

Charakterisierung von Laserschweißstrukturen in Glassubstraten mittels Ultraschall-Rastermikroskopie

Mario WOLF¹, Nuray SEKER^{2*}, Eduard BENZ², Max STEUDEL², Max-Jonathan KLEEFoot², Silvia SCHUHMACHER², Harald RIEGEL², Peter HOFFFROGGE¹, Peter CZURRATIS¹
¹ PVA TePla, Westhausen
² Hochschule Aalen, Aalen
*jetzt PVA Tepla, Westhausen

Kontakt E-Mail:

mario.wolf@pvatepla.com

Silvia.Schuhmacher@hs-aalen.de

Kurzfassung. Glassubstrate spielen in der Mikrochipfertigung oder in der Lab-on-a-Chip Technologie eine zunehmend wichtige Rolle. In diesem Beitrag wird das Potential der Ultraschall-Rastermikroskopie zur Charakterisierung von Laserschweißstrukturen in dünnen Glasobjektträgern beschrieben. Strukturen im Innern des Glasvolumens können mit dieser Methode schnell und mit hoher Auflösung dargestellt werden. Insbesondere lassen sich die Höhenprofile der Strukturen mithilfe von Ultraschall-Querschnittsbildern in sehr guter Qualität ermitteln. Die Messungen dauern nur wenige Minuten. Liegen die Strukturen über ein großes Tiefenintervall verteilt, erfolgt mittels SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) eine 3D-Rekonstruktion der Probe. Es wird gezeigt, dass eine Anwendung der SAFT-Algorithmen bei beliebigen Fokustiefen in der Probe möglich ist, wodurch die Qualität der Ergebnisse erheblich verbessert wird. Zusätzlich lassen sich Oberflächenanrisse bis in die Tiefe nachverfolgen und vermessen.

1. Einleitung

Glassubstrate spielen eine wichtige Rolle bei der Herstellung von Mikrochips und Lab-on-Chip-Systemen. Sie werden häufig als Trägermaterialien für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen und Mikrofluidik-Kanälen verwendet.

Glassubstrate haben mehrere Vorteile gegenüber anderen Materialien. Sie sind chemisch inert, haben eine geringe Wärmeausdehnung und sind optisch transparent. Diese Eigenschaften machen sie ideal für die Integration von optischen Komponenten, wie zum Beispiel Sensoren und Detektoren.

Für die Herstellung von Mikrochips werden Glassubstrate oft als Substratmaterial verwendet. Sie bieten eine glatte, ebene Oberfläche, auf der Mikroelektronikkomponenten wie Transistoren, Widerstände und Kondensatoren aufgebracht werden können. Die Verwendung von Glassubstraten kann auch die Leistung von Mikrochips verbessern, indem sie die Wärmeableitung verbessern und die Stabilität erhöhen.



Lab-on-Chip-Systeme sind Miniaturisierungen von Laboratorien, die auf einem Chip integriert sind. Glassubstrate werden häufig als Trägermaterialien für Mikrofluidik-Kanäle verwendet, die zur Durchführung von chemischen und biologischen Tests auf dem Chip benötigt werden. Die glatte Oberfläche des Glases erleichtert die Herstellung von Mikrokanälen und die Integration von Detektoren und Sensoren, die für die Messung von Biomolekülen benötigt werden.

Durch Laserstrahlschweißverfahren können Strukturen und Schweißnähte in Glassubstrate eingebracht werden [1]. Dieser Beitrag stellt erste Untersuchungen zur Charakterisierung solcher Strukturen mittels der hochauflösenden und hochfokussierenden Ultraschall-Rastermikroskopie vor. Darüber hinaus bieten Glassubstrate eine anschauliche Möglichkeit zur Demonstration des Potentials der Ultraschall-Rastermikroskopie, wie sie insbesondere auch in nicht durchsichtigen Medien der Halbleiterindustrie, z.B. Prüfung von Wafern und Leistungshalbleitern, zum Einsatz kommt und bei der eine Validierung der Ergebnisse ansonsten nur zerstörend, z.B. durch die Anfertigung von Schliffbildern, möglich ist.

