogenen Prüfkörper nahezu keine Änderung, da bei einer einzelnen Faser keine kapazitiven Wechselwirkungen auftreten können. Auftretende Abweichungen sind dementsprechend eher auf numerische Ungenauigkeiten zurückzuführen. Weiterhin kann gezeigt werden, dass höhere Prüffrequenzen von mehreren MHz dazu führen, dass kapazitive Effekte sowohl innerhalb als auch zwischen einzelnen Lagen (bezogen auf die Änderung eines homogenen Prüfkörpers bei derselben Frequenz) geringer ausgeprägt sind als bei niedrigeren Prüffrequenzen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich analog zu [8] bei geringeren Frequenzen magnetische Multipole in den Fasern ausbilden, die Wechselwirkungseffekte zwischen Fasern in unterschiedlichen Lagen begünstigen. Um dies zu verifizieren, sind allerdings weitere Untersuchungen erforderlich.

### Modellierung von unidirektionalen CFK-Tapes

Während die meisten Ansätze zur Simulation von CFK im Bereich der Wirbelstromprüfung auf die Homogenisierung der elektrischen Eigenschaften einzelner Lagen zurückgreifen, wird im Folgenden eine Simulation auf Faser-Matrix-Ebene für ein einzelnes unidirektionales Tape durchgeführt. Hierbei sind quaderförmige Faser- und Matrixelemente mit einer Elementbreite von 0,1 mm abwechselnd

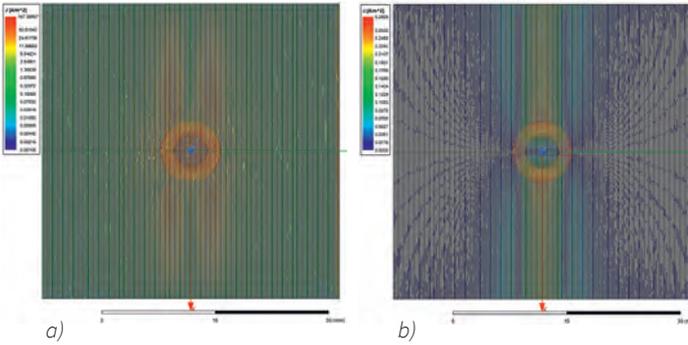


Bild 7: Leitungsstromdichte in den Kohlenstoffelementen (a) und Verschiebungsstromdichte im Matrixwerkstoff (b) bei einer Frequenz von 10 MHz und einer Elementbreite von 0,1 mm.

aneinandergereiht. Die Werkstoffeigenschaften bleiben unverändert. In Bild 7 sind die resultierenden Leitungs- und Verschiebungsstromdichten in Aufsicht dargestellt.

Obwohl die gewählten Abmessungen der Fasern noch eine Größenordnung über realen Werten liegen, ist hier bereits eine elliptische Form der Leitungsströme zu beobachten. Kapazitive Effekte verstärken die geringen induzierten Verschiebestrome im Matrixwerkstoff immens und treten auch in großer Entfernung vom Spulenzentrum noch zwischen Fasern auf. Der Betrag der Verschiebungsstromdichte beträgt maximal ca. 0,29 A/m<sup>2</sup>, während die Leitungsstromdichte Werte von bis zu etwa 167,39 A/m<sup>2</sup> annimmt.

**Simulation von Laminaten**

Ausgehend von den Ergebnissen der Simulation auf Faser-Matrix-Ebene soll im Folgenden eine Möglichkeit für die effiziente und realitätsnahe Simulation von Laminaten aufgezeigt werden. Da für die Simulation eines Laminats auf Faser-Matrix-Ebene immense Rechenleistungen und Speicherkapazitäten benötigt werden, ist dies für die Praxis – nicht zuletzt auch aufgrund des Aufwands in der Modellerstellung – nicht zielführend. Aus diesem Grund wird oft dazu übergegangen, einzelne Laminatschichten zu homogenisieren und ihnen anisotrope elektrische Eigenschaften zuzuweisen. Hierdurch ist jedoch der Einfluss der Permittivität auf die induzierte Spulenspannung und somit der Nachweis von permittivitätsassoziierten Defekten nicht mehr realitätsnah möglich. Weiterhin grenzen bei den meisten in der Literatur dokumentierten Modellierungsansätzen elektrisch leitfähige Lagen direkt aneinander. Da jedoch eine elektrisch isolierende Matrix zwischen den Schichten vorhanden ist, sollten, unter Vernachlässigung der punktuell eventuell vorhandenen Faser-Faser-Kontakte, keine Leitungsströme in tieferliegende Schichten geleitet werden. Darüber hinaus konnte zuvor gezeigt werden, dass bei höheren Frequenzen auch keine kapazitiven Effekte zwischen den Lagen auftreten. Aus diesen Gründen wird im Folgenden ein Laminat mit insgesamt 34 Lagen aufgebaut, wobei jede einzelne Lage aus drei Teilschichten besteht, die mit ihren elektrischen Eigenschaften und Abmessungen in Bild 8 dargestellt sind.

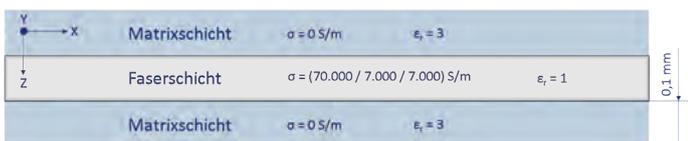


Bild 8: Schematische Darstellung des Aufbaus einer einzelnen Lage des 34-lagigen Laminats

Auf diese Weise kann gezeigt werden, dass es auch bei Präsenz elektrisch isolierender Schichten zwischen zwei Faserschichten zu einer exponentiellen Abnahme der Stromdichte kommt, was anhand von Bild 9 verdeutlicht werden kann. Die Verschiebestromdichte zwischen zwei Lagen ist ungleich Null, allerdings im Vergleich zu den Leitungsströmen in der Faserebene sehr gering. Kapazitive Effekte zwischen den Lagen sind, wie zuvor bereits auf Faser-Matrix-Ebene gezeigt, nicht vorhanden.

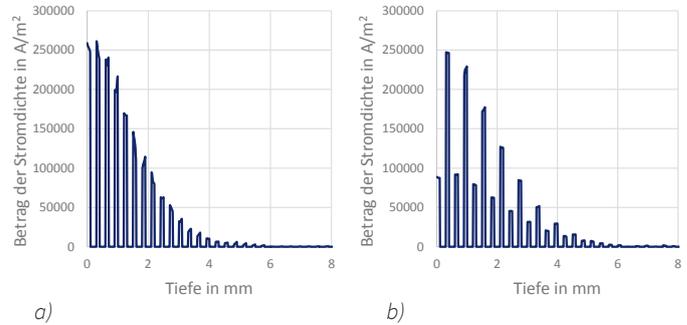


Bild 9: Betrag der Stromdichte in Abhängigkeit von der Tiefe für eine Frequenz von 10 MHz dargestellt für ein UD-Laminat (a) sowie ein Laminat mit einem [90°,0°]-Lagenaufbau (b)

An den Grenzflächen einzelner Lagen mit unterschiedlicher Faserichtung kommt es in der Faserschicht zu einer lokalen Verstärkung der Stromdichte. Bei unidirektionalen Laminaten ist aus diesem Grund eine vergleichsweise schnellere Abschwächung der Stromdichten in Tiefenrichtung zu beobachten als bei multidirektionalem CFK.

**Experimentelle Ergebnisse und Anwendung**

Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung an CFK wird sowohl zur Prüfung von Faserhalbzeugen [9], für das Monitoring der CFK-Herstellungsprozesse [10], als auch zur Betriebsprüfung [11,12] eingesetzt. Hersteller von auf die Prüfung von CFK zugeschnittenen Wirbelstromprüfsystemen ist die Suragus GmbH (Dresden), wobei diese entlang der gesamten CFK-Wertschöpfungskette genutzt werden können. Im Rahmen dieses Beitrags wurde das Wirbelstromprüfgerät ELOTEST PL600 der Firma Rohmann GmbH (Frankenthal) auf bis zu 30 MHz erweitert und für die Prüfung von CFK eingesetzt. Das Potenzial des neuen Wirbelstromprüfsystems soll anhand zweier Prüfkörper mit Referenzdefekten exemplarisch demonstriert werden. Hierzu zählen zwei Prüfkörper mit duroplastischer Matrix und einem Gelege bzw. Gewebe als Faserhalbzeug. Während ersterer einzelne Legespalte aufweist, wurde im Prüfkörper mit Gewebe ein

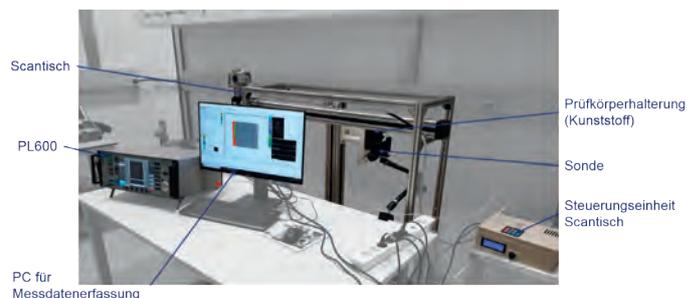


Bild 10: Darstellung des Wirbelstrom-Prüfstands

40 J-Impactschaden eingebracht. Mittels XY-Manipulator können Prüfkörper abgerastert und die Impedanzwerte durch die Encodersignale den einzelnen Ortskoordinaten zugeordnet werden, wodurch eine bildgebende Wirbelstromprüfung möglich ist. Als Parameter wurde eine Bahngeschwindigkeit von 10 mm/s sowie eine Spurbreite von 0,5 mm gewählt.

Der Abstand der Absolutsonde KAS2-3 zum Prüfkörper beträgt etwa 0,2 mm. Das Gesamtsystem ist unter Angabe der relevanten Komponenten in Bild 10 dargestellt.

Hierdurch kann die Faserorientierung sowie damit verbundene Fehlstellen, wie beispielsweise Fehlorientierungen, Legespalte oder Ondulationen detektiert werden. Exemplarisch ist die Ermittlung der Faserorientierung mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) nachfolgend in Bild 11 dargestellt, wobei hellere Bereiche im Gelege auf Legespalte zurückzuführen sind. Der Faserorientierungswinkel kann im Frequenzspektrum direkt gemessen werden.

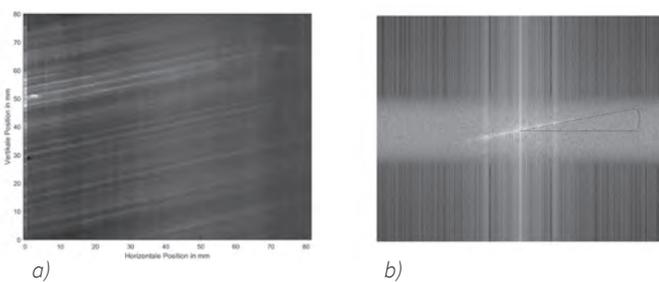


Bild 11: Unter Verwendung der Absolutsonde KAS2-3 bei 3,5 MHz geprüftes CFK-Gelege (a) sowie dessen FFT zur direkten Ermittlung der Faserorientierung (b)

Weiterhin können nicht nur herstellungsassoziierte Schäden, sondern auch betriebsbedingte Schäden nachgewiesen werden. Dies ist beispielhaft in Bild 12 anhand eines 40 J-Impactschadens dargestellt.

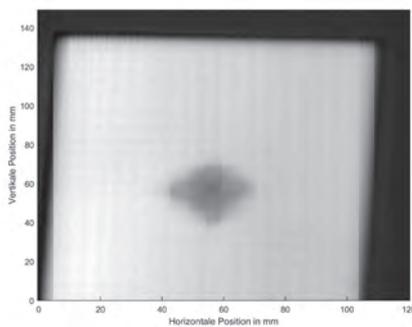


Bild 12: Unter Verwendung der Absolutsonde KAS2-3 bei 3,5 MHz detektierter 40 J-Impactschaden

## Fazit

Im Rahmen dieser Arbeiten konnte gezeigt werden, dass die Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung von Verschiebestromen bei sehr hohen Prüffrequenzen oder sehr geringer elektrischer Leitfähigkeit asymptotisch gegen einen Grenzwert strebt, der lediglich von den Werkstoffparametern bestimmt wird. Für die Prüfung von Nichtleitern kann die Standardeindringtiefe folglich nicht mehr über die Frequenz, sondern lediglich über die geometrischen Abmessungen der Spule bestimmt werden. Weiterhin konnte demonstriert werden, dass kapazitive Effekte in CFK bei hohen Frequenzen ( $> 1$  MHz) ausschließlich in der Ebene auftreten, während bei niedrigeren

Frequenzen ( $< 1$  MHz) eine Verstärkung der kapazitiven Effekte zwischen Lagen zu beobachten ist. Der hierfür zu Grunde liegende Effekt soll in weiteren Arbeiten näher untersucht werden. Der entwickelte Wirbelstrom-Prüfstand soll darüber hinaus für eine systematische Untersuchung von Fehlstellen in CFK bei unterschiedlichen Faserhalbzeugen, Faservolumengehalten und Matrices eingesetzt werden, um eine ausreichende Datenbasis und damit eine hohe Prüfzuverlässigkeit zu erzielen.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 20213 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.



## REFERENCES

1. Grellmann, W.; Seidler, S. *Kunststoffprüfung*, 3., aktualisierte Aufl.; Carl Hanser Verlag: München, 2015, ISBN 9783446443501.
2. Maxwell, J.C. *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* 1865.
3. Huang, S.; Wang, S. *New Technologies in Electromagnetic Non-destructive Testing*; Springer Singapore: Singapore, 2016, ISBN 978-981-10-0577-0.
4. Donnevert, J. *Die Maxwell'schen Gleichungen*; Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, 2015, ISBN 978-3-658-09955-8.
5. Jordan, E.C.; Balmain, K.G. *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, 2<sup>nd</sup> edition; Prentice-Hall, Inc: Englewood Cliffs, New Jersey, 1968.
6. ANSYS Inc. *Maxwell Help*; Canonsburg, PA 14317, 2019.
7. Gäbler, S. *Untersuchung des Anwendungspotenzials der Hochfrequenzwirbelstrommesstechnik zur Charakterisierung dielektrischer Eigenschaften von Epoxidharzen und Faserverbundmaterialien*. Dissertation; Technische Universität Dresden, 2017.
8. Kreuzbruck, M.; Casperson, R.; Reimund, V.; Blome, M. *Magnetic Response Field of Spherical Defects within Conductive Components*. *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics* 2010.
9. Heuer, H.; Schulze, M.; Pooch, M.; Gabler, S.; Kupke, R. *PROCESS MONITORING FOR RESINS, CARBON FIBER FABRICS, PREFORMS AND CONSOLIDATED CFRPS BY HF RADIO WAVE TECHNIQUES*. 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials 2015.
10. Berger, D.; Lanza, G. *Development and Application of Eddy Current Sensor Arrays for Process Integrated Inspection of Carbon Fibre Preforms*. *Sensors (Basel)* 2017, 18, doi:10.3390/s18010004.
11. Mook, G.; Lange, R.; Koeser, O. *Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents*. *Composites Science and Technology* 2001, 65–873.
12. Bardl, G.; Kupke, R.; Heuer, H.; Cherif, C. *Wirbelstromprüfung in der CFK-Fertigung*. *Lightweight design* 2018, 58–63.

Kontakt: sebastian.joas@ikt.uni-stuttgart.de

BEITRAG 21

Wirbelstromprüfung beschichteter Zylinderlaufflächen mit Sensorarrays

Gerhard Mook<sup>1</sup>, Yury Simonin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg

Einführung

In Verbrennungsmotoren aus Aluminiumlegierungen werden zunehmend die Zylinderlaufbuchsen durch tribologisch optimierte und gewichtssparende Laufflächenbeschichtungen ersetzt. Bild 1 zeigt, wie dazu ein ferromagnetischer Werkstoff thermisch auf die aktivierte Oberfläche des Zylinderkurbelgehäuses gespritzt wird. Anschließend wird mehrstufig gehont. Ziel ist eine weitestgehend homogene Schicht bestimmter Dicke mit einstellbarem Porenanteil bestimmter Größe und Verteilung.

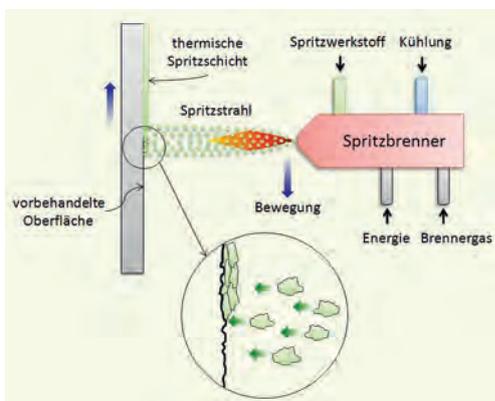


Bild 1: Prinzip des thermischen Spritzens [1].

Der zerstörungsfreien Prüfung kommen dabei vielfältige Aufgaben zu. Neben der Schichthaftung interessieren die erreichte Schichtdicke und ihre Verteilung in besonderem Maße. Darüber hinaus sind Schichtfehler und Inhomogenitäten zu detektieren und zu lokalisieren, um Rückschlüsse auf den Beschichtungsprozess zu ziehen und diesen zu optimieren. Das zu entwickelnde Prüfverfahren soll alle Auswertungen automatisch vornehmen und in-line-fähig sein.

Im Unterschied zu optischen Verfahren kann das Wirbelstromverfahren ein Stück weit in das Material hineinschauen und Informationen aus der Tiefe gewinnen. Wegen der hohen Permeabilität des Schichtwerkstoffs werden jedoch niedrige Prüffrequenzen benötigt, die zu hoher Spuleninduktivität und damit erheblicher Baugröße der Sensoren führen, was dem Wunsch nach hoher Ortsauflösung entgegensteht.

Um einen umlaufenden Einzelsensor mit seiner aufwendigen Rotiermechanik zu vermeiden, soll ein Ringarray zum Einsatz kommen. Da dieses Array problemlos in die Zylinderbohrung einfädeln muss und sensible Zentrierungen unerwünscht sind, muss von variierendem Lift-Off der Einzelsensoren ausgegangen werden. Das dabei entstehende Störsignal muss somit sicher vom Schichtdickensignal getrennt werden.

1. Sensoren für die Schichtdickenbestimmung

1.1 Sensorarten

Am häufigsten findet man in der Wirbelstromprüfung koaxiale Sensoren. Bei diesem Typ sind Sende- und Empfangswicklung auf einer

gemeinsamen Achse untergebracht. Bild 2 zeigt links exemplarisch einen derartigen Sensor. Häufig werden Ferritkerne genutzt, um die Spuleninduktivität trotz der niedrigen Frequenzen hoch zu halten. Das Empfindlichkeitsprofil, genauer, die Punktspreizfunktion, hat die Form eines Kraters. Direkt unter den Windungen besitzt der Sensor seine höchste Empfindlichkeit.

Anders der koplanare Sensor, auch Halbtransmissionssensor genannt, der in Bild 2 rechts dargestellt wird. Seine Punktspreizfunktion besitzt die Form eines Sombros, dessen Spitze zwischen Sender und Empfänger liegt [2, 3], unabhängig davon, welcher Abstand zwischen Sender und Empfänger besteht. Wie verhält es sich mit der Prüftiefe beider Sensortypen?

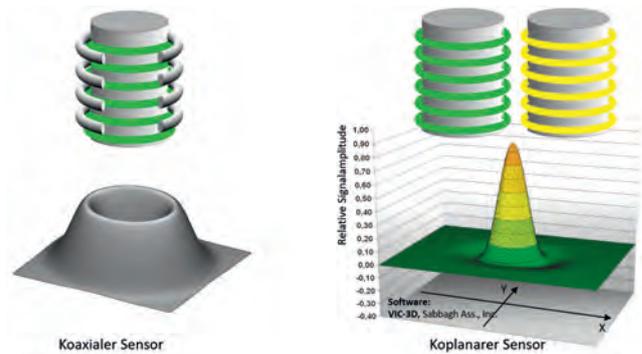


Bild 2: Aufbau und Punktspreizfunktionen des koaxialen und des koplanaren Sensors.

Bild 3 vergleicht die Verteilung der magnetischen Feldlinien bei beiden Sensortypen. Auf die Darstellung der Wirbelstromverteilung wird verzichtet, da sie in beiden Fällen prinzipiell identisch ist. Während die Empfangswicklung des koaxialen Sensors von fast allen Feldlinien der Sendewicklung durchsetzt wird, „sieht“ der koplanare Empfänger nur diejenigen Feldlinien, die auch in große Materialtiefen vorgedrungen sind. Die restlichen Feldlinien erreichen ihn nicht. Somit ergibt sich für den koplanaren Empfänger der Vorteil, dass der gesamte Fluss, der ihn erreicht, Informationen aus großer Materialtiefe trägt. Da dieser Fluss gering ist, kann das Messsignal hoch verstärkt werden [5-10].

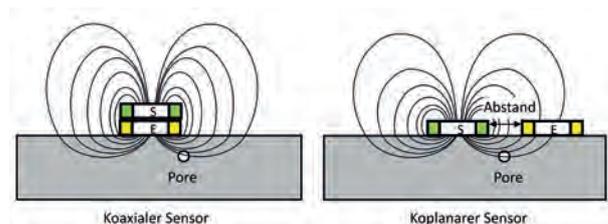


Bild 3: Die Empfangsspule registriert verschiedene Flussanteile der Sendespule.

Der koaxiale Empfänger dagegen wird von einem starken Fluss durchsetzt, von dem nur ein geringer Teil bis in tiefe Regionen vorgedrungen ist. Diesen herauszufiltern, ist kaum möglich.

