

Ultraschallmikroskop zur zerstörungsfreien Untersuchung an gekrümmten Bauteilen

Michael Wüst, Johannes Eisenhart, Annika Rief, Stefan J. Rupitsch

Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland, Email: michael.wuest@fau.de

Einleitung

In diesem Beitrag wird ein Ultraschallmikroskop zur zerstörungsfreien bildgebenden Untersuchung an Prüflingen mit gekrümmter Oberfläche vorgestellt. Konventionelle Messsysteme sind für Untersuchungen an ebenen Oberflächen konzipiert und werden beispielsweise in der Halbleiterindustrie zur Qualitätsprüfung an Silizium-Wafern verwendet. Sie verfügen in der Regel über zwei Linearachsen, die einen Ultraschallprüfkopf während der Messung mäanderförmig über den Prüfling verfahren. Um an gekrümmten Strukturen über großflächige Bereiche Bildgebung zu ermöglichen, muss der Prüfkopf allerdings so über den Prüfling geführt werden, dass er an jedem Messpunkt orthogonal auf dessen Oberfläche schallt. Daher verfügt das vorgestellte System zusätzlich über einen hochpräzisen Roboter mit sechs Bewegungsfreiheitsgraden. Dieser ermöglicht es, neben der mäanderförmigen Abtastung durch den Ultraschallprüfkopf eine synchrone Winkelnachführung zu realisieren. Im Folgenden werden Aufbau und Funktionsweise des Messsystems erläutert. Das für die Nachführung erforderliche Kalibrierverfahren wird beschrieben sowie dessen Funktionsfähigkeit anhand exemplarischer Prüflinge unter Beweis gestellt.

Motivation

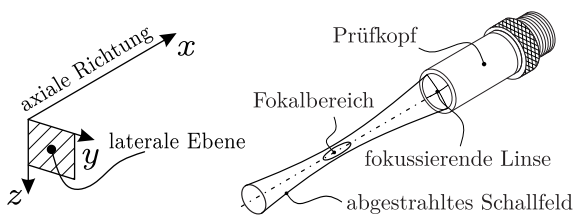


Abbildung 1: Prüfkopf mit fokussierender Linse. Schematische Darstellung der emittierten Schallkeule und gewähltes Koordinatensystem.

Die Ultraschallbildgebung basiert auf einem Sprung der akustischen Impedanz Z_{ak} an Grenzflächen zwischen zwei Materialien unterschiedlicher akustischer Eigenschaften. Die Intensitäten des transmittierten und reflektierten Anteils hängen dabei vom Verhältnis der akustischen Impedanzen der beiden Materialien ab [1], [2]. Für die Bildgebung wird der Signalpegel in einen Farbwert umgesetzt. Meist arbeiten Ultraschallmikroskope im sogenannten Puls-Echo-Modus, bei dem der reflektierte Signalanteil vom selben Prüfkopf aufgenommen wird, der vorher den Schallpuls ausgesendet hat. Aufgrund der hohen Schallfrequenzen werden vorrangig Prüfköpfe mit einem Einzelwandler und einer fokussierenden Linse verwendet. Abbildung 1 zeigt eine Darstellung ei-

nes Prüfkopfs für Mikroskopieanwendungen, dessen Abstrahlverhalten bei einem pulsformigen Sendesignal und das für die Messung verwendete Koordinatensystem. Konventionelle Ultraschallmikroskope sind in der Anzahl der Freiheitsgrade ihres Verfahrssystems vergleichsweise eingeschränkt. Oftmals handelt es sich lediglich um zwei Linearversteller, mit denen der Prüfkopf in der lateralen Ebene translatorisch justiert werden kann [3]. Aus den Scandaten werden C-Scan Bilder erzeugt, die in der Tiefe des Fokalbereichs eine hochaufgelöste flächige Aufnahme liefern. An einem Prüfling mit gekrümmter Oberfläche führt die rein translatorische Bewegung jedoch selbst bei geringen Krümmungen in der Kontur oftmals dazu, dass keine Echosignale mehr zum Prüfkopf zurück laufen. Die Reflexion und Brechung an der Oberfläche unter einem Einfallswinkel von wenigen Grad sowie die geringe Apertur des fokussierenden Prüfkopfs machen die Bildgebung über größere Flächen deshalb unmöglich [4]. Im Bild äußert sich dies durch Abdunkelung der Bereiche mit größerer Krümmung sowie durch Unschärfe der ausgeleuchteten Areale, da der Abstand der betrachteten Grenzfläche zum Fokus variiert. Exemplarisch wird dies anhand eines gebogenen Prüflings in Abbildung 2 gezeigt. Hierzu wurde ein MFC-Modul (Abk. für eng.: Macro Fiber Composite) des Herstellers Smart Materials auf einem gebogenen Blechstreifen vorderseitig aufgebracht. Der schematische Aufbau des Moduls ist in Abbildung 3 dargestellt. Um dem Verlust an Signalqualität und Auflösungsvermögen im Bild zu begegnen, ist es erforderlich, eine zusätzliche Winkelnachführung zu implementieren. Ziel ist die stets orthogonale Führung des Prüfkopfs über die Oberfläche des Prüflings.

