

Zweitveröffentlichung/ Secondary Publication



Staats- und
Universitätsbibliothek
Bremen

<https://media.suub.uni-bremen.de>

von Freyberg, Axel ; Helming, Paula ; Friedrich, Jacob ; Stöbener, Dirk ; Fischer, Andreas

Berührungslose Messung von Pitchwinkelabweichungen an Windenergieanlagen aus 150m Entfernung

Journal Article as: peer-reviewed accepted version (Postprint)

DOI of this document* (secondary publication): <https://doi.org/10.26092/elib/3330>

Publication date of this document: 20/09/2024

* for better findability or for reliable citation

Recommended Citation (primary publication/Version of Record) incl. DOI:

von Freyberg, A., Helming, P., Friedrich, J., Stöbener, D. & Fischer, A. (2021). Berührungslose Messung von Pitchwinkelabweichungen an Windenergieanlagen aus 150m Entfernung. *tm - Technisches Messen*, 88(11), 686-695. <https://doi.org/10.1515/teme-2021-0085>

Please note that the version of this document may differ from the final published version (Version of Record/primary publication) in terms of copy-editing, pagination, publication date and DOI. Please cite the version that you actually used. Before citing, you are also advised to check the publisher's website for any subsequent corrections or retractions (see also <https://retractionwatch.com/>).

Dies ist ein akzeptiertes Manuskript eines bei De Gruyter in der Zeitschrift *tm - Technisches Messen* am 26.08.2021 veröffentlichten Artikels, verfügbar unter <https://doi.org/10.1515/teme-2021-0085>. Es unterliegt den Nutzungsbedingungen der Lizenz Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), die die nicht kommerzielle Wiederverwendung, Verbreitung und Vervielfältigung über ein beliebiges Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert und in keiner Weise verändert, umgewandelt oder ergänzt wird. Wenn Sie dieses Manuskript für kommerzielle Zwecke verwenden möchten, wenden Sie sich bitte an rights@degruyter.com

This document is made available under a Creative Commons licence.

The license information is available online: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Take down policy

If you believe that this document or any material on this site infringes copyright, please contact publizieren@suub.uni-bremen.de with full details and we will remove access to the material.

Axel von Freyberg*, Paula Helming, Jacob Friedrich, Dirk Stöbener und Andreas Fischer

Berührungslose Messung von Pitchwinkelabweichungen an Windenergieanlagen aus 150 m Entfernung

Non-contact measurement of wind turbine rotor blade pitch angle deviations from 150 m distance

Zusammenfassung: Die Windkraft stellt eine wichtige Energiequelle in Deutschland dar. Form und Lage der Rotorblätter von Windenergieanlagen haben dabei einen großen Einfluss auf die Effizienz und die Lebensdauer der Anlage. Geometrische Merkmale von Rotorblättern werden mit Blattschablonen, photogrammetrischen oder interferometrischen Messverfahren erfasst. Hierzu muss die Anlage jedoch gestoppt und ggf. mit Mustern bzw. Markern versehen werden. Für In-Prozess-Messungen ohne Manipulation der Windenergieanlage bietet sich das Prinzip der Laufzeitmessung an, auf dem sogenannte terrestrische Laserscanner aufbauen. Bisher unbekannt ist jedoch die erreichbare Messunsicherheit bei der Bestimmung von Pitchwinkeln.

In diesem Beitrag werden die Messunsicherheiten bei der Erfassung der Rotorblattoberfläche für Distanzen > 100 m experimentell untersucht und zur Bestimmung der Unsicherheit des Pitchwinkels mittels Monte-Carlo Simulation fortgepflanzt. Für die Betrachtung der Pitchwinkelunsicherheit wird unterschieden, ob die Nenngeometrie der Rotorblätter bekannt ist und absolute Aussagen über die Pitchwinkel getroffen werden können, oder ob die Nenngeometrie unbekannt ist und nur relative Pitchwinkelunterschiede zwischen den Rotorblättern ausgewertet werden können.

***Korrespondenzautor:** Axel von Freyberg, Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), 28359 Bremen, Germany, E-Mail: a.freyberg@bimaq.de, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0936-3655>

Paula Helming, Jacob Friedrich, Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), 28359 Bremen, Germany, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7868-8106> (P. Helming)

Dirk Stöbener, Andreas Fischer, Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), MAPEX Center for Materials and Processes, 28359 Bremen, Germany, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-2106> (D. Stöbener), <https://orcid.org/0000-0001-7349-7722> (A. Fischer)

Schlagwörter: Windenergieanlagen, Geometriemessung, Pitchwinkel, terrestrischer Laserscanner.

Abstract: Wind power is an important source of energy in Germany. The shape and position of the rotor blades of wind turbines have a major influence on the efficiency and service life of the turbine. Geometric characteristics of rotor blades are recorded using blade stencils, photogrammetric or interferometric measurement methods. For this purpose, however, the turbine must be stopped and, furthermore, provided with patterns or markers. For in-process measurements without manipulation of the wind turbine, the principle of time-of-flight measurement, on which so-called terrestrial laser scanners are based, is suitable. However, the achievable measurement uncertainty for the determination of rotor blade pitch angles is unknown so far. In this paper, the measurement uncertainties of rotor blade surface sensing for distances > 100 m are investigated experimentally and propagated to determine the uncertainty of rotor blade pitch angle using Monte Carlo simulation. For the consideration of the pitch angle uncertainty it is distinguished whether the nominal geometry of the rotor blades is known and absolute statements about the rotor blade position can be made, or whether the nominal geometry is unknown and only relative differences between the rotor blades can be evaluated.

Keywords: Wind turbines, geometric measurement, pitch angles, terrestrial laser scanner.

1 Einleitung

Seit 2019 liefert die Windenergie den größten Anteil der Stromversorgung in Deutschland [6]. Ein wichtiger Parameter für den effizienten Betrieb von Windenergieanlagen (WEA) ist der Pitchwinkel. Ungleiche Pitchwinkel an den Rotorblättern einer WEA führen zu aerodynamischen Unwuchten und absolute Pitchwinkelabweichungen reduzieren den Wirkungsgrad der Anlage. Neben einem re-

duzierten Ertrag treten erhöhte mechanische Belastungen durch Schwingungen auf. Die jährlichen Folgekosten im Zusammenhang mit Pitchwinkelabweichungen werden pro 2 MW-Anlage auf mehr als 20.000 € geschätzt [7]. Zukünftige Entwicklungen hinsichtlich Anlagengröße und Rotorblattdesign [18] verstärken deshalb den Bedarf, basierend auf einer In-Prozess-Messung der Rotorblattgeometrie aus Entfernungen > 100 m die tatsächlichen Pitchwinkel mit einer Unsicherheit > 0,3° bestimmen zu können.