### 1.2 Array-Fähigkeit

Ein weiterer Vorteil des koplanaren Sensors ist seine innewohnende Arrayfähigkeit. Natürlich kann auch der koaxiale Sensor in Arrays angeordnet werden, es ergeben sich aber keine Abbildungsvorteile gegenüber dem Einzelsensor [11, 12]. Bild 4 zeigt, dass eine Zeile aus koaxialen Sensoren nur die Ortsauflösung des Einzelsensors reproduziert. Zwischen den Sensoren entstehen Lücken. Der koplanare Sensor kann in zwei Zeilen angeordnet werden, eine stellt die Sender, die andere die Empfänger dar. Durch gezieltes Ansteuern von Sender-Empfängerpaaren wandert der Empfindlichkeitspunkt, der eigentliche Sensor, um einen halben Schritt vorwärts. Die blasseroten Punkte in Bild 4 deuten dieses Verhalten an. Es entsteht eine Sensorzeile mit doppelter Dichte und entsprechend höherer Ortsauflösung.

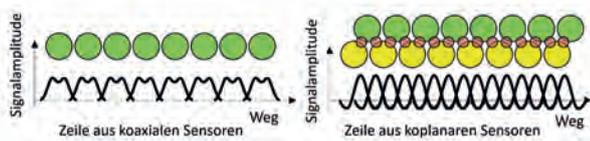


Bild 4: Ortsauflösung eines Arrays aus koaxialen und koplanaren Sensoren.

### 1.3 Isotropie der Empfindlichkeit

In Bild 2 ist auf den ersten Blick zu erkennen, dass die Empfindlichkeit des koaxialen Sensors isotrop ist, während der koplanare Sensor eine ausgeprägte Vorzugsorientierung besitzt. Diese wirkt sich nur bei anisotropen Materialeinflüssen aus. So kann z.B. die Faserorientierung in CFK bestimmt werden, da hier die elektrische Leitfähigkeit stark anisotrop ist [13, 14]. Bei der Prüfung auf Poren spielt die Anisotropie so gut wie keine Rolle, Risse dagegen sind prinzipiell orientiert, hier wirkt sich die Sensoranisotropie aus.

### 1.4 Abhebesignal (Lift-Off)

Das Abhebesignal ist das meistgenutzte Bezugssignal bei der Arbeit mit dem Tastsensor. Der koaxiale Sensor liefert ein weitgehend geradliniges Signal, das sich erst bei größerem Abstand krümmt. So

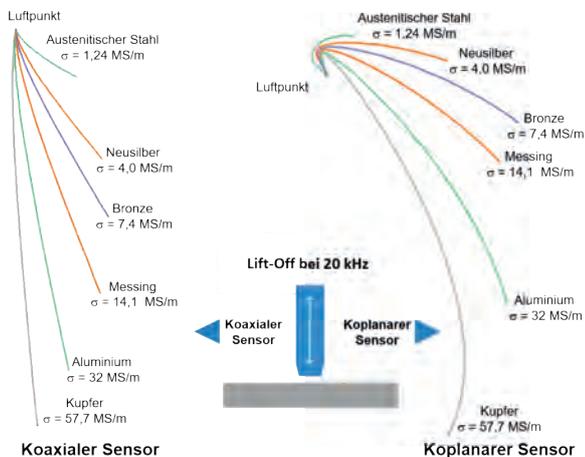


Bild 5: Abhebesignale (Lift-Off) des koaxialen (links) und koplanaren Sensors (rechts) von nicht ferromagnetischen Werkstoffen.

kann dieses Signal auf den negativen Teil der x-Achse gedreht werden und liefert nur vernachlässigbar kleine y-Anteile. Bild 5 zeigt als Beispiel eine Sammlung von Abhebesignalen verschiedener nicht ferromagnetischer Werkstoffe.

Beim Halbtransmissionssensor ist das Abhebesignal viel stärker gekrümmt, wobei die Krümmung auch hier mit zunehmendem Abstand stärker wird. Soll der Abhebeeinfluss durch Phasenselektion unterdrückt werden, darf sich der Abstand zum Prüfobjekt nur in geringem Maße ändern. Kann dies nicht gewährleistet werden, müssen andere Unterdrückungsverfahren angewandt werden.

### 1.5 Signale ferromagnetischer Schichten auf nichtferromagnetischer Unterlage

Die Dicke der ferromagnetischen Beschichtung liegt unterhalb eines halben Millimeters, so dass eine niederfrequente Wirbelstromprüfung möglich erscheint. Es ist die Frage zu beantworten, ob sich das Abhebesignal vom Schichtdickeneinfluss trennen lässt oder nicht. Bild 6 zeigt links die Signale des koaxialen Sensors im Überblick und im Detail. Aus dem Überblicksbild ist zu erkennen, dass der koaxiale Sensor nur dann einen weitgehend geradlinigen Lift-Off liefert, solange das Material entlang der Wirktiefe eine konstante Permeabilität besitzt. Ändert sich die Permeabilität in Tiefenrichtung, wird der Lift-Off krummlinig. Schichtdicken- und Lift-Off-Einfluss lassen sich nur in Schichtdickenbereichen gut unterscheiden, wo in beiden Werkstoffen ein hinreichend starkes Wirbelstromfeld herrscht. Sehr geringe und sehr große Schichtdicken liefern Signalrichtungen, die vom Lift-Off kaum zu trennen sind.

Die Lift-Off-Signale des koplanaren Sensors sind in jedem Schichtdickenbereich stark gekrümmt, was ihre Unterdrückung erschwert. Der Schichtdickeneinfluss besitzt jedoch stets eine andere Richtung als der Lift-Off, so dass er in jedem Dickenbereich gut vom Lift-Off unterscheidbar ist.

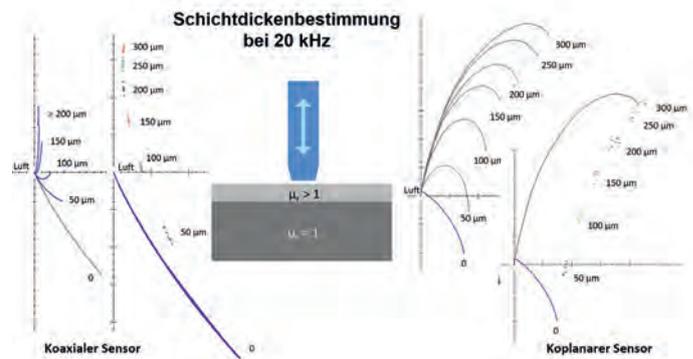


Bild 6: Abhebe- und Schichtdickeneinfluss auf das Wirbelstromsignal. Die Maßangaben beziehen sich auf die Schichtdicke. Links: koaxialer Sensor, rechts: koplanarer Sensor.

### 1.6 Sensorentscheidung

Koaxiale und koplanare Sensoren besitzen spezifische Stärken und Schwächen. Der konkrete Einsatzfall muss über ihre Anwendung entscheiden. Die Stärken des koaxialen Sensors liegen in seinem weitgehend linearen Lift-Off-Signal, seiner Orientierungsunabhängigkeit und der großen Phasenaufspreizung verdeckter Wandreduktionen. Die Stärken des koplanaren Sensors sind die hohe Prüftiefe, die sehr empfindliche Detektion verdeckter Poren, die guten Abbildungseigenschaften mit einer „freundlichen“ Punktpreisfunktion und einer

die flächenbezogene Spulendichte übersteigenden Sensorpunktdichte.  
Bei der Untersuchung von ferromagnetischen Schichten auf nicht ferromagnetischem Grundwerkstoff liefert der koplanare Sensor besser trennbare Lift-Off- und Schichtdickensignale als der koaxiale Sensor [15].

### 2. Prüfkonzep

Das Konzept sieht vor, dass das Array vor dem Eintauchen in den Zylinder den Luftwert aller Sensoren aufzeichnet und danach durch zwei Referenzringe aus ferromagnetischem Stahl und Aluminium gefahren wird, um die Sensoren auf Funktionsfähigkeit zu prüfen (Bild 7a).

Das Sensorarray im Bild 7c) fädelt selbstständig in die Zylinderbohrung ein, verfährt ohne Zentrierung und liefert pro Millimeter Vorschub 128 Werte in Umfangsrichtung. Bei 130 mm Vorschub ergeben sich 16.640 Messwerte [16].

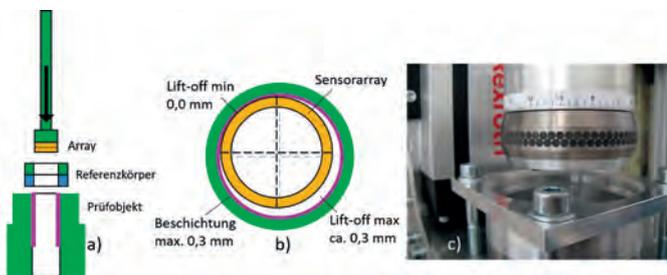


Bild 7: Prüfkonzep: a) Vor dem Eintauchen in den Zylinder durchfährt das Array den Referenzkörper. b) Die Lift-Off-Variation des Arrays (nicht maßstabsgerecht!) muss ausgeglichen werden, c) fertiges Array, das neben den Sensoren auch die gesamte Wirbelstromhardware enthält.

Damit sich das Array gut durch den Referenzkörper und den Zylinder bewegen kann, muss sein Durchmesser kleiner als die Bohrung sein (Bild 7b). Die schwimmende Lagerung des Arrays sorgt im Zusammenspiel mit dem konischen Ende des Arrays für ein problemloses Einfädeln selbst bei Abweichung von der Zylindermitte um mehr als einen Millimeter.

### 3. Kalibrierung

Da das Array im Normalfall an einer Seite des Zylinders anliegt, haben alle Sensoren unterschiedliche Abstände zur Wand. Die Lift-Off-Werte variieren zwischen Null und maximal 0,3 mm. Das Lift-Off-Signal selbst ist stark gekrümmt, so dass es nicht wie sonst in der Wirbelstromtechnik üblich, in die x-Achse gedreht werden kann. Bild 8 a) zeigt Punkte auf den Lift-Off-Kurven des Referenzkörpers (Aluminium grün, Stahl blau) und 4 bekannten Schichtdicken (d1...d4).

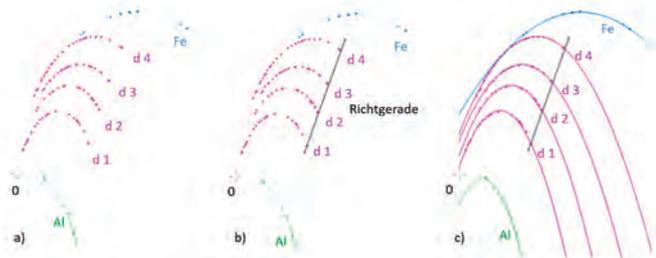


Bild 8: Kalibrierung durch sensorindividuelle Aufzeichnung der Lift-Off-Kurven von der Schicht (violett) und den Referenzkörpern (blau und grün).

Die Lift-Off-Kurven enden auf dem Werkstoff und werden durch eine Richtgerade im Bild 8 b) verbunden.

Durch die Messpunkte einer Lift-Off-Kurve kann mit guter Genauigkeit ein Polynom zweiter Ordnung gelegt werden (Bild 8c), dessen Parameter z. B. nach dem Gauss-Jordan-Algorithmus automatisch bestimmbar sind.

Das Kennfeld jedes der 128 Sensoren besteht also aus 6 Kurven, die hinterlegt werden müssen.

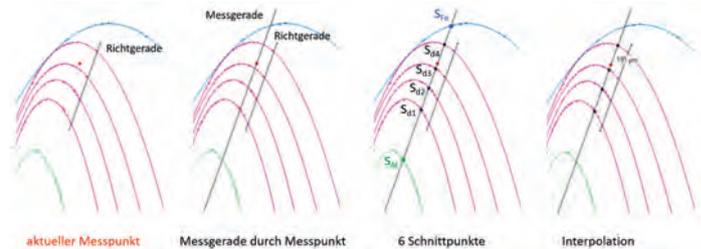


Bild 9: Vorgehen zur Ermittlung der Schichtdicke an der Sensorposition.

Während der Prüfung werden die laufenden Signale anhand ihrer Lage im Kennfeld ausgewertet. Im Bild 9a) ist der Messpunkt rot dargestellt. Bild 9b) zeigt, wie durch diesen Punkt eine Messgerade parallel zur Richtgerade gelegt wird, die alle 6 Kurven schneidet. Diese Schnittpunkte werden berechnet (Bild 9c).  $S_{Al}$  und  $S_{Fe}$  dienen zur Prüfung der Sensorfunktion,  $S_{d1}$  bis  $S_{d4}$  bilden die Grundlage für die lineare Interpolation des Messwertes (Bild 9d). Darüber hinaus wird der Weg auf der Kurve als Lift-Off-Äquivalent bestimmt und als Korrekturfaktor für lokale Auswertungen herangezogen.

### 4. Automatische Auswertung

In Abhängigkeit von der z-Position des Arrays werden die Messdaten aufgenommen, auf den Luftwert bezogen und ausgewertet. Bild 10 zeigt das Ergebnis in Form einer Abwicklung des Zylinders. Die Schichtdicke wird automatisch auf das vorkommende Minimum ausgewertet und mit dem Sollwert verglichen. Lokale Abweichungen lassen sich mit hoher Ortsauflösung erfassen und werden im rechten Bild als lokale Inhomogenitäten dargestellt.

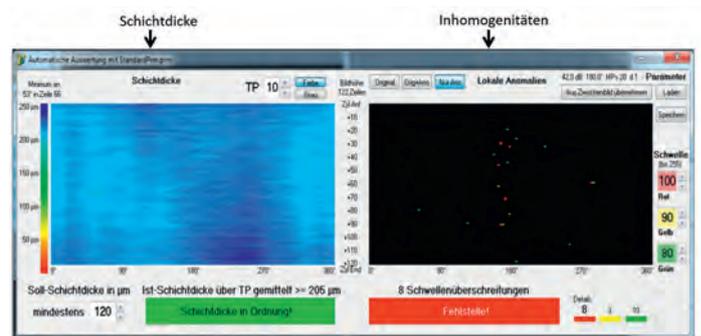


Bild 10: Darstellung des Prüfergebnisses der Schichtdicke (links) und lokaler Anomalien (rechts).

Im Bild 11 ist ein weiteres Ergebnis mit zeilenförmigen Anomalien dargestellt, wobei die Schichtdicke stets über dem geforderten Minimum bleibt und auch die Anomalien nicht die Grenzwerte überschreiten.

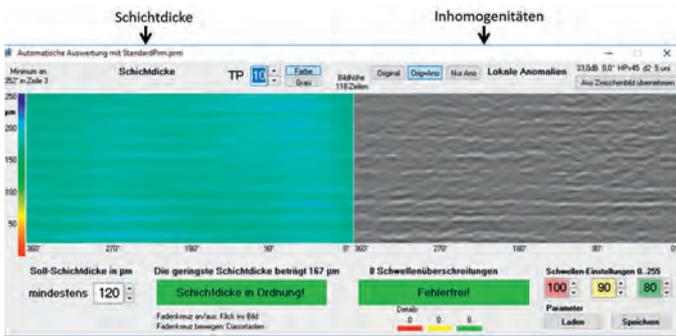


Bild 11: Beispiel für eine leicht inhomogene Schichtdickenverteilung, wie sie erst durch die bildhafte Darstellung erkennbar wird.

## 5. Fazit

Mit Hilfe des Halbtransmissionssensors ist es möglich, Arrays mit hoher Ortsauflösung aufzubauen. Im Unterschied zu koplanaren Sensoren besitzt dieser Sensortyp gute Voraussetzungen zur Trennung des Schichtdickensignals vom Lift-Off-Signal. Dazu ist jedoch eine sensorindividuelle Kalibrierung in Form der Aufnahme eines Sensorkennfeldes erforderlich. Das Lift-Off-Signal lässt sich durch eine Kurve in Form eines Polynoms beschreiben. Bewegt sich der Messpunkt auf dieser Kurve, ändert sich der Lift-Off, verlässt der Punkt die Kurve, ändert sich die Schichtdicke. Durch die bildhafte Ergebnisdarstellung lassen sich systematische Abweichungen wesentlich besser detektieren als durch punktuelle Messungen. Damit bestehen bessere Möglichkeiten zur Rückkopplung auf den Beschichtungsprozess.

Kontakt: mook@ovgu.de

## REFERENZEN

- [1] [https://de.wikipedia.org/wiki/Thermisches\\_Spritzen#/media/Datei:Thermisches-Spritzen.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Thermisches_Spritzen#/media/Datei:Thermisches-Spritzen.jpg). Link zur Lizenz: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>
- [2] Thomas, H.-M.; Weigelt, G.: Anwendung von Wirbelstromverfahren zur quantitativen Bestimmung der Tiefenausdehnung von Korrosionsschäden an Aluminiumstrukturen. DEHEMA-Abschlussbericht 11L08-4, Mai 1991
- [3] Reimche, W.; Duhm, R.; Zwoch, S.; Bernard, M.; Bach, F.: Development and Qualification of a Process-Oriented Nondestructive Test Method for Weld Joints to Operate With Remote Field Eddy Current Technique. 9. ECNDT, Berlin, 25.-29.9.2006, paper Fr.1.7.2
- [4] Mook, G.; Hesse, O.; Uchanin, V.: Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. 9. ECNDT, Berlin, 25.-29.9.2006, paper 176
- [5] Mook, G.; Simonin, J.; Michel, F.; Luther, M.; Borchert, C.: Visualisierung von Randschichtfehlern in Aluminiumguss. Berichte der DGZfP-Jahrestagung, 14.-16.5.2007, Fürth, V17
- [6] Feist, W. D.; Mook, G.; Hinken, J. H.; Simonin, J.; Wrobel, H.: Electromagnetic detection and characterization of tungsten carbide inclusions in non-ferromagnetic alloys. *Advanced Engineering Materials* 7 (2005) 9, pp 841-846
- [7] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.; Krüger, M.; Luther, M.: Visualization of Hidden Anomalies. 2<sup>nd</sup> Dresden Airport Seminar: Reliability, Testing, Monitoring of Aerospace Components. Airport Dresden, 15. November 2006
- [8] Yashan, A.; Bisle, W.; Meier, Th.: Inspection of Hidden Defects in Metal-Metal Joints of Aircraft Structures Using Eddy Current Technique with GMR Sensor Array. Proc. 9<sup>th</sup> ECNDT, Berlin, 2006, paper Tu.4.4.4
- [9] Vacher, F.; Gilles-Pascaud, C.; Decitre, J.M.; Fermon, C.; Pannetier, M.; Cattiaux, G.: Non Destructive Testing with GMR Magnetic Sensor Arrays. Proc. 9<sup>th</sup> ECNDT, Berlin, 2006, paper Tu.4.4.2
- [10] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.; Krüger, M.; Luther, M.: Subsurface Imaging using Moving Electromagnetic Fields and Surface Acoustic Waves, 4<sup>th</sup> International Conference in Non-Destructive Testing, Stuttgart, Germany, April 2-4, 2007
- [11] Scholz, A. 1990. Sondenmatte – neuer Weg für die Oberflächenprüfung mit Wirbelstrom. DGZfP-Jahrestagung Trier 21.-23.5.1990
- [12] Leclerc, R.; Samson, R.: Eddy Current Array Probes for Aircraft Applications, 15<sup>th</sup> WCNDT, Rome, 15-21 October 2000
- [13] Lange, R.; Mook, G.: Structural Analysis of CFRP Using Eddy Current Methods. *NDT&E international* 27 (1994) 5, S. 241-248
- [14] Mook, G.; Lange, R.; Koeser O.: Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents. *Composites Science and Technology* 61 (6) (2001) pp.865-873
- [15] Mook, G.; Michel, F.: Detektion und Interpretation von Wirbelstromsignalen in mehrlagigen Strukturen, DGZfP Jahrestagung, 26.-28.5.2014 Potsdam, P38, BB 148
- [16] Mook, G.; Simonin, Y.: Wirbelstrom-Ringarray zur Charakterisierung von Beschichtungen auf Zylinderlaufflächen. 1. Fachseminar Wirbelstromprüfung, 10.-11. September 2019, Celle

## BEITRAG 22

## In situ Qualitätsbeurteilung von Schleifprozessen mittels Mikrosystemtechnik basierter Sensorfusion

Isman Khazi<sup>1</sup>, Andras Kovacs<sup>1</sup>, Ali Zahedi<sup>2</sup>, Christian Reser<sup>3</sup>, Ulrich Mescheder<sup>1</sup>, Bahman Azarhoushang<sup>2</sup>, Christoph Reich<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> Institut für Mikrosystemtechnik (iMST); <sup>2</sup> Kompetenzzentrum für Spanende Fertigung (KSF); <sup>3</sup> Institut für Data Science, Cloud Computing und IT-Sicherheit (IDACUS), Hochschule Furtwangen

**KURZFASSUNG** | Schleifen ist zu einem Standard-Produktionsschritt für die Präzisionsfertigung von Metallteilen geworden. Nicht optimale Prozessbedingungen während des Schleifprozesses können jedoch zu einer unangemessenen lokalen Temperaturerhöhung in der Randzone des Werkstücks führen und den sogenannten „Schleifbrand“ verursachen. Dies kann zu Gefügeveränderungen und zu Veränderungen der Eigenspannungen in der Randzone führen, wodurch die lokalen Materialeigenschaften in der Randzone verändert werden. Die rechtzeitige Erkennung des Schleifbrandes ist ein wichtiger Aspekt zur Qualitätssicherung der Werkstücke. Das Auftreten des Schleifbrandes kann sowohl zerstörend (Nital-Ätzen, Mikrohärteprüfung) als auch zerstörungsfrei (Barkhausenrauschen-Methode, neuerdings auch Wirbelstromverfahren) detektiert werden.

Trotz der Fortschritte beim Monitoring von Schleifprozessen auf Basis von mittelbar mit dem Prozess verknüpfter Prozessgrößen, besteht nach wie vor hoher Bedarf an der in situ-Charakterisierung von direkten Qualitätsparametern und der Entwicklung der zugehörigen Primärsensorik. Die Integration der Sensorik in den Prozess (in situ-Messung) ist für die Prozesszuverlässigkeit und das Qualitäts-Monitoring entscheidend. Es gibt aber für das Schleifen kaum Sensoren, die in situ verwendet werden können. Die existierenden Sensoren sind teuer, der Integrationsaufwand ist sehr hoch, sie vertragen die harschen Prozessbedingungen nicht, die Abtastraten sind zu niedrig, oder sie können nicht in der Nähe der Bearbeitungszone eingesetzt werden. Daher berichtet dieser Artikel über die Verwendung einer Kombination aus optischen und Wirbelstromsensoren, die sich gegenseitig bei der hochgenauen Erkennung vom Schleifbrand ergänzen. Dadurch ergibt sich eine hohe Qualitätssicherung und Realisierung von schleifbrandfreien Schleifprozessen, die zudem mit einem cloud-basierten Analysesystem zur Echtzeitüberwachung der Prozessbedingungen und Sensordaten ausgestattet ist.

