

Aktuelle Anwendungen der Laser-Thermografie

Philipp MENNER¹, Axel HESS², Stefan GRILL², David SAAL³, Peter MAYR³

¹ edevis GmbH, Stuttgart

² C. & E. Fein GmbH, Schwäbisch Gmünd-Bargau

³ Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Meßtechnik, Ulm

Kontakt E-Mail: philipp.menner@edevis.de

Kurzfassung. Mit Laserstrahlquellen stehen der aktiven Thermografie sehr flexible Anregungsquellen zur Verfügung, die in verschiedensten Bereichen einsetzbar sind. Relativ klassische Anwendungen der Laser-Thermografie sind die Fügeverbindungsprüfung z.B. von Laserschweißnähten oder auch die Flying-Spot-Thermografie zur Rissdetektion. Moderne Online-Thermografie nutzt Laserlinien-Anregung, gibt sich jedoch nicht mit der einfachen Abrollung zufrieden, sondern wendet auch noch eine Fourier-Analyse auf die abgerollten Thermogramm-Sequenzen an. Bei der Laser-basierten Abtragung von Impactgeschädigtem CFK wird der Bearbeitungslaser als Anregungsquelle genutzt, um noch verbliebene Schädigungen im Bauteil zu detektieren. In Kombination mit schnellen IR-Kameras und einer hochpräzisen Synchronisierung sind inzwischen sogar bildgebende Fotothermik-Messungen zur Randzonenanalyse möglich. So ist z.B. Schleifbrand bildgebend nachweisbar, und es kann - nach einer entsprechenden Kalibrierung – die Einhärtetiefe berührungslos bestimmt werden. Dieser Beitrag stellt einige der oben genannten Beispiele vor, um das Potential dieser Anregungsmethode aufzuzeigen.

Motivation

Optisch angeregte aktive Thermografie wird seit vielen Jahren eingesetzt, da die optische Anregung gegenüber anderen Anregungsmethoden einige Vorteile bietet, u.a. die Kontaktfreiheit. Allerdings haben die Standardquellen wie z.B. Halogen- oder Blitzlampen auch jeweils Ihre Nachteile. Die Laseranregung ist dagegen sehr flexibel und ermöglicht teilweise ganz neue Anwendungen für die Thermografie.

1. Optische Anregungsquellen

1.1 Thermische Strahler

Fast alle optischen Anregungsquellen sind thermische Strahler, d.h. ein Leuchtmittel wird soweit erhitzt, bis ausreichend Strahlung im IR oder im sichtbaren Spektralbereich vorliegt. Das Spektrum lässt sich durch die Planck-Kurve beschreiben und ist meist breitbandig, was je nach Anwendung den Einsatz von Spektralfiltern erfordert. Viele Leuchtmittel wie z.B. Halogen-, Quarz- und Keramik-Strahler sind thermisch träge, wodurch die Modulations-



frequenzen limitiert sind (z.B. im Fall von Halogenlampen auf ca. 1 Hz). Für thermisch „langsame“ Werkstoffe wie z.B. CKF sind solche Quellen gut geeignet, für Metalle dagegen nicht. Auch spektral betrachtet sind diese Quellen hier nicht optimal, da nur ein kleiner Teil der Strahlung absorbiert wird. Eine Strahlformung ist nur in gewissen Grenzen möglich.

1.2. Laser

Im Gegensatz zu thermischen Strahlern entsteht bei Lasern Licht durch stimulierte Emission. Laserlicht ist sehr schmalbandig und kann ausgezeichnet geformt – z.B. kollimiert oder fokussiert - werden (Abb. 1). Auch eine strukturierte Beleuchtung ist z.B. über diffraktive optische Elemente (DOE) möglich, und mit einem Galvoscanner ist die Anregung zeitlich und örtlich sehr variabel.



Abb. 1. Variable Strahlformung des Laserlichtes mittels Linsen oder DOE. V.l.n.r.: 2,4 m Spot, 10 mm Kreis, 4 x 40 mm Linie, hexagonales Muster aus sechs 2,0 mm Spots.

Laser sind sehr hochfrequent modulierbar und damit auch für die Prüfung von thermisch schnellen Werkstoffen geeignet. Viele Metalle haben im NIR-Bereich Absorptionsbanden; wird ein Laser mit passender Wellenlänge eingesetzt, kann damit Energie effizient eingebracht werden.

2. Experimentelle Aufbauten

2.1 Prüfsystemkomponenten

Für fast alle der im Folgenden gezeigten Messungen wurde ein Dioden-Laser mit max. 250 W Leistung und 938 nm Wellenlänge eingesetzt (Abb. 1). Der Frequenzgang zeigt, dass der Laser auch bei hohen Lockin-Frequenzen von 1 kHz nur eine sehr geringe Phasenverschiebung aufweist.

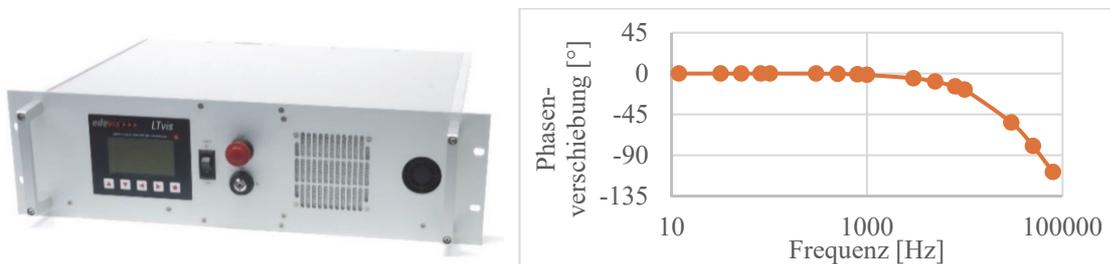


Abb. 2. Eingesetzter 250W Diodenlaser edevis LTvis 250 NT (links), frequenzabhängige Phasenverschiebung des Lasers (rechts).