Neben herkömmlichen Analysen der Ultraschall-Rastermikroskopie, bei der Ergebnisse in Form von B-Bildern und C-Bildern visualisiert werden, wird in diesem Beitrag auch die Anwendung der „Synthetic Aperture Focussing Technique“ (SAFT) zur Signalverarbeitung genutzt. Diese Technik erlaubt es, im Gegensatz zu konventionellen Messungen, ein Bild mit maximaler Auflösung in mehreren Tiefen mit nur einem Scan zu erhalten. Nach der Beschreibung der Grundlagen der Ultraschall-Rastermikroskopie und einer Diskussion der Datenverarbeitung mittels SAFT in Abschnitt 2 werden in Abschnitt 3 die Messergebnisse für mehrere Glasproben diskutiert. In Abschnitt 4 werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein kurzer Ausblick gegeben

2. Methoden

2.1 Ultraschall-Rastermikroskopie

Für jeden Messpunkt wird im Ultraschalltransducer ein piezoelektrisches Element mittels eines Spannungspulses zum Schwingen angeregt. Die erzeugte Ultraschallwelle wird fokussiert und über ein Koppelmedium in das zu prüfende Bauteil übertragen. Dort wird sie an Grenzflächen (innere Strukturen, Fehler usw.) reflektiert, transmittiert, gebeugt und modengewandelt. Das reflektierte Ultraschallsignal wird wiederum piezoelektrisch gewandelt, digitalisiert, aufgezeichnet und ggf. als A-Bild dargestellt. Stellt man die Ultraschallsignale, bzw. deren Einhüllenden, von Messpunkten entlang einer Linie farbcodiert dar, erhält man ein B-Bild, was einem Querschnitt in Tiefenrichtung entspricht. Wird die maximale Signalamplitude in einem bestimmten Zeitbereich ausgewertet und in einem Pixel entsprechend der Scanposition farbcodiert wird ein C-Bild generiert, das einem Schnitt parallel zur Scanebene entspricht. Statt der Amplitude kann auch die Laufzeit innerhalb des Fensters farbcodiert dargestellt werden und man erhält ein „Time of Flight“ (ToF) Bild.

2.2 Synthetic Aperture Focussing Technique

SAFT basiert auf der Idee, für jeden Bildpunkt die Informationen von mehreren Transducerpositionen zu nutzen. Somit wird aus der kleineren Apertur des verwendeten Transducers synthetisch eine viel größere Apertur erzeugt. Im einfachsten Fall werden die Signale entsprechend der Laufzeiten zwischen Transducerposition und Bildpunkt verzögert und überlagert. Dies resultiert in Bildern mit hoher Auflösung unabhängig von der Tiefe der Bildebene. SAFT-Algorithmen wurden für die zerstörungsfreie Prüfverfahren im

niederfrequenten Bereich (1-10 MHz) bereits in den 1970er Jahren entwickelt [2]. Olofsson [3] diskutiert diverse Nachteile der Methode, z. B. dass die Rekonstruktion konstante Koppelbedingungen zwischen Transducer und Probe erfordert, was einen Wasservorlauf notwendig macht und somit die Berechnung der Verzögerungszeiten verkompliziert. Weiterhin werden für SAFT Transducer mit großem Öffnungswinkel benötigt. Diese haben eine kleine Fläche und somit eine geringe Signalenergie und einen geringen Signal-Rausch-Abstand (SNR). Daher wurde der in [4] vorgeschlagene Ansatz weiterverfolgt und es konnten in [5] erste Ergebnisse für die Anwendung von SAFT im Zeit- und Frequenzbereich auf Daten von Ultraschall-Rastermikroskopie vorgestellt werden. Die oben genannten Nachteile werden dabei schon grundlegend durch das Messprinzip ausgeglichen, da z.B. generell mit einem Wasservorlauf gearbeitet wird.

Darüber hinaus, wird ein stark fokussierender Transducer mit hoher Signalenergie und hohem SNR verwendet. Mit diesem wird in einer bestimmten Tiefe fokussiert und eine in dieser eine virtuelle Punktquelle erzeugt, die für die Rekonstruktion genutzt werden kann. Während der Ansatz aus [4] noch von einer Punktquelle an der Bauteiloberfläche ausgeht, soll in vorliegendem Beitrag gezeigt werden, dass die Fokusebene in beliebiger Tiefe liegen kann und die Rekonstruktion für Bereiche vor und hinter dieser Ebene möglich ist.

Für die SAFT-Rekonstruktion im Frequenzbereich geht man davon aus, dass das detektierte Wellenfeld in der Tiefe Z eine Superposition von ebenen Wellen mit beliebiger Frequenz und beliebiger Ausbreitungsrichtung darstellt. Ziel ist es das Wellenfeld in einer beliebigen Tiefe z zu berechnen. Man erhält analog [3], wo die Herleitung ausführlich für den zweidimensionalen Fall erfolgt:

$$p(t, x, y, z) = \iint P(\omega, k_x, k_y | Z) e^{jk_z(z-Z)} e^{jk_x x} e^{jk_y y} e^{-j\omega t} dk_x dk_y d\omega. \quad (1)$$

Dabei ist $P(\omega, k_x, k_y | Z)$ der bzgl. der Ortskoordinaten x und y und der Zeit fourier-transformierte Datensatz bei Fokussierung in die Tiefe Z . Kern der Rekonstruktion ist die Berechnung des Phasenterms $e^{jk_z(z-Z)}$, welcher auf für Werte $z < Z$ ohne jede Einschränkung berechnet werden kann. Der Exponent wird negativ und die Phasendrehung erfolgt in die entgegengesetzte Richtung. Danach erfolgt numerisch die Rücktransformation bzgl. k_x und k_y und die Signalamplitude wird für $t = 0$ bestimmt.

