

Oberflächenwellensensoren zur Überwachung von Eisbildung an Rotorblättern von Windenergieanlagen

Philipp Schulmeyer¹, Hagen Schmidt¹

¹ Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung, Dresden, Deutschland
Kontakt: p.schulmeyer@ifw-dresden.de, h.schmidt@ifw-dresden.de

Einleitung

Vereiste Rotorblätter an Windenergieanlagen (WEA) bergen aufgrund von Eiswurf ein Sicherheitsrisiko für Mensch, Natur und Infrastruktur sowie verursachen durch Massenunwucht verstärkten und einseitigen Verschleiß (Abb. 1). Aus Sicherheitsgründen ist daher eine rechtzeitige Abschaltung erforderlich. Mangels kostengünstiger und zuverlässiger Eisdetektion finden Außer- und Wiederinbetriebnahme der WEA meist zu früh, zu spät oder gar nicht statt. Dies führt u. a. zu Kosten aus Leistungsverlusten, die sich auf jährlich 10 % [1] bis 18 % [2] belaufen können. Betroffen sind vor allem WEA in sogenannten „cold climates“, zu denen der Alpenraum, Skandinavien aber auch bereits deutsche Mittelgebirge zählen.

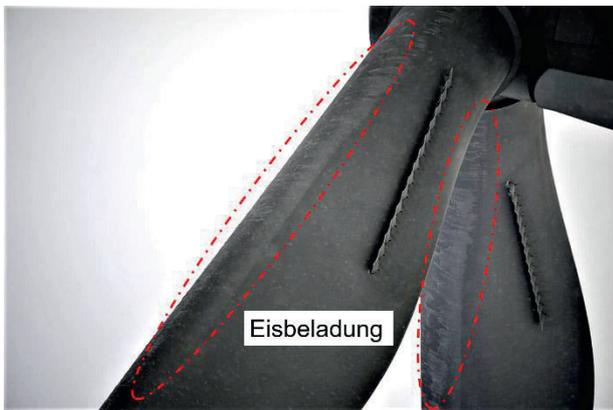


Abb. 1: Vereiste Windenergieanlage [Quelle: cp.max]

Akustische Oberflächenwellen (eng.: surface acoustic waves, kurz: SAW) erlauben die Entwicklung von kleinen, leichten und nachrüstbaren SAW-Sensoren, welche als passive Bauelemente ohne Batterie auskommen und über flache und flexible Antennen per Funksignal betrieben und abgefragt werden können. Letzteres ist ein besonderer Vorteil, da elektrische Leitungen im Rotorblatt das Blitzschlagrisiko erhöhen. Ein am Turm installiertes Abfragesystem sendet über eine Antenne ein elektromagnetisches Signal, welches über die sensorseitige Antenne empfangen und im Interdigitalwandler (IDT) über die ineinandergreifenden Kammelektroden in eine akustische Welle gewandelt wird. Diese breitet sich an der Oberfläche des piezoelektrischen Substrats des SAW-Bauelements aus (Abb. 2). Eine Änderung der Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Druck oder Oberflächenbeladung verursacht eine Änderung der Ausbreitungseigenschaften der akustischen Welle, welche je nach Bauelementgestaltung reflektiert oder über einen Sendewandler als elektromagnetische Welle an das Abfragesystem zurückgesendet wird. Die Analyse von Ausgangs- und Eingangssignal erlaubt so eine Aussage zu Umgebungsbedingungen oder dem Zustand einer im SAW-Pfad befindlichen Oberflächenbeladung.

Die Polarisation der akustischen Oberflächenwelle spielt eine entscheidende Rolle für die vorgesehene Bestimmung des Phasenübergangs von Wasser zu Eis. Rayleigh-Wellen mit Amplitude in der Sagittalebene (Oberflächennormale in Ausbreitungsrichtung) regen bei Benetzung der Oberfläche mit einer Flüssigkeit Volumenwellen in dieser an. Die Welle wird dadurch stark gedämpft. Scher-horizontal (SH) polarisierte Wellen hingegen koppeln nur sehr schwach mit Flüssigkeiten. Beim Einfrieren erhöht sich die Viskosität der Flüssigkeit, sodass an den Kontaktflächen zwischen Substrat und gefrierender Flüssigkeit eine zunehmende Kopplung stattfindet, die die SH-Welle dämpft.