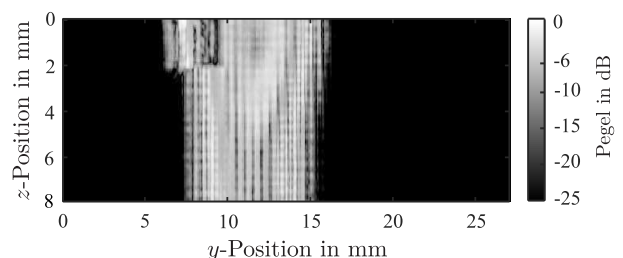


Abbildung 2: C-Scan Aufnahme bei rein lateralem Scan ohne Winkelnachführung (Pegel in dB bezüglich des Maximalwertes im Bild). Aufgrund der unterschiedlichen Distanzen zwischen Prüfkopf und Prüfling sind nur wenige Positionen des ausgeleuchteten Bildbereichs scharf dargestellt. Ab einer Überschreitung eines gewissen Grenzwinkels können aufgrund von Totalreflexion keine Echos mehr detektiert werden. Diese Areale werden daher schwarz dargestellt.

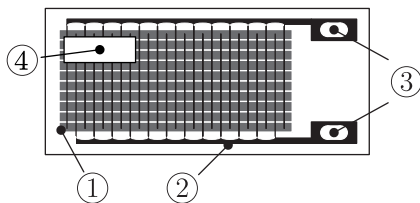


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des in Abbildung 2 untersuchten MFC-Moduls des Herstellers Smart Materials (① piezokeramische Längsfasern, ② interdigitale Elektroden, ③ Löt pads für Kontaktierung, ④ Typenschild).

Aufbau des Ultraschallmikroskops

Das hier vorgestellte Messsystem beinhaltet neben den üblichen Komponenten eines Ultraschallmikroskops eine Erweiterung des Verfahrenssystems. Um die Winkelnachführung entlang der Oberflächenkontur des Prüflings zu ermöglichen, kommt ein hochpräziser sogenannter Hexapod zum Einsatz, ein sechsbeiniger Roboter, der über sechs Bewegungsfreiheitsgrade verfügt und ursprünglich für die Positionierung in der Mikrofertigung gedacht ist. Im präsentierten Aufbau wird der Prüfkopf von zwei Linearverstellern in einer lateralen Ebene bewegt, während die dazu passende Winkelstellung durch den Hexapod am Prüfling erfolgt. In Abbildung 4 wird ein Überblick über die Komponenten des Aufbaus gegeben. Zum Einsatz kommt ein Pulser-Receiver Olympus 5900PR, der ein pulsartiges elektrisches Signal aussendet und die reflektierten Echos verstärkt. Der Motion-Controller erhält vom Messrechner die anzufahrende Position in kartesischen Koordinaten und übernimmt die Steuerung der beiden Linearachsen sowie des Hexapods. Das Oszilloskop dient der Datenerfassung der RF-Echosignale und überträgt an jeder angefahrenen Messposition die RF-Daten an den Messrechner. Eine Skizze zum verwendeten Koordinatensystem des Aufbaus ist in Abbildung 5 dargestellt.