3. Ergebnisse

Alle Messungen wurden mit einem SAM 301 von PVA Tepla durchgeführt. Je nach Probe wurden stark fokussierende Transducer unterschiedlicher Fokustiefe mit Mittenfrequenzen großer 100 MHz genutzt. Erste Messungen wurden an einem Wafer mit mehreren Bildern durchgeführt. Abbildung 1 zeigt sowohl eine Fotografie (links) sowie C-Bilder von einem Ultraschall-Rastermikroskop als Übersichtsscan mit 200 μm (rechts) sowie Scans von einzelnen Bereichen (mit rotem Rahmen markiert, Mitte) mit 5 μm Auflösung. Diese Scans illustrieren sehr anschaulich die Leistungsfähigkeit des Verfahrens, sind jedoch für eine quantitative Auswertung wenig geeignet, sodass weitere systematische Untersuchungen an anderen Proben durchgeführt wurden.

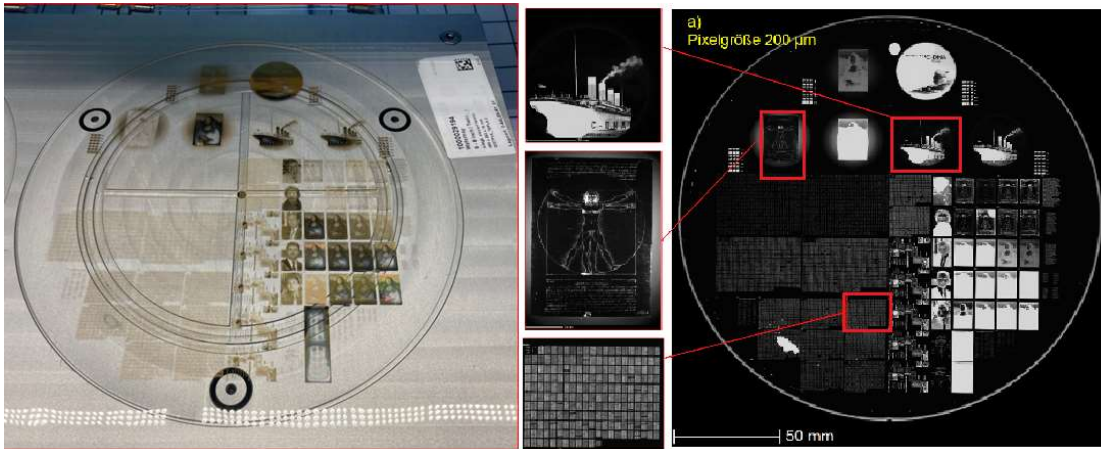


Abb. 1. Glaswafer: links: Fotografie; Mitte: C-Bilder mit 5 µm Auflösung rechts: C-Bild, Übersichtsscan mit 200 µm aufgenommen mit einem Ultraschall-Rastermikroskop.

3.1 Glasprobe mit lasererzeugten Strukturen

Abbildung 2 zeigt die Fotografie einer laserstrukturierten Probe, eines Objektträgers mit den Abmessungen. Die Abmessungen eines Objektträgers betragen ca. 75 mm x 25 mm x 1.0 mm. An diesem Probekörper wurden Scans mit einem Ultraschall-Rastermikroskop durchgeführt. Die resultierenden C-Bilder für mehrere Scans sind in Abbildung 3 zu sehen. Zunächst wurde ein Übersichtsscan mit 20 µm Auflösung (links) und dann ein Detailscan mit 1 µm Pixelgröße (rechts) durchgeführt.



