

Geometrierfassung und Profilschnittberechnung von Rotorblättern großer Windenergieanlagen mittels terrestrischem Laserscanning

Martina Göring¹

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Geometrie eines Rotorblattes einer realen Windenergieanlage mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) erfasst und ausgewertet. Die Messdaten werden aus mehreren zeitlich parallel aufgenommenen Scans registriert, um Bewegungseinflüsse während der Aufnahme zu reduzieren. Anschließend werden entlang der Blattlängsachse Profilschnitte abgeleitet, die eine detaillierte Rekonstruktion der realen Blattgeometrie ermöglichen. Auf Basis der Punktwolken werden geometrische Kenngrößen wie Profiltiefe, Twist-Verlauf sowie lokale geometrische Abweichungen bestimmt. Der Vergleich mit Referenz- bzw. Designdaten zeigt eine gute Übereinstimmung in der Nähe der Blattwurzel, während die Abweichungen in Richtung der Blattspitze zunehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass TLS eine geeignete Methode für die hochauflösende geometrische Erfassung großskaliger Rotorblätter darstellt und eine konsistente Ableitung relevanter Strukturparameter ermöglicht.

Schlagwörter Terrestrisches Laserscanning · Geometrie · Rotorblatt · Profilschnitte

1 Einführung

Windenergieanlagen sind in der Regel für eine Betriebsdauer von 20 Jahren ausgelegt. Nach Ablauf dieser Zeit ist entweder ein Rückbau vorgesehen oder es muss im Rahmen eines Gutachtens die strukturelle Sicherheit für eine Laufzeitverlängerung nachgewiesen werden. Angesichts der großen Anzahl von Anlagen, die derzeit das Auslegungsende erreichen (The Wind Power, 2026), gewinnt die belastbare Bewertung einer möglichen Weiterbetriebsdauer zunehmend an Bedeutung. Die Datengrundlage für entsprechende Laufzeitverlängerungsgutachten ist jedoch häufig begrenzt. Fehlende Bestandsdaten, vereinfachte Modellannahmen oder der Rückgriff auf generische Referenzmodelle führen zu erhöhten Unsicherheiten in der strukturmechanischen und aeroelastischen Bewertung. Diese Unsicherheiten werden üblicherweise durch konservative Sicherheitsaufschläge berücksichtigt, wodurch das tatsächliche Restlebensdauerpotenzial nicht vollständig genutzt wird (Nielsen et al., 2021). Ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor ist die reale Geometrie der Rotorblätter. Sie beeinflusst unmittelbar die aerodynamischen Lasten, das Schwingungsverhalten und damit die ermüdungsrelevante Beanspruchung der Gesamtstruktur. Da herstellerspezifische Geometriedaten meist nicht vollständig verfügbar sind, werden in der Praxis

häufig Referenzgeometrien angesetzt, wie beispielsweise die des National Renewable Energy Laboratory (NREL).

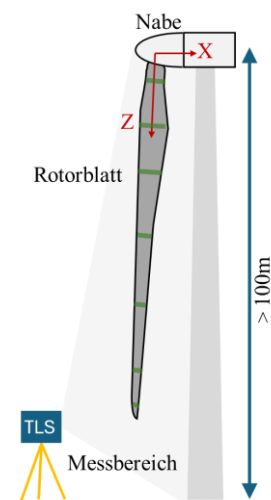


Abbildung 1 Seitenansicht bei der Erfassung eines Rotorblattes in der 6-Uhr-Position zur Erzeugung von Profilen (grün) im Koordinatensystem des Rotorblattes (rot)

Die vorliegende Arbeit zeigt das Verfahren zur hochauflösenden Erfassung der Geometrie eines Rotorblattes einer Windenergieanlage mittels terrestrischem Laserscanning (TLS). Ziel ist die präzise Bestimmung der

¹ Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16/19, 26121 Oldenburg, Deutschland, E-Mail: martina.goering@jade-hs.de

tatsächlichen Blattgeometrie sowie die Ableitung profilbezogener Kenngrößen entlang der Blattlängsachse als Grundlage für weiterführende strukturmechanische und schwingungsrelevante Analysen im Kontext der Laufzeitverlängerung (Abbildung 1).