Kalibrierverfahren

Das im folgenden Abschnitt vorgestellte Verfahren wird in [5] genauer beleuchtet. Um eine präzise Bahnführung des Verfahrenssystems zu gewährleisten, ist vor der eigentlichen Messung eine Kalibrierung erforderlich. Das entwickelte Kalibrierverfahren basiert darauf, die Kontur des Prüflings vorab zu erfassen. Daraus werden die Stellwinkel für den Hexapod bestimmt. Es genügt hierbei in den meisten Fällen, das laterale Abtastinkrement der Konturmessung im Bereich von 0,5 bis 1 mm zu wählen, wohingegen das typische Abtastinkrement für die bildgebende Messung bei etwa 50 µm oder darunter liegt, abhängig vom verwendeten Ultraschallprüfkopf. Während der Bewegung des Prüfkopfs soll der Prüfling rotatorisch um den jeweils aktuellen Pivotpunkt P bewegt werden. Der Pivotpunkt ist das Rotationszentrum des beweglichen Tellers (vgl. Abb. 5), das zur Ausrichtung des Prüflings an der aktuellen Messposition genutzt werden soll. Er folgt daher der Position der Linearachsen. P ist der Schnittpunkt der Prüfkopf-Achse und der Bauteiloberfläche. Dabei ist für alle Messpositionen stets der

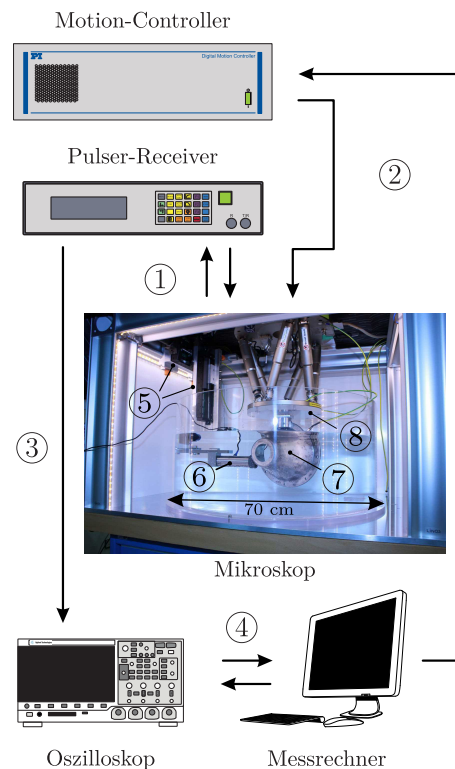


Abbildung 4: Übersicht über den Messaufbau (① elektrische Sende-/Empfangssignale, ② Bewegungssteuerung, ③ Echosignale, ④ Messdatenübertragung/Steuerung Oszilloskop, ⑤ Linearachsenpaar, ⑥ Ultraschallprüfkopf, ⑦ Prüfling, ⑧ Hexapod). Zur akustischen Ankopplung findet die Messung in einem Wasserbad statt.

gleiche Abstand zum Prüfkopf einzuhalten, um die Lage des Fokus in der Tiefe nicht zu verändern. Da P nicht dem Koordinatenursprung des Hexapods O entspricht, muss der bewegliche Teller für die Winkelnachführung nicht nur Rotationen, sondern auch translatorische Bewegungen ausführen. Die dafür benötigte Verschiebung des Tellers am Hexapod besteht aus zwei Kippbewegungen um die beiden zueinander orthogonalen Achsen y und z . Für die Herleitung der gesuchten Hexapod-Koordinaten eines bestimmten Pivotpunkts P im Raum werden nacheinander die Projektionsebenen in der xz - und xy -Ebene betrachtet. Die zweite Rotation ist dabei von der ersten abhängig. Die Rotation in der xz -Ebene aus Abbildung 6 beschreibt die Verschiebung des Zentrums O auf den Punkt O' des beweglichen Tellers bei Drehung der Anordnung um den Pivotpunkt P mit dem Winkel α . Die Verschiebung des Tellers in der zweiten Ebene xy von O' auf den Zielpunkt O'' wird in Abbildung 7 veranschaulicht. Die geometrischen Betrachtungen aus Abbildung 6 und Abbildung 7 liefern den Zusammenhang zwischen dem Startpunkt des Tellers O und dem anzufahrenden Punkt O'' in Abhängigkeit der Position des Pivotpunkts und der Stellwinkel α und β in Richtung v und w des Roboters. Nach Vereinfachung des resultierenden Gleichungssystems ergibt sich für den Ortsvektor des Punktes O'' die Beziehung