Abb. 2. Fotografie des Probekörpers

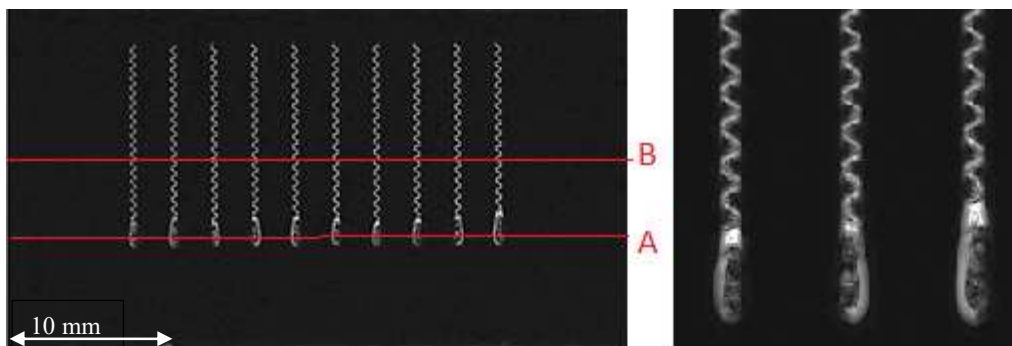


Abb. 3. C-Scans des Probekörpers: links: Übersichtsscan, rechts: Detailscan; Markierung der Positionen der B-Bilder mit roten Linien

Abbildung 4 zeigt zwei B-Bilder entlang der in Abbildung 3 eingezeichneten Schnittlinien A und B. Beim Einbringen der Struktur wurde für jede Linie der Laser an der Position A angesetzt, während sich der Schnitt B etwa in der Mitte der Struktur befindet. Man erkennt deutlich, dass die Strukturen an den Ansatzstellen tiefer ins Material eindringen. Es sei hier noch auf die starke Verzerrung der Bilder hingewiesen. Während eine Höhe von ca. 600 μm bis 1000 μm dargestellt wird, beträgt die Ausdehnung in x-Richtung ca. 25 mm. Aus den Daten lässt sich ebenfalls die Laufzeit bis zur Struktur bestimmen und diese entweder in einem ToF-Bild (Abbildung 5, links) oder in einem 3D-Surfaceplot darstellen.

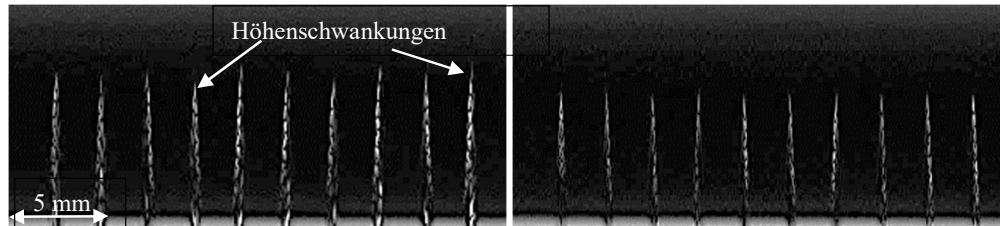


Abb. 4. B-Scans des Probekörpers entlang der Linien A (links) und B (rechts) in Abbildung 3 – Ausdehnung in x-Richtung ca. 25 mm, in z-Richtung nur ca. 500 μm

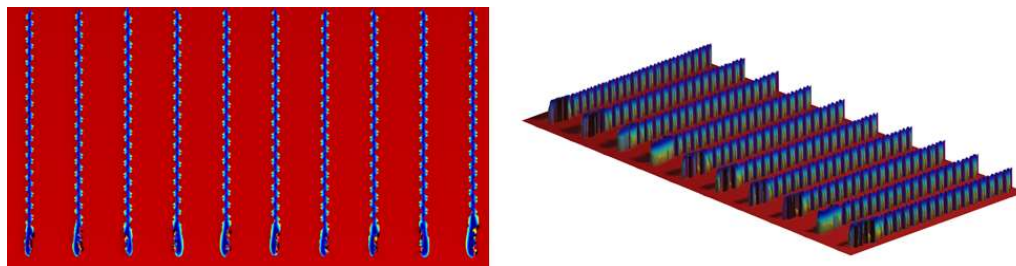


Abb. 5. ToF-Bild (links) und 3-D-Darstellung der Laserstrukturen

Die Untersuchungen zeigen, dass bei geringen Höhenunterschieden der einzelnen Strukturen eine Analyse mit einem Ultraschall-Rastermikroskop sehr präzise Ergebnisse liefert.

3.2 Glasprobe mit laserinduzierten Defekten in unterschiedlichen Tiefen

Die folgenden Untersuchungen wurden durchgeführt um Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Ultraschall-Rastermikroskopie treffen zu können. Es wurde eine zylindrische Probe mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Höhe von 3 mm verwendet. In diesen wurden in sieben Bereichen der Probe Raster von Schweißpunkten mit einem Abstand von ca. 500 μm ins Material eingebracht. In jedem Bereich wurden Strukturen mit unterschiedlicher Energie und somit unterschiedlicher Größe eingebracht.

Abbildung 6 zeigt links einen C-Scan der gesamten Probe, in der Mitte einen der Bereiche mit sehr großen Strukturen und rechts zwei B-Scans entlang der roten Linien. Man erkennt deutlich die Schweißpunkte in unterschiedlichen Tiefen.

