



Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Fakultät II - Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften

Department für Informatik

MODELLIERUNG VON KINEMATISCHEN  
ROTORBLATTDEFORMATIONEN AUF BASIS SEQUENTIELL  
ERFASSTER BILD- UND OBERFLÄCHENDATEN

DISSERTATION ZUR ERLANGUNG DES GRADES EINES  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

VORGELEGT VON

CHRISTIAN JEPPING M. SC.

GEBOREN AM 30. DEZEMBER 1986 IN GRONAU

12. JUNI 2019

**GUTACHTER:**

PROF. DR. OLIVER KRAMER  
PROF. DR. THOMAS LUHMANN

**TAG DER DISPUTATION:**

21. OKTOBER 2019

## Kurzfassung

Bei vielen Ingenieurbauwerken wird eine regelmäßige Deformationsmessung zum Nachweis der Standsicherheit als selbstverständlich angesehen. Hierunter fallen beispielsweise Brücken oder auch Staumauern. Im Bereich von hoch dynamischen Deformationen ist dies aufgrund technischer Einschränkungen nur begrenzt möglich. Dies zeigt eindrucksvoll die Erfassung von Deformationen an Windenergieanlagen, welche regelmäßigen Wartungen unterzogen werden und teilweise über Sensoren zur Überwachung von Schwingungen oder Dehnungen verfügen.

Eine geometrische Überwachung der Deformationen eines Rotorblattes ist hingegen nur begrenzt oder lediglich unter hohem technischen Aufwand möglich. Umfangreiche Messungen der Deformationen von Rotorblättern sind daher nur Prototypen von Windenergieanlagen vorbehalten. Hierbei kommen beispielsweise photogrammetrische Verfahren zum Einsatz. Da diese jedoch von Signalisierungen an den Rotorblättern abhängig sind, ist diese Technik mit hohen Kosten verbunden.

Signalisierungsfreie Anwendungen haben hingegen Einschränkungen in ihrer Aussagekraft. So werden beispielsweise Laserdistanzmessungen untersucht, um punktuelle Aussagen zu Deformationen treffen zu können. Diese Aussagen beschränken sich auf einzelne Blattpositionen. Ein zeitlicher Verlauf eines Deformationsprozesses lässt sich somit nur eingeschränkt beschreiben.

Um ohne größere Eingriffe in den Betrieb einer Windenergieanlage detaillierte Deformationsmessungen durchführen zu können, ist es erforderlich ein neues Verfahren zu entwickeln. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz basiert auf einer Kombination aus photogrammetrischen und Laserscanner-Messungen. Bei diesem kombinierten Verfahren wird die Deformation eines Rotorblattes aus Profilmessungen mit einem oder mehreren Laserscanner sowie aus den Silhouetten der Rotorblätter in den Bildern abgeleitet.

Zur Beschreibung von Deformationen wird ein kinematisches Modell verwendet, welches in der Lage ist, die Verformungen eines Rotorblattes zu beschreiben. Das verwendete Modell basiert auf den Annahmen eines Euler-Bernoulli Biegebalkens. Unter Verwendung dieses Modells ist es möglich, ein geometrisches Modell eines Rotorblattes entsprechend der erfassten Deformation zu verformen. Die Verknüpfung dieser Messdaten erfolgt auf Basis dieser Kombination aus Deformationsmodell und geometrischen Modell. Je nach Anwendungsfall kann die Geometrie des Rotorblattes als gegeben oder unbekannt betrachtet werden.

Die Eignung des Verfahrens wird mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulationen nachgewiesen. Hierbei stellt sich heraus, dass Genauigkeiten von wenigen Dezimetern für die Durchbiegung sowie eine Genauigkeit der Torsion von unter  $1^\circ$  (bei  $3\sigma$ ) für ein 63 m langes Rotorblatt realistisch sind. Die zu erreichenden Genauigkeiten sind abhängig von der verwendeten Aufnahmekonfiguration. Die Torsion ist weiterhin von der Blatttiefe und Geometrie des betrachteten Profils abhängig. Anhand der Simulationen konnte der Einfluss der Transformation ins Referenzkoordinatensystem nachgewiesen werden. In diesem werden die Deformationen bestimmt. Dies bedeutet, dass Unsicherheiten bei der Bestimmung dieser Transformation sich in Unsicherheiten bei der Deformationsbestimmung auswirken. Dies ist ein limitierender Faktor für die Genauigkeit der Deformationsbestimmung.

In Laborversuchen konnten Genauigkeitsaussagen anhand von Balkenmessungen bestimmt werden. Auch hier zeigt sich ein hohes Genauigkeitspotenzial. Deformationen von mehreren Zentimetern konnten mit einer Genauigkeit im Zehntel-Millimeterbereich beschrieben werden. Auf praktische Probleme bei der Bestimmung von Deformationen an Rotorblättern wird bei einer Messung an einer Windkraftanlage eingegangen.

## Abstract

Regular deformation tests are routinely carried out on all kinds of buildings and structures - bridges for example - to guarantee structural integrity.

There are, however, technical limitations when measuring highly dynamic deformation, such as the distortion encountered in wind turbines in operation. These constructions are subject to regular monitoring and some are equipped with frequency or strain sensor systems.

Geometric measurement of rotor blade deflection is technically very challenging. It is both expensive and limited in scope.

Photogrammetric technology - which requires the application of targets to the rotor blades - is one potential option for measuring such deformation. This so-called targeting is a very expensive procedure, so it is only currently used for testing prototypes.

Methods which do not use signalization are of limited effectiveness. LIDAR (light detection and ranging), for example, is being trialled for single-point deformation tests but this can only be done at certain positions on the rotor blades. Effective detection of progressive deformation is limited.

A new approach is required in order to carry out detailed deformation measurements without disrupting the operation of the wind turbine. The method described in this thesis uses a combination of photogrammetry and laser scanning. This combination technique derives the deformation of the rotor blades from profile measurements from one or more laser scanners and from the silhouettes of the blades in one or more images.

An appropriate kinematic model is used to describe the resulting deformation. The model is based on the Euler-Bernoulli bending beam assumptions.

Using this model, it is possible to deform the geometric model of a rotor blade in accordance with the deformation data collected. The combination of a deformation model and a geometric model is used to connect the different data sets. On a case by case basis, the geometry of the rotor blade is stated to be known or unknown.

Validation of the method is achieved using a monte-carlo simulation. This simulation results in an accuracy of a few decimetres for the deflection of a 63 m rotor blade and an accuracy of less than  $1^\circ$  ( $3\sigma$ ) for torsion.

The accuracy depends on the set up used. Both the width and specific geometry of the rotor blade influence the torsion. Furthermore, the accuracy of the transformation to the reference coordinate system is a limiting factor. The simulation shows a correlation between the accuracy of the transformation and the accuracy of the deformation.

In laboratory tests on an aluminium beam, the accuracy of the method could be evaluated. The tests indicate great potential for accuracy. Deformations of a few centimetre were recorded with an accuracy of a few tenths of a millimetre.

In order to anticipate practical problems in the field, rotor-blade deformation measurements are carried out on an operating wind turbine.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.2	Struktur der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Mathematische Grundlagen . . . . .	5
2.1.1	Transformationen . . . . .	5
2.1.2	Ausgleichsrechnung . . . . .	10
2.2	Aufnahme- und Auswerteverfahren . . . . .	17
2.2.1	Zentralperspektive Kamera . . . . .	17
2.2.2	Bestimmung von 3D Punkten aus Bildmessungen . . . . .	20
2.2.3	Kontur- und silhouettenbasierte Verfahren . . . . .	20
2.2.4	Laserscanner . . . . .	25
2.2.5	Das Iterative Closest Point Verfahren (ICP) . . . . .	28
2.3	Windkraftanlagentechnik . . . . .	29
2.3.1	Bauformen von Windkraftanlagen . . . . .	31
2.3.2	Kräfte und Schwingungen an WEAs . . . . .	31
2.4	Beschreibung und Erfassung von Deformationen . . . . .	33
2.4.1	Geodätische Überwachungsmessungen . . . . .	33
2.4.2	Beschreibung von Verformungen . . . . .	35
2.4.3	Die Balkentheorie . . . . .	38
2.4.4	Laserscanning zur Deformationserfassung . . . . .	40
2.4.5	Diskussion . . . . .	42
2.5	Deformationen an Rotorblättern . . . . .	42
2.5.1	Erfassung durch Laserscanner und Distanzmesser . . . . .	43
2.5.2	Erfassung mittels photogrammetrischer Verfahren . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Ein kinematisches Verfahren zur Deformationsbestimmung</b>	<b>49</b>
3.1	Anforderungen an das Verfahren . . . . .	49
3.2	Deformationsmodell für balkenähnliche Objekte . . . . .	50
3.3	Beschreibung eines Rotorblattsystems . . . . .	56
3.4	Definition der Beobachtungen . . . . .	59
3.4.1	Photogrammetrische Beobachtungen . . . . .	59
3.4.2	Beobachtungen aus Laserscannerdaten . . . . .	61
3.4.3	Beobachtungen zur Regularisierung des Gleichungssystems . . . . .	61
3.5	Erweiterungen und alternative Ansätze . . . . .	63
3.5.1	Erfassung von Pitchwinkel- und Torsionsänderungen aus Profilmessungen . . . . .	64

3.5.2	Erfassung der dynamischen Durchbiegung durch photogrammetrische Ansätze . . . . .	67
3.5.3	Simultane Schätzung der Geometrie und Verformung eines Rotorblattsystems . . . . .	70
3.6	Diskussion . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Prototypische Implementierung</b>	<b>75</b>
4.1	Allgemeiner Ablauf einer Berechnung . . . . .	75
4.2	Automatisches Differenzieren zum Lösen von Gleichungssystemen . . . . .	77
4.3	Ermittlung der Beobachtungen aus Bildmessungen . . . . .	79
4.3.1	Extraktion der Silhouette aus einem Objektmodell . . . . .	80
4.3.2	Matching zwischen Bildkanten und Silhouette eines Objektmodells . . . . .	82
4.4	Ermittlung der Korrespondenzen zwischen Punktwolke und Modell . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchung</b>	<b>85</b>
5.1	Untersuchung auf Basis simulierter Daten . . . . .	85
5.1.1	Erzeugung eines simulierten Datensatzes . . . . .	86
5.1.2	Erzeugung verrauschter Eingangsdaten . . . . .	88
5.1.3	Monte-Carlo-Simulation . . . . .	93
5.1.4	Erfassung von Deformationen bei gegebener Objektgeometrie . . . . .	93
5.1.5	Erfassung von Deformationen bei unbekannter Objektgeometrie . . . . .	104
5.1.6	Diskussion . . . . .	106
5.2	Untersuchung an Balken im Labor . . . . .	106
5.2.1	Erfassung eines Balkens unter Last . . . . .	107
5.2.2	Erfassung eines Balkens unter Schwingung . . . . .	108
5.3	Messung an einer WEA . . . . .	111
5.3.1	Orientierung der Messsysteme . . . . .	112
5.3.2	Bestimmung relativer Blattwinkel aus Profilmessungen . . . . .	114
5.3.3	Bestimmung der Blatthinterkante . . . . .	116
5.3.4	Bestimmung der Deformation unter Verwendung eines Deformationsmodells . . . . .	117
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>119</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>123</b>
A.1	Anhänge zur Monte-Carlo-Simulation . . . . .	123
A.1.1	Eingangsdaten . . . . .	123
A.1.2	Detaillierte Ergebnisse bei bekannter Rotorblattgeometrie . . . . .	126
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>133</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>135</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>137</b>

# 1 Einleitung und Motivation

## 1.1 Einleitung

Erneuerbare Energien nehmen einen immer bedeutenderen Platz in der Stromversorgung ein. Die damit verbundenen Probleme und Herausforderungen beziehen sich auf die Integration dieser Energiequellen in das Stromnetz. Hiermit verbundene Fragestellungen sind die Prognostizierbarkeit der Energieerzeugung, Forschung an Speichermöglichkeiten, ökonomische Fragestellungen zur Versorgungssicherheit und die damit einhergehenden Kosten sowie Fragestellungen zur Betriebsicherheit.