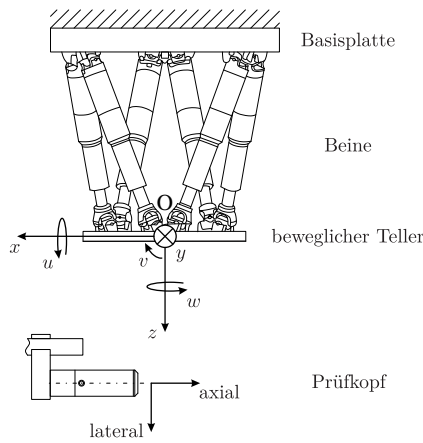


Abbildung 5: Verwendetes Koordinatensystem und Bezeichnung der Komponenten des Hexapods sowie der Achsrichtungen am Prüfkopf. Die Neigungswinkel u und v und der Torsionswinkel w werden dem Motion-Controller in Grad übergeben. Die Werte für die Translationsachsen werden in mm übergeben. Der Koordinatenursprung O entspricht dem Rotationszentrum des beweglichen Tellers.

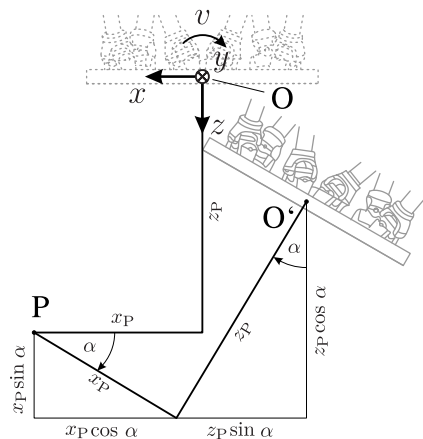


Abbildung 6: Rotation um den Winkel α in v -Richtung in der xz -Ebene.

$$\vec{O}'' = \begin{pmatrix} 1 - \cos \alpha \cos \beta & \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & 1 - \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha & 0 & 1 - \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix}.$$

Der Ablauf der Kalibrierung wird schematisch in Abbildung 8 dargestellt. Mittels eines Scans ohne Winkelnachführung wird zunächst die Kontur über eine Abstandsmessung mit der Kreuzkorrelationsmethode ermittelt. Die daraus resultierende Kontur wird durch eine Dezimationsfilterung reduziert und anschließend linear interpoliert, um die gewünschte Punktemenge für die spätere Messung zu erhalten. Die Reduzierung der Informationen durch das Dezimationsfilter dient der Glättung des Konturverlaufs, ohne die Absolutwerte zu verändern. Somit ist es möglich, eventuell auftretende Sprünge zu vermeiden, die zu extremen Anstellwinkeln führen würden. Im Anschluss wird ein Aufpunkt auf der Kontur ermittelt, um die Absolutposition der Kontur im verwendeten Koordinatensystem aus Abbildung 5 zu bestimmen. Dazu wird eine Kippbewegung jeweils in v -Richtung zur Ermittlung der z -Koordinate des Aufpunkts bzw.

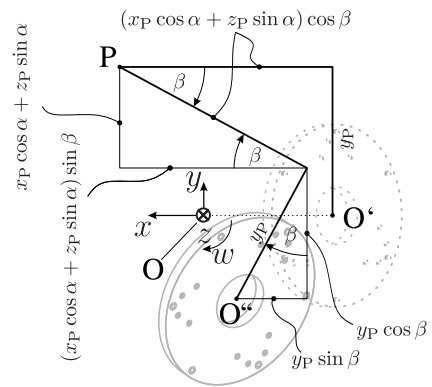


Abbildung 7: Rotation um den Winkel β in w -Richtung in der xy -Ebene.