Dieses Messprinzip basierend auf SAW wurde bereits für Quarz- [3-5] und Lithiumtantalat-Substrate [6-8] untersucht. Diese Arbeit untersucht Lithiumniobat-Substrate auf deren Fähigkeit eine Flüssigkeitsbenetzung, sowie den Phasenübergang von Wasser zu Eis zu bestimmen.

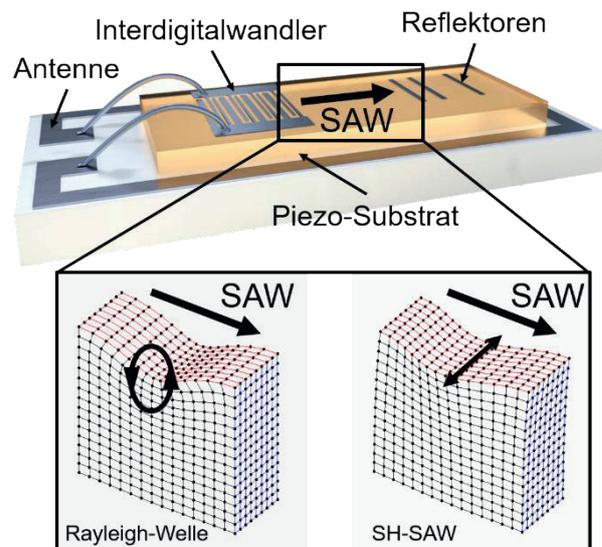


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines SAW-Bauelements als reflektive Verzögerungsleitung mit Antenne; die Vergrößerung stellt Teilchenbewegung und Ausbreitungsrichtung von Rayleigh- und SH-SAW an der Oberfläche des piezoelektrischen Substrats dar

Ein Transfer dieser Technologie vom Labor ins Umfeld einer WEA erfordert zudem die Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen am Rotorblatt. Im Betrieb der WEA tritt Vereisung zuerst an der Anströmkannte der Rotorblattspitze auf. Dort ist mit Abrasion durch Regen und in der Strömung befindliche Fremdkörper wie Sand, zu rechnen. Insbesondere die empfindlichen Elektroden des SAW-Bauelements sind vor elektrochemischer Korrosion zu schützen.

Materialien und Methoden

Materialien

Bei den hier betrachteten SAW-Bauelementen handelt es sich um Zweitord-Verzögerungsleitungen (VZL) aus den piezoelektrischen Substraten 128° YX- und 64° YX-Lithiumniobat (LiNbO_3) mit einer Dicke von $500\ \mu\text{m}$. Im Folgenden werden diese mit 128LN und 64LN abgekürzt. Die Aluminium-Metallisierung der Wandlerstrukturen weist eine Dicke von $300\ \text{nm}$ und die Passivierungsschicht aus Siliziumdioxid (SiO_2) eine Dicke von $500\ \text{nm}$ auf. Eingangswandler und Ausgangswandler bestehen aus jeweils 31 Fingerpaaren mit einer Fingerbreite von $30\ \mu\text{m}$. Die Apertur beträgt $2\ \text{mm}$ und die Verzögerungsleitung hat eine Länge von $10\ \text{mm}$. Damit ergibt sich eine sensitive Fläche von $20\ \text{mm}^2$.

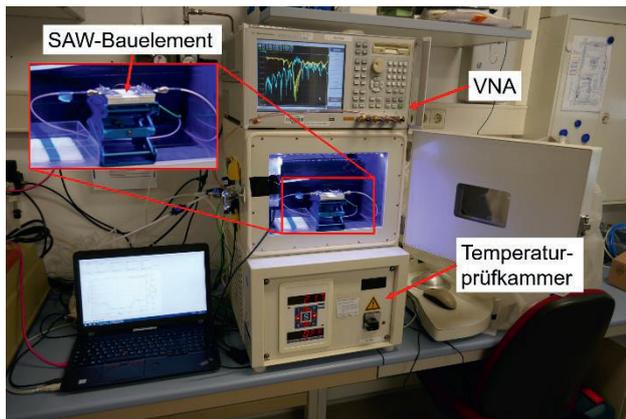


Abb. 3: Versuchsaufbau aus Temperaturprüfkammer, Vektornetzwerkanalysator (VNA), Mikrocontroller, PC und SAW-Bauelement auf Träger