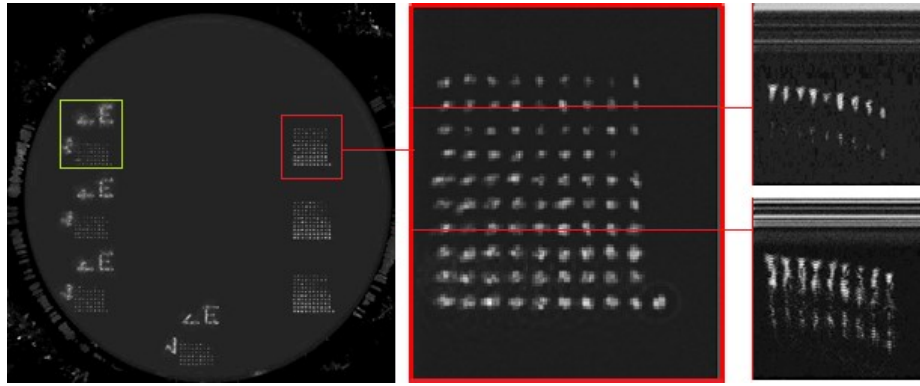


Abb. 6. Ultraschall-Rastermikroskopiebilder der Probe mit Laserschweißpunkten in unterschiedlichen Tiefen: links: C-Bild zur Übersicht über die gesamte Probe, Mitte: C-Bild der rot umrandeten Bereiche, rechts: B-Bilder entlang der beiden Schnittlinien.

Eine genaue Tiefenbestimmung erfordert hier mehrfache Scans in unterschiedlichen Tiefen. Eine direkte Bestimmung mit nur einem Scan ist nicht möglich. Daher wurden auf die aus dem in Abbildung 6 mit einem grünen Rahmen markierten Bereich Daten für die in Abschnitt 2.2 vorgestellte SAFT Rekonstruktion gewonnen. Entsprechend Abbildung 7 wurde mit drei unterschiedlichen Fokustiefen gearbeitet um Aussagen über die Qualität der Rekonstruktion zu gewinnen. Bei Variante 1 wurde in die größte Tiefe, kurz unterhalb der Strukturen, fokussiert, bei Variante 2 etwa in die Mitte der Strukturen und bei Variante 3 kurz oberhalb. Die Rohdaten als B-Bild sind für Variante 1 in Abbildung 8 (rechts) zu sehen. Man erkennt deutlich die nach oben geöffneten sichelförmigen Artefakte, die für kleine Reflektoren vor dem Fokus typisch sind. Abbildung 8 (links) zeigt die SAFT-Rekonstruktion mit einer deutlichen Reduktion der Artefakte und einer Verbesserung des Kontrasts.

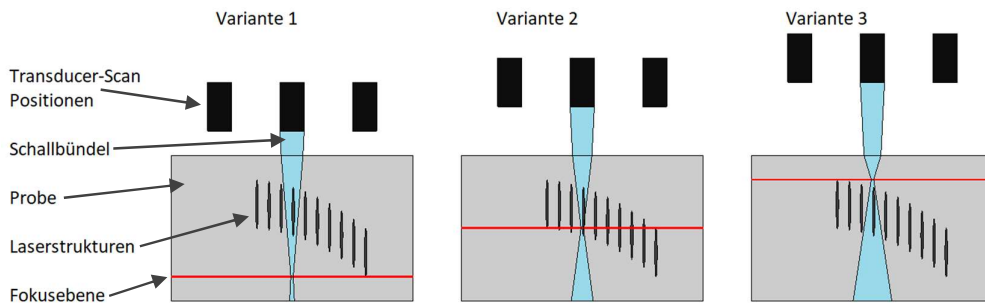


Abb. 7. Schematische Darstellung der drei Varianten der Messanordnung und der SAFT Rekonstruktion

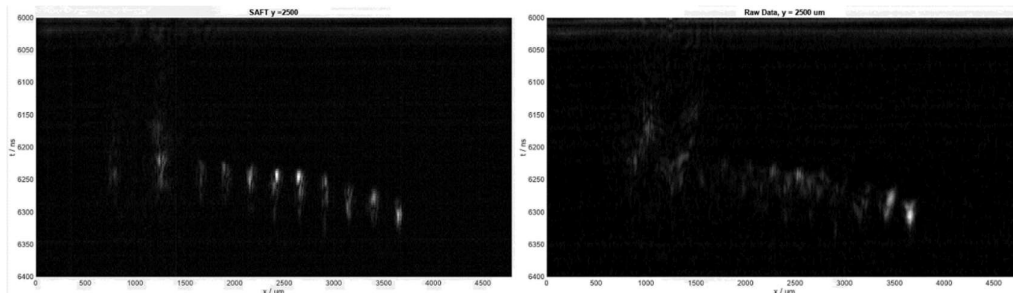


Abb. 8. B-Bilder bei Fokussierung nach Variante 1: Vergleich der SAFT-Rekonstruktion (links) mit den Rohdaten (rechts).