Bei den hohen Bildaufnahme- und Anregungsfrequenzen ist eine exakte Synchronisierung von IR-Kamera und Laser-Anregung erforderlich. Diese erfolgte über das edevis ESG und die Software DisplayImg 6. Bei thermisch unendlich dicken Proben wird wie theoretisch erwartet ein Phasenwinkel von -45° gemessen. Viele der Messungen erfolgten in einer Laserkabine, die auf Basis eines optischen Tisches flexible Aufbauten erlaubt und keine persönliche Schutzausrüstung erfordert.

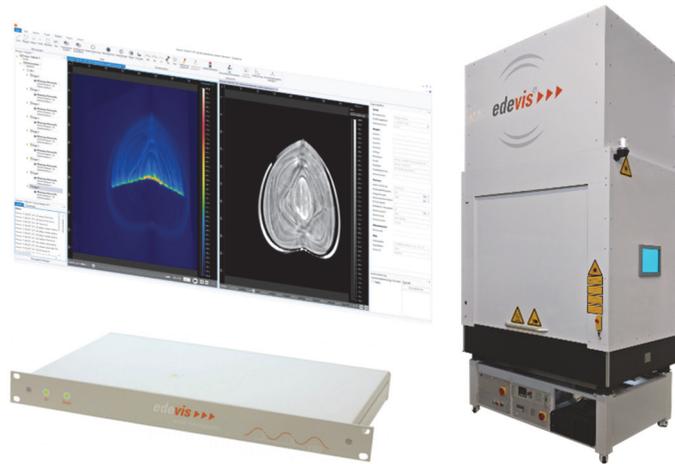


Abb. 3. Für die Messungen verwendete Peripherie: Aufnahme- und Auswerte-Software edevis DisplayImg 6, Synchronisierungseinheit edevis ESG, Laserschutzkabine LTvis.

2.2 Online-Thermografie

Online-Thermografie kann als Puls-Thermografie an bewegten Objekten angesehen werden. Die IR-Kamera arbeitet dabei im einfachsten Fall als Zeilenkamera, die die Probe in einem definierten Abstand von einer linienförmigen Anregung betrachtet [1] (Abb. 4).



Abb. 4. V.l.n.r.: Prinzip der Online-Thermografie, Linien-Optik, IR-Kalibriertarget, Verfahrtisch mit IR-Kamera und Laserlinie.

Durch die linienförmige Anregung spielen hier neben dem Wärmefluss in die Tiefe auch laterale Wärmeflüsse in bzw. entgegen der Verfahrrichtung eine Rolle, wodurch sich die Methode zur Rissdetektion eignet. Sind Bildwiederholrate und Vorschubgeschwindigkeit bekannt, lässt sich über einen Abrollalgorithmus aus der Zeitsequenz von IR-Zeilen ein IR-Bild zusammensetzen, das das gesamte Bauteil zu einem definierten Abkühlzeitpunkt zeigt (wobei alle Pixel virtuell simultan angeregt wurden). Wird statt einer einzelnen Zeile mehrere Zeilen oder sogar das ganze Kamerabild verwendet, besteht das Ergebnis aus mehreren IR-Bildern. Aus 512 Zeilen entsteht so eine IR-Bildsequenz aus 512 Bildern. Da die Zeilen verschiedene Abstände von der Linienanregung besitzen, zeigen die IR-Bilder jeweils verschiedene Abkühlzeitpunkte.

Sind genügend dieser Bilder vorhanden, ist auch Puls-Phasenanalyse dieser errechneten IR-Sequenz möglich. Dies setzt aber voraus, dass vor der Fourier-Analyse evtl. vorhandene Abbildungsfehler (z.B. Linsenverzerrung, Kamera-Perspektive) über eine geometrische Kalibrierung rechnerisch eliminiert werden. Dies kann z.B. über ein Schachbrett-Target erfolgen.

Der verwendete Verfahrtschiff erreicht eine maximale Verfahrgeschwindigkeit von 35 m/min. Je nach Bildfeldgröße sind daher hohe Bildwiederholraten und kurze Integrationszeiten nötig, z.B. (500 Hz und 500 μ s), um die Bewegungsunschärfe gering zu halten. Zum Einsatz kommen bevorzugt FLIR X6580sc oder X6900sc (beide MWIR); bei sehr kurzen Integrationszeiten auch FLIR X6570sc (LWIR). Die Linienoptik ist auf 200 W Laserleistung limitiert.

2.2 Flying Spot

Flying-Spot-Thermografie ist wie die Online-Thermografie eine Kombination aus örtlicher und zeitlicher Variation der Laseranregung, nur dass sich hier die Probe i.d.R. nicht bewegt. Stattdessen wird die Probenoberfläche mit einem Laserpunkt abgerastert [2]. Durch die punktförmige Anregung spielen auch hier laterale Wärmeflüsse eine große Rolle, was die Methode zur Rissdetektion befähigt.

Der verwendete Galvoscaner Scanlab intelliScan III 30 erlaubt je nach F-Theta-Linse eine Scanfeldgröße von z.B. 200 x 200 mm² bei einem Arbeitsabstand von 480 mm und einer Spotgröße von 2,4 mm. Wird mit einem kollinearen Aufbau gearbeitet, bei dem Laser und Kamera über einen dichroitischen Spiegel auf dieselbe optische Achse gebracht werden, ist die Scanfeldgröße durch den Durchmesser des Dichroiten limitiert. Als Kamera dienen entweder FLIR X6580sc oder FLIR A6751sc.

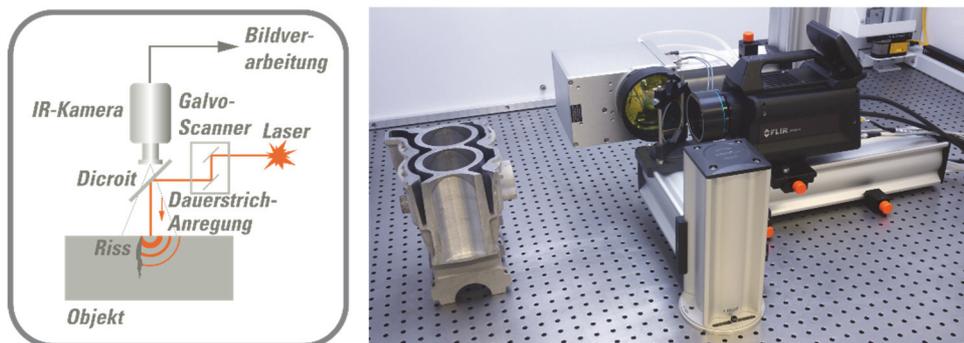


Abb. 5. Prinzip der Flying-Spot-Thermografie (links), kollinearer Laboraufbau mit Galvoscaner Scanlab intelliScan III 30, FLIR X6580sc und Probe.