Das Kapitel 2 beschreibt die Methode zur geometrischen Erfassung von Rotorblättern. Anschließend werden im dritten Kapitel die Ergebnisse präsentiert. Die gesamte Arbeit wird in Kapitel 4 diskutiert und im Kapitel 5 erfolgt das Fazit und der Ausblick.

2 Methode

Im folgenden Kapitel werden zunächst die relevanten Informationen zum Messobjekt der Windenergieanlage beschrieben. Im Anschluss werden die eingesetzten Messsysteme und die Aufnahme-strategie sowie die Auswerteverfahren erläutert.

2.1 Messobjekt

Windenergieanlagen stellen großskalige, schlanke und elastische Tragstrukturen dar, deren Komponenten unter Betriebsbedingungen signifikante Verformungen und Schwingungen aufweisen können. Für geometrische Messungen ist daher sicherzustellen, dass äußere Einflüsse wie Windlasten minimiert werden, um eine möglichst bewegungsarme Erfassung zu gewährleisten.

Die Rotorblätter besitzen eine komplexe, entlang der Blattlängsachse variierende Geometrie, die maßgeblich die aerodynamischen und strukturellen Eigenschaften beeinflusst. Da detaillierte Geometriedaten häufig nicht verfügbar sind, ist eine experimentelle Erfassung der realen Geometrie erforderlich.

Für die Messung befindet sich die Anlage im Stillstand, sodass ein Rotorblatt in einer definierten Position erfasst werden kann. Geeignete Umgebungsbedingungen (insbesondere geringe Windgeschwindigkeiten und trockene Witterung) sind erforderlich, um Bewegungen des Messobjekts während der Datenerfassung zu minimieren.

2.2 Messsystem und Aufnahme-strategie

Die geometrische Erfassung erfolgt mittels terrestrischem Laserscanning (TLS), das eine berührungslose und hochauflösende Aufnahme komplexer Strukturen ermöglicht. Der Einsatz von TLS zur Vermessung von Windenergieanlagen wurde bereits in mehreren Studien untersucht und zeigt die Eignung für großskalige Geometrien und strukturelle Analysen (Grosse-Schwiep,

2013; Mitka et al., 2019; Helming et al., 2023). Auch für die detaillierte Erfassung von Rotorblättern wurde TLS erfolgreich eingesetzt (Stalowska et al., 2023).

Aufgrund der Größe des Messobjekts ist eine geeignete Aufnahme-strategie erforderlich, die sowohl eine vollständige Abdeckung als auch eine ausreichende geometrische Auflösung sicherstellt. Hierzu werden mehrere Scanpositionen um das Objekt verteilt, um Abschattungen zu minimieren und unterschiedliche Blickwinkel zu ermöglichen (Abbildung 2).

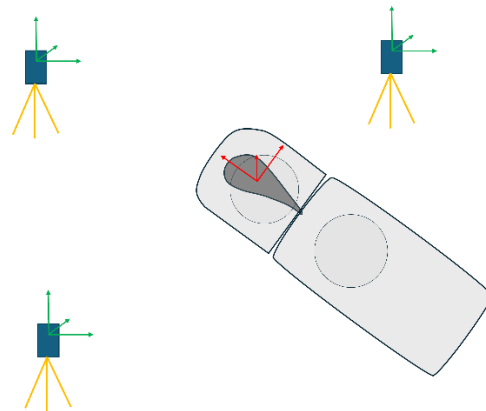


Abbildung 2 Geplanter Messaufbau mit drei TLS, Windenergieanlage in der Draufsicht. Die Messdaten sollen im Koordinatensystem des Rotorblattes (rot) vorliegen.

Zur Reduzierung von Messunsicherheiten infolge möglicher Objektbewegungen kann eine parallele Datenerfassung mit mehreren Scansystemen erfolgen. Dadurch wird die Aufnahmezeit verkürzt und die zeitliche Konsistenz der Messdaten verbessert. Der Einfluss durch Bewegung verursachter Effekte auf TLS-Messungen ist in der Literatur beschrieben (Vaaja et al., 2016).

Die Datenerfassung erfolgt mittels vollständiger Rundumscans, um neben dem eigentlichen Messobjekt auch die Umgebung zu erfassen. Dies soll eine robuste Registrierung der Einzelaufnahmen sowie eine flexible Selektion relevanter Datenbereiche ermöglichen.