Für den Vergleich der Messungen wurde ein C-Bild für eine Schnittebene ca. 850 μm unterhalb der Oberfläche, in der sich möglichst viele Schweißpunkte befinden gewählt. Abbildung 9 a) zeigt das aus den Rohdaten von Variante 1 gewonnene C-Bild. Abbildung 9 b) –d) zeigen die SAFT-Rekonstruktionen für die Varianten 1-3. Es ergeben sich für alle 3 Varianten Rekonstruktionen mit geringen Artefakten und hohem Kontrast. Lediglich die obersten 3 Reihen an Schweißpunkten, die in den konventionellen Messungen nur minimale Echos erzeugen, sind auch in den Rekonstruktionen mit geringem Kontrast zu erkennen. Der Kontrast von Variante 1 (Abbildung 9b) ist etwas geringer als bei Varianten 2 und 3, da bei Variante 1 der Fokus am weitesten von der zu rekonstruierenden Ebene entfernt liegt. Dies zeigt, dass es nicht notwendig ist, den Fokus, wie in der Literatur vorgeschlagen, auf die Oberfläche zu legen, sondern, dass eine Fokussierung in jedwede Tiefe möglich ist.

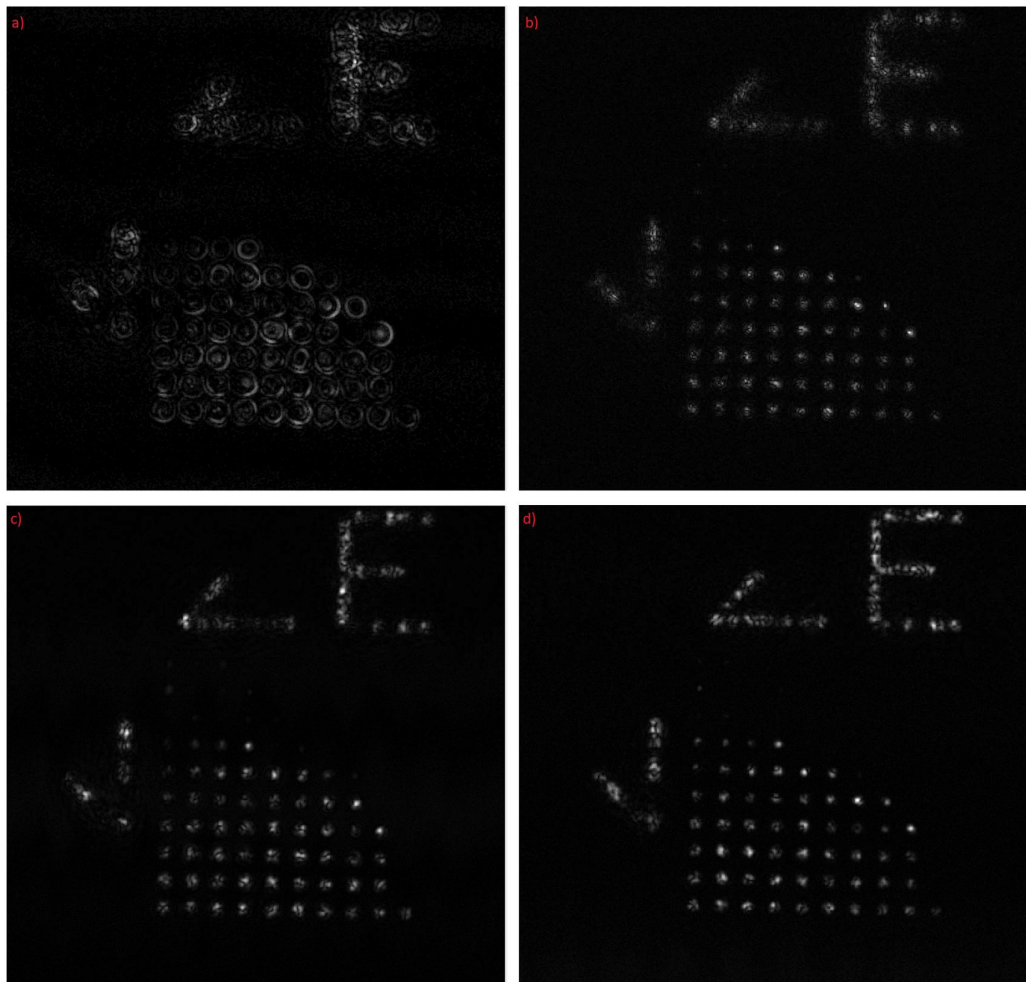


Abb. 9. Vergleich C-Bilder: a) Rohdaten; b) SAFT-Rekonstruktion bei Fokussierung unter die Strukturen; c) SAFT-Rekonstruktion bei Fokussierung in die Mitte der Strukturen; d) SAFT-Rekonstruktion bei Fokussierung über die Strukturen