2.3 Bildgebende Fotothermik

Die fotothermische Radiometrie oder kurz Fotothermik erzeugt mit einem modulierten Laser thermische Wellen im Bauteil und charakterisiert diese mit einem 1-Punkt-Sensor und einem Lockin-Verstärker [3, 4]. Das Verfahren ist so sensitiv, dass damit z.B. Gefügeveränderungen in Metallen quantitativ untersucht werden können. So können z.B. Einhärtetiefen gemessen und Schleifbrand detektiert werden. Mit einer exakten Synchronisierung ist es nun auch möglich, dies mit IR-Kameras bildgebend zu tun. Dazu wird die Kamera über einen Dichroiten mit dem Laser auf dieselbe optische Achse gebracht. Die Laseranregungsfläche hängt vom Anwendungsfall ab; bei ausreichend hohen Signalen kann mit stark aufgeweitetem Laserlicht eine größere Fläche auf einmal untersucht werden (z.B. 20x50 mm²); bei schwachen Signalen nutzt man eine punktförmige Anregung, da dann auch laterale Wärmeflüsse zum Signal beitragen. Um trotzdem den Vorteil der bildgebenden Messung nutzen zu können, wird der Laserstrahl über ein diffraktives optisches Element in mehrere Punkte aufgeteilt.

Optimale Ergebnisse werden mit der FLIR X6901sc erzielt (max. 1 kHz bei voller Auflösung), ausgeprägter Schleifbrand ist jedoch auch mit der FLIR A6751sc (125 Hz bei voller Auflösung) detektierbar. Über eine optische Bank kann der Aufbau an flexibel an die Anwendung angepasst werden. Ein Formspannsystem erlaubt dabei eine einfache, schnelle und reproduzierbare Probenpositionierung.

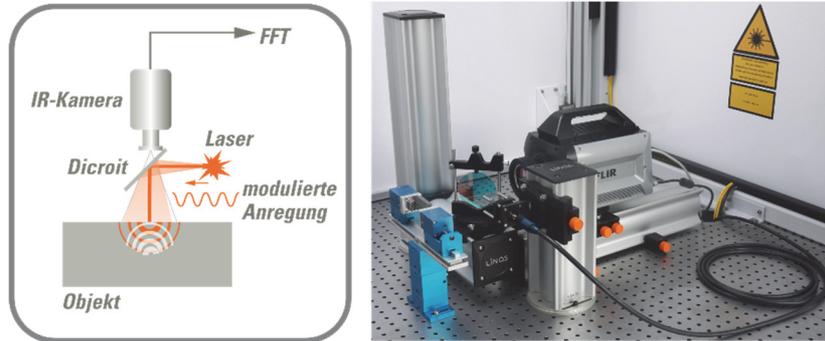


Abb. 6. Prinzip der bildgebenden Fotothermik (links), kollinearer Laboraufbau FLIR X6901sc und Probe in Formspannsystem.

3. Ergebnisse

3.1 Online-Thermografie

Gerade im Lebensmittel- und im Medizinprodukte-Bereich werden an Siegelnähte hohe Qualitätsanforderungen gestellt. Die Prüfung ist aufgrund der hohen Produktionsgeschwindigkeit eine Herausforderung. Die Erzeugung eines Thermogramms durch Abrollung einer Kamerazeile ist zwar schnell und einfach möglich, allerdings ist der Kontrast von Defekten in der Siegelnaht oft nicht ausreichend für eine automatisierte Auswertung.

Werden nun bei einer entsprechend schnellen IR-Kamera wie z.B. FLIR X6580sc viele Zeilen verwendet, liegen genügend Daten vor, um eine Puls-Phasen-Auswertung der abgerollten Sequenz zu ermöglichen. Dadurch steigt der Defektkontrast deutlich an (Abb. 7).



Abb. 7. V.l.n.r.: Online-Thermografie mit Laserlinienanregung an Medizinproduktverpackung, abgerolltes IR-Bild, Puls-Phasen-Auswertung der abgerollten IR-Sequenz bei 5 Hz.

3.2 Flying-Spot-Thermografie

Im Rahmen den Precise-Projektes wurde bei der C. & E. Fein GmbH ein semimobiler Aufbau zur Laser-Bearbeitung von CFK entwickelt (Abb. 8). Anregungslaser und Scanner können aber nicht nur zur Bearbeitung, sondern auch zur thermischen Anregung für Thermografie-

Prüfung verwendet werden. Auf diese Weise wird zunächst die Defektgröße bestimmt, um nur die geschädigten Bereiche abzutragen. Außerdem wird nach jedem Antragschritt geprüft, ob noch weitere Schädigungen im Bauteil vorhanden sind.