2.3 Registrierung und Transformation in das Blatt-Koordinatensystem

Die Registrierung mehrerer Scans erfordert eine stabile Bestimmung gemeinsamer Referenzen zwischen den einzelnen Aufnahmen. In naturnahen Umgebungen, in denen keine ausreichend strukturierten oder dauerhaft stabilen Objekte vorhanden sind, erfolgt dies typischerweise über künstliche Zielmarken.

Aufgrund der großen Messdistanzen bei Windenergieanlagen müssen diese Zielmarken eine ausreichende geometrische Ausdehnung aufweisen, um zuverlässig detektiert werden zu können. Insbesondere sphärische Referenzkörper haben sich hierfür als geeignet erwiesen, da sie aus unterschiedlichen Blickrichtungen eindeutig identifiziert und geometrisch robust approximiert werden können.

Nach der Registrierung liegen die Daten im Koordinatensystem des jeweiligen TLS vor. Für weiterführende Analysen ist eine Transformation in ein objektbezogenes Koordinatensystem erforderlich.

Zur Definition eines rotorblattbezogenen Koordinatensystems wird die Geometrie im Bereich der Blattwurzel genutzt, die näherungsweise als zylindrisch angenommen werden kann. Auf dieser Grundlage erfolgt die Bestimmung der Blattlängsachse durch Zylinderanpassung an die Punktwolke.

Der Ursprung des Koordinatensystems wird über die geometrische Beziehung mehrerer Rotorblätter bestimmt, indem die Achsen der jeweiligen Blattwurzelbereiche kombiniert werden. Die resultierende Schnittpunktbestimmung approximiert den Mittelpunkt der Rotornabe (Abbildung 3).

Die Transformation in dieses Koordinatensystem ermöglicht eine konsistente Beschreibung der Blattgeometrie sowie die Ableitung von Querschnitten entlang der Blattlängsachse.

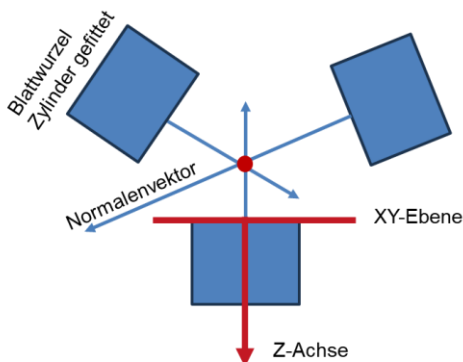


Abbildung 3 Bestimmung der Ausrichtung des Koordinatensystems des Rotorblattes durch Fitten von Zylindern (blaue Rechtecke) in den drei Rotorblättern. Der Normalenvektor der Zylinder definiert den Koordinatenursprung.

2.4 Profilschnitte

Zur Analyse der Rotorblattgeometrie werden Profilschnitte entlang der Blattlängsachse abgeleitet. Da Designdaten

üblicherweise in Form zweidimensionaler Profile vorliegen, ist eine Reduktion der dreidimensionalen Punktwolke auf entsprechende Querschnitte erforderlich. Die Profilschnittberechnung erfolgt in mehreren Schritten:

1. Definition der Schnittebenen

Entlang der Blattlängsachse werden diskrete Positionen definiert. An diesen Positionen werden Ebenen erzeugt, die orthogonal zur Achse ausgerichtet sind.

2. Selektion relevanter Punkte

Für jede Schnittebene werden alle Punkte berücksichtigt, die sich innerhalb eines definierten Abstandsbereiches entlang der Achse befinden.

3. Räumliche Aggregation

Die projizierten Punkte werden innerhalb der Schnittebene in ein zweidimensionales Raster überführt (Abbildung 4).

4. Glättung und Mittelwertbildung

Innerhalb jeder Rasterzelle wird der Mittelwert berechnet, um Messrauschen zu reduzieren und robuste Profilmittelwerte zu erhalten.