So entsteht eine intelligente Steuerung, die mit Selbstlernfähigkeiten ausgestattet ist und Schleifprozesse mit höchsten Abtragsleistungen bei gleichzeitig zuverlässigen und kontrollierten Prozessen hinsichtlich des Schleifbrandzustands optimieren kann. Ein solcher Vorgang gewährleistet die qualitätssichernden Maßnahmen beim Schleifen, spart Zeit, minimiert die Ausschussrate und damit die finanziellen Verluste.

### 1. Konzept für die in situ-Qualitätsbeurteilung von Schleifprozessen

Die Herstellung präziser mechanischer Komponenten erfordert in vielen Fällen eine abschliessende Feinstbearbeitung wie das Schleifen. Da dieser Prozess entscheidend ist für die erzielte Wertschöpfung, kommt dessen Beherrschung und Zuverlässigkeit besondere Bedeutung zu. Die komplexen Wirkzusammenhänge beim Schleifen erschweren jedoch die Einhaltung der Qualitätsvorgaben. Schon geringe Abweichungen von den idealen Prozessbedingungen können irreparable thermische Schädigungen (Schleifbrand) der oberflächennahen Schichten des Werkstückes, der sog. Randschichten, hervorrufen und die Ermüdungsfestigkeit erheblich herabsetzen. In

diesem Beitrag wird ein Konzept durch eine Fusion innovativer Sensorkonzepte auf Basis der Mikrosystemtechnik eine in situ-Qualitätsbeurteilung des Schleifprozesses vorgestellt. Die Sensordaten werden darüber hinaus mit anderen Prozessdaten fusioniert und in einer Cloud analysiert, womit die Grundlage für eine umfassende Optimierung des Bearbeitungsprozesses geschaffen wird. Abbildung 1 zeigt das Schema des vorgeschlagenen Konzepts der Sensorfusion mit Cloud Computing für die Echtzeit-Prozessüberwachung des Schleifprozesses. Abbildung 2 zeigt die EMAG HG 204 Schleifmaschine, die für die Umsetzung des Konzepts eingesetzt wurde und für die

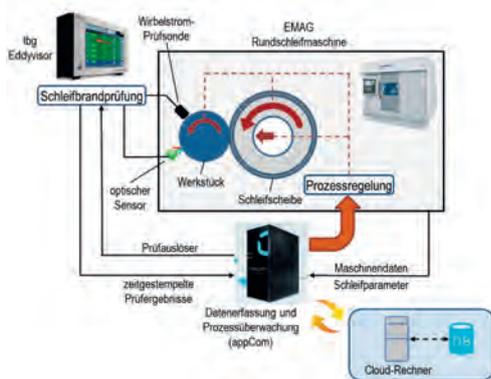


Abb. 1 Konzept der in situ Qualitätsbeurteilung von Schleifprozessen mittels Mikrosystemtechnik basierter Sensorfusion



Abb. 2 Schleifmaschine (EMAG HG 204) zur Herstellung von Werkstücken mit Schleifbrand für die Entwicklung des Sensors und zur Integration der entwickelten Sensorkombination („Sensorfusion“) für die Echtzeitüberwachung des Schleifprozesses.

Entwicklung des Sensors Schleifbrand mit unterschiedlichen Graden generiert. Für den ersten Proof of Concept für die Sensorentwicklung wurde ein Werkstück mit einem Schleifbrand, wie in Abbildung 3 dargestellt, flachgeschliffen.

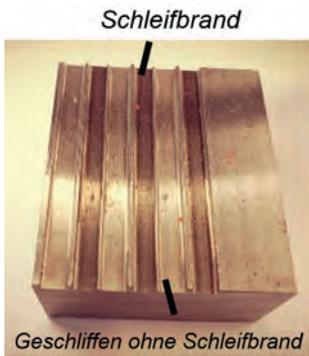


Abb. 3 Werkstück mit absichtlich erzeugtem Schleifbrand für die Entwicklung der Sensorik

## 2. Proof of Concept für den Einsatz von optischen und Wirbelstromsensoren zur ZfP des Schleifbrandes

Das Sensorfusionskonzept unter Verwendung des optischen und Wirbelstromsensors führt zu einer komplementären Detektion und damit zu einer genauen Erkennung des Schleifbrandes. Der optische Sensor registriert die aus dem Auftreten des Schleifbrandes resultierenden Oberflächenveränderungen als Funktion der Reflexionsintensität. Der Wirbelstromsensor hingegen liefert eine Tiefenprofilinformation der Randzone als Funktion der Spulenfrequenz.

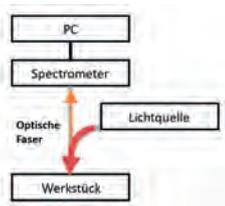


Abb. 4 Messaufbau mit dem Avantes Spektrometer

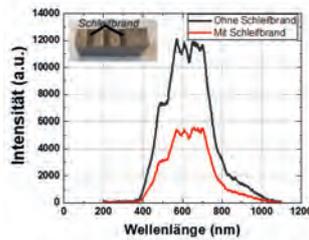


Abb. 5 Das gemessene Spektrum mit einem Spektrometer für das Werkstück mit und ohne Schleifbrand (trockener Zustand)

### a. Entwicklung eines optischen Sensors

Für den vorläufigen Proof of Concept wurde eine einfache Halogenlampenquelle und ein Spektrometer verwendet, um das Reflexionsspektrum vom Werkstück (s. Abbildung 3) aufzunehmen. Das Messkonzept ist in Abbildung 4 dargestellt. Das aufgezeichnete reflektierte Spektrum von der Werkstückoberfläche mit und ohne Schleifbrand ist in Abbildung 5 dargestellt. Das Auftreten des Schleifbrandes verändert die Oberflächenmorphologie in der Randzone, wodurch sich die Reflexionseigenschaften der Oberfläche verändern. Dieser besondere Effekt wird durch den optischen Sensor zur Erkennung des Schleifbrandes ausgenutzt. Daher ist in Abbildung 5 zu sehen, dass die Intensität des Reflexionsspektrums bei Vorhandensein des Schleifbrandes abnimmt. Da die optische Messung bei der Erkennung des Schleifbrandes vielversprechend erscheint, wurde ein einfacher, „stand-alone“ optischer Sensor mit LEDs als Lichtquelle und Fotodetektor entwickelt und hergestellt, wie in Abbildung 6 dargestellt. Für die Vorversuche wurden Messungen mit einer einzelnen leuchtenden LED aus den verfügbaren roten, grünen und blauen

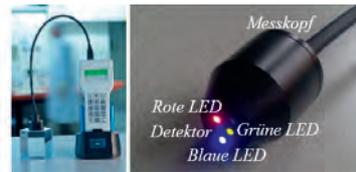


Abb. 6 (links) Minispektrometer und (rechts) der Messkopfaufbau mit 3 LEDs. Der Detektor befindet sich in der Mitte

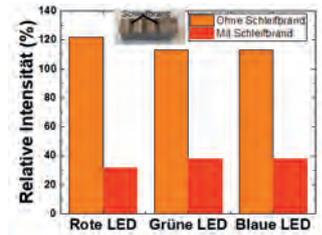


Abb. 7 Die gemessene Intensität mit dem Minispektrometer (3 LEDs, trockener Zustand)

LEDs im Sensormesskopf durchgeführt und die reflektierte Intensität wie in Abbildung 7 dargestellt aufgezeichnet. Wie in Abbildung 5 nimmt die aufgezeichnete Intensität bei Vorhandensein von Schleifbrand auf dem Werkstück ab. Mit diesen Voruntersuchungen scheint der Einsatz eines optischen Sensors für die zerstörungsfreie Prüfung von Schleifbrand eine vielversprechende und einfache Prüfmethode zu sein. Darüber hinaus ist es auch möglich, den Grad des Schleifbrandes in Bezug auf die reflektierte Intensität zu kategorisieren.

### b. Entwicklung eines mikrotechnisch gefertigten Wirbelstromsensors

Das Auftreten des Schleifbrandes verändert nicht nur die Oberflächenmorphologie, sondern führt auch zu einer Gefügeveränderung in der Randzone. Dadurch werden auch die magnetischen und elektrischen Eigenschaften verändert. Die Änderung der magnetischen Permeabilität ist für die ferromagnetischen Werkstücke vorwiegend, deshalb kann durch den Einsatz des Wirbelstromsensors eine hochempfindliche Erkennung des Schleifbrandes erreicht werden. Die vorhandenen Sensoren sind jedoch nicht empfindlich genug, um Schleifbrand im Mikrometerbereich zu erkennen. Daher wird in dieser Arbeit über die Verwendung der mikrogefertigten Mikrospulen berichtet. Das Konzept wird zunächst in COMSOL Multiphysics unter Verwendung des AC/DC-Moduls für verschiedene Spulengeometrien simuliert.

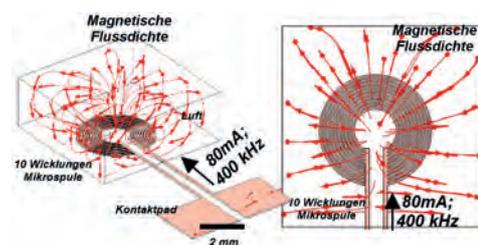


Abb. 8 Simulierte magnetische Flussdichte der Mikrospule mit 10 Wicklungen, Frequenz: 400 kHz und Strom 80 mA

Abbildung 8 zeigt das simulierte Profil der Mikrospule („Non-Spiral“ Geometrie) mit magnetischem Fluss als Funktion des wechselnden Stroms bei 400 kHz Frequenz. Darüber hinaus zeigt Abbildung 9 die aus Nickel-Kobalt-Legierungen hergestellte Mikrospule mit 50 µm Linienbreite und 20 µm Abstand dazwischen. Die hergestellte Mikrospule wurde am Werkstück, wie in Abbildung 3 gezeigt, mit einem LCR-Messgerät charakterisiert. Die Frequenz wurde von 10 kHz bis 10 MHz gesweept und die aufgezeichnete Mikrospulenimpedanz als Funktion der Werkstückoberfläche mit und ohne Schleifbrand ist in Abbildung 10 dargestellt.

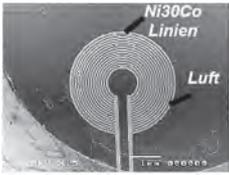


Abb. 9 Mikrotechnisch hergestellte planare Mikrospule aus Nickel-Kobalt (Ni30Co) Legierungen mit einer „Non-Spiral“ Geometrie

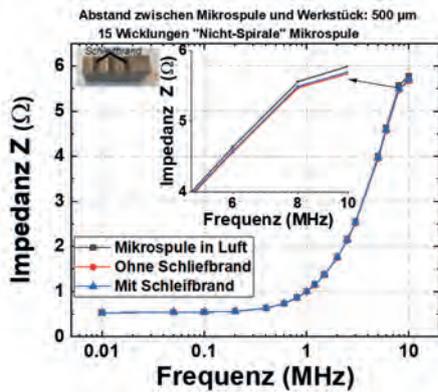


Abb. 10 Impedanz der "Non-Spiral"-Mikrospule mit 15 Windungen als Funktion der Werkstückoberfläche

Die Mikrospulen zeigen ein typisches induktives Verhalten bis zu einer gemessenen Frequenz von 10 MHz. Darüber hinaus wird die Impedanzvariation ( $\Delta Z$ ) aufgrund des Vorhandenseins von Schleifbrand in Abbildung 11 gezeigt, wobei sie als Funktion der Frequenz zunimmt. Daher zeigt sie die oberflächennahe Natur des Schleifbrandes an, da bei höheren Frequenzen die Eindringtiefe des Wirbelstroms abnimmt. Aus diesen Vorversuchen scheint daher der Einsatz der mikrotechnisch gefertigten Wirbelstromsensoren ein vielversprechender Ansatz zu sein, um den Schleifbrand zu erkennen und gleichzeitig die Tiefenprofilinformation der Randzone zu liefern. Darüber hinaus kann mit diesen Spulen die Detektionsauflösung erhöht und gleichzeitig aufgrund ihrer geringen Größe die Integration in die Schleifmaschine erleichtert werden.

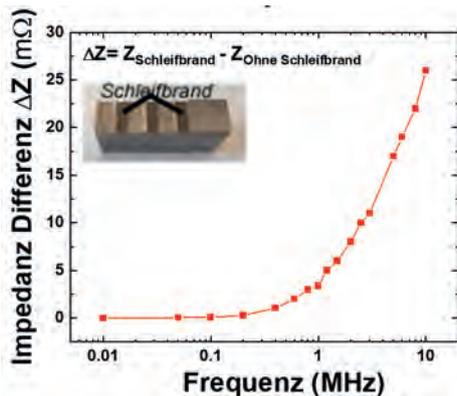


Abb. 11 Impedanzdifferenz  $\Delta Z$  als Funktion der Frequenz

### 3. Zusammenfassung und Fazit

Eine Echtzeit-Prozessüberwachung für den Schleifprozess unter Verwendung der mikrotechnisch gefertigten Sensorfusion aus optischem und Wirbelstromsensor wird vorgestellt. Im Hinblick auf den intelligenten Schleifprozess im Sinne von Industrie 4.0 wird ein

Cloud-Computing-basiertes System in die Schleifmaschine integriert, das die Sensordaten überwacht und die Schleifprozessparameter für einen effizienten Schleifprozess steuert. Die Verwendung des Sensorfusionskonzepts führt zu einer hochgenauen Zerstörungsfreien Prüfung des Schleifbrandes. Dabei arbeiten die vorgeschlagenen optischen und Wirbelstromsensoren komplementär zueinander. Der optische Sensor liefert die Oberflächeninformation, während der Wirbelstromsensor die Tiefenprofilinformation der Randzone liefert. Der Proof of Concept mit beiden Sensoren für ZfP von Schleifbrand wird vorgestellt. Darüber hinaus werden die Sensoren weiterentwickelt und in die Schleifmaschine integriert.

### Danksagung

Die Forschung wurde durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE/EFRE), im Rahmen des Förderprogramms HAW-KMU (32-7545.20/27/57) finanziert. Die Autoren danken der Europäischen Union, der Landesbank Baden-Württemberg in Deutschland für die finanzielle Unterstützung und der ibg Prüfcomputer GmbH für die zur Verfügung gestellten Geräte zur Wirbelstromanalyse.



Kontakt: mes@hs-furtwangen.de

## Qualität hören - Das Gehör des Technikers für die Produktion 4.0

Tobias Clauß<sup>1</sup>, Judith Liebetrau<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer IDMT, Ilmenau

Sie alle kennen Situationen, in denen sie die Qualität eines Produktes oder Prozesses anhand des Funktionsgeräuschs bewerten. Vielleicht hören sie bei der Fahrt mit ihrem Auto seit kurzem ein atypisches Geräusch, welches sonst nicht da war. Oder die Spülmaschine klingt neuerdings nicht so wie üblich; ist sie vielleicht defekt? Die Beispiele verdeutlichen, dass die Veränderung eines Geräusches die menschliche Aufmerksamkeit beeinflussen und eine Handlung auslösen kann. Lassen sich die kognitiven Fähigkeiten des Menschen in eine akustische Prüfmethode überführen?

Akustische Prüfmethode sind etablierte Verfahren zur Messung von Qualität. So werden Körperschallanalysen, Ultraschallprüfungen oder auch die Schallemissionsprüfung herangezogen, um eine zerstörungsfreie Prüfung von Produkten oder Prozessen vorzunehmen. Die Umsetzung der menschlichen Schallwahrnehmung in eine Prüfmethode und die Überführung dieser in ein technisches System ist Gegenstand aktueller Forschung am Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT.

### Menschliche Schallwahrnehmung als System

Das menschliche Hörvermögen liegt im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 16 kHz. In der Literatur ist oftmals auch der Bereich zwischen 20 Hz und 20 kHz angegeben. Mit zunehmenden Alter sinkt die obere Grenze. Erkrankungen oder schädliche Umwelteinflüsse (etwa die Exposition hoher Schalldrücke) können zu einem (Teil-)Verlust der Hörwahrnehmung führen. Zudem ist die menschliche Schallwahrnehmung positions- und frequenzabhängig.

Es existieren diverse Modelle, welche die Schallwahrnehmung vom physikalischen Reiz über die neurologischen Abläufe hin zur eigentlichen Motorik (z. B. das Zuhalten der Ohren) abbilden. Prozesse in den unterschiedlichen Gedächtnisarten des Menschen – etwa der Abgleich einer Sinneswahrnehmung mit bereits gemachten Erfahrungen – spielen eine wesentliche Rolle bei der Qualitätsbewertung durch den Menschen.

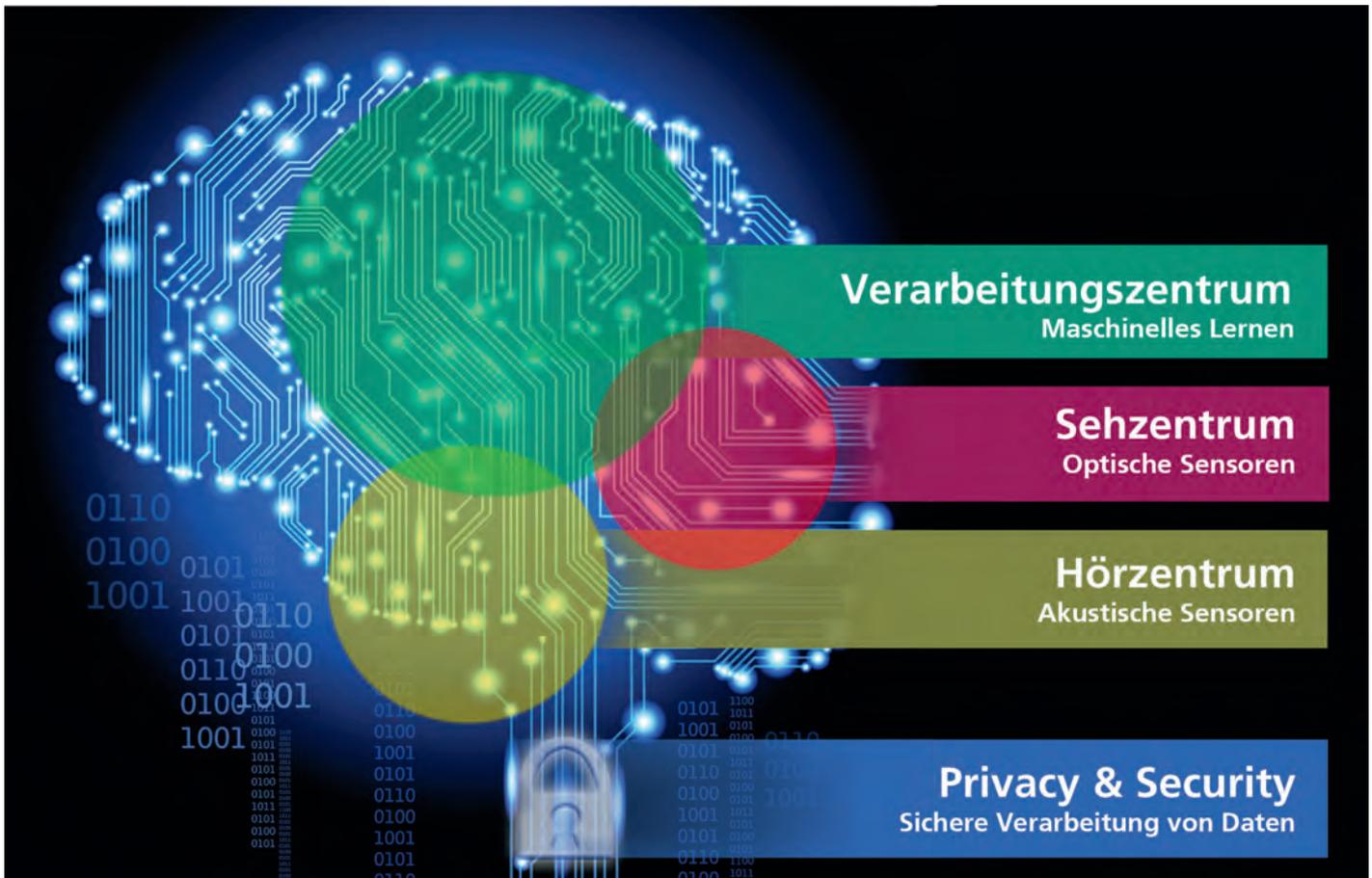


Abbildung 1 – Die systemtechnische Nachbildung menschlicher Entscheidung für die Qualitätsbewertung auf Basis hörbarer Schallinformationen setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, lassen sich in einem Systementwurf die menschlichen Sinne durch die Wahl entsprechender Sensorik darstellen. Die Kognition des Menschen entspricht dabei einer Datenverarbeitung. Vor dieser erfolgt immer eine adäquate Vorverarbeitung der Datenströme. Die Güte und Geschwindigkeit der Datenvorverarbeitung stehen dabei immer in direktem Zusammenhang mit der Rechenleistung der eingesetzten Hardware. Elementar bei der Datenverarbeitung ist die technische Abbildung des menschlichen Erfahrungswissens. Zielführend sind hier häufig Methoden des maschinellen Lernens. Nach aktuellem Stand der Technik bedarf es eines Anlernens dieser Klassifikations-Algorithmen durch den Menschen. Der Umfang des Anlernens steht immer in direkter Abhängigkeit zu der Komplexität der Prüfaufgabe. Die notwendige Datenmenge zum Anlernen der Algorithmen ist nicht pauschal anzugeben oder seriös quantifizierbar. Vielmehr ist diese anwendungsspezifisch und stark mit der Qualität der Daten verbunden. Zu jedem Zeitpunkt der maschinellen Datenverarbeitung müssen zudem die Datensicherheit aber auch der Datenschutz gewährleistet sein. Bei der sensorischen Erfassung des Hörschalls, klassischerweise mit Mikrofonen oder Vibrometrie, muss insbesondere sichergestellt sein, dass ein gesprochenes Wort nicht aufgezeichnet beziehungsweise nicht aus dem Signal rekonstruiert werden kann. Hier lautet ein bewährter Ansatz "Privacy by design", also der systeminhärente Schutz personenbezogener Daten.