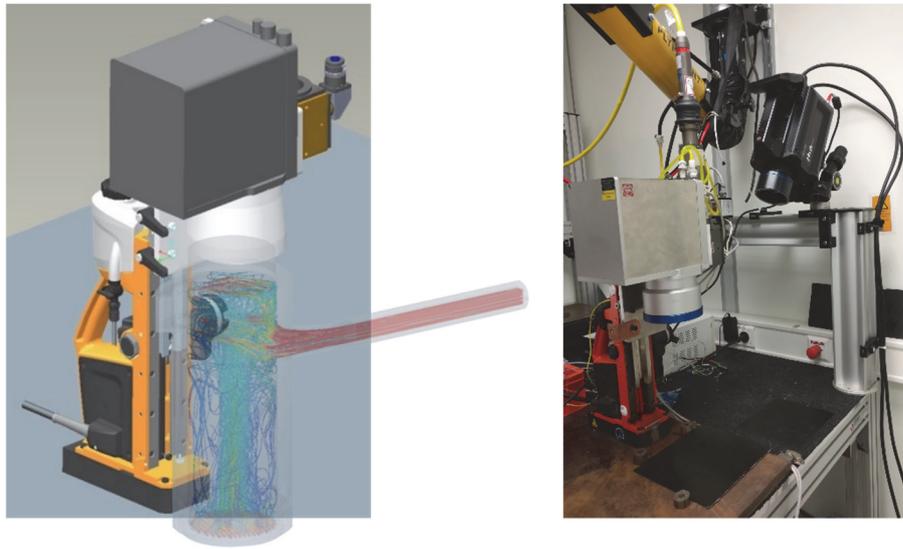


Abb. 8. Aufbau zur sequentiellen Laser-CKF-Bearbeitung und Flying-Spot-Thermografie bei der C.&E. Fein GmbH, basierend auf Trumpf TruHeat 750W, Scanlab intelliScan III mit Halterung und Absaughaube (teiltransparent dargestellt) und FLIR X6580sc.

3.2.1 Delaminationsdetektion

Ein Laserpunkt rastert defokussiert die Bauteiloberfläche ab, während die IR-Kamera eine Sequenz aufzeichnet (Abb. 9) [5]. Die gezeigte Aufnahme erfolgte mit einer FLIR X6580sc mit 200Hz, allerdings reicht auch eine FLIR A6751sc.

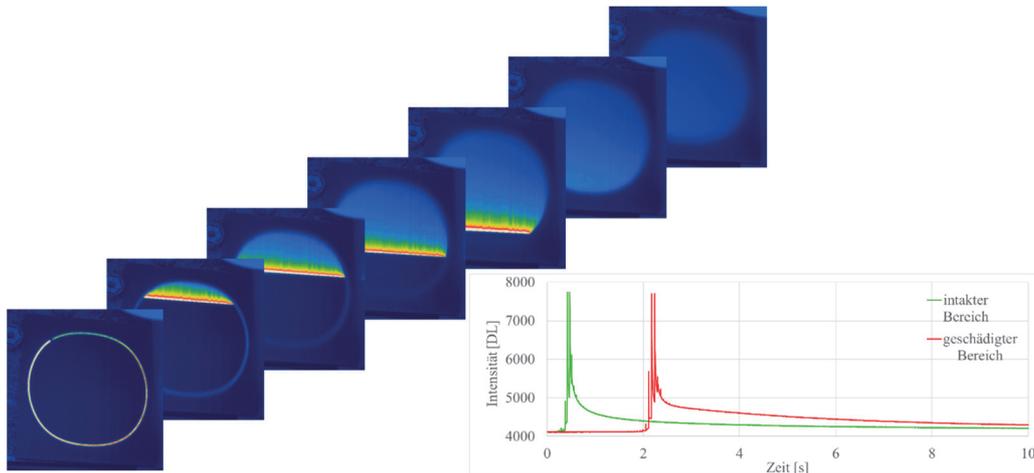


Abb. 9. IR-Sequenz während eines Laserscans (links), Signale zweier Pixel (intakter bzw. geschädigter Bereich, rechts).

Anschließend wird die Sequenz im Zeitbereich so umgeformt, dass scheinbar alle Punkte der Oberfläche gleichzeitig angeregt wurden (Abb. 10). Hier können schon intakte von defekten Bereichen im Abkühlverhalten unterschieden werden.

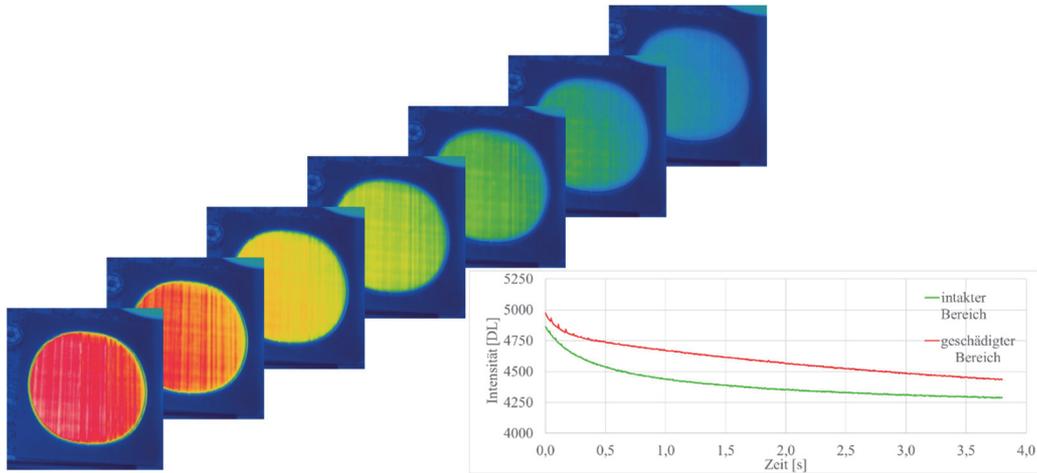


Abb. 10. Abgerollte IR-Sequenz mit virtuell simultaner Anregung aller Pixel (links), Signale zweier Pixel (intakter bzw. geschädigter Bereich, rechts) nach Abrollung.

Die Umrechnung der Sequenz ermöglicht es nun, eine Puls-Phasen-Auswertung durchzuführen (Abb. 11). Dadurch wird das Signal-/ Rausch-Verhältnis erhöht und der Einfluss lokal unterschiedlicher Emissionskoeffizienten reduziert.