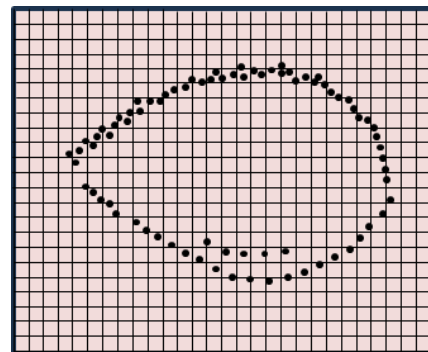


Abbildung 4 Berechnung der Profilschnitte durch ein definiertes Raster

Das Ergebnis sind geglättete zweidimensionale Profile, die den realen Querschnitt des Rotorblattes repräsentieren und für den Vergleich mit Designdaten verwendet werden können.

3 Ergebnisse

3.1 Datengrundlage

Die Messdaten werden an einer Prototyp-Windenergieanlage (Adwen, 2026) erfasst. Aufgrund der geometrischen Dimensionen und der schwierigen Sichtbedingungen ergibt sich eine heterogene Datenbasis mit variierender Punktdichte entlang der Struktur. Insbesondere die Rotorblattgeometrie stellt durch ihre

Ausdehnung und Bewegung eine besondere Herausforderung für die geometrische Rekonstruktion dar.

3.2 Registrierung und Transformation

Die Registrierung der Einzelaufnahmen erfolgt auf Basis künstlicher Zielmarken (weiße Gymnastikbälle). Dabei zeigt sich eine insgesamt stabile Ausrichtung im Bereich der Zielmarken.

Bei Betrachtung des Messobjektes (WEA) treten jedoch Inkonsistenzen auf, die insbesondere in strukturell wenig ausgeprägten Bereichen wie der Rotorblattstruktur und der Gondel sichtbar werden. Diese äußern sich in zunehmenden geometrischen Abweichungen zwischen überlagerten Scans.

Aufgrund der eingeschränkten Stabilität der Registrierung wird eine zusätzliche globale Registrierung mittels eines iterativen Closest-Point-Verfahrens (ICP) durchgeführt. Dadurch wird eine konsistente Gesamtregistrierung der Anlage erreicht (Abbildung 5).

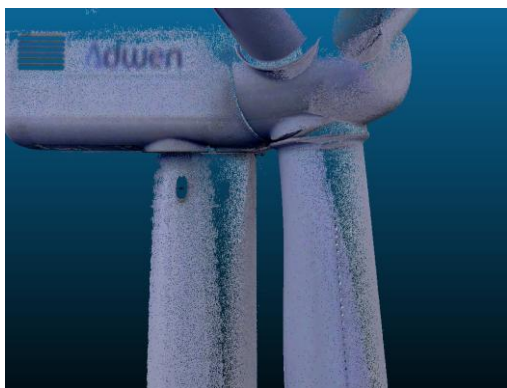


Abbildung 5 Registrierte Punktwolke der Windenergieanlage mittels ICP

Im Ergebnis verbessert sich die geometrische Übereinstimmung der Punktwolke insbesondere in den stabilen Bereichen wie Turm und Blattwurzel. In dynamisch beeinflussten Bereichen wie der Blattspitze bleiben jedoch geometrische Abweichungen sichtbar.

Im Anschluss werden die registrierten Punktwolken in ein rotorblattbezogenes Koordinatensystem überführt, das Auswertungen entlang der Blattlängsachse ermöglicht.

3.3 Geometrische Abweichungen an der Blattspitze

Die Analyse der registrierten Punktwolken zeigt systematische geometrische Differenzen zwischen den einzelnen Blattaufnahmen. Diese Abweichungen sind entlang der Blattlängsachse nicht konstant, sondern nehmen

mit zunehmender Entfernung zur Nabe tendenziell zu. Besonders im Bereich der Blattspitze treten deutliche Unterschiede zwischen den Einzelaufnahmen auf (Abbildung 6).