Eine grundlegende Methode zur Bestimmung der Pitchwinkel ist die Verwendung von Blattschablonen [10]. Der Montageaufwand ist dabei jedoch sehr groß und es können keine In-Prozess-Messungen durchgeführt werden. Durch die Integration von Dehnungssensoren in die Rotorblätter [21, 22] können dynamische Messungen erfolgen. Die lokal erfassten Dehnungen sind jedoch nicht direkt in geometrische Merkmale des Rotorblatts oder in Pitchwinkel zu überführen. Für dynamische Geometriemessungen an WEA-Rotorblättern kommen daher insbesondere berührungslose Messprinzipien in Frage.

Interferometrische Messungen an drehenden Rotorblättern aus großer Distanz wurden bisher mit Laser-Doppler-Vibrometern durchgeführt [14, 16]. Für einen ausreichenden Reflektionsgrad müssen retroreflektive Marker an den Messstellen angebracht werden. Als Ergebnis können Position und Geschwindigkeit einzelner Messstellen erfasst werden, um Schwingungen zu analysieren. Zur Bestimmung des Pitchwinkels sind diese Ansätze jedoch ungeeignet.

Photogrammetrische Messverfahren können die Oberfläche der Rotorblätter im laufenden Betrieb der WEA mit hoher lateraler Auflösung erfassen, erfordern jedoch ebenfalls einen Eingriff in die WEA, um Marker bzw. Muster auf den Rotorblättern anzubringen [9, 19, 20].

Nicht-invasive Alternativen sind Ansätze auf Basis des Laufzeitverfahrens, wie terrestrische Laserscanner (TLS) bzw. Light Detection and Ranging (LiDAR) Systeme. Mitka et al. verwenden einen TLS zur Erfassung der Geometrie einer kompletten WEA aus verschiedenen Richtungen [11]. Die Messungen wurden an einer Anlage mit einer Turmhöhe von 35 m in einem Abstand von 50 m mit einer Abstandsmessunsicherheit von 6 mm durchgeführt. Aus den Messungen wurden die Turmbewegung und die statische Biegung sowie die Teilung der Rotorblätter ausgewertet. Es wurden keine Pitchwinkel gemessen und auch keine Messunsicherheiten für die ausgewerteten geometrischen Merkmale abgeschätzt.

In-Prozess Laufzeitmessungen mit einem größeren Abstand bis 215 m wurden von Hoghoogi et al. [8] mit Hilfe einer opto-mechanischen Messplattform demonstriert,

wobei Abstandsunsicherheiten von ± 13 cm erreicht wurden. Der Pitchwinkel wurde aus punktuellen Messungen an den vorbeidrehenden Rotorblättern an festen radialen Positionen abgeschätzt. Eine Messabweichung von 1° zu dem Wert der Anlagensteuerung ist jedoch unzureichend hinsichtlich der Anforderungen. Eine detaillierte Unsicherheitsbetrachtung wurde nicht durchgeführt, und es ist somit offen, ob der Pitchwinkel unter den geforderten Randbedingungen mit einer Messunsicherheit > 0,3° grundsätzlich bestimmt werden kann.

Das Ziel des vorliegenden Artikels ist es deshalb, zunächst die Unsicherheit geometrischer Messungen an WEA-Rotorblättern aus Entfernungen > 100 m mit einem TLS experimentell zu bestimmen und anschließend die daraus resultierende Messunsicherheit des Rotorblattwinkels abzuschätzen. Im Abschnitt 2 wird das Messprinzip des Laufzeitverfahrens und die Funktionsweise des 3D-Laserscanners zur Erfassung der Rotorblattgeometrie beschrieben. Zudem erfolgt eine experimentelle Bestimmung der Abstandsmessunsicherheit an einem ruhenden Rotorblattsegment. Die entwickelten Algorithmen zur Rotorblattwinkelbestimmung und die Monte-Carlo Simulationen zur Abschätzung der Messunsicherheit mittels Fortpflanzungsrechnung werden in Abschnitt 3 zusammen mit den Ergebnissen präsentiert. Abschnitt 4 schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Messung der Rotorblattgeometrie

2.1 Prinzip

Der eingesetzte terrestrische Laserscanner (TLS) arbeitet nach dem Laufzeitprinzip. Dabei wird ein gepulstes Lasersignal emittiert und dessen Laufzeit t bis zum Messobjekt und zurück zum Empfänger gemessen. Der Abstand zum Messobjekt

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

ergibt sich aus der Laufzeit t und der Lichtgeschwindigkeit c .

TLS können als 1D-, 2D- oder 3D-Messsystem ausgeführt sein. Ein 2D-Laserscanner verfügt i. d. R. über einen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotierenden Spiegel, der eine Anzahl an Messpunkten N über einen Azimutwinkelbereich Φ emittiert. Ein 3D-Laserscanner kann zusätzlich den rotierenden Spiegel kontinuierlich in einem Elevationswinkelbereich Ψ schwenken. Ein Messpunkt P ist, wie in Abb. 1 dargestellt, durch seinen Abstand

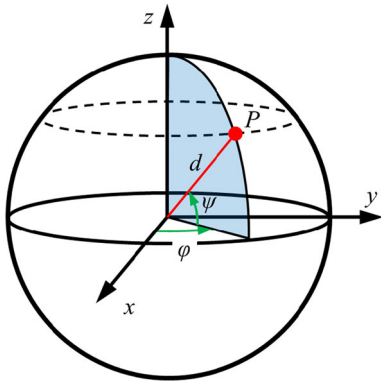


Abb. 1: Messpunkt P im Kugelkoordinatensystem mit Abstand d , Azimutwinkel φ und Elevationswinkel ψ .

d , sowie den Azimutwinkel φ und den Elevationswinkel ψ definiert. Die meisten Messsysteme transformieren die Messpunkte bereits in ein kartesisches Koordinatensystem (x, y, z) .