Diese und andere Themen waren Bestandteil des Promotionsprogramms Systemintegration erneuerbarer Energien, wodurch auch diese Arbeit entstanden ist.

Beiden erneuerbaren Energien nimmt die Windenergie eine herausragende Stellung ein. Wie aus dem Windenergie Report des Fraunhofer IEE für Deutschland hervorgeht (Rohrig, 2018), übernahm die Windenergie mit 16 % den größten Anteil aus dem Bereich der erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2017. Hiermit übertraf die Windenergie konventionelle Energieerzeuger wie die Kernenergie (12%), die Steinkohle (14%) sowie das Erdgas (13%).

Der Zubau von Windkraftanlagen lag im Jahr 2017 bei 2071 Anlagen (Onshore und Offshore). Die Gesamtanzahl der Anlagen betrug 30457.

Ein wesentlicher Auslöser für die Erfolgsgeschichte der Windenergie war das „Erneuerbare Energien Gesetz“ (EEG). Seit Beginn der staatlichen Förderung der erneuerbaren Energien durch das EEG im Jahr 2000 sind mittlerweile 19 Jahre vergangen. Die ersten Windkraftanlagen, die über das EEG gefördert wurden, befinden sich am Ende ihrer ausgelegten Lebensdauer von 20 Jahren (Berkhout u. a., 2013). Mit zunehmender Anzahl von Altanlagen wächst die Nachfrage an Nachweismethoden für die Standsicherheit von Bestandsanlagen.

Voraussetzungen für den Weiterbetrieb sind in Deutschland in DIBt (2012) festgelegt. Diese Anforderungen beziehen sich zumeist auf die Standsicherheit des Turms und der Gründung. Die Vorschrift fordert darüber hinaus eine Begutachtung der Rotorblätter, da bei diesen mit Schäden, z.B. durch Blitzschlag oder Materialermüdung, zu rechnen ist.

Die Geodäsie kann durch Deformationsmessungen einen Beitrag hierzu leisten. In klassischen Anwendungen, wie der Erfassung von Deformationen an Staudämmen (Heunecke u. a., 2013), wird in Einzelepochen ein Deformationsprozess beobachtet. Die Einzelepochen können Monate oder Jahre auseinander liegen. Dies bedeutet für eine einzelne Epoche, dass die Dauer für die Erfassung eine untergeordnete Bedeutung für die Beschreibung der Deformation hat. Bei zunehmend höherfrequenten Deformationsprozessen steigt die Anforderung an die Zeit zur Erfassung.

Durch neue hochfrequente Messmethoden, wie sie u.a. durch das Laserscanning (im 1D- und 2D-Modus) oder durch die Photogrammetrie gegeben sind, lassen sich immer dynamischere Deformationsprozesse beobachten und messtechnisch erfassen. Beispiele hierfür

sind zahlreich, wie die Erfassung von Fußraumdeformationen in Crash-Versuchen mittels Hochgeschwindigkeitskameras (Jepping u. a., 2014) oder von Schwingungen an Brücken durch 2D-Laserscanning (Kutterer u. a., 2009b).

Einschränkungen bestehen im Bezug auf die zu erfassenden Objekte. Bei photogrammetrischen Ansätzen ist beispielsweise eine Signalisierung oder zumindest eine ausreichende Textur des zu erfassenden Objektes erforderlich.

Laserscanner haben im Vergleich deutlich stärkere Einschränkungen bezüglich der Auswirkung (z. B. Starrkörperverformung) einer Deformation und der Deformationsgeschwindigkeit. Aufgrund der sequenziellen Abtastung im 2D- und 3D-Modus limitiert dies die maximale Frequenz zur Erfassung von Epochen. Im 3D-Modus lassen sich flächenhafte Deformationen erfassen, jedoch nur mit einer Wiederholrate von einigen Minuten zwischen den Epochen.

Im 2D-Modus sind selbst Frequenzen von 50 Hz und mehr realisierbar. Aussagen zu Deformationen können jedoch nur noch innerhalb des 2D-Profiles erfolgen (z.B. eine Durchbiegung eines Gewölbes). Die Auswirkung eines Deformationsprozesses muss somit im 2D-Modus weitaus deutlicher bekannt sein als im 3D-Modus.

Übertragen auf hochdynamische Deformationsprozesse, wie sie an Windenergieanlagen (WEA) auftreten, können schnell Grenzen der etablierten Verfahren beobachtet werden. Das Laserscanning eignet sich beispielsweise zur Erfassung von Turmschwingungen (Kutterer u. a., 2009b) oder Triebstrangschwingungen (Hesse u. a., 2006). Bei der Erfassung von Rotorblattdeformationen ist diese Technik nur unter starken Einschränkungen einsetzbar. So können nur punktuelle Aussagen zur Torsion und Durchbiegung gegeben werden (Grosse-Schwiep u. a., 2015).

Einen Vorteil bietet die Photogrammetrie, die zumindest bei ausreichender Signalisierung umfangreichere Aussagen zur Durchbiegung ermöglicht (Corten, 1996; Schmidt Paulsen u. a., 2009), aber keine aussagekräftige Information zur Torsion bieten (mangelnde Genauigkeit in der Tiefe).

Die zwingend benötigte Signalisierung bei photogrammetrischen Ansätzen ist insbesondere bei schwer zugänglichen Bauteilen, wie den Rotorblättern von WEAs, ein Hindernis. Nur durch hohen Aufwand kann eine Signalisierung an einer errichteten WEA angebracht und entfernt werden. Dies schränkt den Einsatz dieser Technik drastisch ein. Eine photogrammetrische Erfassung ist daher lediglich an Prototypen wirtschaftlich vertretbar. Beispiele für die Erfassung an Prototypen sind durch Schmidt Paulsen u. a. (2009) und Winstroth u. a. (2014) gegeben.

Für einen flächendeckenden Einsatz von Deformationsmessungen an WEAs<sup>1</sup> werden somit innovative Ansätze benötigt, mit denen es mit einem deutlich reduzierten Aufwand möglich ist ähnliche geometrische Aussagen zu Deformationen treffen zu können.

Hierbei ist insbesondere die Kombination aus Laserscanning und Photogrammetrie aufgrund der flexibleren Einsatzmöglichkeiten vielversprechend. Darüber hinaus bieten moderne Kameras die Möglichkeit ein Objekt, wie eine WEA, mit mehreren 100 Hz zu erfassen. Grenzen bestehen bei der Signalisierung, der mangelnden Genauigkeit und der Auflösung für die Torsionserfassung. Hier wiederum bietet das Laserscanning als aktives Verfahren seine Stärken, welches insbesondere bei der Torsionserfassung Vorteile bietet.

---

<sup>1</sup>WEAs sind regelmäßigen Prüfungen unterzogen, mit denen die Standsicherheit nachgewiesen wird. Moderne Anlagen verfügen hierüber hinaus über Monitoringsysteme, die frühzeitig Änderungen am Verhalten einer WEA feststellen können.

Gelingt es diese Vorteile zu kombinieren, könnte eine regelmäßige Kontrolle der Strukturdynamik möglich werden. Dies würde die Möglichkeit bieten Materialermüdungen frühzeitiger zu bemerken, um somit den Einsatz von WEAs noch sicherer zu machen.

Die Motivation dieser Arbeit besteht somit in der Weiterentwicklung von Messverfahren zur Deformationserfassung. Es sollen photogrammetrische Daten sowie Laserscannerdaten kombiniert verwendet werden. Das Ziel ist eine signalisierungsfreie Erfassung von Deformationen. Dies reduziert den Eingriff in den Betrieb der zu erfassenden Anlage deutlich, da Standzeiten für die Signalisierung und Designalisierung entfallen, was eine wesentliche Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Einsatz von Deformationsmessungen an Rotorblättern einer WEA ist.

## 1.2 Struktur der Arbeit

Im Kapitel 1 wird eine Einführung in das Thema der Arbeit gegeben. Hierbei wird auf aktuelle Probleme eingegangen und das Thema dieser Arbeit in Kontext gesetzt.

Für die Erarbeitung der Grundlagen dieser Arbeit dient das Kapitel 2. In diesem wird u.a. auf die Messverfahren Photogrammetrie und Laserscanning eingegangen, mit denen eine signalisierungsfreie Erfassung von Objekten möglich ist, sowie auf Methoden zur Deformationserfassung und -beschreibung. Bei der Betrachtung von möglichen Ansätzen zur Beschreibung von Deformationen wird auf die geodätische Betrachtungsweisen von Deformationen und Deformationsprozessen eingegangen. Hierüber hinaus werden allgemeine Ansätze zur Deformationserfassung betrachtet.

Dies sind unter anderem Ansätze zur allgemeinen Beschreibung von deformierten Oberflächen auf Basis räumlicher Deformationsvorschriften, wie beispielsweise einem Deformationsgraphen oder voxelbasierter Ansätze basierend auf einem Octree (Kapitel 2.4).

Neben den allgemeinen Verfahren zur Beschreibung von Deformationen ist die Einschränkung der möglichen Deformationen ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit.

Aufschluss über mögliche Reduktionen der Freiheitsgrade kann die Mechanik liefern. Neben den allgemeinen Ansätzen zur Beschreibung von Deformationen, wird daher auf die Eigenschaften von Balken aus Sicht der Mechanik eingegangen. Dies ermöglicht eine generalisierte Betrachtung der möglichen Deformationen an einem Rotorblatt.

Abschließend wird in Kapitel 2.5 ein Überblick über Verfahren zur Erfassung von Deformationen an Rotorblätter gegeben. Es wird hierbei auf photogrammetrische Verfahren sowie auf Verfahren basierend auf Laserdistanzmessungen eingegangen.

Im Kapitel 3 erfolgt die Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Beschreibung von Deformationen eines Rotorblattes. Das entwickelte Verfahren benötigt keine Signalisierung an den Rotorblättern und ist von den zu erzielenden Genauigkeiten vergleichbar mit bisherigen Ansätzen.

Hierbei werden zuvor betrachtete Ansätze aus Kapitel 2 aufgegriffen und für die Beschreibung von Deformationen eines Rotorblattes angepasst. Als innovativ sind hierbei die Verwendung der vorhandenen Informationen im Bild anstelle von Signalisierungen zu betrachten. Das entwickelte Verfahren verwendet als photogrammetrische Beobachtungen die Silhouette der Rotorblätter im Bild. Kombiniert werden diese mit Laserscannerdaten.