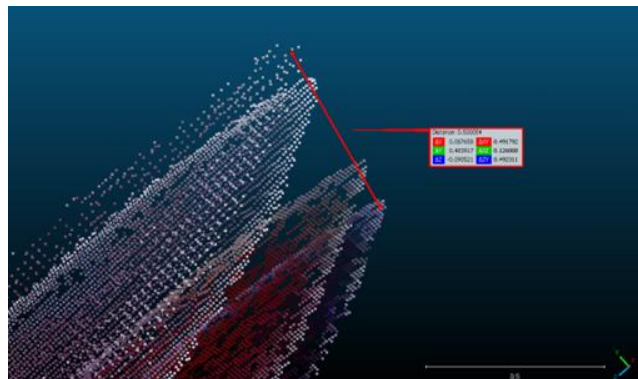


Abbildung 6 Abweichungen an der Blattspitze zwischen einzelnen Punktwolken

Aufgrund dieser Unterschiede werden die Profilschnitte nicht aus der vollständig zusammengeführten Punktwolke abgeleitet, sondern getrennt für jeden Einzelscan berechnet (Abbildung 7). Anschließend erfolgt eine konsistente Zusammenführung der resultierenden Profile unter Berücksichtigung der jeweiligen Scanposition.

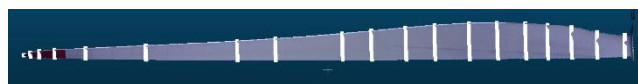


Abbildung 7 Darstellung einer Punktwolke und den dazugehörigen Profildaten

Der Vergleich der auf diese Weise erzeugten Profilschnitte zeigt eine hohe Übereinstimmung in der Nähe der Blattwurzel. Mit zunehmender Blattlänge nimmt die Streuung der Profile jedoch zu. Dieser Effekt ist insbesondere im Bereich der Blattspitze ausgeprägt und weist auf eine Kombination aus Bewegungsartefakten während der Messung sowie residualen Unsicherheiten in der Registrierung hin.

3.4 Vergleich mit Designdaten und geometrische Ableitungen

Die aus den Profilschnitten abgeleiteten geometrischen Informationen bilden die Grundlage für die Validierung der rekonstruierten Rotorblattgeometrie. Ein Bestandteil der Auswertung ist dabei der Vergleich der aus den Einzelscans gewonnenen Profile mit den zugrunde liegenden Designdaten.

Zur Auswertung werden die Profilschnitte getrennt für jeden Einzelscan berechnet und anschließend in einem gemeinsamen rotorblattbezogenen Koordinatensystem verglichen. Dieses Vorgehen ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der geometrischen Übereinstimmung entlang der Blattlängsachse und ermöglicht die Reduzierung durch den Einfluss von Bewegungen während der Messung.

Abbildung 8 zeigt exemplarisch den Vergleich eines Profilschnitts aus mehreren Einzelscans (gestrichelte Linien in unterschiedlichen Farben) mit der zugehörigen Sollgeometrie (durchgezogene Linie in Lila). Zusätzlich ist die zur Bestimmung der Profiltiefe verwendete Verbindungslinie zwischen Vorder- und Hinterkante des Profils dargestellt.

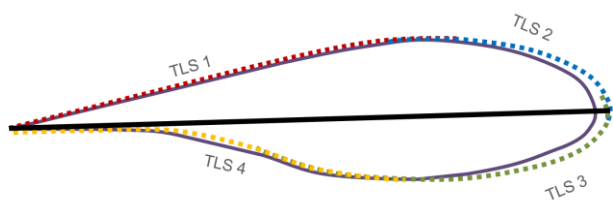


Abbildung 8 Vergleich der aus den Einzelscans abgeleiteten Profilschnitte (gestrichelte Linien) mit der Sollgeometrie (durchgezogene Linie).

Der Vergleich der aus den TLS-Daten abgeleiteten Profilschnitte mit den entsprechenden Designdaten wird im Rahmen einer separaten Untersuchung am Fraunhofer IWES durchgeführt und veröffentlicht (Rosemeier et al., 2025). Die Ergebnisse zeigen eine insgesamt gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Sollgeometrie. Konkrete Geometriedaten werden aus Vertraulichkeitsgründen nicht dargestellt.

Auf Grundlage der berechneten Profilschnitte lassen sich weitere geometrische Kenngrößen des Rotorblattes ableiten. Dazu zählt insbesondere die lokale Verdrehung (Twist), die über die Verbindungslinie zwischen Vorder- und Hinterkante eines Profils bestimmt wird.