Sämtliche Messungen werden in einer Temperaturprüfkammer (Voetsch VT4002) im Bereich zwischen $-30\ ^\circ\text{C}$ und $120\ ^\circ\text{C}$ durchgeführt (Abb. 3). Das zu vermessende SAW-Bauelement befindet sich auf einem Träger und ist mit jeweils zwei Federkontakten pro Wandler über eine auf $50\ \text{Ohm}$ Wellenwiderstand angepasste Leiterplatte und SMA-Anschluss mit einem Vektornetzwerkanalysator (Agilent E5070B, kurz: VNA) verbunden.

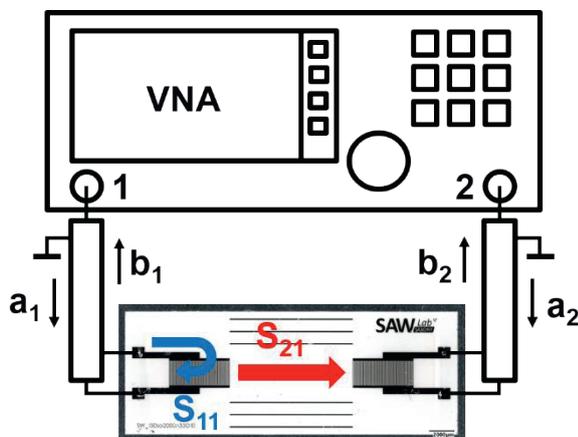


Abb. 4: VNA-Aufbau zur S-Parametermessung an SAW-Zweitordern; Reflexionsfaktor $|S_{11}|$ und Transmissionsfaktor $|S_{21}|$ schematisch dargestellt; a: einlaufende Welle, b: auslaufende Welle

Dieser erlaubt die Messung der Reflexions- und Transmissionsfaktoren des Zweitores in Form der frequenzabhängigen S-Parameter (Abb. 5). Die Reflexionsfaktoren $|S_{11}|$ und $|S_{22}|$ beschreiben das Verhältnis aus einlaufender (a) und auslaufender elektrischer Welle (b) am jeweiligen IDT. Die Transmissionsfaktoren $|S_{21}|$ und $|S_{12}|$ beschreiben das Verhältnis aus einlaufender Welle an einem IDT und auslaufender Welle des anderen IDTs (Abb. 4). Die Analyse der Reflexionsfaktoren $|S_{11}|$ und $|S_{22}|$ der beiden Wandler, sowie der Transmissionsfaktoren $|S_{21}|$ und $|S_{12}|$ zwischen diesen, erlaubt Rückschlüsse auf das Bauelementverhalten bei Temperaturänderung und Benetzung mit Wassertropfen. Die Messanordnung wird sowohl am Ende der Signalleitungen kalibriert und für die Länge der Leiterplatte eine entsprechende Signalverzögerung berücksichtigt. Für eine vereinfachte Interpretation der Messkurven wird im Zeitbereich getort.

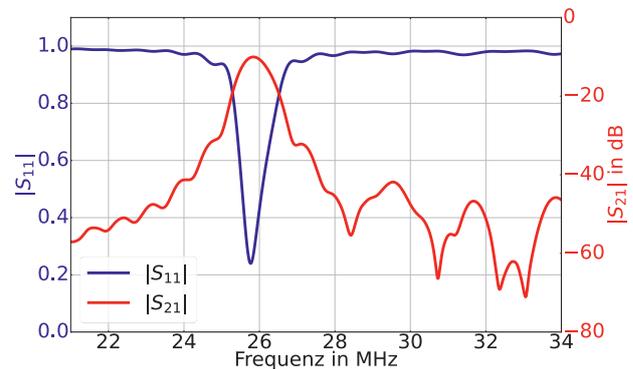


Abb. 5: Betrag des Reflexions- und Transmissionsfaktors $|S_{11}|$ und $|S_{21}|$ über der Frequenz für 128LN