### Anwendungsbeispiele

Die voran beschriebene Herangehensweise findet allgemein in zwei wesentlichen Szenarien ihre Anwendung. Für die vorausschauende Wartung lässt sich die Technologie ebenso einsetzen, wie für die Überprüfung von Produktqualität während des Produktionsprozesses - zum Beispiel in Form von Band-Ende-Tests. In der Industrie gibt es nach wie vor viele Situationen, in welchen erfahrene Mitarbeitende ihr geschultes Gehör zur Situationsbeurteilung einsetzen. Erfolgreich abgeschlossene Projekte gibt es aus den Bereichen Automobilindustrie, der Versorgungstechnik, der Energiewirtschaft oder der Logistikbranche. Ein Forschungsschwerpunkt der Ilmenauer Wissenschaftler liegt im Bereich der Fertigungstechnik. Hier forschen sie an Lösungen zur akustischen Qualitätskontrolle automatisierter Füge- und Zerspanungstechniken.

### Herausforderungen und Forschungsbedarfe

Die in der Theorie beschriebenen und vorausgehend skizzierten Ansätze bringen einige Herausforderungen mit sich. Diese beziehen sich sowohl auf rein technische Aspekte als auch auf die Akzeptanz gegenüber maschineller Lernverfahren (ML) beziehungsweise auf Techniken aus dem Bereich der "Künstlichen Intelligenz". Das Finden entsprechender Lösungswege ist Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. So ist beispielsweise die Wahl des richtigen Mikrofons, dessen Positionierung und Ausrichtung der erste Erfolgsfaktor für die Umsetzung einer automatisierten akustischen Qualitätsbewertung. Hier gilt die Maxime, Störschall schon möglichst bei der Datenaufzeichnung auszublenden. Zudem ermöglicht der Einsatz mehrerer Mikrofone eine Signalbereinigung von Störeinflüssen etwa durch eine algorithmische Quellentrennung oder eine räumliche Steuerung des Sensitivitätsverhaltens des Mikrofons. Die rein technische Integration der Mikrofone und der nach gelagerten Signalverarbeitung in bestehende Infrastruktur ist meist ohne größere Aufwände möglich. Komplex hingegen ist die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen in Bezug auf Kontrolle und Steuerung der maschinellen Lernverfahren. Sowohl dem

erfahrenen Datenwissenschaftler als auch dem Nicht-KI-Experten muss es möglich sein, mit den implementierten Algorithmen zu interagieren (Stichwort „Erklärbare KI“). Am Fraunhofer IDMT entsteht unter diesem Aspekt eine Benutzerschnittstelle, mit welcher die vorab erläuterten Barrieren abgebaut werden. Denn nur wenn die ML-basierten Techniken zur akustischen Qualitätskontrolle bedienbar, nachvollziehbar und wirtschaftlich sind, werden sich diese langfristig etablieren lassen.

Als Forschungsinstitut ist das Fraunhofer IDMT immer auf der Suche nach neuen Herausforderungen. Sollten also auch Sie eine Maschine haben, die „nicht rund“ läuft, es irgendwo klappert oder zischt, dann nehmen Sie gern völlig unverbindlich Kontakt zu uns auf.

Kontakt: tobias.clauss@idmt.fraunhofer.de

## Erste Schritte in Richtung ZfP 4.0

Kai Lichtenberg<sup>1</sup>, Maximilian Topp<sup>1</sup>

<sup>1</sup> sentin GmbH, Bochum

Die Zerstörungsfreie Prüfung wird zunehmend digitaler, aber für viele Unternehmen ist die ZfP 4.0 noch Zukunftsmusik. Doch was genau bedeutet ZfP 4.0 überhaupt und was sind die Vorgänger? Was sind die Vorteile für Prüfer und Auswerter? Wie kann man unkompliziert von den Vorteilen eines digitalen Prozesses profitieren?

### Welche Generationen der ZfP gibt es?

Laut Fachliteratur lassen sich die ZfP-Generationen 1 & 2 mit der Verwendung von einfachen Werkzeugen und analogen Prüfverfahren sowie Hilfsmitteln zur Verbesserung der menschlichen Wahrnehmung charakterisieren. Auf der Schwelle zur Generation 3.0 stehen heute viele Unternehmen. Es werden zunehmend Prozesse digitalisiert wie bspw. die Erfassung von Aufnahmen oder die Archivierung. Die ZfP 4.0 ist die darauffolgende Generation, die moderne Technologieentwicklungen kombiniert und einen Mehrwert für Unternehmen, Prüfer und Auswerter generiert. Einige dieser Entwicklungen sind bspw. Simulationen, schnelle Daten-Verbindungen (5G) und Roboter. Dieser Artikel greift jedoch eine weitere Entwicklung auf und zeigt, wie künstliche Intelligenz (KI) den Auswertungsprozess vereinfachen und sicherer machen kann.

### Wo kann künstliche Intelligenz (KI) für die ZfP 4.0 angewendet werden?

Die Auswertung von Aufnahmen aus verschiedenen ZfP-Verfahren ist eine anspruchsvolle und sicherheitskritische Aufgabe – egal, ob UT, RT, DR, CT oder eine andere Disziplin. Wir, die **sentin GmbH**, glauben daran, dass der menschliche Auswerter mit dem richtigen Werkzeug sicherer und schneller arbeiten kann. Die folgenden Abschnitte thematisieren daher einige Anwendungsfälle, wo eine KI die ersten Schritte in Richtung ZfP 4.0 machen könnte.

### Bildverbesserung und Entrauschen

Die fehlerfreie Interpretation von Aufnahmen hängt neben dem menschlichen Auswerter auch von der Qualität des Bildes ab. Ist ein Bild über- oder unterentwickelt oder weist ein zu hohes Rauschen auf (Stichwort: Signal-Noise-Ratio), ist es häufig unbrauchbar. Dies kann viele Ursachen haben, wie die komplexe Geometrie eines Bauteils, die fehlerhafte Aufnahme oder die Qualität der Hardware. Was wäre jedoch, wenn man nachträglich Bilder verbessern könnte?

Klassische KI-basierte Erkennungssysteme werden häufig für die Bildauswertung genutzt. Sie lokalisieren Dinge und geben eine Erkennungswahrscheinlichkeit eines Fehlers aus. Einen anderen Ansatz können sogenannte Image-To-Image Modelle darstellen, die als Ausgangsgröße ein Bild erzeugen.

Im Bereich der Fotografie können solche Modelle z. B. zur Qualitätsverbesserung bei schlechten Lichtverhältnissen genutzt werden. **sentin** nutzt diese Technologie zur Bildverbesserung in der industriellen digitalen Radiografie/Radioskopie.

Abbildung 1 zeigt für das Beispiel der Bildentrauschung die Stärken eines solchen KI-Systems im Vergleich zu klassischen Verfahren: Nur ein KI-System kann die Entrauschung des Bildes spezifisch anhand räumlich ausgedehnter Merkmale auf dem Bild vornehmen, d. h. **unterschiedlich und gezielt an verschiedenen Stellen eines Bildes wirken**. Die Abbildung zeigt dieses Vermögen insbesondere anhand der unten links an der Schweißnaht befindlichen Ungängen. Diese

sind im verrauschten Bild mit dem bloßen Auge im Wesentlichen nicht mehr erkennbar. Die KI kann jedoch den vorhandenen minimalen Informationsgehalt im verrauschten Bild zu dem auf der rechten Seite zu sehenden Bild rekonstruieren.

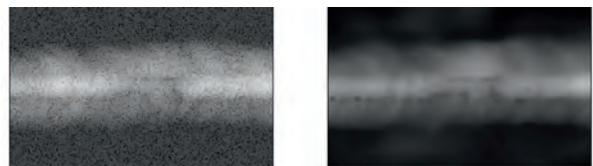


Abbildung 1: Verrauschtes Röntgenbild einer Schweißnaht und durch ein KI-Modell rekonstruierte Version des Bildes. Insbesondere die Wiederherstellung der Ungängen im mittleren/unteren Bereich der Schweißnaht zeigt das außergewöhnliche Vermögen von KI-basierten Ansätzen, auch minimale Signale finden und wiederherstellen zu können.

Neben diesem Beispiel eines stark verrauschten Bildes kann das Verfahren auch genutzt werden, um wesentlich feinere Bildverbesserungen vorzunehmen.

Abbildung 2 zeigt eine einzelne CT-Schichtaufnahme eines Probekörpers. Es ist nicht möglich, das Rauschen im Grauwertbereich des Bildes visuell abzubilden. Stattdessen wird das Bild hier mit einer sich wiederholenden Heatmap-Farbskala dargestellt. Dies verschlechtert zwar die Abbildung der Bauteilstruktur, zeigt jedoch deutlicher kleine Unterschiede im Wertebereich des Detektors. Auf der rechten Seite des Bildes ist eine in höherer Geschwindigkeit gemachte Aufnahme zu sehen, die dadurch leicht verrauscht ist. Auf der linken Seite ist die von einem KI-Modell rekonstruierte Version dieses Bildes zu sehen. **Die Entrauschung entspricht hier einer in langsamerer Geschwindigkeit und höherer Qualität gemachten Aufnahme**. Diese Technologie kann es somit ermöglichen, eine in höherer Geschwindigkeit (und niedrigerer Qualität) gemachte CT-Aufnahme zu verbessern und so den **Durchsatz einer CT-Anlage zu erhöhen**.

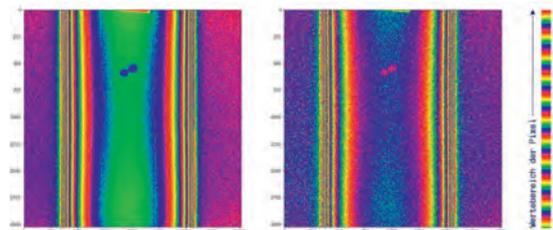


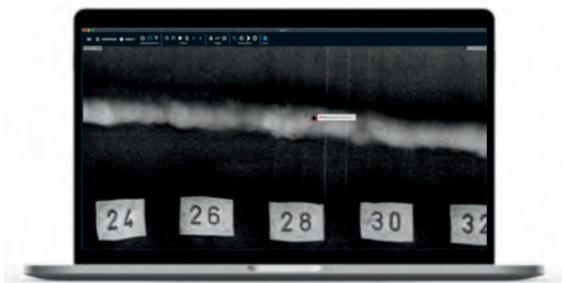
Abbildung 2: Minimal verrauschte Schichtaufnahme eines Probekörpers (rechts) und durch KI-System verbesserte Variante des Bildes (links). Das Bild ist mit einer sich wiederholenden Heatmap-Farbskala abgebildet, um feine Unterschiede im Wertebereich sichtbar zu machen. Probekörper Auflösung Poren in Aluminium | Mit freundlicher Genehmigung von Hrn. Hofmann, Volkswagen AG

Wer sich schon einmal mit KI-Anwendungen beschäftigt hat, weiß, dass Referenzdaten häufig eine Schwierigkeit darstellen. Bei den vorgestellten Ansätzen ist die Akquise von Daten wesentlich einfacher. Es muss keine hohe Anzahl von Bildern gesammelt und annotiert/eingeordnet werden, wie es bei der Klassierung von Fehlern der Fall wäre. **Soll z. B. ein Modell trainiert werden, das verrauschte Aufnahmen verbessert, müssen lediglich Bilder in der Version mit wenig Rauschen vorliegen.** Die neuronalen Netzwerke, die für diese Art von Aufgabe verwendet werden, haben eine so enorme Kapazität, die nötigen Zusammenhänge abzubilden, dass sie bei der Entwicklung eine untergeordnete Rolle spielen. Wesentlich wichtiger ist die sogenannte Loss-Funktion, die im Rahmen des Trainingsprozesses beschreibt, ob eine gefundene Lösung gut ist. Die klassischen mathematischen Verfahren reichen nicht aus, um so subtile Fehlerbilder wie die Ungängen in Abbildung 1 dediziert zu berücksichtigen. Sentin nutzt zur Beschreibung der Güte eines solchen Modells ein weiteres neuronales Netzwerk, das diese Feinheiten berücksichtigen kann.

Wir glauben daran, dass die Bildverbesserung maßgeblich dazu beitragen kann, Prüfungen sicherer und einfacher zu machen, sodass Zeit und Ressourcen effizient eingesetzt werden können.

### Automatisch Ungängen erkennen

Wie zuvor erwähnt, gibt es auch den Ansatz, Aufnahmen von einer künstlichen Intelligenz auswerten zu lassen. Der größte Vorteil eines solchen Systems ist eine objektive zweite Meinung und mehr Zeit für kritische Fälle. Im Gegensatz zu regelbasierten Ansätzen der Bildverarbeitung kann ein KI-Modell sehr komplexe Fehlerbilder automatisch lernen und verhält sich **wie ein Prüfer oder Auswerter, der bereits viele Tausend Aufnahmen gesehen hat.**



Bei der Entwicklung eines solchen Modells müssen verschiedene Fehlertypen antrainiert werden, die das System dann automatisch lernt. Eine Schweißnaht z.B. kann innere und äußere Fehler aufweisen. Einige sind z.B. Risse, Poren, unvollständige Durchdringung, Spritzer oder Einschlüsse. Durch richtig klassierte Daten, die mit Bounding Boxes (Markierungen, wo im Bild der Fehler liegt) versehen sind, lernt das System, wie eine gute Schweißnaht aussieht. Der Computer kann dann Dinge analysieren, die der Mensch nur mit Hilfsmitteln erkennen kann. Ein Beispiel ist der darstellbare Farbbereich eines normalen Monitors. Häufig haben radiographische Aufnahmen einen Grauwertskala von über 60.000 Nuancen, der Monitor kann jedoch nur 256 unterschiedliche darstellen. Beim Training kann dieser Bereich jedoch vollständig berücksichtigt werden und der Computer so noch präziser arbeiten und alles für den Auswerter vorbereiten und das meistens in wenigen Millisekunden pro Bild.

Für das Training gilt: je mehr Daten zur Verfügung stehen, desto besser. Durch sogenanntes Transfer Learning, bei dem ein Modell, das bereits eine ähnliche Aufgabenstellung lösen kann, als Ausgangs-



punkt genutzt wird, kann bereits mit wenigen Dutzend Beispielen ein hochgenaues Modell trainiert werden. Für einen Anwendungsbereich aus dem Luftfahrtbereich haben unsere entwickelten Modelle bereits eine **Genauigkeit von über 99,9 Prozent** erreicht.

### Was gibt es noch?

Neben der Integration von KI in den Prüfprozess kann die Digitalisierung der ZfP weitere Vorteile bieten. Ein Aspekt kann die digitale Datenverarbeitung und Archivierung sein, die es einfacher macht, Berichte zu verfassen oder aufzubewahren. Wird diese Datenhaltung mit der digitalen Auswertung kombiniert, kann durch schnelle Bandbreiten und Cloud-Anwendungen ein großer Mehrwert generiert werden, weil **Auswertungen auch im Remote-Office** ausgeführt werden können z. B. auf zwei verschiedenen Kontinenten.

Genauso können mehrere Aufnahmen parallel ausgewertet werden, sowohl durch Menschen (an verschiedenen Rechnern) als auch durch den Computer. Moderne Recheneinheiten, meist Grafikkarten, erlauben es, mehrere Bilder gleichzeitig zu verarbeiten. Muss eine Prüfung nicht nach einem festen Normwerk z. B. in einer Produktionslinie stattfinden, lässt sich so **eine Vollautomatisierung anstreben**. Ist eine menschliche Bewertung notwendig, kann eine KI z. B. **für den menschlichen Auswerter eine Vorsortierung** durchführen und bei schwierigen Fällen eine Benachrichtigung abgeben.

Wagt man einen Blick über den Tellerrand, kann die ZfP 4.0 den Prüfprozess nachhaltig verändern. Gerade durch die jüngsten Entwicklungen, bei denen viele Menschen angehalten sind, von zuhause zu arbeiten, oder alte Prozesse digitalisiert werden, wird deutlich, dass Technologie einiges vereinfachen kann und jahrelange Skepsis innerhalb kurzer Zeit abgebaut werden kann.

### Wie kann ich diese Technologie heute nutzen?

Die gezeigten Anwendungen sind ein wichtiger Schritt in der Digitalisierung und Verbesserung der ZfP. Für den Fall, dass Sie nun über den Einsatz dieser Technologie nachdenken, möchten wir Sie gerne unterstützen. Daher haben wir es uns als Ziel gesetzt, die visuellen und bildbasierten Inspektionen mit Softwarelösungen sicherer und schneller zu machen. Wir glauben außerdem daran, dass die Digitalisierung einer Branche nur funktioniert, wenn man die Domänenexperten mit ins Boot holt.

Deshalb verfolgen wir den Ansatz, dass Sie mit uns gemeinsam Ihre Lösungen konfigurieren. Anhand von vorhandenen Daten und Modellen haben Sie die Möglichkeit, eine maßgeschneiderte Software für Ihre Auswertungsprozesse zu erhalten, ohne Experte für KI sein zu müssen. Langfristig wollen wir Ihnen die Möglichkeit geben, Ihre Erkennungs- oder Bildverbesserungsmodelle selbst so genau einzustellen, wie Sie wollen.

Kontakt: dominik.nestler@sentin.ai

## Digitale Zwillinge metrologischer Röntgencomputertomografen für die numerische Messunsicherheitsbestimmung

Florian Wohlgemuth<sup>1</sup>, Frederike Wolter<sup>1</sup>, Tino Hausotte<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

**KURZFASSUNG** | Für die dimensionelle Messtechnik kann die aufgabenspezifische Messunsicherheit nach der Richtlinie VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 aufwändig mit zwanzig Mal wiederholten experimentellen Messungen an kalibrierten Bauteilen bestimmt werden. Für andere industrielle Messaufgaben mit Röntgencomputertomografen, wie z. B. die Porendetektion, ist die Angabe einer Messunsicherheit nach Stand der Technik nicht möglich. In beiden Fällen wäre eine numerische Messunsicherheitsbestimmung grundsätzlich möglich. Diese ist für die dimensionelle Messtechnik mit taktilen Koordinatenmessgeräten bereits Stand der Technik. Dazu wird ein digitaler Zwilling, also eine ausreichend realitätsgetreue digitale Repräsentation des realen Messgeräts bzw. der realen Messanordnung, benötigt. Dieser muss die komplette Messkette von dem Bauteil als Eingangsgröße bis zum Messwert als Ausgangsgröße abbilden. Der vorliegende Beitrag präsentiert einen Ansatz zur Umsetzung des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) Supplements 1 (numerische Messunsicherheitsbestimmung unter Benutzung einer Monte-Carlo-Methode) für Röntgencomputertomografie-Messungen sowie mit diesem Ansatz verbundene Herausforderungen und Problematiken. Dabei wird insbesondere die Frage der korrekten Behandlung beobachteter systematischer Messabweichungen, die nach GUM korrigiert werden sollen, kritisch diskutiert. Weiterhin wird ein Überblick über die Herausforderungen bei der Erstellung eines für die numerische Messunsicherheit notwendigen digitalen Zwillings gegeben. Für die Simulation der Röntgendurchstrahlung wird die Software aRTist 2 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) verwendet.

### Einführung

Die industrielle Röntgencomputertomografie ist ein wichtiges Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung und gewinnt auch in der dimensionellen Messtechnik zur Konformitätsprüfung mit einer geometrischen Produktspezifikation an Relevanz. Für beide Anwendungen ist nach momentanem Stand der Technik eine Messunsicherheitsbestimmung jedoch aufwändig (im Fall des dimensionellen Messens) bis nicht möglich (im Falle einiger zerstörungsfreier Prüfungen wie z.B. Porendetektion). In beiden Fällen bietet das GUM Supplement 1 [1] prinzipiell eine Methodik, wie diese Messunsicherheit bestimmt werden könnte. Dazu wird eine realistische Simulation des Messprozesses benötigt – also ein digitaler Zwilling des echten Computertomografie-Systems (CT). Dieser Beitrag beschreibt, auf welche Weise das GUM Supplement 1 zur Messunsicherheitsbestimmung bei industriellen CT-Messungen angewendet werden könnte und welche Herausforderungen es bei der Implementierung eines digitalen Zwillings gibt.

Abschnitt 1 des Beitrags diskutiert die Anwendung des GUM Supplement 1 für industrielle Röntgencomputertomografie-Messungen. Abschnitt 2 gibt einen Überblick über die Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Erstellung eines digitalen Zwillings eines Röntgencomputertomografie-Systems. Abschnitt 3 beschreibt technisch, wie in aRTist 2 Aufnahmegeometrievariationen, die während einer CT-Messung auftreten können und nach GUM Supplement 1 (beschrieben in Kapitel 1) simulativ nachgebildet werden sollen, berücksichtigt werden können.

### 1. Numerische Messunsicherheitsbestimmung nach GUM Supplement 1

Das Supplement 1 (S1) des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [1] beschreibt eine Methodik zur numerischen Messunsicherheitsbestimmung mit einem Monte-Carlo-Ansatz. Diese wird speziell empfohlen, falls

a) es schwierig/unpraktikabel erscheint, die nach Standard-GUM-Vorgehen [2] benötigten partiellen Ableitungen der Messmodelgleichung zu berechnen.

b) die Messmodelle zu komplex werden.

Beides ist für dimensionelle Messungen mit Computertomografie-Systemen (CTs) zutreffend, weshalb eine Anwendung der Methodik des Supplement 1 grundsätzlich sinnvoll ist.