Mithilfe von SAFT ist eine vollständige 3D-Rekonstruktion der Probe möglich. Abbildung 10 zeigt exemplarisch acht Schnittbilder in der xy-Ebene in einem Abstand von 45 μm . Die oberste Ebene (Abbildung 10a) befindet sich dabei in eine Tiefe von ca. 720 μm und die unterste (Abbildung 10h) in einer Tiefe von 1035 μm . Der mit einem Kreis markierte Schweißpunkt ist nur in den Bildern b)-f) zu sehen. Anhand dieser

Darstellung ist also eine Abschätzung der Ausdehnung von ca. 200 μm möglich. Im Allgemeinen kann die Rekonstruktion mit weit höherer Auflösung in z-Richtung durchgeführt werden. Insbesondere bei der SAFT Rekonstruktion im Frequenzbereich sind die Rekonstruktionsebenen nicht an die Samplerate gekoppelt, sodass auch eine Berechnung in Ebenen im Abstand von 1 μm möglich ist. Eine systematische Untersuchung, welche Abstände sinnvoll sind, steht noch aus.

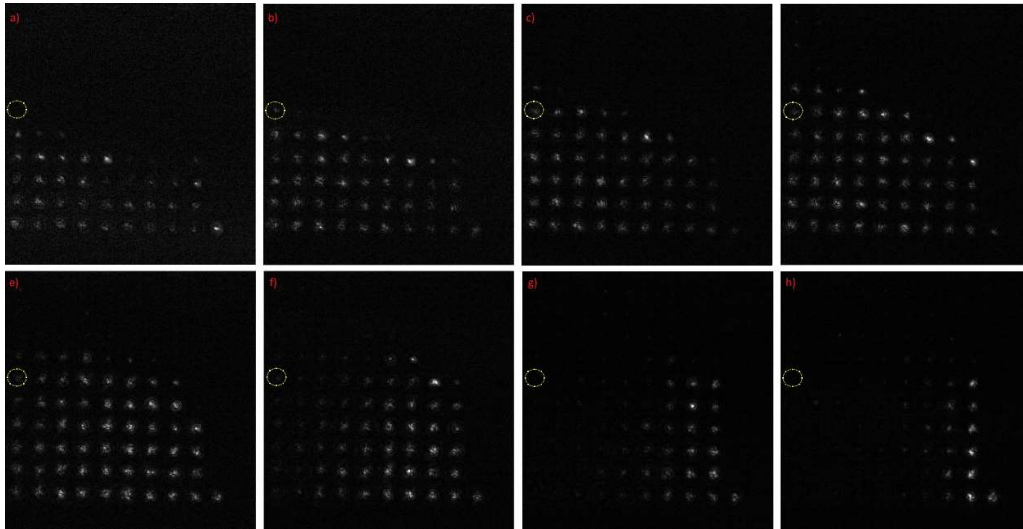


Abb. 10. Vergleich C-Bilder in unterschiedlichen Tiefen: a) 720 μm ; b) 765 μm ; c) 810 μm ; d) 855 μm ; e) 900 μm ; f) 945 μm ; g) 990 μm ; h) 1035 μm ;

3.3 Untersuchungen zur Risstiefe von Oberflächenanrissen

In die verwendete Probe (Foto Abbildung 11a) wurden gezielt Risse unterschiedlicher Tiefe eingebracht. Die drei entstandenen Risse sind im C-Bild mit Fokus auf der Oberfläche (Abbildung 11b) gut zu erkennen. Um eine Tiefen der Risse zu ermitteln, wurden B-Scans mit Fokussierung in verschiedene Tiefen durchgeführt. Eine Tiefenbestimmung für die größeren Risse war erfolgreich, wohingegen der kleinste Riss nicht näher charakterisiert werden konnte. Für eine genaue Vermessung der Risspitzen bietet sich ebenfalls eine SAFT-Rekonstruktion an. Die Anwendung steht noch aus.