in w -Richtung zur Bestimmung der y -Koordinate ausgeführt. Die Messung wird iterativ verfeinert, indem die ermittelte Koordinate im nächsten Iterationsschritt eingesetzt wird. So erhält man innerhalb von etwa drei Iterationsschritten ein Ergebnis, das im erreichbaren Auflösungsbereich des Ultraschallprüfkopfs liegt. Die Kalibriermessungen der y - und z -Koordinate des Aufpunkts sind dabei unabhängig voneinander durchführbar. Die fehlende x -Koordinate wird vom Nutzer manuell vorgegeben. Aus der bekannten Absolutposition der Kontur können nun durch Ableitung in den beiden lateralen Richtungen die Stellwinkel für den Hexapod α und β berechnet werden. Neben den Stellwinkeln geht die Absolutposition des aktuellen Messpunkts als Pivotpunkt P mit den Koordinaten $(x_P|y_P|z_P)$ ein. Damit ist der Bewegungsablauf des Verfahrenssystems für die gesamte Messung bestimmt.

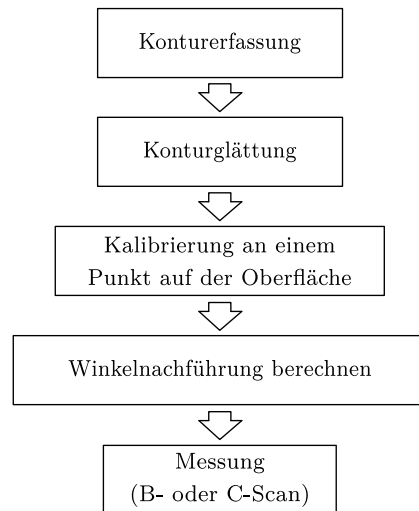


Abbildung 8: Ablauf des Kalibrierverfahrens zur Nachführung des Prüflings entlang seiner gekrümmten Oberfläche.

Messergebnisse

Zur Validierung der Funktionsfähigkeit des Messaufbaus wurde die Messung aus Abbildung 2 unter Winkelnachführung wiederholt. Aus dem C-Mode Bild in Abbildung 9 ist ersichtlich, dass keine Abdunkelungen in

den Randbereichen mehr auftreten. Auflösung und Fokussierung bleiben über die komplette zu vermessende Fläche konstant. Das Raster in der Struktur der Probe weist kaum Verzerrungen auf. In Abbildung 10 wird

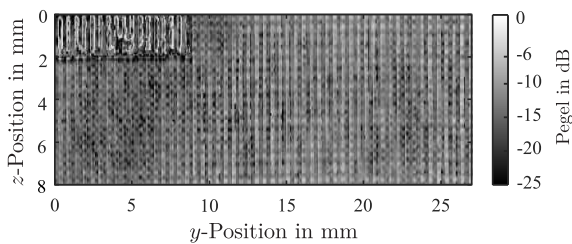


Abbildung 9: C-Scan Aufnahme am Prüfling aus Abbildung 2 mit implementierter Winkelnachführung. Ausleuchtung und Fokussierung bleiben über den kompletten Messbereich erhalten.