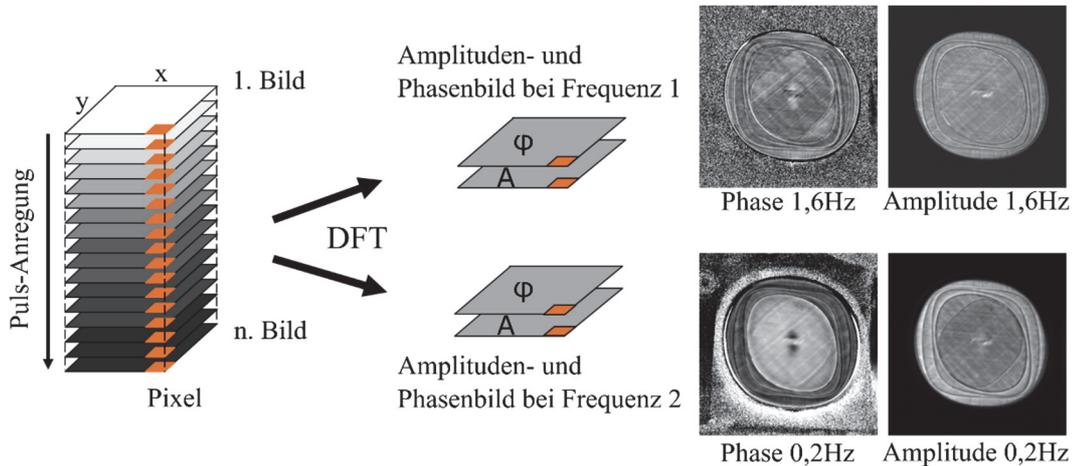


Abb. 11. Puls-Phasen-Auswertung der abgerollten IR-Sequenz (links), Beispiel-Phasen- und Amplituden-Bilder bei zwei verschiedenen Frequenzen (rechts).

Das Ergebnis einer solchen Untersuchung ist in Abb. 12 dargestellt.

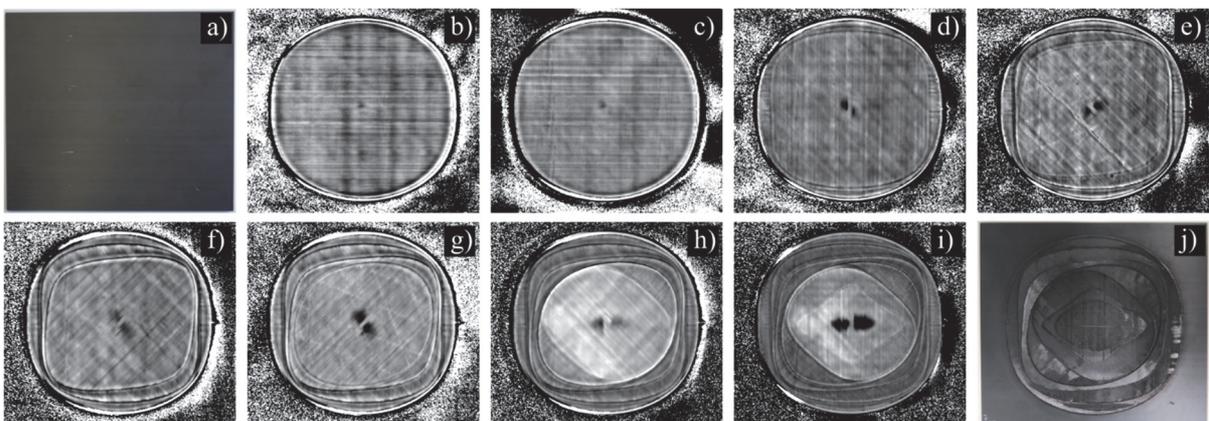


Abb. 12. a) CFK-Platte mit Duromermatrix nach 15J Impact, b) bis i) Phasenbilder bei 1 Hz nach lagenweisem faserorientierungsoptimiertem Abtrag des geschädigten Bereiches, j) CFK-Platte nach Abtrag bis zur letzten Lage.

Wie bei Impactschäden üblich ist von der Impactseite aus kaum ein Schaden erkennbar. Auch das Phasenbild zeigt nur eine kleine Delamination. Mit zunehmender Tiefe (d.h. mit dem schrittweisen Abtrag der CFK-Lagen) erscheint die Schadensfläche zunehmend größer, und auch die Orientierung der delaminierten Bereiche ändert sich entsprechend der jeweiligen Faserorientierung.

Die Methode eignet sich nicht nur für Platten, sondern auch für komplexer geformte Bauteile. Abb. 13 zeigt die Bearbeitung eines Demonstratorbauteils [6].



Abb. 13. Laser-bearbeitung- und Flying-Spot-Thermografie an Impactgeschädigtem CFK-Demonstratorbauteil (links), Bauteil nach lagenweisem faserorientierungsoptimiertem Abtrag des geschädigten Bereiches.

Das Ergebnis der Prüfung zu Beginn und Ende des Abtragsprozesses ist in Abb. 14 dargestellt. Das Phasenbild zeigt die Schadensfläche erheblich deutlicher als die einfachen Thermogramme. Nach dem Abtragsprozess ist kein Schaden mehr erkennbar, das Bauteil ist bereit für die Reparatur.

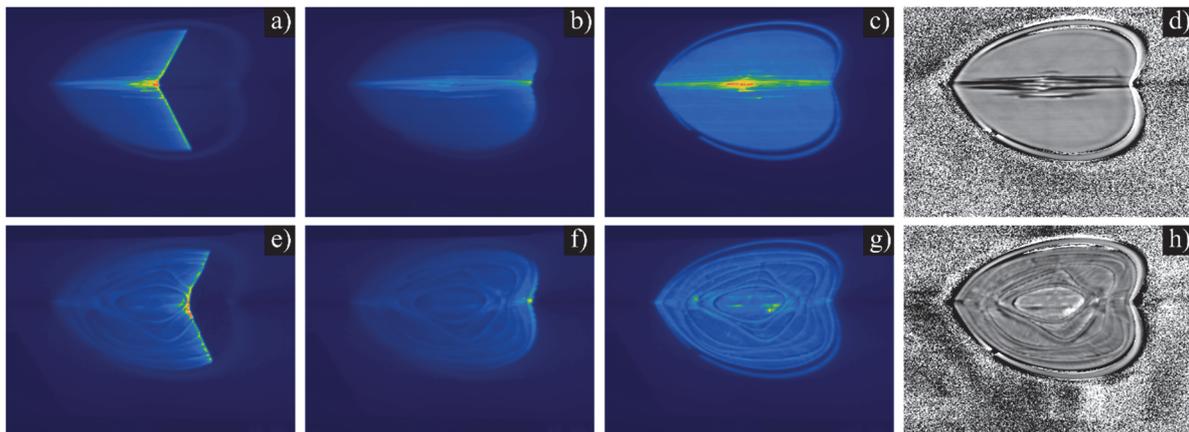


Abb. 14. Demonstratorbauteil mit Impactschaden, a) IR-Bild während Laserscan, b) IR-Bild unmittelbar nach Laserscan, c) abgerolltes Sequenzbild, d) Puls-Phasenbild bei 1 Hz; e) bis h) entsprechend nach Laser-Ablation von 7 Lagen.