Abgeschlossen wird das Kapitel 3 mit der Betrachtung von alternativen Vorgehen zur Ableitung von Deformationen an Windkraftanlagen. Diese sind teilweise mit Algorithmen aus konventionellen Softwarepaketen umsetzbar. Hierunter fällt die Bestimmung

von Winkeländerungen unter Verwendung eines ICP-Verfahrens oder die Bestimmung von Durchbiegungen von Rotorblättern durch die photogrammetrische Bestimmung von Raumkurven (Messung der Blatthinterkante).

Im Kapitel 4 wird auf ausgewählte Details der Implementierung des Verfahrens aus Kapitel 3 eingegangen. Hierunter fällt die Extraktion von Silhouetten in einem Bild auf Basis eines gegebenen 3D-Modells sowie verwendete Methoden zur Einschränkung des Suchbereiches für das Matching der Beobachtungen mit dem Modell.

Eine Verifizierung der Verfahren wird in Kapitel 5 vorgenommen. Diese erfolgt innerhalb einer Monte-Carlo-Simulation sowie durch Laborversuche.

Innerhalb der Monte-Carlo-Simulation werden verschiedene Fälle betrachtet. Diese betreffen die verwendeten Messdaten sowie verwendete Vorinformationen, wie geometrische Informationen.

Abschließend wird die Überführbarkeit ins Feld anhand einer Messung an einer WEA thematisiert. An diesem Beispiel werden praktische Probleme, wie die Bestimmung der Orientierungen der Messsysteme, betrachtet.

Das Kapitel 6 enthält eine Zusammenfassung und Bewertung der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren. Ausblickend wird auf die mögliche Verwendung des entwickelten Ansatzes eingegangen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Mathematische Grundlagen

#### 2.1.1 Transformationen

Mit Hilfe von Transformationen ist es möglich, Punkte eines Koordinatensystems in ein anderes Koordinatensystem zu überführen. Hierbei können verschiedene Arten von Transformationen verwendet werden. Dies sind u.a. die Ähnlichkeitstransformation, die affine Transformation und die projektive Transformation. Zur Beschreibung von Starrkörperverschiebungen eignet sich die Ähnlichkeitstransformation, da bei dieser die innere Geometrie des Objektes erhalten bleibt (abgesehen von einem optionalen Maßstab). Die allgemeine Transformationsgleichung in Matrixschreibweise lautet hierbei:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X}_0 + m\mathbf{R}\mathbf{X} \quad (2.1)$$

Hierbei ist  $\mathbf{X}_0$  die Translation, die die Verschiebung zwischen dem Ursprung des Startkoordinatensystems zum Zielkoordinatensystem beschreibt.  $\mathbf{R}$  ist eine orthonormale Rotationsmatrix und  $m$  ein Skalierungsfaktor. Bei der Beschreibung von Starrkörperverschiebungen ist  $m = 1$  anzunehmen.  $\mathbf{X}$  ist die Koordinate eines Punktes im Startsystem,  $\mathbf{X}'$  die korrespondierende Koordinate im Zielsystem. Für den 3D-Fall lautet die ausgeschriebene Gleichung:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Hierbei stehen  $r_{ij}$  für die Elemente der Rotationsmatrix, die wiederum von den Rotationsparametern abhängig sind.

#### Rotationsmatrix

Die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  ist eine orthonormale Matrix. Das bedeutet, dass alle Spalten- bzw. Zeilenvektoren orthogonal aufeinander stehen und den Betrag 1 ergeben. Daraus folgt, dass  $\mathbf{R}^T = \mathbf{R}^{-1}$  ist. Zur Darstellung von Rotationen werden in dieser Arbeit Euler-Winkel sowie Quaternionen verwendet. In einigen Versuchen wird eine Rotation als Drehung um einen Vektor formuliert. Diese kann aus der Quaternionen-Repräsentation hergeleitet werden.

## Euler-Rotationen

Eine Rotation im Raum kann durch drei Einzeldrehungen beschrieben werden. Diese sind Drehungen um die x-Achse, die y-Achse und die z-Achse eines Koordinatensystems. Die zugehörigen Rotationsmatrizen sind für die Rotation um die x-Achse:

$$\mathbf{R}_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Für die Rotation um die y-Achse:

$$\mathbf{R}_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Für die Rotation um die z-Achse:

$$\mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Die Gesamtroation  $\mathbf{R}_{\omega\phi\kappa}$  ergibt sich durch Multiplikation der einzelnen Rotationsmatrizen  $\mathbf{R}_\omega$ ,  $\mathbf{R}_\phi$  und  $\mathbf{R}_\kappa$  miteinander. Die Reihenfolge der Einzeldrehungen ist hierbei nicht kommutativ. Für die Formulierung einer Gesamtroation bei mitgedrehten Achsen erfolgt die Multiplikation in der Reihenfolge:

$$\mathbf{R}_{\omega\phi\kappa} = \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\phi \mathbf{R}_\kappa \quad (2.6)$$

Die resultierende Rotationsmatrix lautet:

$$\begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & -\cos \phi \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \phi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Somit lässt sich eine Rotation mit drei Parametern beschreiben. Diese Parameter sind nicht eindeutig aus einer gegebenen Rotationsmatrix zu bestimmen. Das bedeutet, dass Mehrdeutigkeiten vorhanden sind. Weiterhin besteht die Gefahr des sogenannten „Gimbal lock“ Effektes. Dieser tritt auf, wenn eine Rotationsachse mit einer anderen Rotationsachse zusammenfällt. Ein Beispiel ist die Rotation um  $\phi = 90^\circ$ . In diesem Fall beschreiben die Rotationen  $\omega$  und  $\kappa$  Rotationen um die gleiche Achse. Dies lässt sich anhand eines Beispiels verdeutlichen:

Die Rotationen  $\omega = 50^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$  und  $\kappa = 50^\circ$  ergeben die gleiche Rotation wie  $\omega = 60^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$  und  $\kappa = 60^\circ$ . Die Winkel  $\omega$  und  $\kappa$  sind somit linear abhängig und lassen sich in einem Gleichungssystem nicht unabhängig bestimmen. Dieses Problem kann durch

Vertauschung der Drehreihenfolge behoben werden (Luhmann, 2018).

### Rotationen mit Quaternionen

Zur Beschreibung von Rotationen können alternativ zur Winkelrepräsentation Quaternionen genutzt werden. Quaternionen sind eine Erweiterung der komplexen Zahlen (McGlone, 2013; Förstner und Wrobel, 2016). Sie bestehen aus einem Realteil  $q_0$  und drei Imaginärteilen  $q_1$ ,  $q_2$  und  $q_3$ . Für die Repräsentation von Rotationen kann die Untermenge der Einheitsquaternionen genutzt werden. Es gilt:

$$1 = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} \quad (2.8)$$

Die zugehörige Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  zu einer Quaternion:

$$\mathbf{q} = \left[ q_0, \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \right] \quad (2.9)$$

ergibt sich zu:

$$\mathbf{R}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_3q_0) & 2(q_1q_3 + q_2q_0) \\ 2(q_1q_2 + q_3q_0) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_1q_0) \\ 2(q_1q_3 - q_2q_0) & 2(q_2q_3 + q_1q_0) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Gegenüber der Repräsentation mittels Euler-Winkel haben Quaternionen einige entscheidende Vorteile. In Rietdorf (2005) wird das bessere Konvergenzverhalten bei der Bestimmung der Transformationsparameter einer Ähnlichkeitstransformation im Vergleich zur Repräsentation der Rotationsmatrix mittels Euler-Winkel hervorgehoben. Weiterhin bestehen weniger Mehrdeutigkeiten im Vergleich zu Euler-Winkel. Zu einer gegebenen Matrix  $R$  können zwei Quaternionen bestimmt werden. Diese sind:

$$\mathbf{q} = \left[ q_0, \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \right] \quad \text{und} \quad \mathbf{k} = \left[ -q_0, \begin{pmatrix} -q_1 \\ -q_2 \\ -q_3 \end{pmatrix} \right] \quad (2.11)$$

Somit unterscheiden sich die beiden Lösungen lediglich durch das Vorzeichen. Eine geometrische Deutung der Quaternionen bietet die Repräsentation des Quaternionen als Rotation um einen Einheitsvektor  $\mathbf{r}$  um den Winkel  $\alpha$  (Abbildung 2.1). Das zugehörige Quaternion lautet:

$$\mathbf{q} = [\cos(\alpha/2), (\sin(\alpha/2) \cdot \mathbf{r})] \quad (2.12)$$

Hierbei wird deutlich, dass zwei mögliche Lösungen für eine Rotation vorhanden sind. Eine Rotation mit dem Winkel  $\alpha$  um einen Vektor  $\mathbf{r}$  bewirkt die gleiche Rotation wie eine Rotation mit dem Winkel  $-\alpha$  um den Vektor  $-\mathbf{r}$ . Trotz dieser Mehrdeutigkeit ist

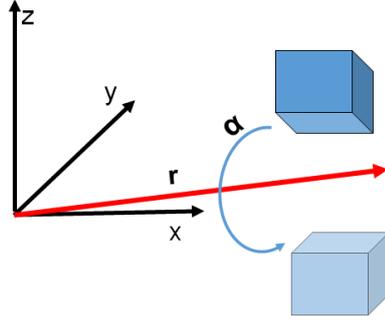


Abbildung 2.1: Rotation eines Objektes um eine Achse

die Repräsentation von Rotationen mittels Quaternionen die einzige Repräsentation, die abgesehen vom Vorzeichen, eindeutig ist und keine singulären Stellen aufweist (McGlone, 2013).

### Interpolation zwischen Transformationen

Bei der Interpolation zwischen zwei gegebenen Transformationen ist eine Interpolation zwischen den Parametern erforderlich. Für die Translation  $\mathbf{X}_0$  kann dies eine lineare Interpolation zwischen den benachbarten Stützstellen  $\mathbf{X}_{0_n}$  und  $\mathbf{X}_{0_{n+1}}$  sein. Der Wert von  $\mathbf{X}_{0_t}$  ergibt sich für den Zeitpunkt  $t$  aus:

$$\mathbf{X}_{0_t} = \frac{\mathbf{X}_{0_{n+1}} - \mathbf{X}_{0_n}}{t_{n+1} - t_n} (t - t_n) + \mathbf{X}_{0_n} \quad (2.13)$$

Bei einer Rotation ist dieses Vorgehen nur mit Einschränkungen möglich. Eine elementweise Interpolation hat zur Folge, dass die resultierende Matrix die Eigenschaften einer Rotationsmatrix verliert (Orthogonalität und Orthonormalität). Nach Shoemake und Duff (1992) kann dies zur Folge haben, dass bei der Transformation eines Objektes alle Punkte nach der Transformation in einem Punkt zusammenfallen.

In Abhängigkeit zur Repräsentation können alternative Verfahren gewählt werden.

Wird eine Rotationsmatrix durch Euler-Winkel repräsentiert, ist eine parameterweise Interpolation zwischen den Winkeln möglich (Dam u. a., 1998). Beachtet werden muss hierbei die Mehrdeutigkeit der Repräsentation durch Winkel. Aufgrund dieser ist die Interpolation nicht eindeutig definiert. Ein Beispiel kann dieses verdeutlichen.

Für den Zeitpunkt  $t = 0$  wird eine Rotation mit  $\omega = 0$ ,  $\varphi = 0$  und  $\kappa = 0$  eingeführt. Die Rotationsmatrix lautet in diesem Fall:

$$\mathbf{R}_{0,0,0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Für den Zeitpunkt  $t = 1$  wird  $\omega = \pi$ ,  $\varphi = \pi$  und  $\kappa = \pi$  eingeführt. Hieraus resultiert

die Matrix:

$$\mathbf{R}_{\pi,\pi,\pi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Beide Rotationsmatrizen unterscheiden sich lediglich durch ihre Winkelwerte. Die resultierende Matrix ist identisch.