Die Methodik des Supplement 1 zielt darauf ab, die kumulierte Verteilungsfunktion der Messgröße zu bestimmen. Aus dieser können dann die Standardabweichung sowie ein Überdeckungsintervall für die Messgröße – ein Intervall, innerhalb dessen sich der „wahre“ Wert der Messgröße mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit befindet – abgeleitet werden<sup>1</sup>.

Dazu wird in allgemeiner Form ein Modell benötigt, das Eingangsgrößen der Messung,  $X_1, \dots, X_N$ , einen Messwert  $Y$  zuordnet:

$$X_1, \dots, X_N \mapsto Y$$

Ein digitaler Zwilling (siehe Abschnitt 2) könnte dies für die CT potentiell leisten. Als erster Anhaltspunkt für die Eingangsgrößen kann Tabelle 2 der Richtlinie VDI/VDE 2630 Blatt 1.2 [3] dienen. Für jede Eingangsgröße, die während der Messung in einem relevanten Maß variiert, muss diese Variation durch eine Verteilungsfunktion beschrieben werden. Eine empirische Verteilungsfunktion für  $Y$  kann dann auf Basis eines Monte-Carlo-Samplings des Modells erhalten werden. Für jeden Samplingschritt werden hierbei für jede der variierenden Eingangsgrößen zufällige Werte aus der zugehörigen Verteilungsfunktion gezogen und mithilfe dieser ein Messwert berechnet. Aus allen gesammelten Messwerten kann die empirische kumulierte Verteilungsfunktion gebildet werden. Ein typisches 95 % Überdeckungsintervall kann dann z. B. symmetrisch als Differenz des 2,5 %-Werts und des 97,5 %-Werts der kumulierten Verteilungsfunktion gebildet werden. Die Verwendung eines Erweiterungsfaktors  $k$  wie im normalen GUM-Verfahren [2] ist nicht notwendig.

<sup>1</sup> Ein Erweiterungsfaktor  $k$ , wie er im normalen GUM-Verfahren und in der Richtlinie VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 verwendet wird, wird in der Methodik des Supplement 1 standardmäßig nicht benötigt (5.11.6 e) in [1]).

Zur Bestimmung sollen laut S1 [1] ca.  $10^6$  Samplingschritte berechnet werden. Da für diesen Anwendungsfall ein Samplingschritt der Simulation einer kompletten CT-Simulation entspricht, ist dies aufgrund der Rechenzeiten der momentan verfügbaren CT-Simulationssoftware nicht realisierbar. Die Verwendung einer geringeren Anzahl an Samplingschritten geht zwangsläufig mit einer erhöhten statistischen Unsicherheit der bestimmten Werte einher. Im Anwendungsfall des taktilen virtuellen Koordinatenmessgerätes wurde daher ein dynamisches Stabilitätskriterium zur Wahl der Samplingschrittzahl entwickelt [4]. Für die Anwendung für CT-Systeme stehen analoge Entwicklungen noch aus; Vorarbeiten zeigen jedoch, dass die Samplingschrittzahl durchaus als problematisch zu bewerten ist und eventuell für ein stabiles Ergebnis bei einem *BruteForce*-Vorgehen sehr viel Rechenzeit notwendig ist [5].

Eine für die CT-Messtechnik weitere Problematik ist das Auftreten von systematischen Messabweichungen (siehe VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [6]). Der GUM und das S1 gehen grundsätzlich davon aus, dass systematische Messabweichungen korrigiert werden – dies ist jedoch bei CT-Messungen nicht immer zuverlässig möglich. Die in VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [6] angegebene Alternative zur Korrektur, die systematische Messabweichung analog zu anderen Unsicherheitsbeiträgen quadratisch im Unsicherheitsbudget zu berücksichtigen, ergibt Messunsicherheiten, die metrologisch nicht zufriedenstellend sind [7]. Auch im Monte-Carlo-Verfahren nach Supplement 1 ist beim Auftreten von unkorrigierten systematischen Messabweichungen eine sinnvolle Angabe eines Überdeckungsintervalls problematisch [5]. Aus diesem Grund sollte angestrebt werden, bei Anwendung von Simulationen zur Monte-Carlo-Messunsicherheitsbestimmung nach Supplement 1 systematische Messabweichungen über die Simulation (z. B. durch die mittlere Abweichung der Simulation zum Sollwert) abzuschätzen und zu korrigieren. Dies erfordert allerdings, in Übereinstimmung mit GUM und VDI/VDE 2630 Blatt 2.1, für die Berechnung der Messunsicherheit des korrigierten Wertes einen Beitrag der Korrekturunsicherheit im Messunsicherheitsbudget. Diese Unsicherheit der CT-Simulation zu spezifizieren ist allerdings nicht trivial und erfordert weitere Forschungsanstrengungen. Welche Einflussgrößen  $X_k$  für dimensionelle Messungen mit CT-Systemen mit relevanter Schwankung zu modellieren sind, ist nicht abschließend geklärt. In Vorarbeiten wurde die Systemgeometrie zwischen jeder Projektion zufallsbasiert modifiziert, um geometrische Driften und Positionierungsunsicherheiten zu simulieren [8,9]. Die technische Umsetzung ist in Abschnitt 3 beschrieben.

## 2. Digitale Zwillinge für CT-Systeme

Abb. 1 zeigt die Prozesskette einer realen CT-Messung. Weite Teile der Messung werden im Computer – also bereits virtuell – durchgeführt. Daher sind für einen digitalen Zwilling eines echten CT-Systems nur Teile der realen Messkette virtuell nachzubilden – weitere Teile können aus der realen Messung übernommen werden. Konkret müssen Röntgenröhre, Bauteil und Röntgendetektor virtuell nachgebildet werden (Abschnitt 2.1, 2.2 und 2.3). Weiterhin muss der Durchstrahlungsprozess korrekt simuliert werden und eventuell eine Flatfieldkorrektur durchgeführt werden (Abschnitt 2.4).

Auf Basis der korrigierten, simulierten Projektionen kann dann, wie bei der realen Messung, die Rekonstruktion und Auswertung (z. B. Oberflächenfindung und dimensionelle Auswertung, Porendetektion, Faseranalyse ...) erfolgen. Hierbei muss für einen echten digitalen Zwilling bei Rekonstruktion und Auswertung mit den gleichen Programmen und Prozessschritten gearbeitet werden wie in der realen Messkette, um keine unerwünschten Abweichungen zu verursachen.



Abb. 1. Prozesskette einer realen CT-Messung.

Die schattierten Bereiche der Prozesskette laufen auch für reale Messungen bereits im Computer ab, sind also immer virtuell. Nur die nicht schattierten Prozessschritte laufen real physisch ab und müssen dementsprechend für einen digitalen Zwilling simuliert werden. Je nach Anwendungsfall besteht die Auswertung beispielsweise aus Oberflächenfindung und dimensioneller bzw. geometrischer Auswertung oder aus einer Defekterkennung im rekonstruierten Grauwertvolumen

Zur Simulation sind momentan unter anderem die Simulationstools aRTist [10,11], astra [12,13], CivaCT [14], Scorpius XLab [15,16] sowie SimCT [17,18] verfügbar.

### 2.1. Röntgenröhre

Idealerweise müsste die reale Röntgenröhre durch Messungen sowohl im Hinblick auf Photonenanzahl als auch deren Energieverteilung charakterisiert werden. Da derartige Messungen mit den momentan verfügbaren energieauflösenden Detektoren über den kompletten Energiebereich typischer industrieller CTs (d. h. bis mindestens 450 keV) problematisch und für die Praxis beim Anwender zu kompliziert sind, ist eine Methode zur Spektrumsbestimmung ohne energieauflösende Messungen sinnvoll. Neben vorgestellten Methoden zur Spektrumsschätzung auf der Basis von nicht-energieauflösenden Messungen (z. B. [19]) ist hierfür insbesondere ein in aRTist 2 integriertes Modell zu nennen, das auf Basis weniger Röhrenparameter ein Spektrum berechnet [20].

Die reale Abbildung in einem CT erfolgt mit einem nicht-punktförmigen Röntgenbrennfleck. Um diesen Röntgenspot zu charakterisieren, wurde z. B. eine Methode zur Charakterisierung des Intensitätsprofils auf Basis der Auswertung von Kantenabbildungen vorgeschlagen [21, 22]. Ein anderer aktueller Ansatz ist die Rekonstruktion des Intensitätsprofils auf Basis einer Blendenaufnahme [23-25].

### 2.2. Bauteil

Die digitale Nachbildung von Bauteilen mit realistischen internen Defekten (z. B. Poren) kann herausfordernd sein (siehe z. B. [26]). Messtechnische Anwendungen, für welche nur die Außenoberfläche des Bauteils benötigt wird, können üblicherweise auf ein CAD-Modell mit der Soll-Geometrie des Bauteils zurückgreifen. Solange die Fertigungsabweichungen des Bauteils nicht zu groß sind und die Geometrie des Bauteils ausreichend ähnlich zur Soll-Geometrie ist, kann dieses verwendet werden. Die „geometrische Ähnlichkeit“ (auch enthalten in [6]) ist dabei nach momentanem Stand der Technik trotz erster Forschungsbemühungen (in [27]) bisher nicht quantifizierbar – was in diesem Sinne „ausreichend ähnlich“ ist, muss im Anwendungsfall abgeschätzt werden.

Neben der Geometrie muss auch das Bauteilmaterial hinreichend genau bekannt sein. Was hierbei „hinreichend“ ist, muss für jeden Anwendungsfall charakterisiert werden. In aRTist 2 arbeiten einfache Detektormodelle (wie z. B. in [8]) mit Energiedichte-Grauwert-Kennlinien (siehe Abschnitt 2.3). Abb. 2 zeigt die relative Energiedichte verschiedener Aluminium-Legierungen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass ein solches Detektormodell nur dann den korrekten Grauwert liefern kann, wenn die genaue Legierung bekannt ist. Je nach Anwendungsfall kann es akzeptabel sein, die realen Grauwerte nicht exakt zu reproduzieren – dies sollte allerdings für die jeweilige Auswertung überprüft werden.

aRTist 2 erlaubt auch, Detektoren zusätzlich über strahlungsenergieabhängige Sensitivitätskennlinien zu beschreiben. Mit diesen Detektormodellen ist die Relevanz dieser Legierungsunterschiede wie bei realen Messungen zusätzlich von der Detektorcharakteristik abhängig.

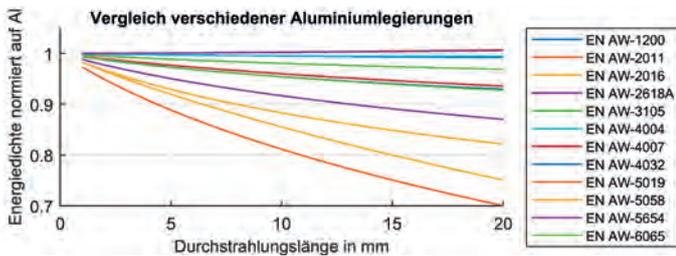


Abb. 2. Vergleich der Energiedichten verschiedener Aluminiumlegierungen.

Die Grafik zeigt die Energiedichten verschiedener Aluminiumlegierungen nach verschiedenen Durchstrahlungslängen, normiert auf die Energiedichte von theoretischem Reinaluminium. Das verwendete Spektrum wurde mit aRTist 2 für die Röntgenröhre des Zeiss Metrotom 1500 am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik bei einer Spannung von 180 kV und einem Strom von 180  $\mu$ A berechnet.

Eine weitere Bauteileigenschaft, die nach ersten simulativen Voruntersuchungen relevant zu sein scheint, ist eine etwaige funktionelle Beschichtung. Abb. 3 (aus [28]) zeigt simulierte Messabweichungen einer Kugel mit 5 mm Radius und einer Beschichtung aus Titanitrid und Hydroxylapatit in verschiedenen Beschichtungsdicken. Es zeigt sich bei diesen simulativen Voruntersuchungen, dass Beschichtung mit ähnlichem Absorptionsverhalten die dimensionelle Auswertung kaum beeinflussen (z. B. Ti6Al4V mit Titanitrid), Beschichtungen mit niedrigerem Absorptionsverhalten jedoch zu näherungsweise linear mit der Beschichtungsdicke steigenden Messabweichungen führen. Für den Fall von Beschichtungen mit höheren Absorptionsverhalten sind die Abhängigkeiten komplexer, ein Einfluss ist jedoch feststellbar. Weitere Untersuchungen und reale Validierungsmessungen der simulativen Vorstudien sind an dieser Stelle notwendig.

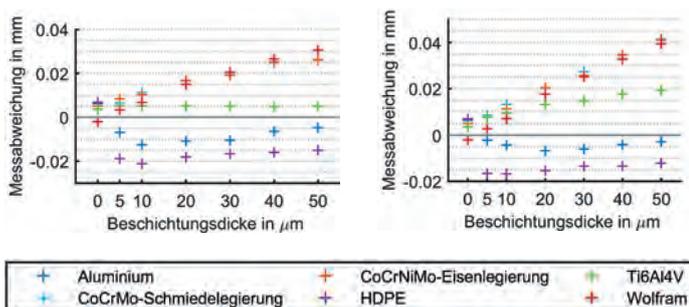


Abb. 3. Messabweichung des Kugelradius in Abhängigkeit der Beschichtungsdicke bei einer Beschichtung mit Titanitrid (links) und Hydroxylapatit ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) (rechts). Simulationen einer Kugel mit 5 mm Radius mit dem Simulationsmodell aus [8].

### 2.3. Röntgendetektion

In allgemeinsten Form kann eine Durchstrahlungssimulationssoftware mithilfe eines Spektrums und der Bauteilpositionierung bezüglich Detektor und Quelle für jeden Detektorpixel die Anzahl transmittierter Photonen sowie deren Energie berechnen. Um diese

Information nun in einen Grauwert umzurechnen, benötigt die Simulation Informationen über das Verhalten des realen Detektors.

Das in [8] vorgestellte Modell benutzt zwei Kennlinien für Grauwert und Rauschen, die jeweils der Pixelenergiedichte einen Grauwert oder ein Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zuordnen. Das Rauschen ist in aRTist 2 normalverteilt. Abb. 4 zeigt, dass dies global auch für reale Messungen eine sinnvolle Annahme ist.

Wie in Abschnitt 2.2 kurz angedeutet, ist es in aRTist 2 auch möglich, weitere Kennlinien zur Charakterisierung der spektralen Antworteigenschaften des Detektors zu implementieren. Dies ist sinnvoll und sollte in zukünftigen Weiterentwicklungen bedacht werden.

Eine weitere Detektoreigenschaft, die in der Simulation korrekt abgebildet werden muss, ist die z. B. durch Photonentransport in einem üblichen Szintillationsdetektor erzeugte Detektorunschärfe. Zu deren Charakterisierung wurde z. B. eine Methode zur Charakterisierung auf Basis der Auswertung von Kantenabbildungen vorgeschlagen [21, 22]. Weiterhin kann die Charakterisierung der Basisortunschärfe nach ASTM E2597 [29], z. B. mit Doppeldraht-Bildgüteprüfkörpern, erfolgen.

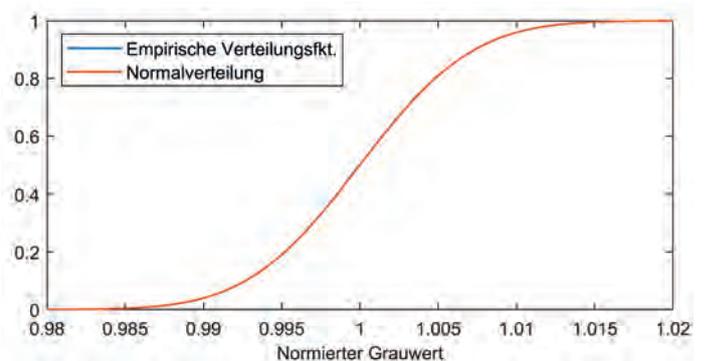


Abb. 4. Empirische kumulierte Verteilungsfunktion des realen Detektorrauschens des Zeiss Metrotom 1500 am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik bei 180 kV, 180  $\mu$ A, 1000 ms Belichtungszeit und 16 x Verstärkung bei leerem Messvolumen mit kumulierter Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung.

Die Daten basieren auf 1000 aufgenommenen Projektionen mit 2038 x 2046 Pixeln. Die Flatfieldkorrektur wurde wie in Abschnitt 2.4 beschrieben durchgeführt. Die Normierung erfolgte pixelweise durch Division mit dem pixel-spezifischen Mittelwert.

### 2.4 Flatfield-Korrektur

Die Flatfield-Korrektur dient dazu, eine gleichmäßige Beleuchtung auf dem in der Realität nicht gleichmäßig ausgeleuchteten Detektor zu erreichen sowie inhomogene Pixelsensitivitäten zu kompensieren [30]. Die Flatfield-Korrektur ist digitaler Teil der realen Messkette und kann somit eigentlich aus der realen Messkette übernommen werden. Oft ist die Flatfield-Korrektur realer CT-Geräte jedoch nicht zugänglich bzw. nicht dokumentiert. In diesem Fall ist es bei der Erstellung und Anwendung eines digitalen Zwillings sinnvoll, sofern möglich, die unkorrigierten Projektionsdaten des realen CT-Geräts vor der Rekonstruktion selbst zu korrigieren – und die simulierten Projektionen dann in gleicher Weise zu korrigieren.

Für diesen Beitrag verwenden wir eine einfache Flatfield-Korrektur in Anlehnung an [30]:

$$P_C(i, j) = \frac{P(i, j) - D(i, j)}{B(i, j) - D(i, j)} \cdot B_{\text{avg}}$$

Hierbei ist  $P_c$  die korrigierte Projektion,  $P$  die unkorrigierte Projektion,  $D$  das Dunkelbild und  $B$  das Hellbild.  $B_{avg}$  ist der mittlere Grauwert des Hellbilds.  $i, j$  sind die Pixelindizes. Um  $P_c$  in uint16 zu speichern, werden negative Werte auf Null gesetzt. Die Skalierung auf  $B_{avg}$  garantiert bei sinnvollem Hellbild, dass der uint16-Wertebereich nach oben nicht überschritten wird.

Für  $D = 0$  ist diese Korrektur mit der in aRTist 2 implementierten Korrektur identisch.

### 3. Umsetzung in aRTist 2

Im Folgenden wird beschrieben, wie aRTist 2 [10, 11] die Systemgeometrie eines realen CTs parametrisiert (Abschnitt 3.1) und wie in aRTist 2 technisch eine Umsetzung von projektionsspezifischen Geometrievariationen während einer CT-Messung möglich ist (Abschnitt 3.2).

#### 3.1 Geometriebeschreibung

In aRTist 2 [10, 11] wird jedes Objekt durch das Zentrum seiner Bounding Box (als Punktvektor  $\vec{r} \in \mathbb{R}^3$ ) im Weltkoordinatensystem verankert. Die Objektorientierung des Objekts (resp. seines lokalen Koordinatensystems) wird durch drei Drehwinkel (um die x-Achse  $\vartheta_x \in [-90, 90]$  und um y bzw. z-Achse  $\vartheta_y$  bzw.  $\vartheta_z \in [-180, 180]$ ) definiert, die in der Reihenfolge  $R_z R_y R_x$  als Rotationen um die drei kartesischen Achsen (immer in Bezug auf den ‚ursprünglichen‘ Einlagezustand des Objekts) angewendet werden.

Zwei relevante Ausnahmen hiervon sind die Röntgenquelle, die in aRTist 2 isotrop in alle Raumrichtungen abstrahlt und somit keine relevante Orientierung besitzt, sowie die Rotationsachse, die durch ihre Position als Aufpunkt bzw. Rotationszentrum sowie ihre Orientierung als Einheitsvektor (als Vektor  $\vec{n} \in \mathbb{R}^3$  mit  $\|\vec{n}\| = 1$ ) definiert wird.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der verwendeten Geometrieparameter. Im Weltkoordinatensystem haben diese  $15 + 6 n_{obj}$  skalare Werte, wobei  $n_{obj}$  die Anzahl der Objekte ist.

Tabelle 1. Übersicht der Geometrieparameter

Geometrieparameter	Variablenbezeichnung	Wertebereich
Position der Röntgenquelle (bzw. des Spots)	$\vec{r}_S$	$\mathbb{R}^3$
Position des Röntgendetektors	$\vec{r}_D$	$\mathbb{R}^3$
Orientierung des Röntgendetektors	$\vartheta_{D,x}, \vartheta_{D,y}, \vartheta_{D,z}$	Y, Z je $[-180, 180]$ X $[-90, 90]$
Position der Rotationsachse	$\vec{r}_A$	$\mathbb{R}^3$
Orientierung der Rotationsachse	$\vec{n}_A$	$\vec{n} \in \mathbb{R}^3$ mit $\ \vec{n}\  = 1$
Objektposition (pro Objekt)	$\vec{r}_O$	$\mathbb{R}^3$
Objektorientierung (pro Objekt)	$\vartheta_{O,x}, \vartheta_{O,y}, \vartheta_{O,z}$	Y, Z je $[-180, 180]$ X $[-90, 90]$

#### 3.2 GeoDev-Option

Die GeoDev-Option des CtScan-Moduls der API der Version aRTist 2.10 erlaubt, einen vollen CT-Scan unter Berücksichtigung von projektionsweisen Verschiebungen der Aufnahmegeometrie zu simulieren. Dazu wird eine Textdatei mit entsprechenden numerischen Werten für jeden der geometrischen Parameter eingelesen. Im Folgenden wird der Abweichungswert für einen Parameter  $\vec{x}$  in Projektion  $j$  als  $\Delta(\vec{x}, j)$  notiert. Dieser hat jeweils die gleiche Dimension wie  $\vec{x}$ . Im Sinne einer übersichtlichen Notation wird im Folgenden von einem einzelnen Objekt ausgegangen; mehrere Objekte werden sinngemäß alle analog behandelt.

Zu Beginn der Routine werden die unmodifizierten Parameter  $\vec{r}_{S,init}$ ,  $\vec{r}_{D,init}$ ,  $\vec{r}_{A,init}$ ,  $\vec{n}_{A,init}$  sowie  $\vartheta_{D,x,init}$ ,  $\vartheta_{D,y,init}$ ,  $\vartheta_{D,z,init}$ , also initiale Quellenposition, Detektorposition und -orientierung sowie Rotationsachsenposition und -orientierung, gesichert.