3.2.1 Rissdetektion

Die abgerollten Sequenzen erscheinen wie Puls-Thermografie-IR-Sequenzen, durch die punktförmige Anregung enthalten Sie jedoch auch Informationen aus lateralen Wärmequellen. Es können also auch Risse detektiert werden. Abb. 15 zeigt das Ergebnis der Prüfung einer CFK-Platte mit Thermoplastmatrix. Bei deren Schädigung kam es zur Rissbildung an der Oberfläche. Der Riss ist im Phasenbild wieder besser erkennbar als im abgerollten IR-Bild. Mit etwas Bildverarbeitung (Gradientfilter etc.) ist auch eine automatisierte Rissdetektion möglich.

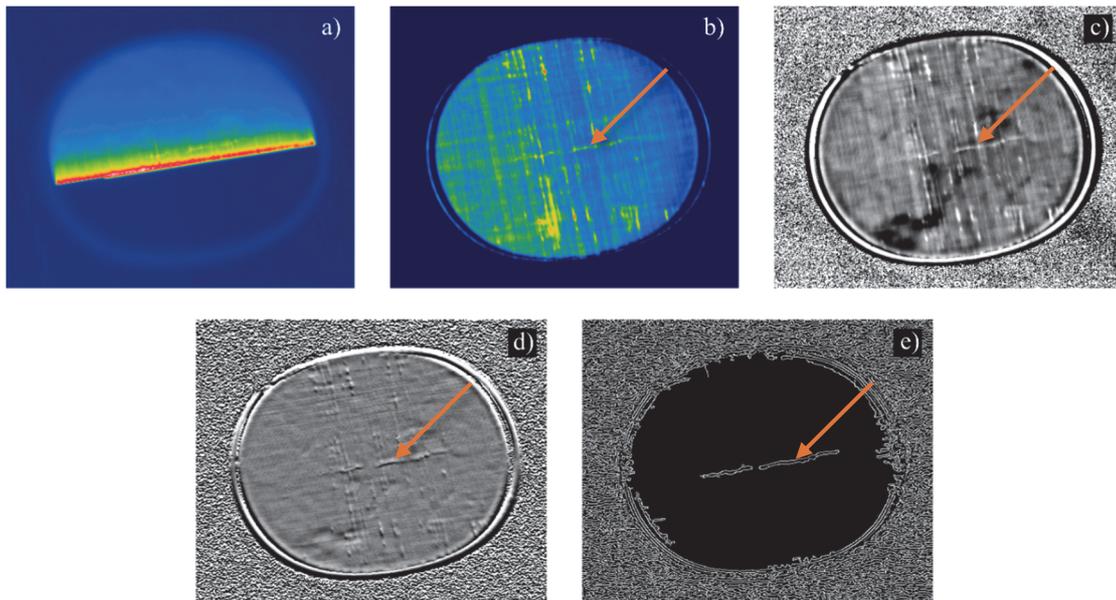


Abb. 15. Rissbehaftete CFK-Platte mit Thermoplastmatrix, a) IR-Bild während Laserscan, b) abgerolltes Sequenzbild, c) Puls-Phasenbild bei 1 Hz, Phasenbild mit Sobel-Filterung, automatisierte Rissdetektion.

3.3. Bildgebende Fotothermik

3.3.1 Einhärtetiefe-Messung

Nach einer Kalibrierung mit zerstörender Prüfung sind mit Fotothermik berührungslose Einhärtetiefemessungen möglich. Abb. 16 zeigt einen Vergleich zwischen punkt- und bilgebender Fotothermik (Foratherm bzw. Forakam).

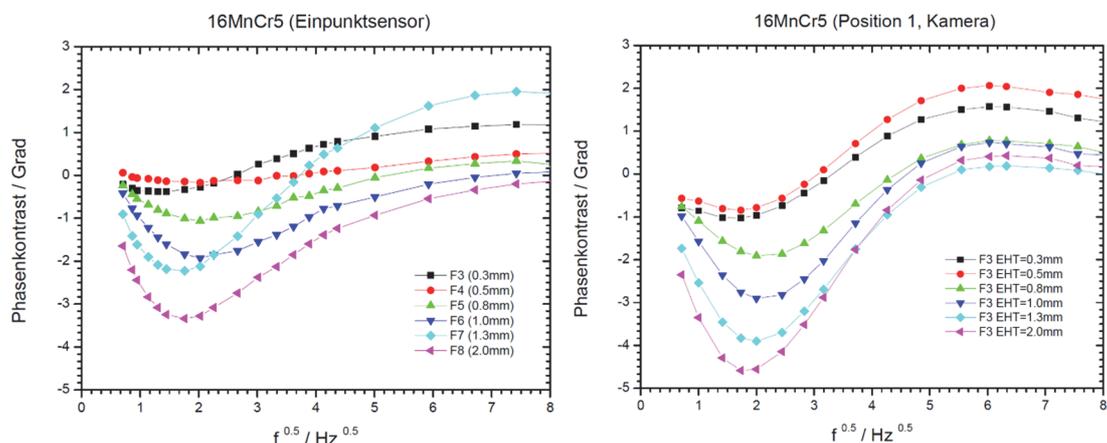


Abb. 16. Stahlproben mit Einhärtetiefen zwischen 0,3 mm und 2,0 mm, gemessen mit Foratherm (Einpunktsensor, links) und mit Forakam (IR-Kamera FLIR A6751sc, rechts).