Untersuchung des Temperaturverhaltens

Eine Oberflächenbeladung der VZL durch Flüssigkeit oder feste Stoffe hat keinen Einfluss auf die getorten Reflexionsfaktoren, sondern lediglich auf die Transmissionsfaktoren. Aus diesem Grund wird das bauelementspezifische Temperaturverhalten untersucht, um später anhand des Reflexionsfaktors $|S_{11}|$ auf eine Temperaturänderung des Bauelements schließen zu können. In $10\ ^\circ\text{C}$ -Schritten werden die SAW-Bauelemente von $-30\ ^\circ\text{C}$ bis $120\ ^\circ\text{C}$ temperiert und jeweils die Frequenzen der minimalen Reflexionsfaktoren $f(|S_{11}|_{\min})$ über der Temperatur aufgetragen. Anschließend werden die Temperaturkoeffizienten (TCF) für die Bauelemente aus 64LN und 128LN bestimmt.

Beim späteren Einsatz ist die Bestimmung der Temperatur zwar kein direkter Indikator für das Auftreten von Vereisung, ermöglicht aber die Vorhersage eisrelevanter Betriebssituationen zur direkten Detektion von Eisbildung.

Untersuchung des Übertragungsverhaltens in Abhängigkeit zur Oberflächenbeladung

Zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens bei Benetzung mit Wassertropfen werden die Bauelemente zuerst bei Raumtemperatur ($20\ ^\circ\text{C}$) im trockenen und unbenetzten Zustand vermessen und anschließend jeweils Wassertropfen in $0,5\ \mu\text{L}$ -Schritten in der Mitte der VZL mit einer Pipette platziert. Geringe Abweichungen der Volumina durch Verdunstung werden hierbei aufgrund der kurzen Messzeit vernachlässigt. Das maximale Tropfenvolumen für diese Messung liegt bei $20\ \mu\text{L}$. Im Anschluss werden diese Messungen bei $-20\ ^\circ\text{C}$ in der Temperaturprüfkammer wiederholt (Abb. 6). Durch das Öffnen der Kammertür bildet sich Kondensat auf den kalten Oberflächen der Versuchsanordnung, welches in wenigen Sekunden gefriert und nach ein

paar Minuten wieder abgetaut und verdunstet ist. Diese kurzzeitige Beladung der gesamten Bauelementoberfläche und damit auch der Wandlerstrukturen verursacht eine reversible und daher nicht berücksichtigte Störung der S_{11} - und S_{22} -Parametermessung. Die Messung wird nach jeder Applikation erst nach Ablauf einer Wartezeit von 30 min durchgeführt. Signifikante Änderungen im Tropfenvolumen sind auch hier nicht feststellbar. Das maximale Tropfenvolumen für diese Messung liegt bei 6 μL .

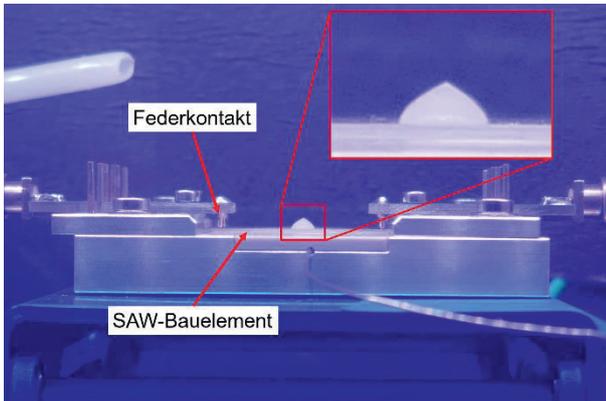


Abb. 6: Gefrorener Tropfen auf SAW-Bauelement

Ergebnisse

Untersuchung des Temperaturverhaltens

Die hier betrachteten SAW-Bauelemente weisen im gewählten Temperaturbereich einen linearen Temperaturgang der Arbeitsfrequenz auf (Abb. 7).