2.2 Messunsicherheit

Als TLS wurde das System LASE 3000D-C3-227 verwendet. Dieser 3D-Laserscanner ist für Messungen bis zu 300 m bei einer Unsicherheit < 15 mm spezifiziert. Er erfasst $N = 1000$ Messpunkte im Azimutwinkelbereich $\Phi = 90^\circ$ mit einer Frequenz von 20 Hz. Der maximale Elevationswinkelbereich beträgt $\Psi = 180^\circ$ bei einer maximalen Winkelgeschwindigkeit von $\dot{\psi} = 150^\circ/\text{s}$.

Die Abstandsmessunsicherheit wird mittels statistischer Auswertung wiederholter Messungen an einem Rotorblattsegment mit bekannter Geometrie bestimmt. Als Messobjekt dient ein Rotorblattsegment für Windkanalmessungen (vgl. Abb. 2). Es weist über eine Länge von $L = 120$ cm ein konstantes aerodynamisches Profil mit einer Sehnenlänge von ca. $S = 80$ cm auf. Abb. 2 zeigt die Referenzmessung der Oberfläche mittels fünf Profilmessungen in einem Abstand von $\Delta L = 200$ mm mit einem Koordinatenmessgerät vom Typ Leitz PMM-F 30.20.7. Die Antastunsicherheit $P_{\text{MPE}} = 0,9 \mu\text{m}$ ist vernachlässigbar im Vergleich zum TLS. Die taktilen Messdaten werden mit MATLAB zu einem flächigen Polygonnetz interpoliert, welches die Referenz darstellt.

Als wesentliche Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit des TLS wurden der Messabstand d , der Winkel α zur Oberflächennormalen sowie die Lichtverhältnisse analysiert. Der Einfluss der Oberfläche wurde nicht systematisch untersucht, weil die Rotorblätter von Windenergieanlagen eine weitestgehend einheitliche Oberflächenbe-

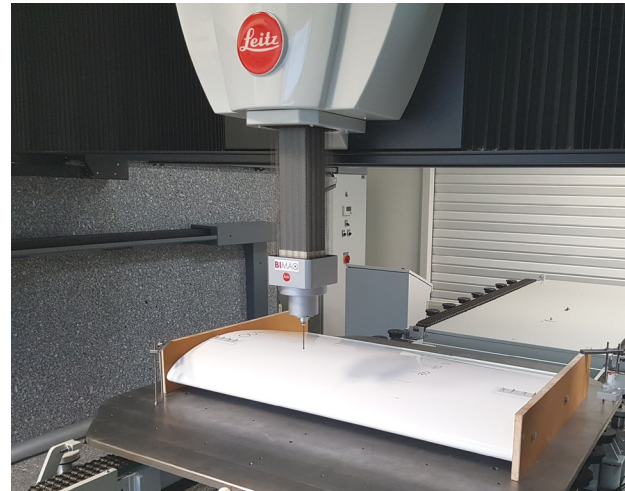


Abb. 2: Messobjekt und Referenzmessung mit einem Koordinatenmessgerät.

schichtung auf Polyurethan-Basis aufweisen, mit der das hier untersuchte Messobjekt ebenfalls beschichtet ist.

Zur Bestimmung der Messunsicherheit werden Messungen in verschiedenen Abständen, unter unterschiedlichen Winkeln und Lichtverhältnissen durchgeführt. Dazu wird der Elevationswinkelbereich auf $\Psi = \pm 10^\circ$ und die Elevationsgeschwindigkeit auf $\dot{\psi} = 1^\circ/\text{s}$ eingestellt, um in jeder Messung mindestens 14 Messprofile auf dem Messobjekt zu erfassen. Die Länge L des Messobjektes ist hierbei der limitierende Faktor. Im kürzesten Messabstand von $d = 20$ m wird der Elevationswinkelbereich so gewählt, dass das Messobjekt komplett erfasst werden kann. Im entferntesten Messabstand von $d = 180$ m wird die Elevationsgeschwindigkeit auf Basis der Messrate von 20 Hz so gewählt, dass 14 Messprofile aufgenommen werden. Die Messdaten werden im CSV-Format exportiert und in die Software GOM Inspect eingelesen, um sie mit den Referenzdaten zu vergleichen. Mess- und Referenzdaten werden zunächst grob mittels manueller Dreipunktausrichtung zueinander transformiert, und anschließend wird eine Feinausrichtung nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Mit diesem Vorgehen werden systematische Einflüsse in den Messdaten eliminiert, wenngleich diese in der späteren Anwendung zur Lagebestimmung der Rotorblätter keine Rolle spielen. Zur Bestimmung der zufälligen Messabweichungen werden dann die Abweichungen zu den Referenzdaten profilweise statistisch ausgewertet und der Mittelwert der jeweils 14 empirischen Standardabweichungen berechnet.

Die so ermittelte empirische Standardabweichung der Abstandsmessung s_d wird als Schätzwert für die Standardunsicherheit σ_d verwendet und ist in Abb. 3 in Abhängig-

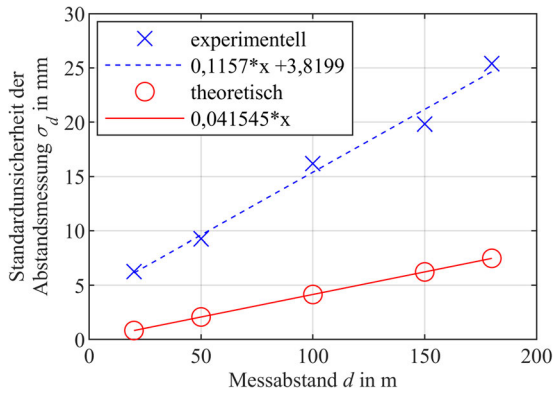


Abb. 3: Standardunsicherheit der Abstandsmessung σ_d in Abhängigkeit des Messabstands d bei einem Winkel zur Oberflächennormalen $\alpha = 0^\circ$ für experimentelle Ergebnisse (blau) und theoretische Abschätzungen der Messbarkeitsgrenze durch das Photonenschrottrauschen (rot).