eine C-Mode Messung an einem exemplarischen Bauteil in Sandwichbauweise präsentiert. Es entstand im Rahmen des DFG Sonderforschungsbereichs/Transregio 39 [6]. Im Inneren des Tiefziehteils zwischen zwei Aluminiumblechen befindet sich ein MFC-Modul (vgl. Abbildung 3), das in einer Schicht aus Epoxidharz eingebettet ist. Im C-Mode Bild in Abbildung 10 sind sowohl die piezokeramischen Längsfasern des MFC als auch die quer zu den Fasern angeordneten interdigitalen Elektroden gut aufgelöst erkennbar. Des Weiteren sind kleine Luftpinschlüsse aus der Epoxidharz-Klebeschicht dargestellt. Die Nachführung auf der Oberfläche des Bauteils ist auch bei großen Stellwinkeln in den Ecken des Bildes hoch präzise. Das zu untersuchende MFC-Modul im Inneren beschreibt allerdings nicht exakt den Biegeradius des Bauteils. Dadurch variiert der Abstand zwischen MFC-Oberfläche und vorderem Blech etwas, was unvermeidbar zu unterschiedlicher Fokussierung im Bauteil führt.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Messaufbau für mikroskopische Ultraschalluntersuchungen an Bauteilen mit gekrümmter Oberfläche vorgestellt. Zur optimalen Positionierung des Prüfkopfs entlang der Prüflingsoberfläche wird in den konventionellen Aufbau eines Ultraschallmikroskops ein Hexapod-Robotersystem eingefügt. Dieses dient der Winkelnachführung am Prüfling, während der Ultraschallprüfkopf mit zwei Linearverstellern justiert wird. Für die stets optimale Ausrichtung des Prüfkopfs zum Prüfling wird vorab eine Kalibrierung durchgeführt, mit Hilfe derer die Form und Position der Kontur ermittelt wird. Es konnte gezeigt werden, dass das aufgebaute Ultraschallmikroskop für die Bildgebung an den untersuchten Prüflingen geeignet ist. Das bestehende Messsystem soll für weitere Untersuchungen um ein zusätzliches Linearachsenpaar erweitert werden. Mit Hilfe eines Hydrophons wird es dadurch ermöglicht, neben Puls-Echo-Messungen auch Bilddaten aus dem transmittierten Schallanteil zu generieren und so genauere Erkenntnisse über das Innere des Prüflings zu gewinnen.

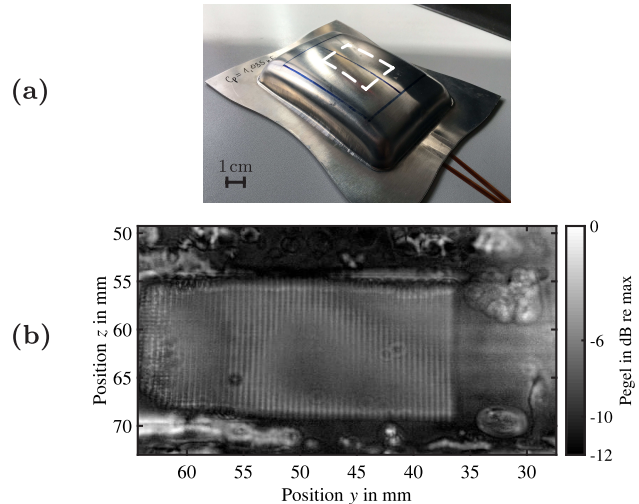


Abbildung 10: Exemplarischer Prüfling in Sandwich-Bauweise mit zweiachsig gekrümmter Oberfläche (a) und C-Scan Aufnahme (b). Aus (b) ist ersichtlich, dass der Abstand zwischen MFC- und Bauteilvorderkante über die vermessene Fläche leicht variiert. Es kommt zu unterschiedlicher Fokussierung im Bereich der Längsfasern und zu teilweiser Abdunkelung. Der Großteil des zu untersuchenden Bereichs ist vergleichsweise gut aufgelöst. Die interdigitalen Elektroden sowie die Lötstellen sind gut zu erkennen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung dieser Forschungsarbeit durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 39 „PT-PIESA“ (Teilprojekt C09).

Literatur

- [1] Lerch, R.; Sessler, G.; Wolf, D.: Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen. Springer, Berlin, 2009.
- [2] Kino, G.S.: Acoustic Waves: Devices, Imaging and Analog Signal Processing. Prentice Hall, 1987.
- [3] Rupitsch, S.J.; Zagar, B.G.: Acoustic microscopy technique to precisely locate layer delamination. IE-EE Trans. on Instr. and Meas., vol. 56, no. 4, 2007.
- [4] Maev, R.Gr. (Hrsg.): Acoustic Microscopy. Wiley-VCH, 2013.
- [5] Wüst, M.; Eisenhart, J.; Rief, A.; Rupitsch, S.J.: Messsystem zur Ultraschallmikroskopie an gekrümmten Strukturen. *tm - Technisches Messen* (2017): <https://dx.doi.org/10.1515/teme-2016-0085>.
- [6] Nestler, M.; Drossel, W.G.; Hensler, S.; Müller, R.: Fabrication method for series production of sheet metal parts with integrated piezoelectric transducers. 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering, (15): 494–502, 2014.