Wird zwischen diesen Rotationen interpoliert, so erhält man für  $t = 0.5$  die Winkel:

$$\omega = \pi/2 \quad (2.16)$$

$$\varphi = \pi/2 \quad (2.17)$$

$$\kappa = \pi/2 \quad (2.18)$$

mit der zugehörigen Rotationsmatrix:

$$\mathbf{R}_{\pi/2,\pi/2,\pi/2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Es ist festzustellen, dass, obwohl jede Rotation für sich eine Einheitsmatrix ergibt, die resultierende, interpolierte Matrix keine Einheitsmatrix ist. Dies ist auf die Mehrdeutigkeit der Repräsentation der Rotationsmatrizen durch Winkel zurückzuführen. Aufgrund dieser Mehrdeutigkeiten kann diese Art der Interpolation nur bedingt eingesetzt werden. Sie eignet sich insbesondere für kleine Rotationswinkel.

Eine Alternative sind Interpolationen zwischen zwei Einheitsquaternionen.

In Dam u. a. (1998) werden zwei Verfahren vorgestellt. Dies sind die lineare Quaternionen Interpolation (*Lerp*) und die sphärische, lineare Quaternionen Interpolation (*Slerp*).

Bei dem *Lerp*-Verfahren erfolgt eine parameterweise lineare Interpolation zwischen den Parametern der Quaternionen. Die Interpolationsvorschrift zwischen dem Quaternion  $q_0$  und  $q_1$  lautet somit:

$$\mathit{Lerp}(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, t) = \mathbf{q}_t = \mathbf{q}_0(1 - t) + \mathbf{q}_1 t \quad (2.20)$$

mit  $t \in [0, 1]$ .

Das resultierende Quaternion ist kein Einheitsquaternion. Zur Beschreibung einer Rotation erfolgt daher eine Normierung des Quaternionen. Wird die Winkelgeschwindigkeit bei der Interpolation nach *Lerp* untersucht, so kann festgestellt werden, dass diese bei einer Interpolation nicht konstant ist. Ein Verfahren, welches dies berücksichtigt, ist die *Slerp*-Interpolation.

Im Gegensatz zur Interpolation nach *Lerp* wird beim *Slerp*-Verfahren nicht direkt über die Parameter der Quaternionen interpoliert. Beim *Slerp* erfolgt die Interpolation der Parameter über den Winkel  $\Omega = \arccos(\mathbf{q}_0 \cdot \mathbf{q}_1)$  zwischen den Quaternionen.

Hieraus folgt:

$$Slerp(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, t) = \mathbf{q}_t = \frac{\mathbf{q}_0 \sin((1-t)\Omega) + \mathbf{q}_1 \sin(t\Omega)}{\sin(\Omega)} \quad (2.21)$$

Die Interpolation ist nicht definiert für  $\mathbf{q}_0 = \pm \mathbf{q}_1$ . In diesem Fall beschreiben  $\mathbf{q}_0$  und  $\mathbf{q}_1$  die gleiche Rotation und der Nenner in Funktion 2.21 nimmt den Wert 0 an. Für diesen Fall kann  $\mathbf{q}_t = \mathbf{q}_0$  gesetzt werden.

Wie die Beschreibung einer Rotationsmatrix mittels Euler-Winkel, so ist auch die Beschreibung mittels Quaternionen nicht eindeutig definiert (vgl. Formel 2.11). Dies folgt aus der Mehrdeutigkeit des Winkels  $\Omega$ . Es existieren die Lösungen:

$$\Omega = \arccos(\mathbf{q}_0 \cdot \mathbf{q}_1) = \arccos(-\mathbf{q}_0 \cdot -\mathbf{q}_1) \quad (2.22)$$

und

$$\Omega = \arccos(-\mathbf{q}_0 \cdot \mathbf{q}_1) = \arccos(\mathbf{q}_0 \cdot -\mathbf{q}_1) \quad (2.23)$$

Um diese Mehrdeutigkeit zu lösen, wird definiert, dass die Interpolation über den kleineren der beiden Winkel erfolgt. Hieraus folgt, dass  $-\mathbf{q}_1$  anstelle von  $\mathbf{q}_1$  verwendet wird, wenn  $\mathbf{q}_0 \cdot \mathbf{q}_1 < 0$  ist. Diese Annahme kann in dieser Arbeit als zutreffend für die Interpolation zwischen Rotationen angenommen werden und wird bei der Parametrisierung von Bewegungen und Deformationen berücksichtigt.

### 2.1.2 Ausgleichsrechnung

Die Ausgleichsrechnung als mathematische Optimierungsmethode wird zur Bestimmung von  $u$  unbekanntem Größen durch eine Anzahl  $n \geq u$  Beobachtungen verwendet. Hierbei stehen die Unbekannten in einem funktionalen Zusammenhang mit den Beobachtungen. Ziel der Ausgleichung ist es, ein optimales Ergebnis für die Unbekannten zu bestimmen. Bei  $n = u$  Beobachtungen ergibt sich eine eindeutige Lösung. Bei  $n > u$  ist diese nicht gegeben. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wesentlichen Verfahren der Ausgleichsrechnung aus Niemeier (2008), Jäger (2005) und Heunecke u. a. (2013) zusammengefasst.

#### Funktionales Modell

Die Beschreibung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen gemessenen Größen (Beobachtungen) und den zu bestimmenden Unbekannten ist eine Hauptaufgabe bei der Definition eines Ausgleichsproblems. Die Beobachtungen werden hierbei in dem  $n$  Elemente langen Beobachtungsvektor  $L$  zusammengefasst:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Jede Beobachtung  $L_i$  wird als normalverteilte Zufallsvariable aufgefasst und sollte keine systematischen Abweichungen aufweisen. Die Berücksichtigung des stochastischen Anteils folgt im stochastischen Modell. Die zu bestimmenden Parameter (Unbekannte) werden in dem  $u$  Elemente langen Unbekanntenvektor  $\mathbf{X}$  zusammengefasst:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_u \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Die Beziehung zwischen den Unbekannten im Unbekanntenvektor  $\mathbf{X}$  und den Beobachtungen im Beobachtungsvektor  $\mathbf{L}$  ist durch eine Abbildung der Beobachtungen  $\mathbf{L}$  auf die Unbekannten  $\mathbf{X}$  zu beschreiben. Eine Ausgleichung im engeren Sinne ergibt sich bei  $n > u$  Beobachtungen.

Die Abbildung der Beobachtungen auf die Unbekannten erfolgt durch das funktionale Modell:

$$\tilde{\mathbf{L}} = \begin{bmatrix} f_1(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_u) \\ f_2(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_u) \\ \vdots \\ f_3(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_u) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Dieses gilt für „wahre“ Werte der Beobachtungen  $\tilde{\mathbf{L}}$  und wahre Werte für die Unbekannten  $\tilde{\mathbf{x}}$ . Bei realen Messwerten gilt dieser Zusammenhang nicht. Da eine Beobachtung  $l_i$  mit einer Messunsicherheit  $\sigma_i$  behaftet ist, muss für jede Beobachtung eine Verbesserung  $v_i$  angebracht werden. Diese werden in dem Vektor  $\mathbf{v}$  zusammengefasst. Weiterhin sind die „wahren“ Werte unbekannt. Für diese Werte muss somit eine Schätzung  $\hat{\mathbf{X}}$  eingeführt werden. Dies sind die von der Ausgleichung bestimmten Parameter. Somit lautet der verwendete funktionale Zusammenhang für eine Beobachtung  $L_i$ :

$$L_i + v_i = f_i(\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_u) \quad (2.27)$$

Bei einem nicht linearen Zusammenhang zwischen Unbekannten und Beobachtungen muss für die Methode der kleinsten Quadrate eine Linearisierung des Gleichungssystems erfolgen. Diese ergibt sich durch Anwendung der Taylor-Reihenentwicklung an den Näherungswerten  $\mathbf{X}_0$  der Unbekannten. Die Reihenentwicklung wird hierbei nach dem linearen Glied abgebrochen.

Es ergeben sich hieraus die partiellen Ableitungen:

$$a_{ij} = \left( \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right)_{\mathbf{X}_0} \quad (2.28)$$

diese bilden die A-Matrix:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1u} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{iu} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nu} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Aus der Linearisierung des Gleichungssystems folgt für den Parametervektor eine Zerlegung in einen Näherungsvektor  $\mathbf{X}_0$  und einem Zuschlagsvektor  $\hat{\mathbf{x}}$ :

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_0 + \hat{\mathbf{x}} \quad (2.30)$$

Der Zuschlagsvektor  $\hat{\mathbf{x}}$  dient als Parametervektor im linearisierten Gleichungssystem.

Neben der Zerlegung des Parametervektors folgt eine Zerlegung des Beobachtungsvektors:

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_0 + \mathbf{l} \quad (2.31)$$

Hierbei ist  $\mathbf{l}$  der verkürzte Beobachtungsvektor.  $\mathbf{L}_0$  ergibt sich aus dem funktionalen Modell mit den Näherungswerten  $\mathbf{X}_0$ .

### Stochastisches Modell

Im stochastischen Modell werden Angaben zur a priori Genauigkeit zusammengefasst. Für einen Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  lässt sich diese vollständig in einer Kovarianzmatrix zusammenfassen:

$$\mathbf{\Sigma}_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \dots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{21}\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \dots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}\sigma_n\sigma_1 & \rho_{n2}\sigma_n\sigma_2 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

In dieser Kovarianzmatrix stehen auf der Hauptdiagonalen die Varianzen der einzelnen Beobachtungen  $l_i$ , die Kovarianzen auf den Nebendiagonalen enthalten Informationen zu möglichen Korrelationen  $\rho_{ij}$  zwischen den Beobachtungen  $l_i$  und  $l_j$ . Häufig liegen keine näheren Informationen bezüglich der Korrelationen zwischen den einzelnen Beobachtungen vor, weshalb oft die Annahme der unkorrelierten Beobachtungen getroffen wird. Die Kovarianzmatrix wird somit zur Diagonalmatrix.

Für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen sind lediglich die Genauigkeitsrelationen erforderlich. Hierzu wird von der Kovarianzmatrix ein konstanter Faktor  $\sigma_0^2$ , der auch als Varianz der Gewichtseinheit bezeichnet wird, abgespalten. Es ergibt sich die Kofaktormatrix  $\mathbf{Q}_{ll}$ . Es gilt:

$$\Sigma_u = \sigma_0^2 Q_u \quad (2.33)$$

Die Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  der Beobachtungen  $\mathbf{l}$  ergibt sich aus der Inversen der Kofaktormatrix  $\mathbf{Q}_u$ . Für den Fall einer Diagonalmatrix ergibt sich das Gewicht einer Beobachtung  $l_i$  aus  $P_i = \sigma_0^2/\sigma_i^2$ . Die Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  lautet dann:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \sigma_0^2/\sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_0^2/\sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_0^2/\sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

### Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Markov-Modell)

Beim Gauß-Markov-Modell handelt es sich um eine Variante der Methode der kleinsten Quadrate, bei der Kovarianzinformationen der Beobachtung berücksichtigt werden. Grundannahme der Methode der kleinsten Quadrate ist die Minimierung der Verbesserungsquadrate.

$$\sum_{i=1}^n v_i v_i \rightarrow \min \quad (2.35)$$

Im Gauß-Markov-Modell wird diese Minimierung um eine Gewichtung der Residuen  $v_i$  erweitert. Es folgt hieraus die Forderung:

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \rightarrow \min \quad (2.36)$$

Wird dieses Minimierungsproblem auf das lineare funktionale Modell  $\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$  angewendet, so ergibt sich der Zuschlagsvektor  $\hat{\mathbf{x}}$  aus:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (2.37)$$

Das zugehörige Gleichungssystem lautet:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}) \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (2.38)$$

Wobei der Ausdruck  $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$  zur Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{N}$  zusammengefasst wird und  $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$  zur rechten Seite  $\mathbf{n}$  des Normalgleichungssystems.