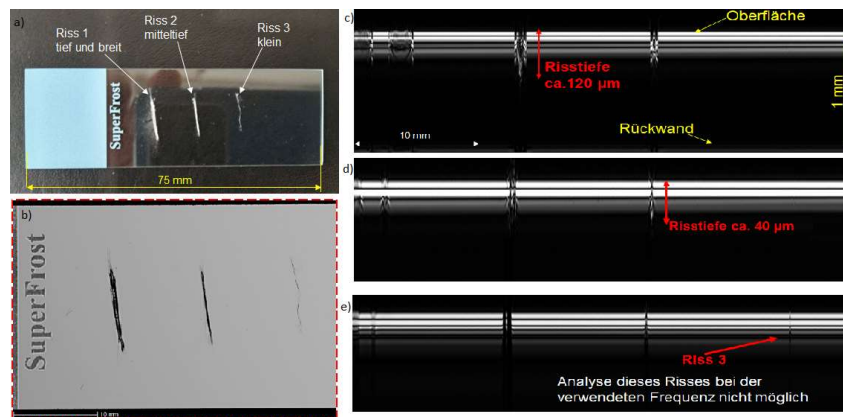


Abb. 11. Analyse der Glasprobe mit Rissen: a) Fotografie der Probe mit markierten Rissen; b) C-Scan der Oberfläche; c) B-Bild mit Fokussierung auf den tiefen Riss; d) B-Bild mit Fokussierung auf den mittleren Riss; e) B-Bild mit Fokussierung auf den kleinen Riss, Vermessung nicht möglich

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen demonstrieren deutlich, dass die Ultraschall-Rastermikroskopie ein leistungsfähiges Werkzeug für die Charakterisierung und Vermessung von Laserstrukturen in Glasproben ist. Liegen alle Strukturen in der gleichen Ebene, kann mit klassischen Analyseverfahren, wie B-Bildern, C-Bildern oder ToF-Bildern, eine vollständige Charakterisierung durchgeführt werden.

Liegen die interessierenden Strukturen in unterschiedlichen Tiefen, führen klassische Analyseverfahren nur noch mit erheblichem messtechnischem Aufwand zum Erfolg, da separate Scans für alle Tiefen durchgeführt werden müssen. Hier bietet sich die SAFT-Rekonstruktion an, die es erlaubt, aus dem aufgenommenen Datensatz eine vollständige 3D-Rekonstruktion des Volumens mit einer tiefenunabhängigen hohen lateralen Auflösung durchzuführen.

In diesem Beitrag konnte erstmals gezeigt werden, dass bei der Anwendung von SAFT auf die Ultraschallmikroskopie keine Fokussierung auf die Oberfläche notwendig ist, sondern eine Rekonstruktion bei beliebigen Fokustiefen möglich ist und auch Ebenen, die vor der Fokusebene liegen, rekonstruiert werden können. Dies erlaubt es, deutlich geringere Arbeitsabstände zu wählen und somit deutlich mehr Schallenergie in die Probe einzutragen. Dies verbessert das SNR der reflektierten Signale und somit die Qualität der Rekonstruktion.

Systematische Untersuchungen zur erreichbaren Genauigkeit bei der Bestimmung von Tiefe und Ausdehnung von Schweißpunkten mithilfe der SAFT-Rekonstruktion stehen noch aus. Hierfür ist es notwendig, die Strukturen mit alternativen Verfahren, z. B. mittels optischer Immersionsmikroskopie, zu vergleichen.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass Glassubstrate eine anschauliche Möglichkeit zur Demonstration des Potentials der hochauflösenden und hochfrequenten Ultraschall-Rastermikroskopie auch in einem Frequenzbereich über 100 MHz bieten. Ein solches Demonstrationsexperiment ist die ausstehende Anwendung von SAFT zur Vermessung von Rissspitzen.

Referenzen

- [1] Włodarczyk, K.L.; Hand, D.P.; Maroto-Valer, M.M.: Maskless, rapid manufacturing of glass microfluidic devices using a picosecond pulsed laser. In: Scientific Reports 9 (2019), Heft 1, S. 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56711-5>.
- [2] Prine, D. W.: Synthetic aperture ultrasonic imaging. Proceedings of the Engineering Applications of Holography Symposium, Los Angeles, CA, USA. Vol. 1617. 1972
- [3] Olofsson, T.: Phase shift migration for imaging layered objects and objects immersed in water. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 57.11 (2010): 2522-2530.
- [4] Köhler, B., F. Schubert, and M. Barth. "Tomographic Imaging Based on Scanning Acoustic Microscopy." AIP Conference Proceedings. Vol. 1096. No. 1. American Institute of Physics, 2009.
- [5] Wolf, M., Hoffrogge, P., Kühnicke, E., Czurratis, P., & Kupsch, C.: Inspection of Multilayered Electronic Devices via Scanning Acoustic Microscopy Using Synthetic Aperture Focusing Technique. 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, 2022.