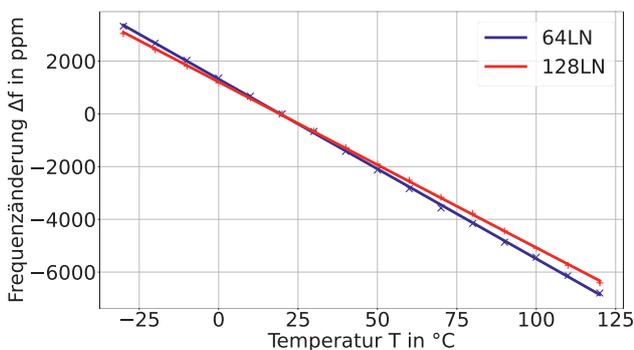


Abb. 7: Frequenzänderung von $|S_{11}|_{\min}$ über der Temperatur für 64LN und 128LN (linearer Fit)

Die Temperaturkoeffizienten lassen sich aus dem linearen Fit berechnen und betragen $-68 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ für 64LN und $-63 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ für 128LN bei einer Bezugstemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese ermöglichen die zusätzliche Bestimmung der Temperatur über die S_{11} -Parameter.

Untersuchung des Übertragungsverhaltens in Abhängigkeit zur Oberflächenbeladung

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Änderung des Transmissionsfaktormaximums $\Delta|S_{21}|_{\max}$ bei zunehmender Benetzung durch Wassertropfen für Raumtemperatur und $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. Der exponentielle Fit weist im Fall von 128° YX -Lithiumniobat einen deutlich größeren Abfall von $|S_{21}|$ gegenüber 64° YX -Lithiumniobat auf.

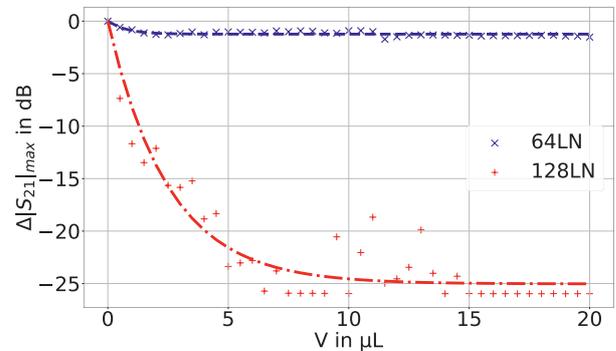


Abb. 8: Abhängigkeit des Übertragungsverhaltens $|S_{21}|$ für die Bauelemente aus 64LN und 128LN bei Benetzung mit unterschiedlichen Tropfenvolumina bei Raumtemperatur (exponentieller Fit)

Bei einer Flüssigkeitsbenetzung bis zu einem Mikroliter zeigt sich für 64LN eine Verringerung der Transmission, die sich für größere Tropfenvolumina einem festen Wert von circa 1 dB annähert. Die Flüssigkeit hat einen geringen Einfluss auf die Energieübertragung zwischen den beiden Wandlerstrukturen. 128LN zeigt einen deutlich steileren Abfall von $|S_{21}|$ und damit eine größere Dämpfung der akustischen Welle (Abb. 8). Die Transmission nähert sich asymptotisch einem Wert von circa -25 dB an.

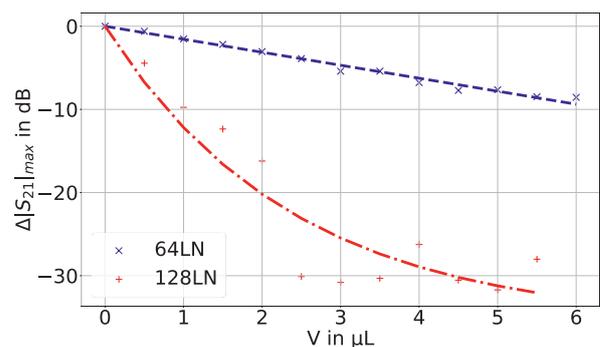


Abb. 9: Abhängigkeit des Übertragungsverhaltens $|S_{21}|$ für die Bauelemente aus 64LN (linearer Fit) und 128LN (exponentieller Fit) bei Vereisung unterschiedlicher Tropfenvolumina bei $-20 \text{ }^\circ\text{C}$

Vereiste Wassertropfen hingegen verursachen auch bei 64LN eine höhere Dämpfung der akustischen Welle, welche größer ausfällt als bei flüssigem Wasser. Im untersuchten Bereich von $0 - 6 \mu\text{L}$ stellt sich eine lineare Abnahme des Transmissionsfaktors $|S_{21}|$ ein. Die Rayleigh-Welle in der Verzögerungsleitung des 128° YX -Lithiumniobat-Bauelements wird dagegen schon bei weniger als drei Mikroliter um 25 dB gedämpft (Abb. 9).