Die Inverse der Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{N}$  ist die Kofaktormatrix  $\mathbf{Q}_{xx}$  der Unbekannten. Aus ihr folgt nach Multiplikation mit dem Quadrat der a posteriori Standardabweichung  $\hat{s}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n-u}$  die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{xx}$ . Diese enthält Informationen zu den Varianzen der Unbekannten sowie zur Korrelation zwischen den Unbekannten.

$$\Sigma_{xx} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \dots & \rho_{2u}\sigma_1\sigma_u \\ \rho_{21}\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \dots & \rho_{2u}\sigma_2\sigma_u \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{u1}\sigma_u\sigma_1 & \rho_{u2}\sigma_u\sigma_2 & \dots & \sigma_u^2 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

In Abhängigkeit zur Güte der Näherungswerte ist es erforderlich, die Berechnung mit verbesserten Näherungen  $\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}_{0_i} + \hat{\mathbf{x}}_i$  erneut durchzuführen.

### Bedingte Ausgleichung

Bei der bedingten Ausgleichung wird das funktionale Modell des Gauß-Markov-Modells um zusätzliche Bedingungen erweitert. Dies kann sinnvoll sein, wenn beispielsweise ein Rangdefekt vorliegt und dieser durch eine sinnvolle Bedingung behoben werden kann. Ein Beispiel ist die Bestimmung einer Rotationsmatrix mittels Quaternionen. Da eine Rotation im 3D-Raum mit drei Parametern beschrieben werden kann, besteht bei der Einführung von vier Parametern eine Überparametrisierung.

In diesem Fall ist eine Bedingung zwischen den Parametern sinnvoll.

Eine mögliche Bedingungsgleichung ist:

$$1 = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 \quad (2.40)$$

Alternativ können Bedingungen verwendet werden, um Restriktionen einzuführen. Eine Restriktion könnte beispielsweise sein, dass ein Punkt auf einer Ebene liegt.

Um Bedingungen in einer Ausgleichung zu integrieren, wird das Minimierungsproblem des Gauß-Markov-Modells zur Lagrangeschen Funktion erweitert:

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} + 2\mathbf{k}(\mathbf{B}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{w}) \rightarrow \min \quad (2.41)$$

Hierbei enthält  $\mathbf{B}$  die linearisierten Bedingungsgleichungen. Die Linearisierung erfolgt analog zur Aufstellung der A-Matrix. In  $\mathbf{w}$  werden die Widersprüche zusammengefasst.

Das linearisierte funktionale Modell lautet somit:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{l} + \mathbf{v} \quad (2.42)$$

$$\mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{w} = 0 \quad (2.43)$$

Durch die Einführung der Bedingungsgleichungen ergibt sich das erweiterte Normalgleichungssystem zu:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ -\mathbf{w} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

wobei der Vektor  $\mathbf{k}$  die Lagrangschen Multiplikatoren enthält.

## Sequenzielle Ausgleichung

Das Ziel der sequenziellen Ausgleichung ist die Erweiterung eines bestehenden Normalgleichungssystems um zusätzliche Beobachtungen. Die Unbekannten bleiben gleich.

Somit ist es erforderlich, den Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  um zusätzliche Beobachtungen  $\mathbf{l}_z$  zu erweitern. Dies hat zur Folge, dass die A-Matrix, die Kovarianzmatrix der Beobachtungen  $\Sigma_{ll}$  sowie der Vektor der Residuen  $\mathbf{v}$  erweitert werden müssen. Es ergibt sich hieraus das erweiterte Modell:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{l} \\ \mathbf{l}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{v}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}_z \end{bmatrix}^{-1} [\mathbf{x}] \quad (2.45)$$

$$\Sigma_{ll_{zz}} = \begin{bmatrix} \Sigma_{ll} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_{ll_z} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Beim stochastischen Modell wird angenommen, dass keinerlei Korrelationen zwischen den ursprünglichen Beobachtungen und den neuen Beobachtungen vorliegen. Unter dieser Annahme kann eine Zerlegung der Normalgleichungsmatrix erfolgen.

Die Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{N}_{zz}$  ergibt sich somit aus:

$$\mathbf{N}_{zz} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}_z^T \mathbf{P} \mathbf{A}_z = \mathbf{N} + \mathbf{A}_z^T \mathbf{P} \mathbf{A}_z = \mathbf{N} + \mathbf{N}_1 \quad (2.47)$$

Die rechte Seite des Normalgleichungssystems ergibt sich aus:

$$\mathbf{n}_{zz} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} + \mathbf{A}_z^T \mathbf{P} \mathbf{l}_z = \mathbf{n} + \mathbf{A}_z^T \mathbf{P} \mathbf{l}_z = \mathbf{n} + \mathbf{n}_1 \quad (2.48)$$

Hieraus ist ersichtlich, dass sowohl die Normalgleichungsmatrizen als auch die Normalgleichungsvektoren für die einzelnen Beobachtungen separat aufgestellt werden können. Die Normalgleichungsmatrix sowie der Normalgleichungsvektor des Gesamtsystems  $\mathbf{N}_{zz}$  und  $\mathbf{n}_{zz}$  ergeben sich aus den aufsummierten Normalgleichungsmatrizen bzw. Normalgleichungsvektoren. Dieses Vorgehen kann beliebig wiederholt werden. Bei  $n$  Beobachtungen, die sequenziell dem Normalgleichungssystem hinzugefügt werden, kann das Vorgehen für jede Beobachtung wiederholt werden.

## Bestimmung von Ausreißern

Das Ziel eines Ausreißertests ist die Aufdeckung von groben Fehlern in den Beobachtungen. Im Folgenden wird das Vorgehen nach Baarda (1968) näher erläutert. Bei diesem Verfahren wird von lediglich einem groben Fehler im Datenmaterial ausgegangen. Für robuste Verfahren, die für eine höhere Anzahl von Ausreißern ausgelegt sind, wird auf die Literatur verwiesen (Niemeier, 2008; Jäger u. a., 2005). Weite Verbreitung haben die modifizierten m-Schätzer (wie z.B. der Huber-Schätzer) sowie das RANSAC (random sample consensus) Verfahren (Fischler und Bolles, 1981).

Basis des Ausreißertestes nach Baarda (1968) ist die Einführung der normierten Verbesserungen  $w_i$ . Für die Bestimmung der normierten Verbesserungen muss zunächst die Kofaktormatrix der Verbesserungen:

$$\mathbf{Q}_{vv} = \mathbf{Q}_{ll} - \mathbf{AQA}^T \quad (2.49)$$

eingeführt werden. Aus ihr lassen sich für jede Beobachtung die Standardabweichungen  $\hat{s}_{v_i}$  der Residuen bestimmen:

$$\hat{s}_{v_i} = \hat{s}_0 \sqrt{(Q_{vv_{ii}})} \quad (2.50)$$

Die normierten Verbesserungen  $w_i$  ergeben aus den Verbesserungen  $v_i$  und den zugehörigen Standardabweichungen der Residuen  $\hat{s}_{v_i}$ :

$$w_i = \frac{v_i}{\hat{s}_{v_i}} \quad (2.51)$$

Zur Beurteilung eines groben Fehlers wird für die normierten Verbesserungen ein Schwellwert  $k$  eingeführt.

$$|w_i| \begin{cases} > k : \text{grober Fehler} \\ \leq k : \text{kein grober Fehler} \end{cases} \quad (2.52)$$

Die Größe  $k$  ist aus der Normalverteilung mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  abzuleiten. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ergibt sich ein  $k$  von 1,96. Der Wert  $k$  sollte in Abhängigkeit zur Anzahl der Beobachtungen gewählt werden. Bei einer hohen Anzahl ist ein größerer Wert von  $k$  sinnvoll. Hierdurch wird die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers 1. Art (eine Beobachtung wird fälschlicherweise als Ausreißer identifiziert) reduziert.

Die Aufdeckbarkeit eines groben Fehlers ist abhängig von dem Redundanzanteil  $r_i$  einer Beobachtung.

Dieser bestimmt sich aus dem zugehörigen Element  $r_i = R_{ii}$  der Matrix:

$$\mathbf{R} = \mathbf{Q}_{vv}\mathbf{P} \quad (2.53)$$

Der Redundanzanteil einer Beobachtung ist ein positiver Wert zwischen 0 und 1. Liegt die Redundanz einer Beobachtung bei 0, ist es nicht möglich, grobe Fehler in den zugehörigen Beobachtung aufzudecken. Beobachtungen mit einem Redundanzanteil nahe 0 werden auch als Hebelpunkte oder Hebelbeobachtungen bezeichnet. In Wicki (1999) wird ein robustes Ausgleichsverfahren vorgestellt (BIBER-Schätzer), welches den Einfluss von Hebelpunkten berücksichtigt.

Im Gegensatz zum Ausreißertest nach Baarda (1968) wird bei modifizierten m-Schätzern eine Verlustfunktion  $\Psi(w_i)$  eingeführt, die den Einfluss einer Beobachtung reduziert und

somit den Einfluss von groben Fehlern. Eine detaillierte Beschreibung von  $m$ -Schätzern wird in Jäger u. a. (2005) gegeben.

## 2.2 Aufnahme- und Auswerteverfahren

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Messgeräte und die damit verbundenen grundlegenden Verfahren, die in dieser Arbeit zur Erfassung von Deformationen an WEAs genutzt werden, beschrieben. Bei den vorgestellten Verfahren liegt der Schwerpunkt auf signalisierungsfreien Methoden zur Bestimmung von Transformationen und Objektgeometrien aus den jeweiligen Messdaten. Hierfür werden die Vor- und Nachteile der Verfahren, bezogen auf den Anwendungsfall dynamische Deformationsanalyse, diskutiert und aufgezeigt.

Die Modellierung von Deformationen ist Bestandteil des Kapitels 2.4.

### 2.2.1 Zentralperspektive Kamera

In der Photogrammetrie werden Kameras zur Vermessung von Objekten eingesetzt. Dies können beispielsweise Spiegelreflexkameras oder Industriekameras sein.

Ein wesentliches Einteilungsmerkmal ist das Abbildungsmodell der verwendeten Kameras. In dieser Arbeit werden zentralperspektivische Kameras eingesetzt. Andere Abbildungen sind u.a. die sphärische und die zylindrische Abbildung, wie sie z.B. für Panorama-Kameras verwendet werden. Einen Überblick über die Kameratechnik kann der gängigen Literatur entnommen werden. In Luhmann (2018) wird beginnend mit der historischen Entwicklung auf verschiedene Kamerateypen und deren Einsatzgebiete eingegangen.