Neben der globalen Blattgeometrie wird die Punktwolke zusätzlich zur Analyse lokaler Anbauteile verwendet. Am Beispiel des im mittleren Blattbereich befindlichen Spoilers zeigt sich, dass auch kleinräumige geometrische Strukturen zuverlässig in den TLS-Daten enthalten sind und geometrisch ausgewertet werden können.

Insgesamt bestätigen sowohl der Vergleich mit den Designdaten als auch die abgeleiteten geometrischen Parameter die Eignung der TLS-basierten Datengrundlage für die struktur- und geometriebezogene Analyse von Rotorblättern.

3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Auswertung der Punktwolken zeigt eine insgesamt konsistente geometrische Erfassung der Rotorblattstruktur, jedoch mit lokal variierenden Abweichungen. Diese treten insbesondere an der Blattspitze auf und stehen im Zusammenhang mit Bewegung des Blattes sowie verbleibenden Unsicherheiten der Registrierung.

Für eine robuste geometrische Auswertung ist die getrennte Betrachtung der Einzelscans erforderlich. Nur so kann eine konsistente Zuordnung der Profilgeometrien entlang der Blattlängsachse gewährleistet werden und eine Verfälschung durch Überlagerung dynamischer Effekte vermieden werden.

4 Diskussion

Die Analyse der Punktwolken und Profilschnitte zeigt, dass die Bewegung der Rotorblätter während der Messung einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden geometrischen Abweichungen hat. Besonders an der Blattspitze treten höhere Differenzen auf, während die Blattwurzel aufgrund ihrer geringeren dynamischen Auslenkung stabilere Ergebnisse liefert. Die eingesetzte Messstrategie mit zeitgleicher Erfassung durch drei Laserscanner reduziert diese Effekte bereits, kann jedoch die Blattbewegung nicht vollständig kompensieren.

Eine vollständige Eliminierung dieser Einflüsse wäre durch eine zeitliche Synchronisierung der Messsysteme oder eine signifikante Verkürzung der Aufnahmezeit möglich. Ergänzend wäre die Integration der Bewegungsinformationen, beispielsweise aus photogrammetrischen Verfahren oder Tracking-Systemen, denkbar, um die gemessenen Punktwolken nachträglich zu korrigieren. Dieser Ansatz ist jedoch mit einem erheblich erhöhten Auswerteaufwand verbunden und muss gegen den erwarteten Mehrwert abgewogen werden.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die geometrische Rekonstruktion des Koordinatensystems des Rotorblattes. Insbesondere die Definition der Blattachse über lokale Geometrieapproximationen stellt eine kritische Einflussgröße dar, da kleine Winkelfehler über die Blattlänge hinweg zu verstärkten Abweichungen in den abgeleiteten Profilen führen können. Die Genauigkeit der nachfolgenden Analysen ist daher unmittelbar an die Robustheit der Registrierung und Transformation gekoppelt. Bekannte Anlagenparameter wie Rotororientierung und Blattwinkel können hierbei als zusätzliche Randbedingungen genutzt werden (NREL, 2026).

Alternativ zu dem gewählten Mess- und Auswerteansatz existieren Verfahren auf Basis unbemannter Luftfahrtsysteme in Kombination mit terrestrischem Laserscanning oder photogrammetrischen Verfahren. Diese könnten insbesondere eine vollständigere Erfassung der Blattgeometrie und Bewegungszustände ermöglichen, sind jedoch in Bezug auf Synchronisation, Datenvolumen und Auswertungskomplexität deutlich anspruchsvoller.

Insgesamt zeigt sich, dass die Kombination aus terrestrischem Laserscanning, ICP-basierter Registrierung und rotorblattbezogener Transformation eine geeignete Grundlage für die geometrische Analyse von Windenergieanlagen darstellt, jedoch insbesondere hinsichtlich dynamischer Effekte und globaler Referenzdefinitionen weiterhin Optimierungspotenzial besteht.

5 Fazit & Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erfassung der Rotorblattgeometrie mittels terrestrischem Laserscanning auch unter den komplexen Randbedingungen großer Windenergieanlagen erfolgreich durchgeführt werden kann. Die Kombination aus Registrierung, der Transformation in ein rotorblattbezogenes Koordinatensystem sowie der anschließenden Profilschnittberechnung liefert eine gute Datengrundlage für geometrische Analysen und den Vergleich mit Designdaten.