Tab. 1: Parameter zur Abschätzung der theoretischen Grenze der Abstandsmessunsicherheit.

mittlere Leistung	\bar{P}	5	mW
Wellenlänge	λ	905	nm
Pulsfrequenz	f_p	40	kHz
Pulsdauer	t_p	10	ns
Detektorfläche	A_D	3x3	cm ²

keit des Messabstands d für einen Winkel zur Oberflächennormalen $\alpha = 0^\circ$ in blau dargestellt. Die Standardunsicherheit steigt annähernd linear mit dem Abstand und beträgt bei einem Messabstand von $d = 150$ m ungefähr $\sigma_d = 20$ mm.

Die theoretische Grenze der Standardunsicherheit für Abstandsmessungen mittels Laufzeitverfahren lässt sich für den Fall eines dominanten Photonenschrottrauschens mit Hilfe der Cramér-Rao Schranke unter der Annahme eines gaußförmigen Lichtpulses mit der $\frac{1}{c^2}$ Weite d_z sowie der mittleren Anzahl an Photonen N_{photon} wie folgt abschätzen [4]:

$$\sigma_{d,\text{theor}} = \frac{d_z}{8 \cdot \sqrt{N_{\text{photon}}}}. \quad (1)$$

Zur Berechnung werden die in Tabelle 1 zusammengefassten Parameter verwendet. Damit ergibt sich

$$d_z = c \cdot t_p = 3 \text{ m} \quad (2)$$

aus der Pulsdauer t_p und der Lichtgeschwindigkeit c . Es wird zusätzlich angenommen, dass die Laserabstandsmessung senkrecht zu einer ideal diffusen Oberfläche, d. h. gemäß des Lambertschen Gesetzes erfolgt. Der vom

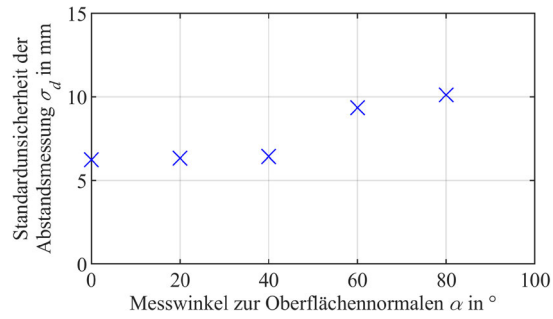


Abb. 4: Standardunsicherheit der Abstandsmessung σ_d in Abhängigkeit des Winkels α zur Oberflächennormalen in einem Abstand $d = 20$ m.

Detektor (Fläche A_D) empfangene Anteil des halbkugelförmig zurückgestreuten Lichts beträgt damit beispielsweise bei einem Messabstand von $d = 150$ m

$$\eta = \frac{A_D}{2 \cdot \pi \cdot d^2} = 6,4 \cdot 10^{-9}. \quad (3)$$

Die mittlere Anzahl an Photonen

$$N_{\text{photon}} = \frac{E \cdot \eta \cdot \lambda}{h \cdot c} = 2,034 \quad (4)$$

lässt sich aus der Energie $E = \bar{P}/f_p$ eines Pulses, dem Anteil des zurückgestreuten Lichts η der Wellenlänge λ , sowie der Lichtgeschwindigkeit c und dem Planckschen Wirkungsquantum h berechnen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 in rot dargestellt. Die abgeschätzte unterste Grenze der Messbarkeit ergibt einen linearen Verlauf mit einer geringeren Steigung als bei den experimentellen Ergebnissen. Bei einem Messabstand von $d = 150$ m ergibt sich mit $\sigma_{d,\text{theor}} = 6,2$ mm eine theoretisch erreichbare Unsicherheit, die nur ein Drittel der experimentellen Ergebnisse beträgt. Dieser Vergleich zeigt, dass das eingesetzte Messsystem bereits sehr nah an die durch das Photonenschrottrauschen gegebene theoretische Messbarkeitsgrenze herankommt. Gemäß der Abschätzung kann eine signifikante Reduzierung der absoluten Messunsicherheit des TLS, um beispielsweise eine Größenordnung, somit nur mit einer größeren Anzahl an Photonen gelingen. Zunächst wären jedoch die aktuell dominierenden Ursachen für Messabweichungen zu klären. Diesbezüglich sind z. B. die Beiträge zum Messunsicherheitsbudget durch das Schrottrauschen und das thermische Rauschen des Photodetektors sowie durch Dispersionseffekte aufgrund der spektralen Bandbreite der Laserpulse [15] zu untersuchen.

Abbildung 4 zeigt die Standardunsicherheit σ_d der Abstandsmessung, abgeschätzt aus den experimentell ermittelten empirischen Standardabweichungen, in Abhängigkeit des Winkels α zur Oberflächennormalen bei einem



Abb. 5: TLS-Messung an einer WEA aus einem Abstand von $d \approx 150$ m.

Messabstand von $d = 20$ m. Bis zu einem Winkel zur Oberflächennormalen $\alpha \leq 40^\circ$ sind keine signifikanten Änderungen in der Standardunsicherheit zu erkennen. Bei größeren Winkeln zur Oberflächennormalen steigt die Standardunsicherheit, jedoch sind auch bei $\alpha = 80^\circ$ noch Messungen möglich, wobei die Standardunsicherheit sich in diesem Fall fast verdoppelt.

Zur Untersuchung des Einflusses von Tageslicht werden Messungen in einem Abstand von $d = 20$ m und unter einem Winkel $\alpha = 0^\circ$ zur Oberflächennormalen einmal bei Tageslicht und einmal nach Sonnenuntergang in einer dunklen Halle durchgeführt. Die empirischen Standardabweichungen betragen $s_d = 6,3$ mm und $s_d = 6,1$ mm, d. h. die Standardunsicherheit bleibt nahezu unverändert. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Einflüssen wird die Querempfindlichkeit durch das Tageslicht beim Außeninsatz deshalb als nicht signifikant bewertet.

3 Rotorblattwinkelbestimmung

Die Bestimmung von Pitchwinkeln aus TLS-Messungen, wie beispielhaft in Abb. 5 gezeigt, ist auf zwei Arten mög-

lich. Einerseits können die Messdaten der Rotorblätter einer WEA untereinander verglichen werden, um relative Pitchwinkelabweichungen festzustellen. Andererseits kann der absolute Pitchwinkel eines Rotorblatts durch den Vergleich mit Nenndaten in einem definierten Werkstück-Koordinatensystem bestimmt werden. Für beide Fälle wurden Auswertelgorithmen entwickelt, die in den folgenden Unterabschnitten vorgestellt und simulativ bezüglich der erwartbaren Pitchwinkelmessunsicherheit charakterisiert werden.