Die im Folgenden betrachtete zentralperspektivische Kamera beruht auf dem Prinzip der Lochkamera (Abbildung 2.2). In idealisierter Form passiert jeder Bildstrahl, bevor er auf den Sensor fällt, einen einzigen Punkt, das Projektionszentrum  $O$ .

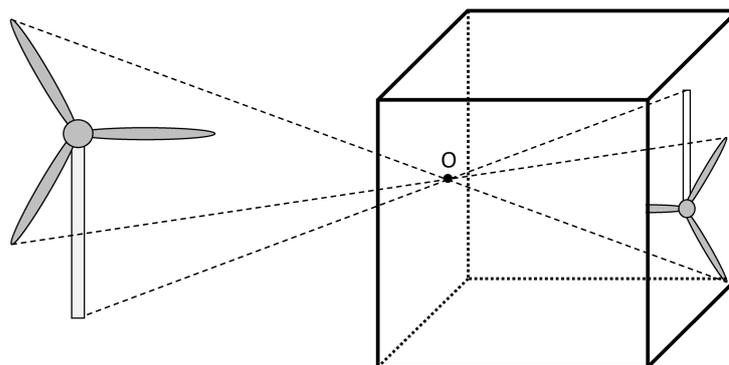


Abbildung 2.2: Das Prinzip der Lochkamera

Wird zunächst angenommen, dass der Sensor achsparallel zur  $xy$ -Ebene angebracht ist und das Projektionszentrum im Koordinatenursprung liegt, kann ein einfacher Zusammenhang zwischen Objektpunkt und Bildpunkt hergeleitet werden:

$$X = x'm_b \quad (2.54)$$

$$Y = y'm_b \quad (2.55)$$

$$Z = z'm_b \quad (2.56)$$

Hierbei ist  $z' = -c$ . Die Kamerakonstante  $c$  ist in etwa gleich der Brennweite der Kamera. Die Bildmaßstabszahl  $m_b$  beschreibt eine Skalierung des Bildstrahls. Hieraus folgt die Abbildung eines 3D-Punktes auf einem Sensor durch Umstellen der Gleichung und Eliminierung der unbekanntes Bildmaßstabszahl  $m_b$ :

$$x' = X/Z \cdot z' \quad (2.57)$$

$$y' = Y/Z \cdot z' \quad (2.58)$$

Liegt die Kamera nicht im Koordinatenursprung des übergeordneten Systems, muss eine zusätzliche Transformation berücksichtigt werden. Die Orientierung einer Kamera, auch äußere Orientierung genannt, kann durch eine 6-Parametertransformation beschrieben werden, wobei die Translation  $X_0$  die Position des Projektionszentrums im übergeordneten Koordinatensystem beschreibt. Die Rotation  $R$  beschreibt die Rotation der Kamera im übergeordneten Koordinatensystem. Hieraus folgt für einen Punkt  $X$  folgender Zusammenhang:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + m_b \mathbf{R} \mathbf{x}' \quad (2.59)$$

Nach Umstellung der Gleichung nach den Bildkoordinaten und Eliminierung der Unbekannten  $m_b$  folgen die Kollinearitätsgleichungen:

$$x' = x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \quad (2.60)$$

$$y' = y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \quad (2.61)$$

Dieser Zusammenhang zwischen Objektkoordinaten und Bildkoordinaten beruht auf der Annahme einer idealen Lochkamera. Abweichungen von diesem Modell werden durch  $\Delta x'$  und  $\Delta y'$  beschrieben. Neben der äußeren Orientierung (Beschreibung der Position der Kameras) werden in der inneren Orientierung Parameter zur Beschreibung eines kamerainternen Koordinatensystems zusammengefasst. Diese beinhalten neben der Kamerakonstanten  $c$  die Koordinaten  $x'_0$  und  $y'_0$  des Hauptpunktes. Der Bildhauptpunkt beschreibt den Durchstoßpunkt der optischen Achse und kann als Lotfußpunkt des Projektionszentrums im Bild aufgefasst werden. Anhand dieser Parameter wird ein kamerainternes Koordinatensystem definiert. Neben diesen Parametern beinhaltet die innere Orientierung Parameter zur Beschreibung von Abweichungen vom Modell der Lochkamera ( $\Delta x'$  und  $\Delta y'$ ).

Im Folgenden werden die Parameter nach Brown (1971) mit einer Erweiterung um Affi-

nität und Scherung (El-Hakim, 1986) vorgestellt. Diese gelten als Standardparameter im Bereich der Photogrammetrie. Alternative Ansätze können in Luhmann (2010), Luhmann (2018) oder Förstner und Wrobel (2016) nachgeschlagen werden.

Die Parameter nach Brown (1971) und El-Hakim (1986) berücksichtigen drei Typen von Abweichungen zur Abbildung einer Lochkamera:

- die radialsymmetrische Verzeichnung
- die radial-asyymetrische und tangentielle Verzeichnung
- die Affinität und Scherung

### Radial-symmetrische Verzeichnung

Die radial-symmetrische Verzeichnung entsteht durch Brechungsänderungen an den Linsen des Objektivs. Sie ist abhängig von der gewählten Blendeneinstellung, der Fokussierung, der Entfernung und der Wellenlänge des Lichts (Luhmann, 2018). Bei Änderung einer dieser Parameter ändert sich die Verzeichnung. Zur Beschreibung dieser Verzeichnung kann ein Polynomansatz gewählt werden:

$$\Delta r'_{rad} = A_1 \cdot r' \cdot (r'^2 - r_0^2) + A_2 \cdot r' \cdot (r'^4 - r_0^4) + A_3 \cdot r' \cdot (r'^6 - r_0^6) \quad (2.62)$$

In diesem Ansatz entspricht  $r'$  dem radialen Abstand eines Bildpunktes zum Bildhauptpunkt  $(x_0, y_0)$ . Der Parameter  $r_0$  ist ein konstanter Faktor. Die Korrektur in radialer Richtung ist  $\Delta r'_{rad}$ . Die Umrechnung von  $\Delta r'_{rad}$  in die Komponenten  $\Delta x'_{rad}$  und  $\Delta y'_{rad}$  erfolgt über folgenden Zusammenhang:

$$\Delta x'_{rad} = x' \cdot \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \quad (2.63)$$

$$\Delta y'_{rad} = y' \cdot \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \quad (2.64)$$

### Radial-asyymetrische und tangentielle Verzeichnung

Die physikalische Begründung dieser radial-asyymetrischen und tangentialen Verzeichnung liegt vor allem in der Dezentrierung von Linsen innerhalb des Objektivs einer Kamera. Durch dezentrierte Linsen, deren Mitte sich nicht innerhalb der optischen Achse befinden, ändert sich das Abbildungsverhalten des Objektivs. Mathematisch kann dies mittels folgender Gleichungen kompensiert werden:

$$\Delta x'_{tan} = B_1 \cdot (r'^2 + 2 \cdot x'^2) + 2 \cdot B_2 \cdot x' \cdot y' \quad (2.65)$$

$$\Delta y'_{tan} = B_2 \cdot (r'^2 + 2 \cdot y'^2) + 2 \cdot B_1 \cdot x' \cdot y' \quad (2.66)$$

Nach Luhmann (2018) ist die Größenordnung der radial-asyymetrischen und tangentialen Verzeichnung im Vergleich zur radial-symmetrischen Verzeichnung für die meisten Kameraobjektive geringer.

## Affinität und Scherung

Die Affinität und Scherung beschreibt die Abweichungen von Orthogonalität und Gleichmäßigkeit der Bildkoordinatenachsen. Ursachen können beispielsweise nicht quadratische Pixel sein. Eine Korrektur erfolgt über folgenden Ansatz:

$$\Delta x'_{aff} = C_1 \cdot x' + C_2 \cdot y' \quad (2.67)$$

$$\Delta y'_{aff} = 0 \quad (2.68)$$

### 2.2.2 Bestimmung von 3D Punkten aus Bildmessungen

Die Voraussetzung zur Bestimmung von 3D Punkten aus Bildern ist eine Zuordnung von gleichen Punkten/Bildausschnitten in mindestens zwei Bildern aus unterschiedlichen Perspektiven. Ist dies gegeben, kann mittels eines photogrammetrischen Vorwärtsschnittes ein 3D Punkt bestimmt werden. Hierbei wird der Abstand eines unbekanntes 3D Punktes zu den korrespondierenden Bildstrahlen minimiert. Die Bildstrahlen ergeben sich aus den in den Bildern gemessenen Bildpunkten, der inneren Orientierung der Kameras sowie deren äußere Orientierungen.

Zur Zuordnung von Bildpunkten zueinander können Matching-Verfahren verwendet werden. Das Ziel beim Matching ist die Zuordnung von einem oder mehrere Merkmale zueinander. Mehrere Merkmale werden hierzu in einem Merkmalsvektor zusammengefasst. Unter dem Oberbegriff Matching fallen unterschiedliche Verfahren, die das Ziel haben korrespondierende Bildausschnitte zuzuordnen, wie das Least Squares Matching (Gruen, 1985) oder das Semi Global Matching (Hirschmuller, 2005). Hierbei kann zwischen Sparse und Dense Matching Verfahren unterschieden werden.

Wird ein Sparse Matching verwendet, werden einzelne Punkte eines Bildes, die im Allgemeinen durch einen Interest-Operator gefunden werden, zu einzelnen Punkten eines oder mehrerer anderer Bilder zugeordnet. Das Ergebnis des anschließenden Vorwärtsschnittes ist eine dünne Punktwolke. Beim Dense Matching ist das Ziel eine möglichst pixelweise Zuordnung zwischen zwei oder mehreren Bildern. Das Ergebnis ist eine dichte 3D-Punktwolke.

### 2.2.3 Kontur- und silhouettenbasierte Verfahren

Neben den in der Photogrammetrie gängigen Verfahren, die auf Texturen oder Signalisierungen diskreter Punkte am Objekt basieren, ist es möglich, die Silhouette und die Kontur eines Objektes zu nutzen. Aus diesen können beispielsweise Parameter von Regelgeometrien wie Kugeln und Zylinder abgeleitet werden. Weiterhin ist es möglich, aus mehreren Ansichten eines Objektes die visuelle Hülle eines Objektes oder dessen Lage im Raum abzuleiten.

#### Bestimmung von Regelgeometrien

In Andresen (1991) wird beschrieben, wie aus den Konturen von Regelgeometrien, wie Kugeln und Zylindern, im Bild die Parameter dieser Objekte bestimmt werden können. Anwendung findet dies bei der As-Built Dokumentation von Industrieanlagen, siehe z.B.

Burger und Busch (2000), Boochs u. a. (2003) und Tangelder u. a. (2000), sowie bei erweiterten Bündelblock-Ansätzen (Wrobel, 2012; Otepka und Fraser, 2004; Otepka, 2004), in denen Raumkreise statt Punkte ausgeglichen werden.