Qualitativ sind die Kurvenverläufe sehr ähnlich; der etwas geringere Phasenkontrast der Foratherm-Messung könnte auf lokale Verunreinigungen zurückzuführen sein. Drei separat ausgewertete Pixel der Forakam-Messung mit der FLIR A6751sc lieferten praktisch identische Kurven (wie in Abb. 16 rechts dargestellt). Der Verlauf entspricht den theoretischen Erwartungen und zeigt deutlich, dass quantitative EHT-Messungen möglich sind. Praktisch ist die Methode auf Schichtdicken bis max. 3 mm begrenzt.

Die Signale sind vergleichsweise klein, so dass es ratsam ist, laterale Wärmeflüsse mit einzubeziehen (also eine punktförmige Anregung). Um trotzdem einen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber klassischer 1-Punkt-Fotothermik zu erhalten, kann ein diffraktives optisches Element genutzt werden, um mehrere Punkte simultan messen zu können (Abb. 17).

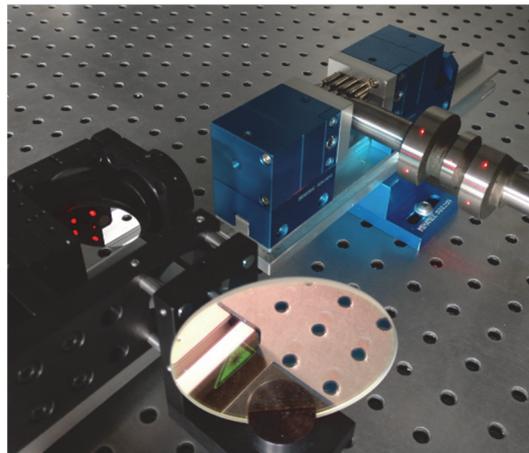


Abb. 17. Stahlprobe, beleuchtet mit DOE zur gleichzeitigen EHT-Messung an mehreren Stellen mit FLIR X6580sc.

3.3.2. Schleifbranddetektion

Schleifbrand ist sehr viel dünner als die Schichtdicke von gehärteten Teilen, d.h. die Lockin-Frequenzen und damit auch die Bildwiederholraten müssen höher sein als bei der EHT-Messung. In dem gezeigten Forakam-Demonstrator (Abb. 18 a)) ist eine FLIR X6580sc verbaut, die max. 353 Hz bei 640x512 Pixel Auflösung erreicht und typischerweise im Subwindow-Modus (160 x 160 Px) bei 900 Hz läuft. Bei stark ausgeprägtem Schleifbrand reicht jedoch auch eine FLIR A6751sc, z.B. mit 695 Hz bei 192x192 Px.

Für einen objektiven Vergleich von Forakam, Foratherm und klassischer Schleifbrandprüfung mittels Nital-Ätzung wurden Schleifbrandreferenzproben der Firma IMQ GmbH beschafft und getestet [7, 8]. Abb. 18 zeigt exemplarisch eine solche mittels Laser wärmebehandelte Probe vor einem Ätzvorgang (b)) und eine weitere, identische Probe nach dem Ätzvorgang (c).

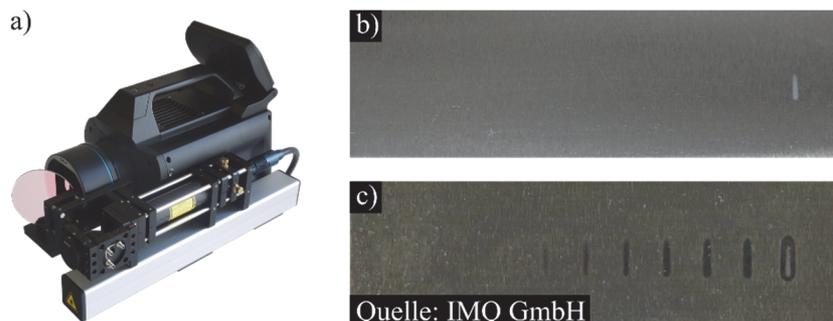


Abb. 18. a) Forakam-Demonstrator, b) Schleifbrandprobe ungeätzt, c) Schleifbrandprobe nach Nital-Ätzung.

Die 50x20x10 mm³ großen Einwegmasterteile für die Nital-Ätzung zeigen mehrere Stufen von Gefügeveränderungen: Ganz rechts eine Neuhärtungszone und eine große Anlasszone sowie von rechts nach links stufenweise abnehmend große Anlasszonen. Lichtmikroskopisch sind zehn Stufen von Gefügeveränderungen erkennbar (Abb. 19).

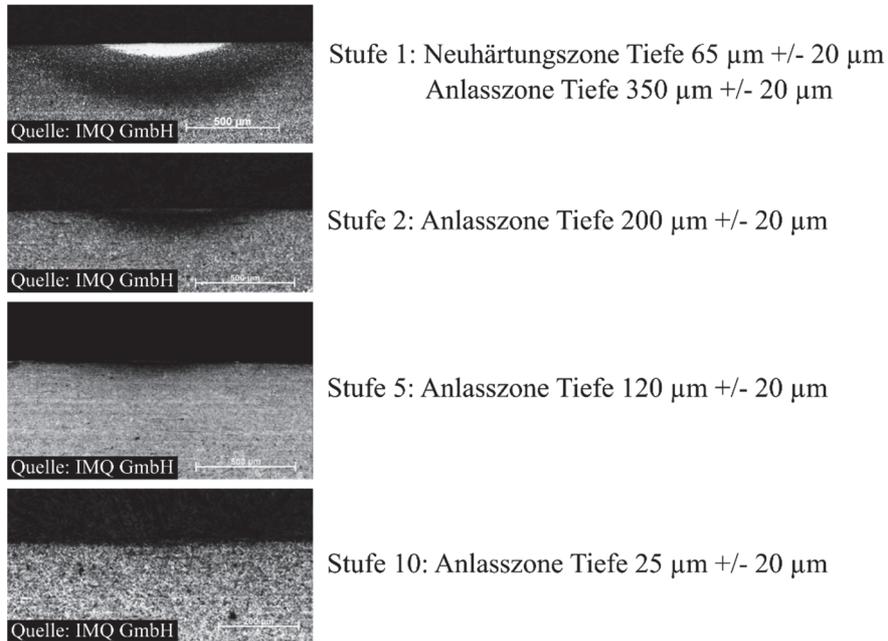


Abb. 19. IMQ-Schleifbrand-Referenzprobe nach Metallografie, Querschliff der Gefügeveränderungen.