Dazu wird die in Abschnitt 2 ermittelte Abstandsmessunsicherheit des TLS auf die Messunsicherheit der Pitchwinkel mittels Monte-Carlo Simulation fortgepflanzt. Wie in Abb. 6 dargestellt, werden die Messdaten aus einem Computer Aided Design Modell (CAD-Modell) eines 50 m langen Rotorblatts [13] generiert, das mit der 2D-Scanebene des TLS geometrisch geschnitten wird. Hierfür wird eine Implementierung [17] des Möller-Trumbore Algorithmus [12] verwendet. Die auf dieser Basis simulierten Messabstände der jeweiligen Messprofile werden schließlich mit einem normalverteilten Rauschen überlagert. Für einen angenommenen Messabstand von $d = 150$ m wird gemäß Abb. 3 dazu eine Standardabweichung von $\sigma_d = 20$ mm gewählt.

3.1 Relative Pitchwinkelunterschiede

Das Ziel ist es, die Rotationslage zweier gemessener Profile zu bestimmen und zu vergleichen. Da die beiden Profile sich jedoch nicht nur in ihrer Rotationslage unterscheiden, ist ein direkter Vergleich (Minimierung der Abstände der beiden Punktwolken) nicht sinnvoll. Die Einflüsse der Verteilung und der Orientierung der Punkte auf dem Profil sowie der jeweiligen Abweichungen zum Nennprofil sind zu groß. Stattdessen wird ein Polynom 4. Grades als geometrisches Ersatzelement verwendet. Ein beispielhaftes Ergebnis der Polynomapproximation für zwei Messprofile ist in Abb. 7 visualisiert. Die Auswertung von Pitchwinkelunterschieden erfolgt so, dass ein Polynom (lila Linie) in die Messpunkte des ersten Profils (blaue Punkte) approximiert wird und für dieses Polynom (ohne Veränderung seiner Form, grüne Linie) dann die bestmöglichen Lageparameter zur Approximation an ein weiteres Profil (gelbe Sterne) bestimmt wird.

Zur Untersuchung der erreichbaren Messunsicherheit für Pitchwinkelunterschiede wurde die experimentell abgeschätzte Standardunsicherheit der Abstandsmessung σ_d für einen Messabstand von $d = 150$ m für verschiedene Punktdichten je Messprofil bzw. Azimutwinkelauflösungen simulativ fortgepflanzt. Die Ergebnisse jeweils

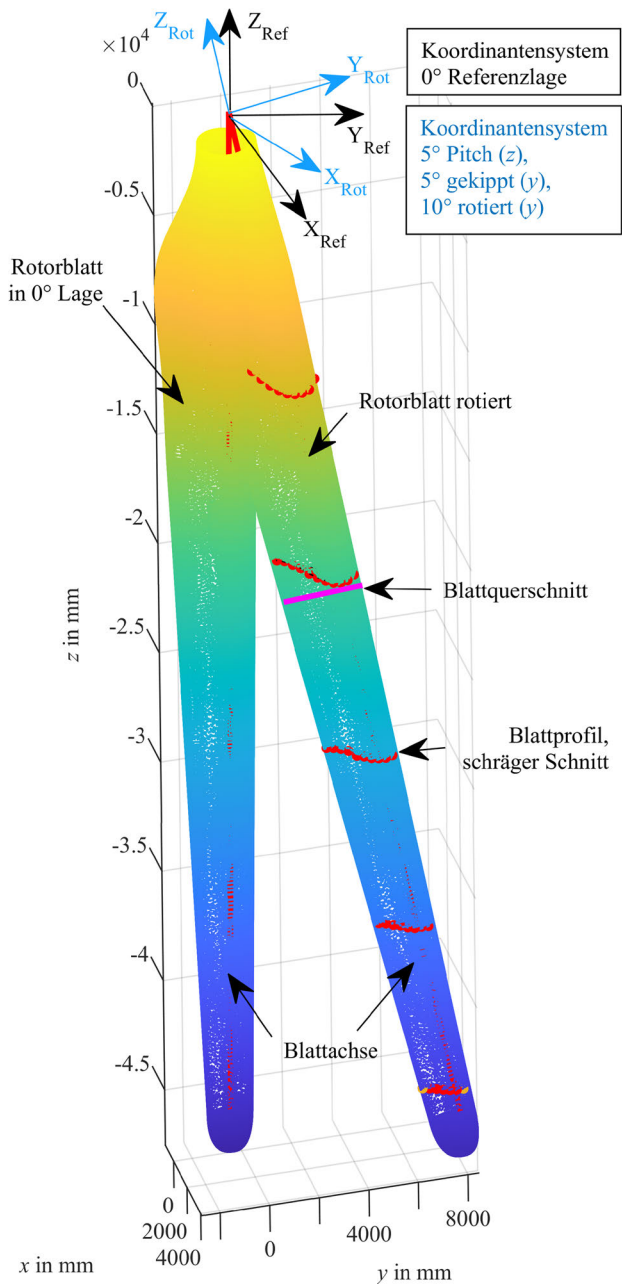


Abb. 6: Darstellung der Messdatensimulation: Auf Basis eines rotierten Nennmodells [13] werden fünf verrauschte Messprofile in unterschiedlichen radialen Positionen generiert (rote Punkte).

100 wiederholter Monte-Carlo Simulationen sind in Abb. 8 als Mittelwerte dargestellt. Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung der Einzelmessungen, um die zufälligen Abweichungen einer praxisgerechten Messung zu charakterisieren. Für den Fall einer geringen Azimutwinkelauflösung von $\Delta\varphi = 0,2^\circ$ beträgt die systematische Pitchwinkelabweichung $-5,2^\circ$. Diese Winkelauflösung wäre in der erforderlichen Messsituation ungeeignet, um präzise Aussagen über Pitchwinkelunterschiede der

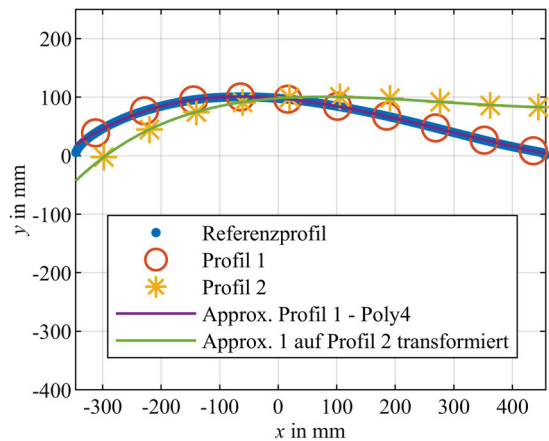


Abb. 7: Approximation zweier Messprofile mit einem Polynom 4. Ordnung.