Hierbei können zwei Vorgehensweisen unterschieden werden:

1. Der objektraumbasierte Ansatz
2. Der bildraumbasierte Ansatz

In Andresen (1991) wird beispielsweise der Abstand zwischen einer geometrischen Form und einem Bildstrahl minimiert. Die Minimierung erfolgt somit im Objektraum. Minimiert wird der Abstand  $d$  zwischen beispielsweise einem Zylindermantel und einem Bildstrahl  $\mathbf{p}$  der sich aus einem Bildpunkt  $\mathbf{p}'$  ergibt:

$$\mathbf{p} = \mathbf{X}_0 + \lambda \mathbf{R} \mathbf{p}' \quad (2.69)$$

Alternativ ist es möglich die Minimierung im Bildraum durchzuführen. Dies wird beispielsweise in Otepka (2004) durchgeführt. Hierbei wird ein Raumkreis in ein Bild projiziert. Die Projektion eines Kreises im Bild kann auf einen Kegelschnitt der Form:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey - 1 = 0 \quad (2.70)$$

reduziert werden. Minimiert wird der Abstand zwischen den Randpunkten der im Bild gemessenen Ellipse zur Projektion des Kreises im Bild. Hierzu werden zunächst die Randpunkte der Ellipse im Bild zur Bestimmung von Ellipsenparametern herangezogen. Als indirekte Beobachtungen werden diese Parameter als Beobachtungen für den Raumkreis eingeführt.

Im Vergleich zum objektraumbasierten Ansatz hat dieses den Vorteil, dass eine Gewichtung entsprechend der Genauigkeit im Bild vorgenommen werden kann. Im Objektraum ist die Gewichtung abhängig vom Bildmaßstab. Dieser ist a priori nur genähert bekannt.

### Bestimmung der visuellen Hülle

Neben der Bestimmung von Regelgeometrien ist es möglich, aus der Silhouette eines Freiformobjektes seine Geometrie abzuleiten. Hierbei kann lediglich die visuell sichtbare Hülle abgeleitet werden. Das bedeutet, dass konkave Einbuchtungen am Objekt, die nicht in der Silhouette sichtbar sind, nicht erfasst werden können.

Erstmals wurde die Bestimmung von 3D-Geometrien aus Silhouetten in Baumgart (1974) vorgestellt. Auf Basis dieser Idee wurden im Laufe der Zeit einige Verfahren entwickelt, mit denen Objektgeometrien aus der Silhouette abgeleitet werden können. Ein Beispiel sind Octree-basierte Ansätze (Wong, 2001; Ahuja und Veenstra, 1989; Potmesil, 1987; Szeliski, 1993). Bei diesen wird der Objektraum durch einen Octree repräsentiert (siehe Abbildung 2.3).

Für jede Zelle des Octrees wird eine Prüfung in den Bildern durchgeführt. Liegt eine Zelle in allen Bildern vollständig innerhalb der Silhouette, so gehört diese zum Objekt (in Abbildung 2.3 die schwarzen Knoten des Octrees). Liegt eine Zelle in mindestens einem

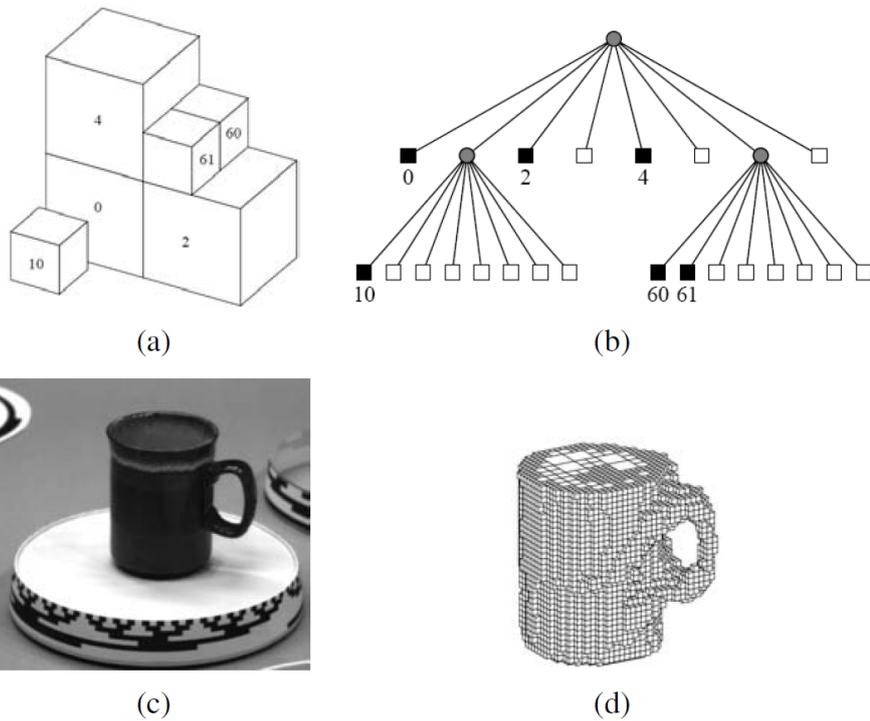


Abbildung 2.3: Volumenrekonstruktion mittels Octree-Repräsentation aus Silhouetten (Szeliski, 2010)

Bild nicht in der Silhouette, so gehört diese nicht zum Objekt (in Abbildung 2.3 die weißen Knoten).

Zellen, die teilweise innerhalb der Silhouette liegen, werden weiter unterteilt (graue Knoten in der Abbildung 2.3). Bei diesem Verfahren handelt es sich um einen einfachen Ansatz, bei dem die Auflösung am Objekt durch die Tiefe des Octrees bestimmt werden kann.

Ein alternativer Ansatz ist die Bestimmung von Konturkanten aus Schnitten mehrerer Silhouetten (Franco und Boyer, 2009; Lazebnik u. a., 2007). Hierzu wird die Silhouette im Bild in den Objektraum extrudiert und mit den extrudierten Silhouetten aus anderen Ansichten verschnitten (Abbildung 2.4). Das Ergebnis ist ein Modell des Objektes. Dieser Ansatz ist im Vergleich zum Octree-basierten Ansatz deutlich aufwändiger, da Schnitte zwischen allen Silhouetten bestimmt werden müssen. Das Verfahren kann jedoch stark parallelisiert werden. In Yous u. a. (2007) wird beispielsweise eine Implementierung auf der GPU (graphics processing unit) vorgestellt.

Weiterführende Ansätze parametrisieren die Oberfläche des Objektes. Hierbei wird die extrudierte Silhouette als Tangente der unbekanntes Oberfläche aufgefasst (Cremers und Kolev, 2011; Franco u. a., 2006). Unterschiede liegen in der Parametrisierung der Oberfläche. In Brand u. a. (2004) wird bspw. eine  $C^2$  stetige Oberfläche gefordert. Dabei wird zusätzlich zur Tangente eine Minimierung der Krümmung eingeführt.

In Abbildung 2.5 sind die Unterschiede in den einzelnen Verfahren skizziert. Das Octree-basierte Verfahren liefert die größte Näherung der unbekanntes Geometrie. Durch Schnitte mehrerer extrudierter Silhouetten kann das Volumen, in dem sich das unbekanntes Ob-

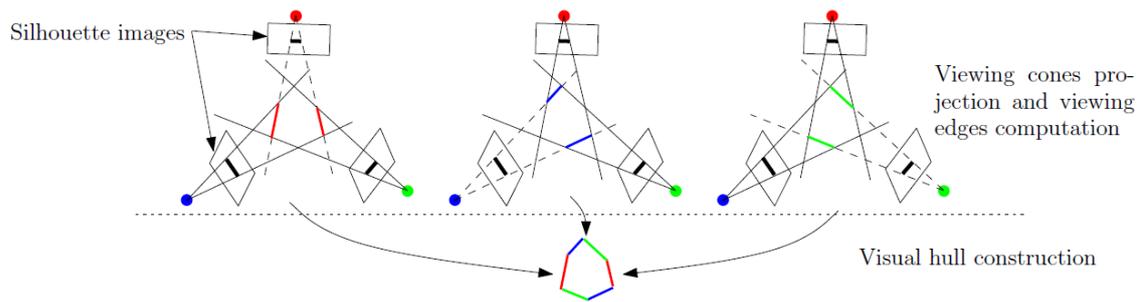


Abbildung 2.4: Prinzip der Bestimmung der visuellen Hülle aus Schnitten extrudierter Silhouetten (Yous u. a., 2007).

jekt befindet, eingegrenzt werden. Die unbekannte Geometrie kann somit unter Vernachlässigung der Messunsicherheit als Untermenge des bestimmten Schnittvolumens aufgefasst werden. Bei der Verwendung von Parameteroberflächen kann eine natürlich wirkende Oberfläche bestimmt werden.

### Bestimmung der Orientierung von Objekten

Neben der Bestimmung von Objektgeometrien kann anhand der Silhouette die Orientierung eines bekannten Objektes im Raum bestimmt werden (Dambreville u. a., 2008; Rosenhahn u. a., 2004; Brox u. a., 2006; Lowe, 1991). Zur Beschreibung der räumlichen Lage von Objekten ist eine Transformation mit sechs Freiheitsgraden (im englischen: six degrees of freedom (6DoF)) zu bestimmen. Hierbei wird eine bekannte Form sowie die Näherung der Objektposition im Bezug zur Kamera vorgegeben.

Durch ein Matching zwischen gemessener Silhouette im Bild und der ins Bild projizierten Objektgeometrie ist eine Bestimmung von unbekanntem Transformationsparametern möglich. Das Matching erfolgt durch eine Minimierung des Abstandes zwischen gemessener Silhouette im Bild und der projizierten Objektgeometrie. Ein mögliches Verfahren liefert das Iterative Closest Point Verfahren (siehe Kapitel 2.2.5).

Die bestimmbaren Parameter sind abhängig von der Eindeutigkeit der Objektgeometrie. Bei rotationsinvarianten Objektgeometrien reduzieren sich die zu bestimmenden Parameter. Bei Kugeln lässt sich beispielsweise keine Rotation bestimmen. Bei einem Zylinder sind zwei Rotationen eindeutig bestimmbar.

Das prinzipielle Vorgehen ist in Abbildung 2.6 skizziert. In einem iterativen Prozess wird die Position des Objektes relativ zur Kamera verbessert. Hierbei wird mit den iterativ verbesserten Positionsdaten die Projektion des Objektes ins Bild wiederholt. In jeder Iteration wird der Abstand der Silhouette des ins Bild projizierten Objektes zur im Bild gemessenen Silhouette minimiert.