Für jede Projektion  $k$  wird (sequentiell):

- Die ursprüngliche Detektorposition, -orientierung sowie die Quellenposition und Rotationsachsenposition und -orientierung entsprechend der eingelesenen Textdatei modifiziert und als Momentanwert für diese Projektion  $k$  gesetzt:

$$\begin{aligned} \circ \vec{r}_D &= \vec{r}_{D,init} + \Delta(\vec{r}_D, k) \\ \circ \vartheta_{D,U} &= \vartheta_{D,U,init} + \Delta(\vartheta_{D,U}, k) \text{ für } U = X, Y, Z \\ \circ \vec{r}_A &= \vec{r}_{A,init} + \Delta(\vec{r}_A, k) \\ \circ \vec{n}_A &= \left( \vec{n}_{A,init} + \Delta(\vec{n}_A, k) \right) \cdot \left\| \vec{n}_{A,init} + \Delta(\vec{n}_A, k) \right\|^{-1} \\ \circ \vec{r}_S &= \vec{r}_{S,init} + \Delta(\vec{r}_S, k) \end{aligned}$$

- Die momentane Position und Orientierung aller Objekte,  $\vec{r}_{O,init}(k)$  sowie  $\vartheta_{O,x,init}(k)$ ,  $\vartheta_{O,y,init}(k)$ ,  $\vartheta_{O,z,init}(k)$ , gesichert.
- Die Objektposition und -orientierung mit den Werten aus der eingelesenen Textdatei modifiziert und als Momentanwert gesetzt:

$$\begin{aligned} \circ \vec{r}_O(k) &= \vec{r}_{O,init}(k) + \Delta(\vec{r}_O, k) \\ \circ \vartheta_{D,U}(k) &= \vartheta_{D,U,init}(k) + \Delta(\vartheta_{D,U}, k) \text{ für } U = X, Y, Z \end{aligned}$$

- Das Durchstrahlungsbild aufgenommen.
- Die Objektposition und -orientierung auf den Anfangswert der Projektion  $k$ ,  $\vec{r}_{O,init}(k)$  sowie  $\vartheta_{O,x,init}(k)$ ,  $\vartheta_{O,y,init}(k)$ ,  $\vartheta_{O,z,init}(k)$ , zurückgesetzt und als Momentanwert gesetzt.
- Das Objekt um die (modifizierte) Rotationsachse  $\vec{n}_A$  an der (modifizierten) Position  $\vec{r}_A$  um einen Winkelschritt gedreht.

Die GeoDev-Option des CtScan-Moduls erlaubt wie beschrieben die Beachtung von projektionsweisen Geometrieabweichungen in der Simulation; die Textdatei mit den zu verwendenden Zahlenwerten muss jedoch extern erzeugt werden.

Eine alternative Möglichkeit, Geometrieabweichungen in aRTist 2 zu simulieren, bietet das TomoSynth-Modul. Das TomoSynth-Modul erlaubt für bestimmte Verteilungen eine automatische Generierung von Geometrieabweichungen sowie freie Trajektorien [31].

## 4. Fazit

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die mögliche Anwendung des Supplement 1 des *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* auf industrielle CT-Messungen und skizziert notwendige Schritte zur realitätsnahen Modellierung eines CT-Systems als digitaler Zwilling. Hierfür sind noch weitere Forschungsanstrengungen notwendig.

### Danksagung

Florian Wohlgenuth (F.W.) und Tino Hausotte (T.H.) danken dem aRTist-Team der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Fachbereich 8.5 (Mikro-Zerstörungsfreie Prüfung), insbesondere C. Bellon, für umfangreiche Unterstützung bei der Einarbeitung in aRTist 2. F.W. und T.H. danken weiterhin allen Projektpartnern im Förderprojekt CTSimU – sowohl während der Beantragung als auch der Bearbeitung – für viele produktive und lehrreiche Diskussionen.



Die dargestellten Arbeiten sind im Rahmen des WIPANO-Förderprojektes CTSimU (03TNH026A) durchgeführt worden. Die WIPANO-Förderrichtlinie wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie finanziert und vom Projektträger Jülich verwaltet.

## Beiträge nach CRediT [32]

Tino Hausotte (T.H.) und Florian Wohlgemuth (F.W.) waren an Finanzierungsantrag, Projektadministration und der Finalisierung des Manuskripts beteiligt. T.H. war für Betreuung und Bereitstellung der benötigten Ressourcen zuständig. F.W. war für Konzeptualisierung, Datenpflege, formale Analyse, Untersuchungen, Methodik, Software, Validierung, Visualisierung und Entwurf des Manuskripts zuständig. Frederike Wolter hat im Rahmen ihrer Masterarbeit die Simulationen und Auswertungen für die Untersuchungen zu Beschichtungen in Abschnitt 2.2 (Abb. 3) erstellt.

## REFERENZEN

- [1] Joint Committee for Guides in Metrology, *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, 2008
- [2] Joint Committee for Guides in Metrology, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 2008
- [3] Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI/VDE 2630 Blatt 1.2, Düsseldorf, 2018.
- [4] M. Franke, T. Kistner, T. Hausotte, D. Heißelmann, C. Schwehn, and K. Wendt, *Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme, tm - Technisches Messen*, 84(5), 2017
- [5] F. Wohlgemuth and T. Hausotte, *Convergence Behaviour of Numerical Measurement Uncertainty Evaluation using a Virtual Metrological Computed Tomography System*, in: 10<sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography, 2020
- [6] Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI/VDE 2630 Blatt 2.1, Düsseldorf, 2015
- [7] K. Klauenberg, G. Wübbeler, and C. Elster, *About not Correcting for Systematic Effects*, *Measurement Science Review*, 19 (5), pp. 204–208, 2019
- [8] F. Wohlgemuth, A. Müller, and T. Hausotte, *Development of a virtual metrological CT for numerical measurement uncertainty determination using aRTist 2*, *Tm-Technisches Messen*, 85, pp. 728–737, 2018
- [9] E. Helmecke, M. Fleßner, M. Kaufmann, A. Staude, and T. Hausotte, *Numerical measurement uncertainty determination for dimensional measurements of microparts with CT*, in 6<sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria (iCT 2016), 2016
- [10] <http://www.artist.bam.de/>, abgerufen am 28.05.2020
- [11] C. Bellon, A. Deresch, C. Gollwitzer, and G.-R. Jaenisch, *Radiographic Simulator aRTist: Version 2*, in: 18<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 2012
- [12] <https://www.astra-toolbox.com/>, abgerufen am 28.05.2020
- [13] W. van Aarle, W. J. Palenstijn, J. Cant, E. Janssens, F. Bleichrodt, A. Dabravolski, J. De Beenhouwer, K. J. Batenburg, and J. Sijbers, *Fast and Flexible X-ray Tomography Using the ASTRA Toolbox*, *Optics Express*, 24(22), pp. 25129-25147, 2016
- [14] <http://www.extende.com/computed-tomography-with-civa>, abgerufen am 28.05.2020
- [15] J. Hiller, T. O. J. Fuchs, S. Kasperl, and L. M. Reindl, *Einfluss der Bildqualität röntgentomographischer Abbildungen auf Koordinatenmessungen: Grundlagen, Messungen und Simulationen*, *tm - Technisches Messen*, 78 (7-8), pp. 334–347, 2011
- [16] S. Kasperl, S. Reisinger and M. Franz, *Aufnahmeplanung in der industriellen Computertomographie*, in: DGZfP-Jahrestagung 2011, Bremen, 2011
- [17] <http://www.3dct.at/cms2/index.php/en/software-en/simct>, abgerufen am 28.05.2020
- [18] M. Reiter, M. Erler, C. Kuhn, C. Gusenbauer, J. Kastner, *SimCT: a simulations tool for X-ray imaging*, in: *Proceedings of Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2016)*, Wels, Austria, 2016
- [19] C. Leinweber, J. Maier, and M. Kachelrieß, *X-ray spectrum estimation for accurate attenuation simulation*, *Medical Physics*, 44 (12), pp. 6183–6194, 2017
- [20] Deresch: *Modellierung von Röntgenspektren für technische Anwendungen*, Universität Potsdam, 2015
- [21] M. Fleßner, M. Blauhöfer, E. Helmecke, A. Staude, and T. Hausotte, *CT measurements of microparts: Numerical uncertainty determination and structural resolution*, in: *SENSOR 2015*, Nürnberg, 2015
- [22] C. Orgeldinger, F. Wohlgemuth, A. Müller, and T. Hausotte, *Spot size and detector unsharpness determination for numerical measurement uncertainty determination*, in: 9<sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography, Padova, Italy, 2019.
- [23] G. D. Domenico, P. Cardarelli, A. Contillo, A. Taibi, and M. Gambaccini, *X-ray focal spot reconstruction by circular penumbra analysis-Application to digital radiography systems*, *Medical Physics*, 43 (1), pp. 294–302, 2015
- [24] U. Ewert, G.-R. Jaenisch, A. Deresch, B. A. Bircher, and F. Meli, *Neue Konzepte zur Messung von Parametern der Brennflecke von Nano- und Mikrofokus-Röntgenröhren*, in: *DACH-Jahrestagung 2019*, 2019
- [25] U. Ewert, G.-R. Jaenisch, A. Deresch, B. A. Bircher, and F. Meli, *New Concepts for the Measurement of Focal Spot Parameters of Nano- and Microfocus X-Ray Tubes*, in: *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography – DIR2019*, 2019.
- [26] P. Fuchs, T. Kröger, T. Dierig, and C. S. Garbe, *Generating Meaningful Synthetic Ground Truth for Pore Detection in Cast Aluminum Parts*, in 9<sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography, Padova, Italy, 2019
- [27] C. Niggemann: *Wissensbasiertes System zur Verbesserung dimensioneller Messungen mittels Röntgen-Computertomografie*, RWTH Aachen, 2012.
- [28] F. Wolter: *Einfluss von Materialzusammensetzung und Beschichtungen auf die dimensionelle Messung medizinischer Implantate*, Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2020.
- [29] ASTM E2597/E2597M – 14
- [30] V. Van Nieuwenhove, J. D. Beenhouwer, F. D. Carlo, L. Mancini, F. Marone, and J. Sijbers, *Dynamic intensity normalization using eigen flat fields in X-ray imaging*, *Optics Express*, 23 (21), p. 27975, 2015
- [31] C. Bellon, K. Burger and C. Gollwitzer, *Virtual CT acquisition and reconstruction of complex and noisy scanning trajectories in aRTist*, in 9<sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography, Padova, Italy, 2019
- [32] CASRAI CRediT, <https://casrai.org/credit/>, abgerufen am 20.02.2020

Kontakt: [florian.wohlgemuth@fmt.fau.de](mailto:florian.wohlgemuth@fmt.fau.de)

## BEITRAG 26

## Untersuchung der Einflussgrößen auf die Anzeigenerkennbarkeit bei der visuellen Prüfung

Michel Blankschän<sup>1</sup>, Marija Bertovic<sup>3</sup>, Daniel Kanzler<sup>2</sup>, Martina Rosenthal<sup>3</sup>, Stanislav Lindt<sup>3</sup>

<sup>1</sup> DGZfP Ausbildung und Training GmbH, Berlin

<sup>2</sup> Applied Validation, Berlin

<sup>3</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

**KURZFASSUNG** | Das Detektieren von Unregelmäßigkeiten an Bauteilen mit dem bloßen Auge ist ein sehr komplexer Vorgang, der von einer Vielzahl technischer und menschlicher Faktoren beeinflusst wird. Aktuelle Normen und Regelwerke rücken lediglich die Beleuchtungsstärke in den Fokus und fordern für diesen Messwert höchste Genauigkeit und eine metrologische Rückführbarkeit. Im Rahmen von Feldversuchen sollten weitere Einflussfaktoren auf die Anzeigenerkennbarkeit bei der visuellen Prüfung (VT) von Schmiedeteilen erfasst werden. Dabei wird die Auswirkung unterschiedlicher, kontrollierter Beleuchtungsszenarien auf das Prüfergebnis ebenso untersucht, wie der Einfluss menschlicher Faktoren (Alter, Erfahrung, Kontrastsehvermögen, individuelle Einstellungen zur Beleuchtungsstärke). Diese Arbeit beschreibt den Versuchsaufbau, präsentiert erste Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf mögliche Einflussfaktoren auf die Anzeigenerkennbarkeit.

### 1. Einleitung

Vorrangiges Ziel der Sichtprüfung ist es, Inhomogenitäten an der Oberfläche von Bauteilen zu finden und so Qualität und Sicherheit des Prüfobjektes sicherzustellen. Dabei ist dieses Auffinden in erster Linie ein Erkennen eines Unterschiedes zu benachbarten Bereichen und noch keine Klassifizierung oder Bewertung des Gesehenen. Die Detektion erfolgt primär durch die Wahrnehmung von Kontrastunterschieden auf dem Prüfobjekt. So können bspw. Risse dunkel gegenüber dem umliegenden Material erscheinen oder Erhöhungen, in Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel, Schatten auf der Oberfläche werfen.

Ein Kontrast wird durch Leuchtdichteunterschiede benachbarter Bereiche erzeugt, auch wenn in beiden Bereichen die gleiche Beleuchtungsstärke gemessen wird. Die DIN EN 12665: (2011) beschreibt die Leuchtdichte als die Menge an Licht, welche von einer Oberfläche reflektiert und mit dem Auge erfasst wird. Da sich eine solche Größe in der ZfP-Praxis nicht praktikabel messen lässt, wird die Beleuchtungsstärke in der DIN EN 13018: (2016) als zu messende Hilfsgröße deklariert. Definiert wird sie von der DIN EN 12665 als Lichtstrom, der auf eine bestimmte Fläche trifft. Man kann sie also als das Licht einer Lichtquelle verstehen, welches potentiell Leuchtdichteunterschiede und damit Kontrast auf einer Fläche erzeugen kann.

Zunächst ist es wichtig, die Relevanz und den Ursprung der geforderten Mindestbeleuchtungsstärke von 500 Lux (Lx) für die direkte, lokale Sichtprüfung zu klären. Çakir (2006) fand heraus, dass Grenzwerte in Beleuchtungsnormen seit Jahrzehnten aus frühen Arbeiten von etwa Blackwell (1959) übernommen wurden, ohne deren Aktualität bzw. Relevanz für den jeweiligen Anwendungsfall zu prüfen. Auch Boyce (1995) wies darauf hin, dass sich keine wissenschaftliche Basis für diese Festlegungen finden lässt.

Die visuelle Prüfung ist nicht nur durch die Beleuchtungsstärke beeinflusst. Zusätzlich zu den technischen Faktoren (Fehlertyp, Fehlerlänge, Oberflächenbedingungen), zeigten beispielsweise Bertovic et al. (2011) sowie die Literaturübersicht von D'Agostino et al. (2017), dass sich die Ergebnisse unterschiedlicher Prüfer\*innen untereinander oft unterscheiden, aus Gründen, die menschlichen Eigenschaften (engl. Human Factors) zugewiesen werden können. Eigenschaften der Prüfer\*innen, wie z. B. Erfahrung, Sehschärfe, individuelle Motivation, Müdigkeit, sowie Störfaktoren aus der Arbeitsumgebung haben einen Einfluss auf die Prüfleistung.

Ein wahrnehmbarer Kontrast, welcher für die Detektion von Anzeigen essentiell ist, entsteht nicht nur durch eine bestimmte Beleuchtungsstärke. Eine umfangreiche Literaturrecherche ergab, dass dafür vielmehr das Zusammenspiel aus den drei Faktoren Lichtquelle (Farbtemperatur, Intensität), Objekt (Oberflächenbeschaffenheit) und Mensch als Detektor (Alter, biologische Faktoren, Konzentration, Erfahrung), sowie deren räumliche Anordnung verantwortlich ist. Diese Arbeit untersucht den Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die Detektion rissartiger Anzeigen bei Schmiedeteilen mit dem Ziel, einen Toleranzbereich der Messwerte, in dem keine signifikante Änderung der Detektionswahrscheinlichkeit vorliegt, zu identifizieren.

### 2 Versuchsaufbau

Um herauszufinden, ob sich bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken die Prüfleistung signifikant ändert, wurde ein Feldversuch mit Prüfer\*innen unterschiedlicher VT-Erfahrung durchgeführt. Dieser bestand aus drei Etappen.

#### 2.1 Kontrastwahrnehmungsvermögen

Als erstes sollten die Teilnehmer\*innen in einer definierten Zeit von drei Minuten sogenannte Gabor-Patches auf einem Monitor finden



Abbildung 1 Benutzeroberfläche Gabor-Test mit gut sichtbarem Patch

(Abbildung 1). Nach Fredericksen et al. (1997) sind diese Gabor-Patches sinusförmige, gedämpfte Leuchtdichtemuster mit überlagertem Gauß-Fenster. Durch diese Untersuchung konnte ein Zusammenhang zwischen der Größe und dem Kontrast einer Anzeige hergestellt und somit eine individuelle Wahrnehmungsschwelle ermittelt werden. Des Weiteren diente dieser Teil des Versuchs dazu, das Kontrastsehvermögen der Teilnehmer\*innen zu überprüfen, welches maßgeblichen Einfluss auf den zweiten Teil der Untersuchung hat und so mögliche Ausreißer zu identifizieren.

Den Teilnehmer\*innen wurden diese Muster, mit zufällig generierter Größe und Kontrast, an zufälligen Positionen auf dem Monitor angezeigt. Durch Klicken mit der Maus auf einen solchen Gabor-Patch signalisierten sie, diesen gefunden zu haben und es wurde ein neuer Gabor-Patch generiert. Sahen die Teilnehmer\*innen den angezeigten Patch nicht, so konnten sie durch Klicken einer Schaltfläche den Kontrast um einen zufälligen Betrag erhöhen, bis der Patch wahrnehmbar wurde.

## 2.2 Sichtprüfung von Schmiedeteilen

Der zweite Teil des Versuchs stellte den Einfluss der Beleuchtungsstärke bei der Anzeigenerkennung heraus. Hierzu inspizierten die Teilnehmer\*innen eine Reihe von Schmiedeteilen unter drei definierten Beleuchtungsstärken.

Die zu untersuchenden Prüfstücke waren Kugelzapfen aus dem Automobilbereich. Für den Versuch standen insgesamt 24 Kugelzapfen gleichen Typs zur Verfügung. Acht davon wiesen rissartige Anzeigen auf, während ein weiterer Kugelzapfen einen anderen Oberflächenfehler enthielt. Alle Prüfstücke besaßen eine abgedrehte, stark reflektierende Oberfläche. Die Detektierbarkeit der rissartigen Anzeigen lag, auch auf Grund des Oberflächenzustandes, bewusst an der Verfahrensgrenze der Sichtprüfung. Alle Prüfstücke wurden zuvor bei der Qualitätskontrolle des Herstellers mittels Sichtprüfung ausgesondert. Dies demonstriert die prinzipielle Eignung von Prüfobjekt, Anzeige und Detektionsverfahren für diesen Versuch.

Die Oberflächenfehler sind natürliche, produktionsbedingte Defekte und wurden nicht künstlich eingebracht. Entsprechend der für das Experiment gewählten Aufgabe, in der nur axial orientierte Risse gefunden werden sollten, wurden die acht Prüfstücke mit rissartigen



Abbildung 2 Kugelzapfen mit rissartiger Anzeige bei 504 Lx, rechts Detailaufnahme Anzeigebereich

Anzeigen als nicht in Ordnung (n. i. O) und die restlichen 16 Prüfstücke als in Ordnung (i. O.) eingeteilt. Abbildung 2 zeigt ein Prüfstück mit rissartiger Anzeige unter Prüfbedingungen.

Als definierte Beleuchtungsszenarien für den Feldversuch wurden folgende Festlegungen getroffen.

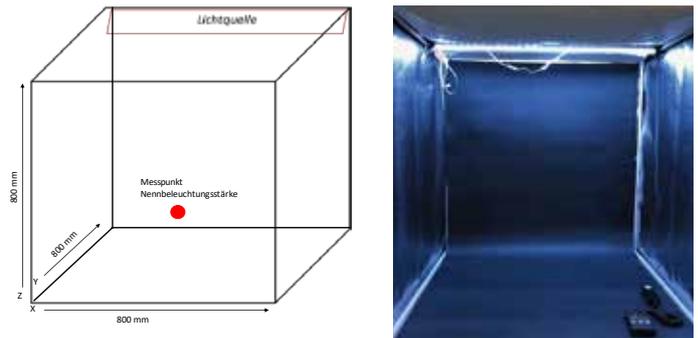


Abbildung 3 Skizze Versuchsaufbau mit Messpunkt Nennbeleuchtungsstärke (links) und Foto Prüfplatz (rechts)

Dabei wurde die Nennbeleuchtungsstärke  $E_N$  innerhalb des Prüfbereichs eingestellt, wie in Abbildung 3 gezeigt.

- Szenario A: Nennbeleuchtungsstärke 200 Lx
- Szenario B: Nennbeleuchtungsstärke 350 Lx
- Szenario C: Nennbeleuchtungsstärke 500 Lx

Um diese Beleuchtungsstärken bei den Feldversuchen zu gewährleisten und den Einfluss der Raumumgebung möglichst gering zu halten, wurden die Untersuchungen in einer portablen Box durchgeführt. Die würfelförmige Box hat eine Kantenlänge von 800 mm. Im Inneren ist eine matt-schwarze Folie auf der Grundfläche und der den Prüfer\*innen gegenüber befindlichen Fläche angebracht. Sie reduziert unerwünschte Reflektionen der Lichtquelle im Sichtfeld der Prüfer\*innen. Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau sowie eine Skizze mit Messpunkt der jeweiligen Nennbeleuchtungsstärke. Dieser Messpunkt lag bei  $x = 400$  mm,  $y = 250$  mm,  $z = 250$  mm.

Bei den Untersuchungen wurde ein Gossen Mavolux 5032 C USB, ein sowohl in der Ausbildung als auch in der Prüfpraxis weitverbreitetes Messgerät, zur Bestimmung der jeweiligen Beleuchtungsstärken verwendet.