Durch zeitgleiche TLS-Aufnahmen und verkürzte Messzeiten konnten Bewegungseffekte reduziert werden. Im Bereich der Blattspitze bleibt Bewegung jedoch ein einschränkender Faktor.

Auf Basis der gewonnenen Daten konnten geometrische Kenngrößen wie Profiltiefe und Verdrehung abgeleitet werden. Damit stellt die Arbeit eine geeignete Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Bewertung von Geometrieparametern dar.

Für zukünftige Arbeiten ergibt sich die Möglichkeit, die Erfassung der Rotorblattbewegung stärker zu integrieren, beispielsweise durch photogrammetrische Trackingverfahren oder sensorbasierte Bewegungsmodelle. Darüber hinaus könnten verbesserte Synchronisationsstrategien zwischen den Messsystemen sowie weiterentwickelte Registrierungsverfahren die verbleibenden Unsicherheiten weiter reduzieren.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass TLS-basierte Messverfahren ein leistungsfähiges Werkzeug zur geometrischen Analyse von Rotorblättern darstellen, jedoch insbesondere bei dynamischen Strukturen weiterhin methodische Weiterentwicklungen erforderlich sind, um die erreichbare Genauigkeit weiter zu steigern.

Danksagung

Diese Arbeit wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Projekts BLADAPTION (Förderkennzeichen 03EE3086B). Vielen Dank an die Kolleg_innen der Photogrammetrie-Gruppe des IAPG & der Geodätischen Werkstatt für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Messungen sowie dem Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme. Weiterhin geht ein besonderer Dank an die Firmen Zoller + Fröhlich für die Bereitstellung der Laserscanner Imager 5016 sowie die technische Unterstützung während der Messkampagne und an Siemens Gamesa Renewable Energy Deutschland GmbH für die Bereitstellung der Windenergieanlage.

Literaturverzeichnis

- Adwen (2026). Datenblatt der Windenergieanlage AD180. Online verfügbar unter: <https://www.wind-turbine-models.com/turbines/1124-adwen-ad-8-180> (abgerufen am 30.03.2026)
- Grosse-Schwiep, M., Piechel, J., & Luhmann, T. (2013). Measurement of rotor blade deformations of wind energy converters with laser scanners. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2, 97–102. <https://doi.org/10.5194/isprannals-II-5-W2-97-2013>
- Helming, P., Intemann, A., Webersinke, K.-P., von Freyberg, A., Sorg, M. & Fischer, A.: Assessing the rotor blade deformation and tower-blade tip clearance of a 3.4 MW wind turbine with terrestrial laser scanning (*Wind Energy Science*, 2023).
- Mitka, B., Klapa, P., & Gniadek, J. (2019). Use of terrestrial laser scanning for measurements of wind power stations. *Geomatics and Environmental Engineering*, 13(39). <http://dx.doi.org/10.7494/geom.2019.13.1.39>
- NREL (2026). National Renewable Energy Laboratory, *OpenFAST documentation*. <https://openfast.readthedocs.io/en/main/>
- Nielsen, J. S., Miller-Branovacki, L., & Cariveau, R. (2021). Probabilistic and Risk-Informed Life Extension Assessment of Wind Turbine Structural Components. *Energies*, 14(4), 821. <https://doi.org/10.3390/en14040821>
- Rosemeier, M., Theron, J. N., Göring, M., Lieckfeldt, R., Kleinselbeck, T. (2025). Field measurements of as-built geometry deviations of an 88.4 m wind turbine rotor blade. *Wind Energy Science Conference (WESC 2025)*, Proceedings.
- Stałowska, P., Suchocki, C., & Zagubień, A. (2023). Application of terrestrial laser scanning measurements for wind turbine blade condition surveying. *Metrology and Measurement Systems*, 30(3), 403-422. <https://doi.org/10.24425/mms.2023.146419>

-
- The Wind Power (2026). Wind energy database. Verfügbar unter <https://www.thewindpower.net> (abgerufen am 30.03.2026)
- Vaaja, M. T., Virtanen, J.-P., Kurkela, M., Lehtola, V., Hyypä, J., & Hyypä, H. (2016). The effect of wind on tree stem parameter estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-8, 117–122. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-8-117-2016>