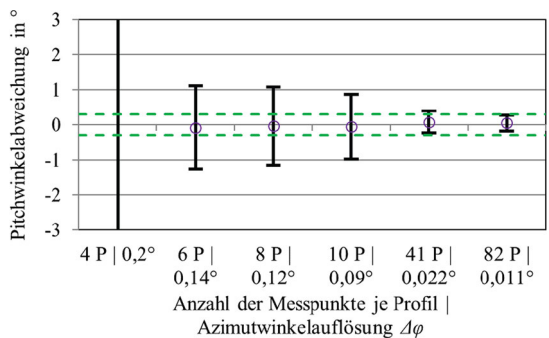


Abb. 8: Messabweichung zu einem vorgegebenen Pitchwinkelunterschied ausgewertet als Polynomapproximation als Mittelwert und Standardabweichung von je 100 wiederholten Simulationen für eine Standardunsicherheit der Abstandsmessung von $\sigma_d = 20$ mm in Abhängigkeit der Punktzahl pro Messprofil. Die grünen Linien stellen die Anforderung bezüglich der Unsicherheit dar.

Rotorblätter zu treffen. Mit der geringen absoluten Punktzahl von nur 4 Messpunkten pro Profil ist in diesem Fall keine reproduzierbare Polynomapproximation möglich. Bei höheren Azimutwinkelauflösungen liegt die systematische Pitchwinkelabweichung unter $0,1^\circ$ und ist somit vernachlässigbar klein. In diesem Fall kann die Messunsicherheit direkt über die Standardabweichung als Maß für die zufälligen Messabweichungen abgeschätzt werden. Der vorhandene TLS hat eine Azimutwinkelauflösung von $\Delta\varphi = 0,09^\circ$, was in der Messsituation eine Erfassung der Rotorblattprofile mit etwa 10 Punkten bedeutet. In diesem Fall liegt die Standardabweichung des Pitchwinkels einer Einzelmessung bei $0,92^\circ$. Die geforderte Messunsicherheit von $0,3^\circ$ kann mit einer Einzelmessung also nicht erreicht werden. Bei konstanten Windbedingungen könnten jedoch Mehrfachmessungen durchgeführt werden, um die Messunsicherheit durch eine Mittelung zu reduzieren.

Darüber hinaus könnte ein TLS mit einer höheren Azimutwinkelauflösung die Pitchwinkelunsicherheit bereits mit einer Einzelmessung erreichen.

3.2 Absolute Pitchwinkelbestimmung

Für den Fall, dass die Nenngometrie der Rotorblätter bekannt ist, bietet sich die Möglichkeit, die absoluten Pitchwinkel der Rotorblätter zu bestimmen. Diese Methode hat gegenüber der relativen Pitchwinkelbestimmung den Vorteil, dass der Auswertalgorithmus nur die Invarianzgrade der Lage zwischen Nenngometrie und Messdaten (Transformation) bestimmen muss und nicht zusätzlich die Freiheitsgrade bezüglich der Form des approximierenden Elements. Dies hat einen positiven Einfluss auf die numerischen Iterationen.

Mit dem Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) [1, 3] werden die 3D-Messpunkte von einem oder mehreren Profilen unter Bestimmung der Transformationsparameter an das CAD-Modell eines Rotorblatts angepasst. Aus den so bestimmten Parametern wird die Lage des Rotorblatts und der Pitchwinkel abgeleitet. Um die Anzahl der Freiheitsgrade zu reduzieren, wird vorausgesetzt, dass die Position der Rotornabe bekannt ist. Dabei werden zwei wesentliche ICP Varianten untersucht. Die Point-to-Point-Variante minimiert die Summe der quadrierten, euklidischen Abstände der Punktpaare. Die Point-to-Plane-Variante [2] minimiert die Summe der quadrierten, euklidischen Abstände zwischen den Messpunkten und den Normalenebenen der zugeordneten Referenzpunkte. Die zweite Variante bietet durch die Normalenebenen eine gleichmäßigere Oberflächenrepräsentation, gleitet bzw. divergiert aber bei unzureichender Einschränkung der Freiheitsgrade eher [5].

Für die Untersuchung der Messunsicherheit werden erneut Monte-Carlo Simulationen verwendet. Die Ergebnisse von jeweils 100 wiederholten Auswertungen von Einzelprofilmessungen mit der Point-to-Point-Variante sind in Abb. 9 dargestellt. Für das vorhandene Messsystem (10 P | 0,09°) ergibt sich eine deutliche systematische Pitchwinkelabweichung von 1,8° und eine Standardabweichung von 0,8°, womit die Anforderungen nicht erfüllt sind. Für höhere Azimutwinkelauflösungen reduzieren sich die Abweichungen jedoch deutlich und liegen durchaus im Anforderungsbereich. Die Erklärung dafür ist die ungleichmäßige Oberflächenrepräsentation durch die Point-to-Point-Variante, wodurch der Algorithmus bei einer unzureichenden Anfangstransformation in abweichenden lokalen Minima endet. Die Point-to-Plane-Variante ist bei diesen Versuchen divergiert, die Ergebnisse sind daher nicht dargestellt.

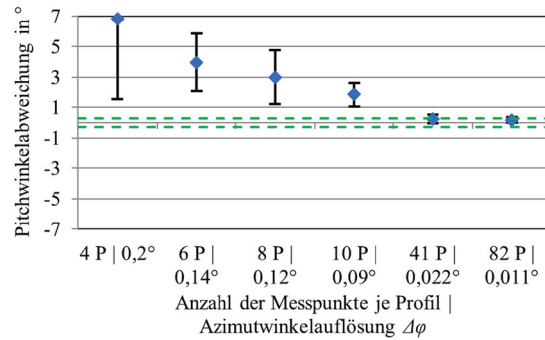


Abb. 9: Messabweichung zu einem vorgegebenen Pitchwinkel ausgewertet mittels ICP (Point-to-Point) für ein Einzelprofil als Mittelwert und Standardabweichung von je 100 wiederholten Simulationen für eine Standardunsicherheit der Abstandsmessung von $\sigma_d = 20$ mm in Abhängigkeit der Punktzahl pro Messprofil. Die grünen Linien stellen die Anforderung bezüglich der Unsicherheit dar.