Ausgehend von den gewählten Beleuchtungsszenarien, würde man für Szenario C, welches als einziges der normativen Vorgabe für die Beleuchtungsstärke entspricht, die höchste Detektionsrate für Anzeigen erwarten. Gleichzeitig sollten die 500 Lx eine sichere Beurteilung der Prüfoberfläche hinsichtlich des Vorhandenseins von nicht relevanten (Schein-)Anzeigen ermöglichen. Die Szenarien A und B sollten dementsprechend deutlich schlechtere Ergebnisse liefern.

Als Lichtquelle(n) dienen neutralweiße LED-Streifen mit einer Farbtemperatur von 5000 K, welche positioniert wurden, wie in Abbildung 3 zu sehen. Ein Vergleich diverser Anbieter für Industrie- und Arbeitsplatzbeleuchtung legt die Verwendung von Lichtquellen mit einer Farbtemperatur von 4000 – 5000 K für diese Art der Sehaufgaben nahe. Auch die DIN EN 12464-1 (Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten) und die LV 41 des Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) empfehlen diese Werte. Um eine direkte Blendung der Teilnehmer\*innen zu vermeiden, wurden die Lichtquellen leicht von der Öffnung der Box weggedreht. Die Nennbeleuchtungsstärke wurde durch stufenweises Zu- bzw. Abschalten von LED-Elementen der Lichtquelle eingestellt.

Innerhalb der Box resultierte daraus eine räumliche Verteilung der Beleuchtungsstärke, wie Abbildung 4 veranschaulicht. Die Werte wurden an definierten Messpunkten innerhalb der Box für jedes Beleuchtungsszenario erfasst. Anhand der ermittelten Messwerte lässt sich ein Bereich erkennen, in dem die Beleuchtungsstärke annähernd konstant ist. Dieser Bereich erstreckt sich von  $x = 300 - 500$  mm;  $y = 250 - 300$  mm und  $z = 200 - 400$  mm. Ein Großteil der Testpersonen untersuchte die Prüfstücke innerhalb dieses Bereiches. So kann

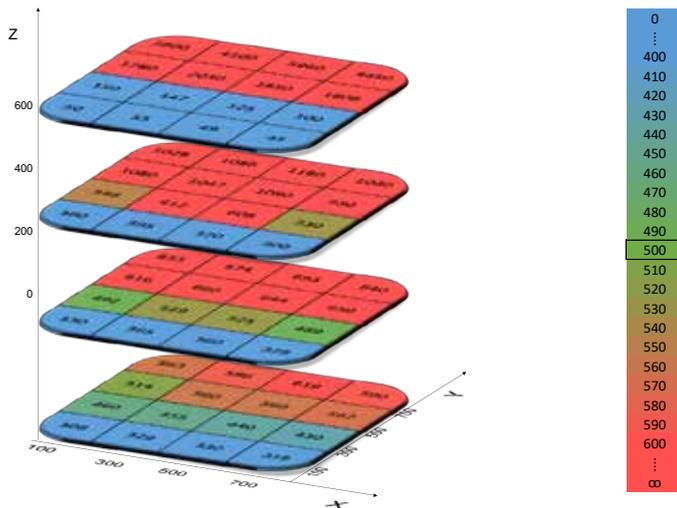


Abbildung 4 Beleuchtungsstärkeverteilung innerhalb der Box bei  $E_N = 500 \text{ Lx}$

davon ausgegangen werden, dass auf dem Prüfstück zu jedem Zeitpunkt der Untersuchung die gewünschte Beleuchtungsstärke vorhanden war. Um diese Annahme zu bestätigen, wurde nach jedem Beleuchtungsszenario die Beleuchtungsstärke durch die Experimentierenden überprüft und zwar an der Stelle innerhalb der Box, an der die jeweiligen Teilnehmer\*innen die Prüfobjekte untersucht hatten. Zusätzlich wurden die Teilnehmer\*innen gebeten, selbstständig die Beleuchtungsstärke bei jedem Szenario zu messen. Dadurch sollten eventuelle Unterschiede in der Beleuchtungsstärke zwischen Mess- und Prüfort festgestellt und deren Auswirkung auf das Prüfergebnis untersucht werden.

### 2.3 Fragebogen

Um herauszufinden, wie die unterschiedlichen Beleuchtungsstärken von den Prüfer\*innen empfunden wurden und ob weitere Faktoren einen Einfluss auf das Prüfergebnis hatten, wurde ein Fragebogen erstellt. Der Fragebogen bestand aus zwei Teilen: dem allgemeinen und dem prüfbedingungs-spezifischen. Im allgemeinen Teil wurden Fragen zu (1) Alter, Bildungsgrad, Qualifikation und Erfahrung, (2) zu den Prüfbedingungen (z. B. ob ein Unterschied zwischen den Beleuchtungsstärken wahrgenommen wurde, sowie welche der Bedingungen als unterstützend und angenehm empfunden wurden) und zur (3) Umgebung und Motivation (z. B. Einfluss anderer Faktoren, wie z. B. Box, Präsenz anderer Menschen usw.; Bewertung der Lichtfarbe, der Boxumgebung und das Interesse an den Ergebnissen der Untersuchung) gestellt. Im spezifischen Teil wurden die Teilnehmer\*innen aufgefordert, die jeweilige Prüfbedingung in Bezug auf Zufriedenheit mit der Beleuchtungsstärke, Störfaktoren (Blendeffekte oder Dunkelheit der Box) sowie ihren eigenen Zustand (Müdigkeit oder mangelnde Konzentration) auf einer 7-stufigen Skala zu bewerten. Dieser Teil des Fragebogens wurde nach jeder Prüfbedingung von den Teilnehmer\*innen ausgefüllt.

### 2.4 Teilnehmer\*innen

In der laufenden Studie haben bisher (im Zeitraum Dezember 2019 bis März 2020) 33 Prüfer\*innen teilgenommen (davon 1 weiblich und 32 männlich). Im Durchschnitt beträgt das Alter der Teilnehmer\*innen 40,2 Jahre (Standardabweichung,  $\sigma = 10.5$  Jahre) und die Erfahrung in der visuellen Prüfung 1 Jahr (Medianwert). Davon haben 45 %

der Teilnehmer\*innen 0,5 Jahre oder weniger, 27 % 1 – 10 Jahre und 21 % 10 oder mehr Jahre Erfahrung. 36,4 % der Teilnehmer\*innen hatten schon Erfahrung mit der Art des vorliegenden Prüfstücks.

### 2.5 Ablauf

Die Reihenfolge der Beleuchtungsszenarien wurde zufällig gewählt, um evtl. Lerneffekte bei der Beurteilung der Prüfobjekte auszuschließen. Zu Beginn jedes Szenarios sollten die Teilnehmer\*innen selbstständig die Beleuchtungsstärke mit dem bereitgestellten Beleuchtungsstärkemessgerät bestimmen. Der Messpunkt der Teilnehmer\*innen wurde mit dem Bereich, in dem sie die Prüfstücke später untersuchten, verglichen. Danach wurde den Teilnehmer\*innen immer ein zufällig gewähltes Prüfstück zur Untersuchung gereicht. Ihre Aufgabe bestand darin, die Prüfstücke auf axiale, rissartige Anzeigen zu prüfen. Deren Vorhandensein sollte durch ein „ja“ (Riss detektiert) oder „nein“ (kein Riss detektiert) angezeigt werden. Jegliche andere Art von Oberflächenunregelmäßigkeiten (Kratzer, Riefen, Korrosion, Schmiedefehler etc.) sollte dabei nicht beurteilt werden. Nach der Entscheidung der Teilnehmenden (ja/nein) wurde das Prüfstück gegen das nächste getauscht. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis die Teilnehmenden alle 24 Prüfstücke in diesem Szenario geprüft hatten. An diesem Zeitpunkt wurde die Beleuchtungsstärke durch die Experimentierenden in dem Bereich der Box gemessen, in dem die Teilnehmer\*innen die Prüfstücke zum Großteil inspiziert hatten. Anschließend bewerteten die Teilnehmer\*innen in einem kurzen Fragebogen das jeweilige Beleuchtungsszenario, bevor die Beleuchtung für das nächste Szenario eingestellt und der Ablauf wiederholt wurde. So wurde verfahren, bis alle drei Szenarien durchlaufen waren. Zum Abschluss wurde der Fragebogen mit allgemeinen Fragen zur Person, Prüfbedingungen, anderen Einflüssen und Motivation ausgefüllt.

## 3 Ergebnisse

Die folgenden Erkenntnisse stellen vorläufige Ergebnisse aus den noch laufenden Untersuchungen dar. Auf Grund der aktuellen Lage konnten seit März 2020 keine weiteren Untersuchungen mit Teilnehmer\*innen durchgeführt werden.

Als erste Erkenntnis aus den Feldversuchen fällt auf, dass der Messpunkt, an dem die Teilnehmer\*innen selbst die Beleuchtungsstärke zu Beginn jedes Szenarios messen, oftmals von der Position abweicht, an welcher sie die visuelle Prüfung der Kugelzapfen durchführen. Einige Teilnehmer\*innen z. B. maßen die Beleuchtungsstärke mittig am Boden der Box, untersuchten die Kugelzapfen jedoch ca. 300 mm über dem Boden. Dies resultiert entsprechend in einer Abweichung zwischen von Teilnehmer\*innen gemessener ( $E_{TN}$ ) und der am Prüfobjekt tatsächlich vorliegenden Beleuchtungsstärke ( $E_P$ ). Deren Differenz  $\Delta E = E_{TN} - E_P$  reichte von -460 Lx bis +150 Lx. Der Mittelwert der Beleuchtungsstärkedifferenz liegt bei  $\Delta E = 39 \text{ Lx}$ . Das bedeutet, die Teilnehmer\*innen haben im Schnitt 39 Lx mehr gemessen, als am Prüfort vorhanden war.

Zusätzlich zu der Abweichung von der eingestellten Nennbeleuchtungsstärke muss auch die Messunsicherheit des verwendeten Beleuchtungsstärkemessgerätes berücksichtigt werden. Das Mavolux 5032 C USB ist ein Beleuchtungsstärkemessgerät der Klasse C nach DIN 5032-7 (2017) und darf als solches eine maximale Messgenauigkeit von 20 % nicht überschreiten. Laut Herstellerangaben liegt die Gesamtmessgenauigkeit bei 15 %, was bei einem Messwert von 500 Lx bereits  $\pm 75 \text{ Lx}$  entspricht. Berücksichtigt man noch das durchschnittliche  $\Delta E = 39 \text{ Lx}$ , so erhält man eine Abweichung von bis zu  $\pm 114 \text{ Lx}$  bzw.  $\pm 23 \%$  zur von den Prüfer\*innen gemessenen

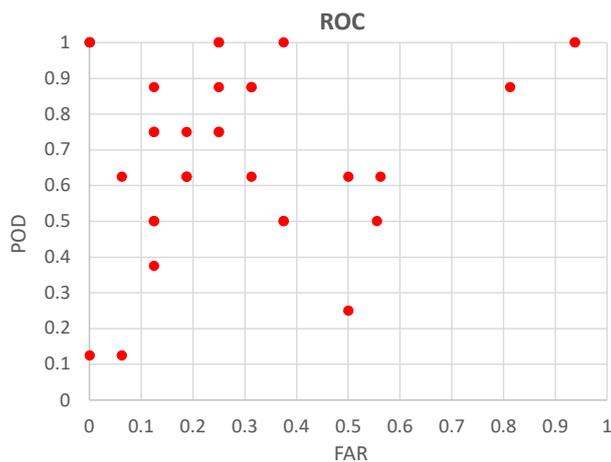


Abbildung 5 Detektionsrate in Bezug zur Fehlalarmrate bei 500 Lx

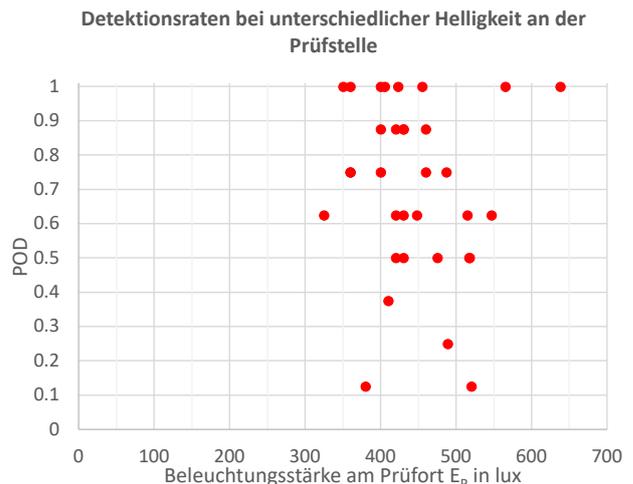


Abbildung 6 Detektionsraten bezogen auf die Beleuchtungsstärke am Prüfort bei Nennbeleuchtungsstärke 500 Lx

Beleuchtungsstärke. Dies zeigt, dass selbst bei Einhaltung der Forderungen der DIN EN 13018 und Verwendung genormter Messgeräte, die gemessenen 500 Lx unter Umständen nicht im Prüfbereich vorliegen.

Betrachtet man nun die Ergebnisse der visuellen Prüfung und stellt die Detektionswahrscheinlichkeit der Anzeigen (probability of detection – POD) und die Fehlalarmrate (FAR) in einer Receiver Operator Characteristics (ROC) Kurve gegenüber, bemerkt man die sehr große Streuung dieser Daten. Abbildung 5 lässt erkennen, dass trotz normgerechter Nennbeleuchtungsstärke von 500 Lx ein Großteil der Prüfer\*innen weder alle Anzeigen detektiert ( $POD < 1$ ), noch sicher bei der Beurteilung fehlerfreier Prüfobjekte ist ( $FAR > 0$ ). Dies widerspricht den oben genannten Erwartungen.

Eine mögliche Erklärung dafür könnte die in der Literatur häufig beschriebene Erkenntnis sein, dass verschiedene Prüfer\*innen oft unterschiedliche Prüfergebnisse erzielen (z. B. Bertovic et al., 2011). Als weitere mögliche Erklärung könnte man die Messunsicherheit des Gerätes anführen, dass also die Prüfer\*innen glauben, bei 500 Lx zu prüfen, in Wirklichkeit jedoch eine geringere Beleuchtungsstärke vorliegt.

Setzt man jedoch die Detektionsraten in Bezug zu den Beleuchtungsstärken am Prüfort  $E_p$ , wie in Abbildung 6 zu sehen, ergibt sich ein anderes Bild. Es zeigt sich, dass selbst bei Beleuchtungsstärken außerhalb des Bereiches der Messungenauigkeit von 15 %, also  $E_p \leq 425$  Lx, höhere PODs erzielt wurden, als im normativ geforderten Bereich. In den noch laufenden Untersuchungen deuten sich bereits ähnliche Verteilungen an.

#### 4 Weiterführende Untersuchungen

Die große Streuung bei den gemessenen Beleuchtungsstärken und die hohen Detektionsraten bei niedrigeren Beleuchtungsniveaus deuten darauf hin, dass die Beleuchtungsstärke nicht der ausschlaggebende Faktor beim Auffinden von Materialfehlern an der Oberfläche ist. Vielmehr scheint das Zusammenspiel mehrerer anderer Parameter einen wesentlich größeren Einfluss auf das Prüfergebnis zu haben. Darauf deuten auch die bereits gesammelten Daten aus den Fragebögen hin. Diese sollen Aufschluss auf den Einfluss der VT-Kenntnisse und die Erfahrung der Prüfer\*innen, sowohl im Bereich anderer ZfP-Verfahren, als auch mit dem Prüfobjekt geben. In weiteren Untersuchungen sollen die gewonnenen Erkenntnisse

validiert und mögliche weitere Zusammenhänge und Einflüsse auf die Detektionswahrscheinlichkeit analysiert werden. Die bereits gewonnenen Ergebnisse zeigen jedoch, dass eine strikt festgelegte Mindestbeleuchtungsstärke, welche in ihrem Ursprung nicht für heutige Prüfaufgaben konzipiert wurde, die Zuverlässigkeit der Prüfaussage nicht maßgeblich positiv beeinflusst. Somit vermuten wir, dass eine höchstgenaue, rückführbare Kalibrierung der Messgeräte nicht gerechtfertigt wäre.

#### REFERENZEN

- [1] M. Bertovic, M. Gaal, C. Müller, und B. Fahlbruch. „Investigating human factors in manual ultrasonic testing: testing the human factors model.“ *Insight*, 53(12), 2011: 673-676. <https://doi.org/10.1784/insi.2011.53.12.673>
- [2] Blackwell, H. Richard. „Development and Use of a Quantitative Method for Specification of Interior Illumination Levels on the Basis of Performance Data.“ *Illuminating Engineering*, 1959: 317-353.
- [3] Boyce, Peter Robert. „Illuminance Selection Based on Visual Performance – and Other Fairy Stories.“ *Illuminating Engineering Society of North America 1995 Annual Conference: Proceedings*. New York: IESNA, 1995. 562-577.
- [4] Çakir, A. „Basis der Festlegung von Beleuchtungsstärkewerten in Beleuchtungsnormen.“ *ERGONOMIC Institut für Arbeits- und Sozialforschung Forschungsgesellschaft mbH*, Berlin, 2006.
- [5] D'Agostino, A., S. Morrow, C. Franklin, und N. Hughes. *Review of Human Factors Research in Nondestructive Examination*. Herausgeber: Office of Nuclear Reactor Regulations. Prod. U.S. Nuclear Regulatory Com-missions. Washington DC, 2017. <https://www.nrc.gov/docs/ML1705/ML17059D745.pdf>
- [6] DIN 5032-7: 2017-02, Lichtmessung – Teil 7: Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke und Leuchtdichtemessgeräten
- [7] DIN EN 12665: 2011-09, – Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung
- [8] DIN EN 13018: 2016-06, Zerstörungsfreie Prüfung – Sichtprüfung – Allgemeine Grundlagen
- [9] Fredericksen, R. E., Peter J. Bex, und Franz A. J. Verstraten. „How big is a Gabor patch, and why should we care?“ *Journal of the Optical Society of America A* 14, Nr. 1 (1997): 1-12.

Kontakt: bl@dgzfp.de

## BEITRAG 27

## Bestimmung und Klassifizierung von Korrosionserscheinungen in ferromagnetischen Tankbodenblechen mit einer Wirbelstromapplikation in Verbindung mit der Streuflussmethode

Matthias Janßen<sup>1</sup>, Dirk Koster<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tuboscope Vetco (D) GmbH, Celle

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

**KURZFASSUNG** | Geräte (Scanner, Handscanner) von Tuboscope Vetco (D) GmbH zur Detektion von Korrosionserscheinungen in ferromagnetischen Tankbodenblechen arbeiten nach der Streuflussmethode (MFL – Magnetic Flux Leakage), ihr Auflösungsvermögen reicht von sehr großen Ungängen herunter bis zu kleinsten Fehlstellen, den sog. Pittings. Ermöglicht wird dieser weite Auflösungsbereich durch zwei verschiedene Modi, die sich in der Art der Sensorik und der Filterung voneinander abgrenzen. In der jüngeren Vergangenheit wurde von den Tankfarmbetreibern der Wunsch an Tuboscope herangetragen, auch die Anordnung (oben, unten) der detektierten Fehlstellen anzuzeigen. Zur Unterscheidung, ob sich Fehlstellen an der Ober- oder Unterseite der Tankbodenbleche befinden, wurden die Geräte zusätzlich neben der Streuflussmethode mit Wirbelstromapplikationen ausgestattet. Diese Kombination zweier wichtiger Technologien der ZfP in Tankbodenprüfgeräten wurde bereits in mehreren Vorträgen thematisiert. Zurzeit ist die Trennung von ober- und unterseitigen Korrosionsangriffen für großflächige Ungängen verlässlich möglich. Kleinere und kleinste Fehlstellen werden zwar sehr zuverlässig mit der Streuflussmethode detektiert, können aber nicht eindeutig in die ober- oder unterseitige Lage eingeordnet werden. Untersuchungen mit der Wirbelstromprüfelektronik „insPECT-PRO“ des Fraunhofer IZFP in Saarbrücken sollten aufzeigen, ob mit der vorhandenen Sensorik auch kleinere Fehlstellen in ihre ober- oder unterseitige Lage getrennt werden können. Der Vortrag beleuchtet den Aufbau der Sensorik und ihre Anordnung im magnetischen Kreis der Streuflusstechnologie. Die Wirbelstromprüfelektronik "insPECT-PRO" des Fraunhofer IZFP wird vorgestellt, des Weiteren werden die Prüfergebnisse eingehend diskutiert. Dabei steht u. a. der nicht zu vernachlässigende Sachverhalt im Vordergrund, in welcher Art und Weise das gleichzeitig auftretende Signal der Streuflussmethode die Wirbelstromapplikation beeinflusst; und ob sich diese Beeinflussung nachteilig auf das Auflösungsvermögen der Ober- und Unterseitentrennung auswirkt.

### 1 NOV, Tuboscope, Tankbodenprüfungen

Die Abkürzung NOV steht für National Oilwell Varco (branchenintern wird auch von „no other vendor“ gesprochen). Der Technologiekonzern betätigt sich weltweit als Ausrüster und Zulieferer der Erdöl- und Erdgasindustrie. Tuboscope ist ein Teil dieses Mischkonzerns und beschäftigt sich vorrangig mit zerstörungsfreier Werkstoffprüfung, primär im Erdöl- und Erdgasbereich. Im Vordergrund steht die Dienstleistung – also die Auftragsprüfbarkeit – für den Kunden. Für diesen Zweck werden Geräte zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung selbst entwickelt und gefertigt, aber auch auf dem Markt erstanden (um dann in die Geräteflotte integriert zu werden).

Eine über 50jährige Firmengeschichte führte zu weitreichendem Technologie- und Prüfwissen, das auch in Geräte außerhalb des Erdöl- und Erdgasgeschäftes einfließt. Als Prüfverfahren sind vorrangig zu nennen: Streufluss (MFL – Magnetic Flux Leakage), Ultraschall, Wirbelstrom, Magnetic Particle Inspection (MPI) und das Farbeindringverfahren.