Die Neuhärtungszone ist sowohl mit Forakam (bildgebend) als auch mit Foratherm (1-Punkt-Sensor) sehr deutlich erkennbar, es kommt sogar zu einer Phasenumkehr (Abb. 20). Bei den reinen Anlasszonen hat Foratherm ein etwas höheres Signal-/Rausch-Verhältnis. Grund dafür ist einerseits die hohe Empfindlichkeit des 1-Punkt-Detektors (die aktive Fläche misst 100 μm) in Kombination mit einem Lockin-Verstärker und andererseits die Miteinbeziehung lateraler Wärmeflüsse, da nur eine punktförmige Anregung erfolgt. Die Forakam-Aufnahme erfolgte mit einer FLIR X6901sc (mit Pixel-Kantenlänge 25 μm), die mit halber Auflösung (640 x 256 Px) bei 1700 Hz lief, und einer vollflächigen Beleuchtung der gesamten Probe. Die Messdauer mit Forakam betrug 25s, während Foratherm für das Abscannen je nach Feinheit des Rasters ca. 1h benötigte. Zur direkten Vergleichbarkeit wurde bei derselben Lockin-Frequenz (105 Hz) gemessen.

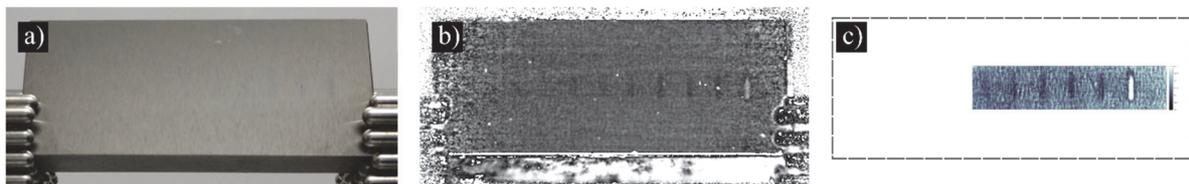


Abb. 20. a) Schleifbrand-Referenzprobe in Formspannsystem, b) Schleifbranddetektion mit FLIR X6901sc bei 105 Hz Lockin-Frequenz, c) mit Foratherm scannend bei 105 Hz.

Bei noch höherer Lockinfrequenz und mit längerer Messzeit (200 s) sind mit Forakam alle Anlasszonen der Schleifbrand-Referenzprobe visuell erkennbar (Abb. 21). Die Anlasszone der sechsten Stufe mit ca. 100 μm Dicke sollte auch automatisiert erkennbar sein.

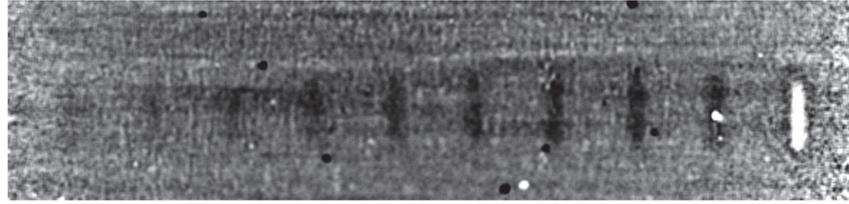


Abb. 21. Schleifbrand-Referenzprobe, gemessen mit FLIR X6901sc bei 1260 Hz Bildwiederholrate und 315Hz Lockin-Frequenz.

4. Zusammenfassung

Die Laser-Anregung bietet großes Potential, bestehende Anwendungen zu optimieren sowie neue Anwendungen für die Thermografie zu erschließen. Mit Online-Thermografie ist eine 100%-Prüfung im Produktionsprozess möglich, nun auch mit einer der zeitlichen Auswertung. Flying-Spot-Thermografie ermöglicht Rissprüfung an Werkstoffen, an denen keine Induktionsthermografie oder andere Rissprüfverfahren möglich oder nicht gewünscht sind. Bildgebende Fotothermik erlaubt berührungslose Schichtdicken-Messungen und Schleifbranddetektion und hat das Potential, viele langwierige metallografische Analysen zu ersetzen.

5. Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung im Rahmen des Projektes PRECISE (13N12919) durch das Programm Photonik Forschung Deutschland, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projektes Forakam (KF2201505GR4) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogrammes Mittelstand sowie allen Projektpartnern für die effektive Zusammenarbeit.

Referenzen

- [1] J. Aderhold, P. Meinschmidt, "Grundlagen der Online-Thermographie (article 2).", Bauer N. Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie – Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung, S. 5-7, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Erlangen, 2005
- [2] C. Cruss, D. Balageas, "Theoretical and experimental applications of the flying spot camera", Tagungsband 1st International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Châtenay-Malabry, Frankreich, 1992
- [3] P.E. Nordal, S.O. Kanstad, "Photothermal Radiometry", Physica Scripta 20, No. 5-6, S659-662, 1979
- [4] C.a. Bennett, R.R. Patty, "Thermal wave interferometry: a potential application of the photoacoustic effect", Applied Optics 21, S. 49-54, 1982
- [5] P. Menner, A. Hess, S. Grill, M. Wiedenmann, "Online-Thermography: an efficient tool for optimization of laser ablation and repair of CFRP structures", Tagungsband 19th World Conference on Non-Destructive Testing, München, Deutschland, 2016
- [6] P. Menner, A. Hess, S. Grill, D. Holder, A. Thellmann, "Online-Thermografie zur Optimierung des Reparaturprozesses von CFK-Strukturen", Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 2017, Koblenz, Deutschland, 2017
- [7] Vergleichskörper NE Test Set: Gebrauchsmuster Nr. 20 2015 001 664.2, IPC G01N 27/72, Deutsches Patentamt München
- [8] M. Seidel, A. Zösch, K. Härtel: Neu entwickeltes Test-Set für die Überwachung der Schleifbrandätzung. Schleifen und Polieren, 1/2016, S. 32-34