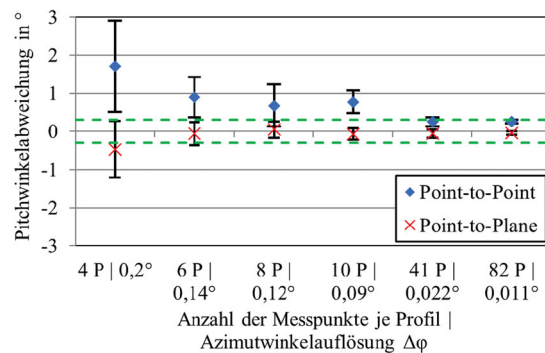


Abb. 10: Messabweichung zu einem vorgegebenen Pitchwinkel ausgewertet mittels ICP für jeweils fünf Profile als Mittelwert und Standardabweichung von je 20 wiederholten Simulationen für eine Standardunsicherheit der Abstandsmessung von $\sigma_d = 20$ mm in Abhängigkeit der Punktzahl pro Messprofil. Die grünen Linien stellen die Anforderung bezüglich der Unsicherheit dar.

Eine weitere mögliche Messstrategie setzt darauf, dass die Rotorstellung bei jeder Profilmessung bekannt ist. Unter dieser Voraussetzung können mehrere Profilmessungen an unterschiedlichen Blattradien eines Rotorblatts gemeinsam an die Nenngometrie angepasst werden. Um dies zu untersuchen, werden fünf Profilmessungen an definierten Blattradien generiert, vgl. Abb. 6. Die Ergebnisse für jeweils 20 wiederholte Simulationen sind in Abb. 10 dargestellt. Für die Point-to-Point-Variante fallen die Pitchwinkelabweichungen im Vergleich zu den Einzelmessungen geringer aus. Durch die Verteilung der Messpunkte entlang der Blattachse ist eine stärkere Eingrenzung der Freiheitsgrade gegeben. Das hat auch zur Folge, dass die Point-to-Plane-Variante konvergiert. Bereits bei 6 Messpunkten je Profil liegt die Standardabweichung des Pitch-

winkels im Anforderungsbereich und es ist keine signifikante systematische Pitchwinkelabweichung erkennbar. Für den vorhandenen TLS (10 P | 0,09°) wird eine Standardabweichung der Pitchwinkelmessung von 0,15° erreicht.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Bestimmung von Pitchwinkeln an Windenergieanlagen (WEA) wurde der Einsatz eines terrestrischen Laserscanners (TLS) untersucht. Mit einem TLS kann die Oberfläche der Rotorblätter aus Distanzen $d > 100$ m ohne Eingriffe in die WEA, z. B. durch das Anbringen von Markern, erfasst werden. In diesem Beitrag wurde die Messunsicherheit der geometrischen Erfassung experimentell bestimmt und mit theoretischen Grenzen verglichen. Der Messabstand stellt den größten Einfluss auf die Messunsicherheit dar, und die Unsicherheit steigt linear mit dem Abstand. Bei einem Messabstand von $d = 150$ m liegt die empirische Standardabweichung der Abstandsmessung bei $s_d \approx 20$ mm. Der Akzeptanzwinkel des verwendeten TLS liegt bei $\alpha \geq 40^\circ$.

Die Unsicherheitsfortpflanzung auf den Pitchwinkel wurde für zwei Fälle mittels Monte-Carlo Simulationen abgeschätzt. Ohne Kenntnis der Nenngeometrie der Rotorblätter können lediglich relative Pitchwinkelunterschiede zwischen den Rotorblättern ermittelt werden. Die geforderte Pitchwinkelunsicherheit $< 0,3^\circ$ kann mittels Polynomapproximation jedoch nur mit hochauflösenden TLS oder über zeitlich gemittelte Mehrfachmessungen erreicht werden. Ist die Nenngeometrie hingegen bekannt, kann die Anzahl der Freiheitsgrade in der Auswertung reduziert werden. Hierdurch ist die Bestimmung absoluter Pitchwinkel mit einer Standardabweichung von 0,15° möglich.

Zukünftig soll das Messkonzept für In-Prozess-Messungen an drehenden Anlagen eingesetzt werden. Hierzu ist eine Datenfusion von TLS-Messungen mit Videokameramessungen vorgesehen, um die Bewegungseinflüsse der drehenden Rotorblätter während der Messung zu kompensieren. Da die anliegende Windlast die Rotorblätter elastisch verformt, müssen Blatttorsionen und ggf. die Bestimmung von verschiedenen Blattneigungswinkeln entlang eines Blattes berücksichtigt werden. Hierdurch entstehen neue Freiheitsgrade in der Approximation, deren Einflüsse auf die Messunsicherheit zu untersuchen sind.

Danksagung: Die Autoren bedanken sich bei der Firma Deutsche WindGuard Engineering GmbH für die Unterstützung und Beratung sowie für die Leihgabe eines

Windkanal-Rotorblattsegments. Ein weiterer Dank geht an die Firma LASE Industrielle Lasertechnik GmbH für die Bereitstellung einer individuellen Messsoftware. Teile dieser Arbeit sind im Rahmen einer Bachelorarbeit entstanden, danke dafür an Georgii Kereselidze.

Finanzierung: Dieses Vorhaben wurde aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert (BAB-Förderkennzeichen AUF0007A).