Tankbodenprüfungen werden u. a. von den lokalen Umweltbehörden (z. B. Wasserbehörden) gefordert, um die notwendige Betriebssicherheit der Anlagen zu gewährleisten. Die Untersuchungen von Tanklagerstätten (für Rohöl, Produkte der petrochemischen Industrie) stellen sehr hohe Anforderungen an die intervallmäßige Dichtheitsprüfung [1-3]. Seit über 30 Jahren werden diese erforderlichen Prüfungen mit dem von Tuboscope selbstentwickelten Floor Inspection Tool (FIT) durchgeführt. Über die Jahre wurde das FIT-Gerät weiterentwickelt und den Gegebenheiten angepasst. Die letzte größere Produktüberarbeitung erfolgte unlängst und ermöglicht nun, neben der Detektion von großflächigen Fehlern, auch die Messung von Kleinkorrosion (z. B. in der Form von Sacklöchern mit einem Durchmesser von < 1,6 mm). Verfahrensprüfungen, die den bestimmungs-



Abbildung 1: FIT-Tankbodenprüfgeräte im Einsatz.

gemäßen Verwendungszweck von unabhängiger Stelle belegen, wurden durch den TÜV-Nord durchgeführt [4-6].

### 2 Fraunhofer IZFP, insPECT-PRO

Das Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP in Saarbrücken ist eine Einrichtung der Fraunhofer-Gesellschaft. Das Institut forscht in allen Bereichen der ZfP und entwickelt kognitive Sensorsysteme für das zerstörungsfreie Monitoring industrielle Prozesse und Wertschöpfungsketten. Ein herausragendes Technologiefeld ist die Wirbelstromprüftechnik, für die das Institut eine Breitband-Prüfelektronik für Mehrkanal- und Mehrfrequenzanwendungen entwickelt hat. Die sog. insPECT-PRO Wirbelstrom-Prüfelektronik bietet aufgrund seiner umfangreichen Auslegung ein sehr breites Anwendungsspektrum [7].



Abbildung 2: insPECT-PRO – Produktportfolio.

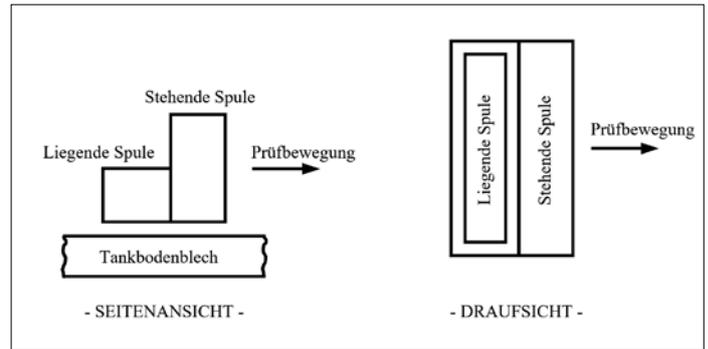


Abbildung 4: Anordnung der Sensorspulen, gemeinsame Nutzung für MFL und EC.

### 3 Aufgabenstellung

Die Tankbodenprüfgeräte, große Scanner [8] ebenso wie die kleineren Handscanner [9], sind mit einer Kombination aus Streufluss- und Wirbelstromtechnik (MFL – Magnetic Flux Leakage und EC – Eddy Current) ausgerüstet. Kerntechnologie zur Auffindung aller möglichen Fehler von kleinsten sog. „Pittings“ bis zu handtellergrößen Korrosionsschäden war und ist die Streuflussmethode (MFL). Aufgrund der Auslegung der Geräte mit sehr kraftvollen Magnetisierungen, die beachtliche Reserven aufweisen, können auch dickste Stahlplatten geprüft werden, die zudem mit einer Kunststoffschicht (Coating) belegt sind. Auflösungs- und Nachweisvermögen wurden in den (bereits oben genannten) Verfahrensprüfungen des TÜV Nord nachvollziehbar geprüft und dokumentiert.

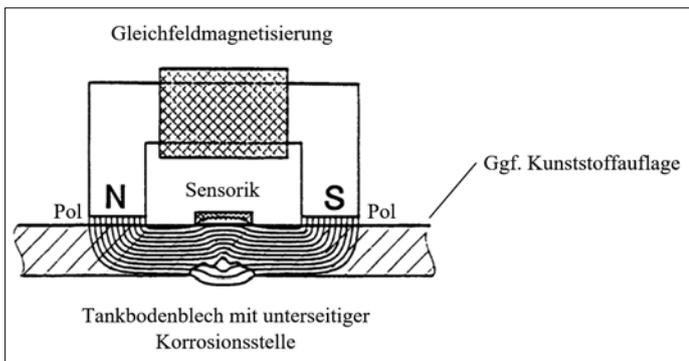


Abbildung 3: Anordnung der Sensorik im magnetischen Kreis.

Die zusätzlich zur Streuflussapplikation eingeführte Wirbelstromtechnik vermag großflächige Fehler eindeutig in ihrer Lage (ob auf der Ober- oder Unterseite des inspizierten Tankbodenbleches) zu diskriminieren – das Trennvermögen endet jedoch bei einer Größe, die ungefähr einem Daumenabdruck gleichkommt. Kleinflächige Korrosionsangriffe, Sacklöcher und die sog. „Pittings“ werden durch die zusätzliche Wirbelstromtechnik nicht mehr sicher erfasst. Dieser Sachverhalt wurde zunächst dem Umstand zugeschrieben, dass die Wirbelstrom-Instrumentation vergleichsweise einfach gehalten wurde und die Sensorik für die Fehlerbestimmung unpassend sei. In vergangenen Vorträgen wurde beschrieben, dass die Sensorik aus zwei Prüfspulen bestand, die L-förmig angeordnet waren und für die Streufluss- und Wirbelstromapplikation gemeinsam genutzt wurde. Möglicherweise ist diese Anordnung für die Auflösung kleinerer Fehler weniger geeignet, da die Spulen verhältnismäßig große

Flächen aufziehen und im Hinblick auf die Anregung und den Empfang ungünstig angeordnet sind.

Jüngste Änderungen in der Sensormechanik des FIT-Gerätes ermöglichten es, die Sensorik für die Streufluss- und Wirbelstromtechnik vollständig zu trennen. Nunmehr befindet sich in den Messschuhen, die berührend auf der zu inspizierenden Tankboden-Stahlblechplatte geführt werden, vier Messspulen. Zwei Messspulen nehmen in der bewährten L-Anordnung die Signale der Streuflussapplikation auf, die Sensorik der Wirbelstromtechnik besteht aus übereinander angeordneter Empfänger- und Senderspule. Diese rechteckförmigen Spulen spannen eine Spuleninnenraum von ca. 50 mm<sup>2</sup> auf; daraus wurde abgeleitet, dass kleinere Fehler nicht eindeutig erfasst werden können. Diese Einschätzung wurde im Vorfeld der Untersuchungen von vielen Entwicklern und erfahrenen Anwendern für Inspektionen mit Wirbelstromapplikationen geteilt.

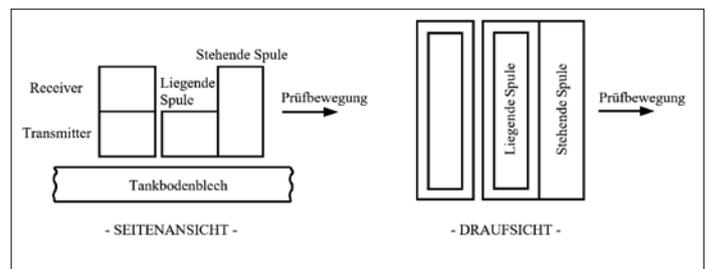


Abbildung 5: Neue Anordnung der Sensorspulen, getrennt für MFL und EC.

Weiterreichende Diskussionen mit Mitarbeitern des Fraunhofer IZFP zeigten auf, dass die Beschränkungen der bestehenden Wirbelstromtechnik sehr wahrscheinlich auf die Instrumentation und nicht auf die Sensorik zurückzuführen sind. Eine praktische Versuchsdurchführung im Labor des Instituts in Saarbrücken sollte belegen, ob die

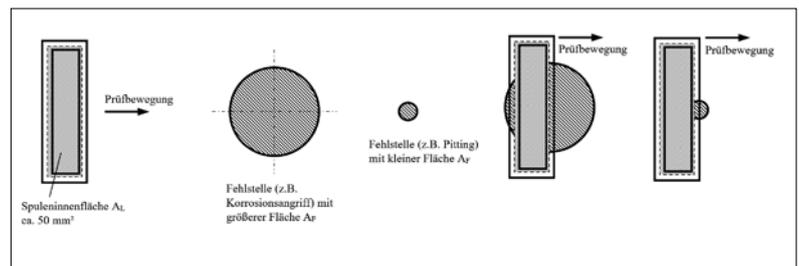


Abbildung 6: Spuleninnenfläche, Flächen großer und kleiner Ungenzen. Ist die Sensorik in der Lage, auch kleinere Fehlstellen zu erfassen?

Auflösung kleinerer Fehler mit einer leistungsfähigeren Instrumentation (in diesem Fall die oben abgebildete inspECT-PRO) und der bestehenden Sensorik möglich ist.

#### 4 Versuchsdurchführungen

Die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden mit der von Tuboscope Vetco entwickelten Testplatte für Tankbodenprüfungen durchgeführt.

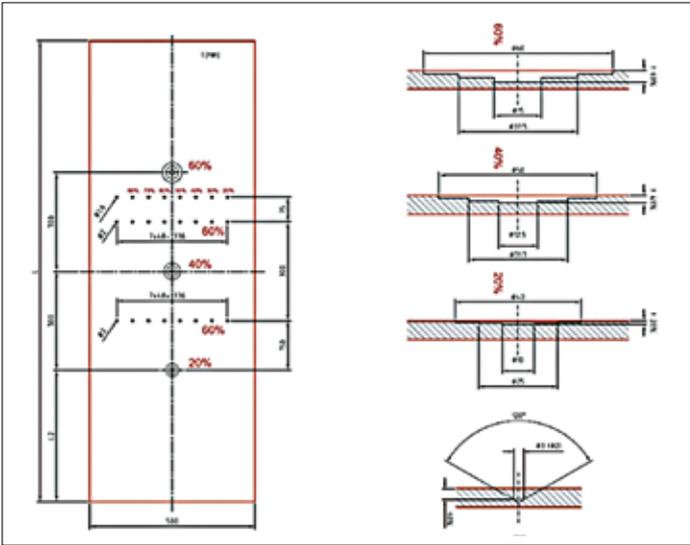


Abbildung 7: Testplatte mit großflächigen Ausfräsungen und kleinen Sacklochbohrungen. Die Dicke der Platte beträgt 6 mm, es handelt sich um ferromagnetischen Stahl.

Die folgenden Abbildungen zeigen das  $Y(t)$ -Diagramm der Signalspannung. Die Messungen wurden mit der inspECT-PRO Instrumentation und Software angefertigt. Um die Anforderung der Unterscheidbarkeit der Lage der Fehler zu lösen (Fehler oben oder unten), wurden zwei Wirbelstromkanäle unterschiedlicher Phaseneinstellung zur Auswertung verwendet. Abbildung 8 zeigt das  $Y(t)$ -Signal beider Kanäle bei Lage der Fehler auf der Oberseite. Die Testplatte wurde bis zur Sättigung magnetisiert, die maximale Permeabilität wurde erreicht.

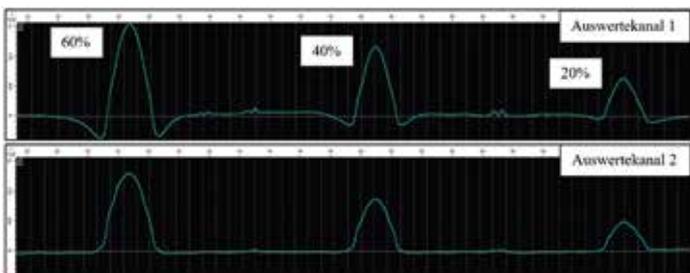


Abbildung 8: Ausfräsungen (60%, 40%, 20%) und Sacklöcher oben.  $Y(t)$ -Signale beider Auswertekanäle.

Das Signal der drei Ausfräsungen ist in beiden Auswertekanälen deutlich ausgeprägt. In Auswertekanal 1 sind auch die drei Sacklöcher zu erkennen, Abbildung 9 zeigt eine Vergrößerung. Ohne Anwesenheit der Offsetschwankungen, verursacht durch die großen Signale der Ausfräsungen, sollte die Signalhöhe für eine zukünftige Auswertung ausreichend sein. Hierbei können auch Algorithmen zur Offsetkompensation unterstützen.

Anschließend wurde die Testplatte umgedreht, so dass die Testfehler sich auf der Unterseite befanden. Es ist gut zu erkennen, dass in Auswertekanal 1 die Ausfräsungen und Sacklöcher immer noch deutliche Signalanzeigen hervorbringen.

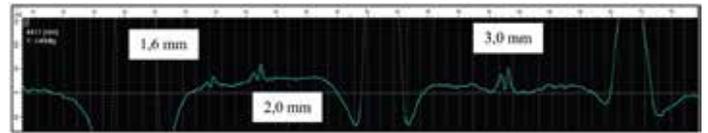


Abbildung 9: Ausfräsungen (60%, 40%, 20%) und Sacklöcher oben. Vergrößerung des Signalverlaufs. Nunmehr werden auch die Sacklöcher 1,6 mm, 2,0 mm und 3,0 mm sichtbar.

Anders sieht es in Auswertekanal 2 aus. Hier sind keine signifikanten Signale mehr zu erkennen, weder bei den Ausfräsungen noch bei den Sacklöchern. Dieses Signalverhalten kann zukünftig zur Unterscheidbarkeit der Fehlerlage genutzt werden indem z.B. eine Kombination der Auswertekanäle mittels Korrelationsalgorithmen verwendet wird.

#### 5 Ergebnisse

Zweifelsfrei gelingt mit der Wirbelstromtechnik inspECT-PRO des IZFP und der Sensorik des FIT-Gerätes die Trennung auch von kleinsten Fehlern in Ober- und Unterseite, das konnten die Messungen ver-

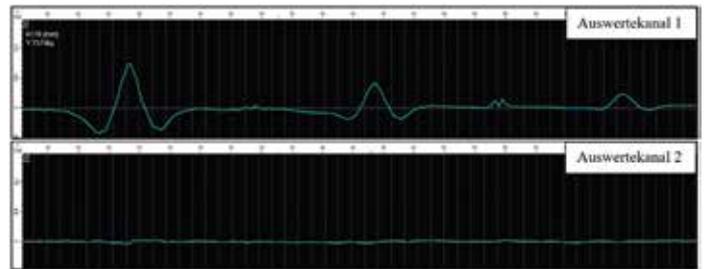


Abbildung 10: Ausfräsungen (60%, 40%, 20%) und Sacklöcher unten. Auswertekanal 2 zeigt keine nennenswerten Anzeigen.

lässlich belegen. Ein Auswertekonzept wurde kurz angesprochen. Bereits ohne weitere aufwändige Signalnachbearbeitung wurden kleinste Testfehler sicher erkannt, das erzielte Signal-/Rauschverhältnis lag weit über den Erwartungen. Interessant in diesem Zusammenhang ist die vermeintliche (und oben erwähnte) Fehleinschätzung, dass die Sensorik aufgrund ihrer Größe und Anordnung nicht zur Detektion kleiner Fehler geeignet sei. Für das bessere Verständnis der Verhältnisse um die Sensorik wurde der Versuch ohne Magnetisierung und damit ohne Streuflusssignal wiederholt. Und ohne die Anwesenheit des Streuflusssignals erfolgte keine Detektion der Sacklöcher. Daraus schlussfolgert zwingend, dass erst die Überlagerung von Streufluss- und Wirbelstromsignal zu dem gewünschten Ergebnis führt. Nachfolgend werden die Einflüsse auf die Send- und Empfangsspule der Wirbelstromtechnik veranschaulicht.

#### 6 Folgeversuche

Nach den überzeugenden Versuchen mit der inspECT-PRO Wirbelstromtechnik des Fraunhofer IZFP wurde die bestehende Wirbelstromtechnik der FIT-Geräte im Hinblick auf die gesammelten Erkenntnisse deutlich modifiziert. Hervorzuheben sind Änderungen des Wirbelstromsignal-Transmitters, der nunmehr mit einer höheren Sendefrequenz und leistungsangepasst auf die Sendespule wirkt. Des Weiteren wurden der Wirbelstromsignalempfänger und die

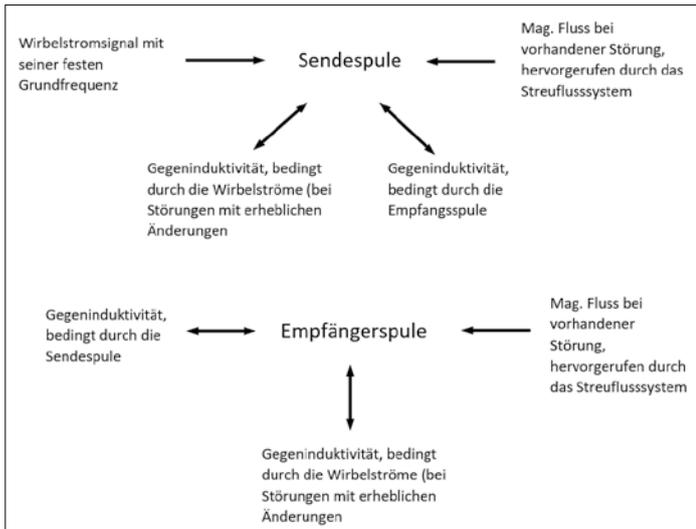


Abbildung 11: Sende- und Empfangsspule werden zusätzlich von dem Streuflusssignal beeinflusst.

Signalfilter bezüglich ihrer Güte verbessert. Das Trennvermögen zwischen ober- und unterseitig angeordneten Fehlern wurde im unteren Bereich auf Sacklöcher begrenzt, die ungefähr einen Durchmesser von 3,0 mm aufweisen – vor dem Hintergrund der jahrzehntelangen Erfahrung mit Tankbodenblechen ein mehr als ausreichendes Trennvermögen. Die beiden Messungen, die in Abbildung 12 dargestellt werden, wurden mit der geänderten Instrumentation und mit

der bereits oben vorgestellten Testplatte durchgeführt. Abweichend von den Ergebnissen mit der Technik des Fraunhofer IZFP werden nun beide Signalformen, Phase und Amplitude, dargestellt und genutzt. Unsicher ist den Darstellungen zu entnehmen, dass bei oberseitig angeordneten Fehlern die Phase deutlich größere Signalhöhen annimmt als die Amplitude. Bei unterseitig angeordneten Fehlern kehren sich die Verhältnisse vollständig um. Diese Feststellung gilt nur für die Ausfräsungen und eine bestimmte Sendefrequenz; darüber dominieren Änderungen der Phase, darunter die der Amplitude. Beide Signale, Phase und Amplitude, werden in festen zeitlichen Abständen von einer Millisekunde der Messsoftware des Geräts zugeführt und abgespeichert. Vor der Übertragung an den Rechner werden die Signale in der Instrumentation vorverarbeitet, so dass dem Bediener die Information „Fehler oben“ oder „Fehler unten“ direkt zur Verfügung steht. Die Darstellung der Phase und Amplitude als Linienschrieb in der Messsoftware ist möglich, erfolgt jedoch während der Inspektionsarbeiten im Tank nicht. Grund für die ausbleibende Darstellung der Amplitude und Phase als Linienschrieb ist die Fülle der Signale; die zusätzliche Präsentation neben den Signalen der Streuflussmethode würde den Werkstoffprüfer mit Sicherheit überwältigen.

## REFERENZEN

- [1] Arbeitsblatt DWA-A 788, Technische Regel wassergefährdender Stoffe (TRwS) Flachbodentanks aus metallischen Werkstoffen zur Lagerung wassergefährdender Flüssigkeiten, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- [2] API Standard 650, Welded Tanks for Oil Storage, American Petroleum Institute, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005.
- [3] API Standard 653, Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, American Petroleum Institute, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005.
- [4] Bericht über die Verfahrensprüfung für das halbautomatische Streuflusssystem FIT (Floor Inspection Tool) zur Ermittlung von Korrosion an der Unter- und Oberseite von Tankböden, Prüfzeitraum April 1995, Bericht Nr. VET 95 167, TÜV Hannover, Am TÜV 1 30519 Hannover
- [5] Bericht über die ergänzende Verfahrensprüfung des Tankbodenprüfgerätes FIT (Floor Inspection Tool) zur Ermittlung von Korrosionsstellen an Tankböden, Prüfzeitraum August 2012, Bericht TSV-12-01, TÜV Nord EnSys Hannover, Am TÜV 1, 30519 Hannover
- [6] Bericht über die ergänzende Verfahrensprüfung des Tankbodenprüfgerätes FIT (Floor Inspection Tool) zur Ermittlung von Korrosionsstellen an Tankböden, Prüfzeitraum August 2016, Bericht TSV-16-01, TÜV Nord EnSys Hannover, Am TÜV 1, 30519 Hannover
- [7] insPECT-PRO, Breitband-Wirbelstromprüfelektronik für Mehrkanal- und Mehrfrequenzanwendungen, Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Campus E3, 66123 Saarbrücken
- [8] Magnetische Streuflussprüfung in Kombination mit einer Wirbelstromapplikation zur Trennung von Störungen (Fehler, Ungenügen) auf der Ober- und Unterseite von Tankbodenplatten aus ferromagnetischen Materialien, DGZfP-Jahrestagung 2017, 22. – 24. Mai 2017, Koblenz
- [9] Prüfung von ferromagnetischen Tankbodenplatten in Randbereichen und unter Einbauten mit einem manuell geführten Handscanner, DGZfP-Jahrestagung 2018, 07. – 09. Mai 2018, Leipzig

Kontakt: Matthias.Janssen@nov.com



Abbildung 12: Ergebnisse der modifizierten Wirbelstromtechnik.