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen des Übertragungsverhaltens der SAW-Bauelemente in Abhängigkeit zur Oberflächenbelastung haben gezeigt, dass die Differenzierung zwischen unbenetzter, mit Wasser und mit Eis beladener Verzögerungsleitung möglich ist. Die Rayleigh-Welle in 128° YX-Lithiumniobat kann nachweislich zur Detektion von Flüssigkeitsbenetzung dienen, während sich die scherhorizontal polarisierte Oberflächenwelle in 64° YX-Lithiumniobat eignet, um den Phasenübergang von flüssiger zu fester Oberflächenbelastung (Wasser zu Eis) zu bestimmen. Die Bauelementgestaltung als Zweitor-VZL ermöglicht zusätzlich zur Analyse der ungedämpften bzw. gedämpften Transmission, die Betrachtung der temperaturbedingten Änderung der Frequenz des Reflexionsfaktorminimums des IDT. Neben der Bestimmung des Aggregatzustandes einer Oberflächenbelastung ist die Messung der Temperatur für diese Bauelemente über $\Delta f(|S_{11}|_{\min})$ möglich.

Um die Eigenschaften der hier untersuchten SAW-Bauelemente mit einem einzigen piezoelektrischen Substrat zu realisieren, werden künftig geeignete Substratschnitte und SAW-Ausbreitungsrichtungen gesucht. Für den industriellen Einsatz von SAW-Sensoren an Rotorblättern müssen darüber hinaus weitere relevante Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Hierzu zählen abrasiv und korrosiv wirkende Einflüsse wie Niederschlag und in der Strömung befindliche Partikel, sowie störende Oberflächenbelastungen aufgrund von Insektenflug, Staub und Schmiermittelleckage. Der Einfluss dieser Bedingungen auf SAW-basierte Sensoren ist Teil der weiteren Untersuchungen.

Literatur

- [1] DIERER, S. ; OECHSLIN, R. ; CATTIN, R.: Wind turbines in icing conditions: performance and prediction, *Adv. Sci. Res.*, 6, 245-250, 2011
- [2] PÉREZ, J.M.P. ; MÁRQUEZ, F.P.G. ; HERNÁNDEZ, D.R.: Economic viability analysis for icing blades detection in wind turbines. *J. Clean. Prod.*, 135, 1150-1160, 2016
- [3] VELLEKOOP, N.J. ; JAKOBY, B. ; BASTEMEIJER, J.: A Love-wave ice detector, *IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. Vol.1*, 453-456, 1999
- [4] GANGADHARAN, S. ; VARADAN, V. ; VARADAN, V. ; JOSE, K. ; ATHASBAR, M.: Love-wave-based ice sensor. *Proceedings Volume 3673, Smart Structures and Materials: Smart Electronics and MEMS*, 1999
- [5] JOSE, K. A. ; SUNIL G. ; VARADAN, V. K. ; VARADAN, V. V.: Wireless IDT ice sensor, *2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.02CH37278)*, 2002, pp. 655-658 Vol.2
- [6] VARADAN, VASUNDARA V. et al.: IDT sensors for detection of ice on rotorcraft. *Smart Structures* (1998).
- [7] YIN, Y. ; WANG, W. ; JIA, Y. ; LIANG, Y.: Development of a novel wireless and passive Love wave based ice sensor, *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2019, pp. 2553-2556
- [8] WANG, W. ; YIN, Y. ; JIA, Y. ; et al.: Development of a Love Wave Based Device for Sensing Icing Process with Fast Response, *J. Electr. Eng. & Techn.*, 15, 1245-1254, 2020

Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Technologie Transfer Programms des Leibniz-Instituts für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden gefördert. Dank für die Unterstützung gilt der Forschungsgruppe *Surface Dynamics* am IFW Dresden und der cp.max Rotortechnik GmbH & Co. KG.