Literatur

1. Paul J. Besl and Neil D. McKay. Method for registration of 3-d shapes. In *Sensor fusion IV: control paradigms and data structures*, volume 1611, pages 586–606. International Society for Optics and Photonics, 1992.
2. Y. Chen and G. Medioni. Object modeling by registration of multiple range images. In *Proceedings of the 1991 IEEE international conference on robotics and automation*, pages 2724–2729, 1991.
3. Yang Chen and Gérard Medioni. Object modelling by registration of multiple range images. *Image and vision computing*, 10(3):145–155, 1992.
4. Andreas Fischer. Limiting uncertainty relations in laser-based measurements of position and velocity due to quantum shot noise. *Entropy*, 21(3):264, 2019.
5. Natasha Gelfand, Leslie Ikemoto, Szymon Rusinkiewicz, and Marc Levoy. Geometrically stable sampling for the icp algorithm. In *Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2003. 3DIM 2003. *Proceedings*, pages 260–267. IEEE, 2003.
6. Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt. *Erneuerbare Energien in Deutschland 2019*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020.
7. A. Grunwald, C. Heilmann, M. Melsheimer, and A. Donth. Payback analysis of different rotor balancing strategies. In *Proceedings of EWEA*, 2013.
8. Hadi Hoghooghi, Ndaona Chokani, and Reza S. Abhari. Optical measurements of multi-megawatt wind turbine dynamic response. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206:104214, 2020.
9. Stephanie Lehnhoff, Alejandro Gómez González, and Jörg R. Seume. Full-scale deformation measurements of a wind turbine rotor in comparison with aeroelastic simulations. *Wind Energy Science*, 5(4):1411–1423, 2020.
10. Christoph Lucks. Verfahren zum Erfassen des Spurlaufes der Rotorblätter einer Windkraftanlage, 2009. Patent DE102008013392B4.
11. Bartosz Mitka, Przemysław Klapa, and Jacek Gniadek. Use of terrestrial laser scanning for measurements of wind power stations. *Geomatics and Environmental Engineering*, 13, 2019.
12. Tomas Möller and Ben Trumbore. Fast, minimum storage ray-triangle intersection. *Journal of graphics tools*, 2(1):21–28, 1997.

13. L. F. Monteiro. Wind turbine CAD-model, 2019. <https://grabcad.com/library/wind-turbine-model-flow-study-1>.
14. Muammer Ozbek and Daniel J. Rixen. Operational modal analysis of a 2.5 mw wind turbine using optical measurement techniques and strain gauges. *Wind Energy*, 16(3):367–381, 2013.
15. Claude Rulliere et al. *Femtosecond laser pulses*. Springer, 2005.
16. Mark Rumsey, John Hurtado, Bruce Hansche, Todd Simmermacher, Tom Carne, and Erik Gross. In-field use of laser doppler vibrometer on a wind turbine blade. In *1998 ASME Wind Energy Symposium*, page 48, 1998.
17. J. Tuszynski. Triangle/ray intersection, 2020. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33073-triangle-ray-intersection>.
18. Paul Veers, Katherine Dykes, Eric Lantz, Stephan Barth, Carlo L. Bottasso, Ola Carlson, Andrew Clifton, Johny Green, Peter Green, Hannele Holttinen, et al. Grand challenges in the science of wind energy. *Science*, 366(6464), 2019.
19. J. Winstroth, L. Schoen, Benedikt Ernst, and Jörg R. Seume. Wind turbine rotor blade monitoring using digital image correlation: a comparison to aeroelastic simulations of a multi-megawatt wind turbine. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 524, page 012064. IOP Publishing, 2014.
20. Rong Wu, Yue Chen, Yanting Pan, Qiang Wang, and Dongsheng Zhang. Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 65:38–45, 2015.
21. Mathew L. Wymore, Jeremy E. Van Dam, Halil Ceylan, and Daji Qiao. A survey of health monitoring systems for wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52:976–990, 2015.
22. H. F. Zhou, H. Y. Dou, L. Z. Qin, Y. Chen, Y. Q. Ni, and J. M. Ko. A review of full-scale structural testing of wind turbine blades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33:177–187, 2014.

Autoreninformationen

Axel von Freyberg

Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), 28359 Bremen, Germany
a.freyberg@bimaq.de

Axel von Freyberg hat an der Universität Bremen Produktionstechnik studiert. Er arbeitet seit 2001 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im BIMAQ und schloss seine Promotion im Jahr 2021 ab. Seine Hauptarbeitsgebiete liegen in der geometrischen Messtechnik und der Messdatenauswertung.

Paula Helming

Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), 28359 Bremen, Germany
p.helming@bimaq.de

Paula Helming hat an der TU Dresden Maschinenbau studiert. Sie arbeitet seit 2020 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am BIMAQ. Ihre Hauptarbeitsgebiete liegen in der optischen Messtechnik.

Jacob Friedrich

Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), 28359 Bremen, Germany
jac_fri@uni-bremen.de

Jacob Friedrich studiert zurzeit an der Universität Bremen Systems Engineering im Master mit der Spezialisierungsrichtung Automatisierungstechnik und Robotik. Im Jahr 2020 schloss er sein gleichnamiges Bachelorstudium ab. Seitdem arbeitet er als studentischer Mitarbeiter im BIMAQ.

Dirk Stöbener

Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), MAPEX Center for Materials and Processes, 28359 Bremen, Germany
d.stoebener@bimaq.de

Dirk Stöbener absolvierte ein Physik-Studium und promovierte 2016 an der Universität Bremen im Fachbereich Produktionstechnik. Er ist seit 2000 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) angestellt. Seit 2003 leitet er die Arbeitsgruppe „In-prozess Messtechnik und Optik“ und übernahm 2020 die Position des Oberingenieurs. Seine Forschungsinteressen umfassen fertigungsnahe und In-Prozess-Messverfahren (optisch, akustisch und taktile) z. B. zur Positionsbestimmung und zur Charakterisierung von (geometrischen) Werkstückeigenschaften.

Andreas Fischer

Universität Bremen, Bremer Institut für
Messtechnik, Automatisierung und
Qualitätswissenschaft (BIMAQ), MAPEX
Center for Materials and Processes, 28359
Bremen, Germany
andreas.fischer@bimaq.de

Andreas Fischer erhielt 2004 sein Diplom in Elektrotechnik und schloss 2009 seine Promotion an der Technischen Universität Dresden ab. Während seiner Tätigkeit als Leiter der Gruppe „Messsystemtechnik“ im Fachgebiet Mess- und Sensorsystemtechnik (2009–2016) habilitierte er im Jahr 2014. Seit 2016 ist er Professor im Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen und Leiter des Bremer Instituts für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ). Seine Forschungsbereiche umfassen Messsystemtechnik, optische Messprinzipien für die Strömungs- und Fertigungsmesstechnik sowie die Anwendung modelbasierter Messsysteme und die Untersuchung ihrer Messbarkeitsgrenzen.