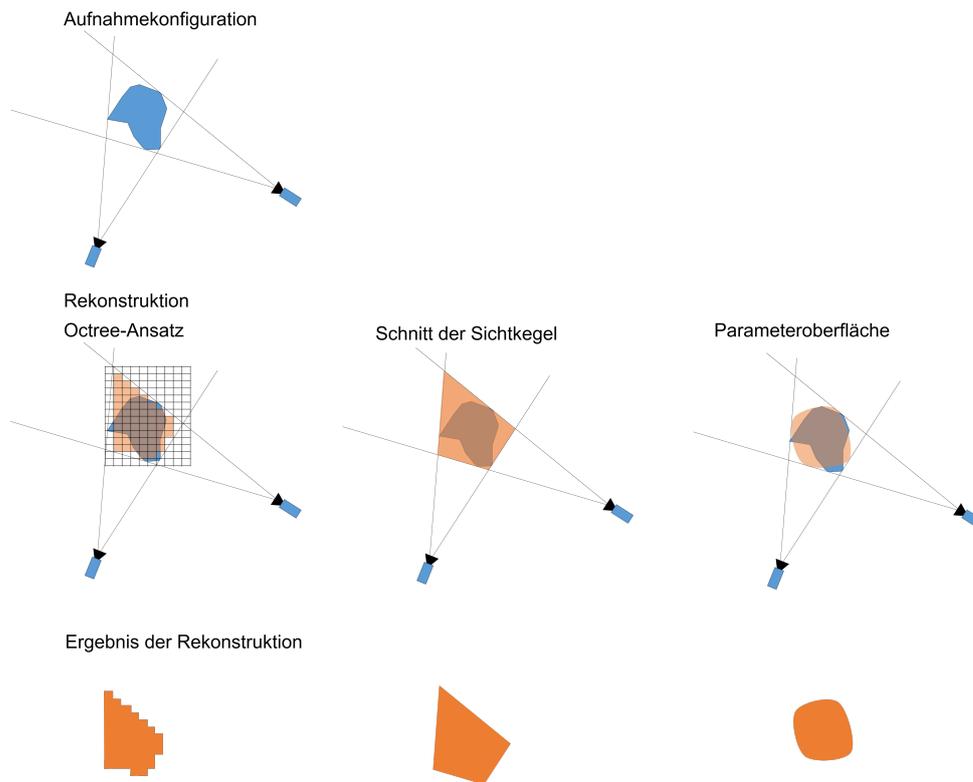


Abbildung 2.5: Unterschiede zwischen den Rekonstruktionsarten. Von links nach rechts: Prinzipskizze der Octree-Rekonstruktion, der Rekonstruktion aus Schnitten der Sichtkegel und der Rekonstruktion als Parameteroberfläche

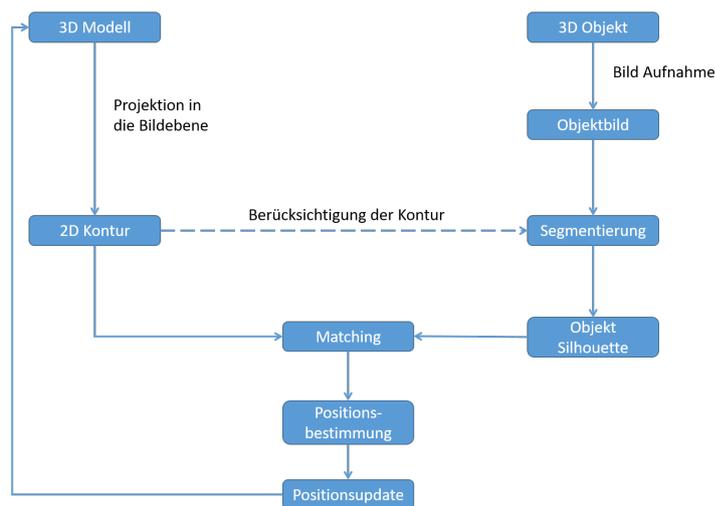


Abbildung 2.6: Ablauf der Positionsschätzung aus Silhouetten nach Han u. a. (2008) (übersetzt und angepasst)

Unterschiede zwischen Verfahren bestehen im Wesentlichen in der Repräsentation der Oberfläche. Diese kann aus einzelnen Patches oder Dreiecken bestehen (Lowe, 1991) oder funktional beschrieben werden (Kriegman u. a., 1992; Rosenhahn u. a., 2004). Rosenhahn u. a. (2004) verwenden z.B. eine Fourier-Transformation zur Repräsentation einer 3D-Oberfläche. In Elliott u. a. (2018) wird eine Genauigkeitsuntersuchung für die Bestimmung der Position eines Tennisschlägers aus Silhouetten vorgenommen.

#### 2.2.4 Laserscanner

Laserscanner sind polar messende Systeme, welche sich im Wesentlichen durch ihre hohe Erfassungsfrequenz auszeichnen. Durch diese ermöglichen sie die flächenhafte Erfassung von Objekten durch regelmäßige Abtastung eines Messobjektes, im Gegensatz zur Erfassung von diskreten Punkten mit dem Tachymeter. Erfasst werden je Punkt die Raumdistanz sowie ein Horizontal- und ein Vertikalwinkel.

Unterscheidungsmerkmale von Laserscannern ergeben sich u.a. durch ihre Bauart. Nach Witte und Sparla (2015) werden im terrestrischen, statischen Einsatz zwischen Panorama-Scannern, Hybrid-Scannern und Kamera-Scannern unterschieden.

Weitere Unterscheidungsmerkmale bilden das verwendete Verfahren zur Distanzmessung (Impulsmessung oder Phasenvergleichsverfahren) (Mettenleiter u. a. (2015) und Vosselman und Maas (2010)) sowie die Ablenkeinrichtungen für den Laserstrahl. Mögliche Verfahren für die Strahlableitung sind oszillierende Spiegel, rotierende Spiegel sowie rotierende Polygonspiegel. Eine detaillierte Beschreibung der Eigenschaften unterschiedlicher Ablenkeinheiten kann Vosselman und Maas (2010) entnommen werden.

Zur Erfassung von baulichen Anlagen haben sich vor allem Panorama-Scanner (Abbildung 2.7) durchgesetzt. Bei diesen wird das Messobjekt durch einen Laserstrahl, der durch einen rotierenden Spiegel abgelenkt wird, erfasst. Die Rotation des Spiegels ermöglicht die schnelle vertikale Ablenkung des Laserstrahls und somit die Erfassung von Profilen. Eine zweite, langsamere Rotation, erfolgt um die Geräteachse.



Abbildung 2.7: Panorama-Scanner Z&F Imager 5010C.

Die Primärachse ist die Vertikalachse. Die Rotationsfrequenz dieser ist abhängig vom verwendeten Scanner und beträgt beispielsweise bei dem *Z&F Imager 5010C* bis zu 50 Hz. Die sekundäre Drehung um die Stehachse wird hingegen deutlich langsamer durchgeführt. Eine 360° Erfassung nimmt bei mittlere Auflösungen mehreren Minuten in Anspruch. Bei



Abbildung 2.8: Ausschnitt aus einem Intensitätsbild eines 3D Panorama Scans (a), Ausschnitt aus einer Punktwolke (b)

der Drehung um die Vertikal- sowie Horizontalachse erfolgt eine kontinuierliche Messung der Raumdistanzen sowie des Horizontal- und Vertikalwinkels. Die Erfassung kann je nach Laserscanner mit  $> 1$  MHz erfolgen. Neben den Polarkoordinaten wird häufig eine Intensität des reflektierten Signals ermittelt. In Abbildung 2.8(a) ist ein solches Intensitätsbild zu sehen.

Die Erfassungszeit eines horizontalen Bereiches beträgt, je nach verwendeten Einstellung, bis zu mehrere Minuten. Dies ist für schnelle kinematische Anwendungen zu langsam.

Bewegte Objekte können mehrfach oder verzerrt erfasst werden, wie eine Person im Scan, wenn sie während des Scanvorgangs ihre Position ändert. Im Intensitätsbild (Abbildung 2.8(a)) ist vier Mal dieselbe Person zu sehen.

Das Ergebnis eines Scans ist eine sogenannte Punktwolke (Abbildung 2.8).

### **Einflussfaktoren auf die Genauigkeit**

Genauigkeitsbegrenzende Einflüsse auf die Messung eines Laserscanners können unterschiedliche Ursachen haben. Diese können nach Soudarissanane u. a. (2011) in vier Gruppen eingeteilt werden:

- mechanische Einflüsse
- atmosphärische Einflüsse sowie Umgebungseinflüsse
- Objekteigenschaften
- Aufnahmegeometrie

Mechanische Einflüsse sind gerätespezifische Abweichungen, beispielsweise Achsenabweichung und Achsexzentrizität, wie sie auch bei Tachymetern und Theodoliten bekannt sind. Weiterhin sind Einflüsse basierend auf der elektromagnetischen Distanzmessung bekannt. Diese sind Abweichungen des Nullpunktes der Distanzmessung, Maßstabsabweichungen und bei Phasenvergleichsverfahren zur Distanzmessung der zyklische Phasenfehler sowie die Phaseninhomogenität.

Die gerätespezifischen Fehlereinflüsse sind in der Literatur zum Teil bereits durch geodätische Messsysteme wie Tachymeter und Theodolite bekannt. Nähere Informationen zu diesen Fehlern kann der Fachliteratur entnommen werden (Deumlich und Staiger, 2002). Die aufgeführten, gerätespezifischen Fehler können durch eine Kalibrierung des Laserscanners berücksichtigt werden. In Rietdorf (2005) wird ein Verfahren zur Kalibrierung eines Laserscanners mittels Ebenen vorgestellt. Ein alternatives Verfahren wird in Schneider (2008) vorgestellt. Hier wird eine kombinierte Bündelblockausgleichung für Bild- und Laserscandaten verwendet.

Die Kalibrierung eines Laserscanners wird vom Hersteller vorgenommen. Eine Manipulation oder Aktualisierung dieser ist für gewöhnlich nicht durch einen Nutzer vorgesehen.

Zur Überprüfung eines Laserscanners werden daher von Gottwald u. a. (2009) und Heister (2006) Feldprüfverfahren vorgeschlagen. Diese ermöglichen eine Überprüfung eines Laserscanners mit überschaubarem Aufwand.

Neben den Gerätefehlern sind Umgebungseinflüsse sowie objektspezifische Einflüsse auf die Messgenauigkeit bekannt. Zu den Umgebungseinflüssen zählen die Temperatur und der Luftdruck. Diese wirken sich auf die elektronische Distanzmessung aus (Deumlich und Staiger, 2002). Weitere Einflüsse können durch das Umgebungslicht verursacht sein (z.B. künstliche Beleuchtung oder komplett dunkle Umgebung).

Bei der Distanzmessung durch einen Laser spielt die Größe des Laserspots eine wesentliche Rolle. Mit zunehmender Entfernung zum Messobjekt wird der Spot aufgrund der Strahldivergenz größer. Bei Aufnahmeentfernungen von  $> 100$  m kann die Spotgröße bereits mehrere *cm* betragen (3 cm bei 150 m beim Laserscanner Z&F 5010C).

Die vom Laserscanner gemessene Entfernung wird aus der mittleren Entfernung der vom Laserspot abgetasteten Fläche am Objekt bestimmt. Unterschieden werden können hierbei drei Fälle.

Ein Idealfall stellt ein nahezu rechtwinklig auftreffender Laserstrahl dar. In diesem Fall wird durch den Spot eine kreisförmige Fläche abgetastet. Bei schrägen Auftreffwinkeln wird diese Fläche zunehmend elliptischer. In Kern (2003) konnte für diesen Fall nachgewiesen werden, dass aufgrund der Verformung der Energiewellenfront das reflektierte Signal von dem näher gelegenen Reflexionsanteilen dominiert wird und somit eine zu kurze Strecke gemessen wird. Laut Gordon (2008) tritt hypothetisch aufgrund der Ellipsenexzentrizität ein weiterer Effekt auf, der zu einer zu lang gemessenen Strecke führt. Die Ellipsenexzentrizität beschreibt den Versatz zwischen Schwerpunkt der Ellipse und Durchstoßpunkt der Achse des Laserlichtkegels.

Neben der systematischen Verfälschung der Distanz führt ein schräger Auftreffwinkel zu einem höheren Rauschen der Distanzmessung. In Soudarissanane u. a. (2011) konnte dieser Effekt bei 3D-Scans von Innenräumen nachgewiesen werden.

Ein dritter Fall ist ein Mischsignal, welches an Diskontinuitäten auftreten kann. Hierbei fällt der Laserspot zum Teil auf ein Objekt im Vordergrund und zum Teil auf ein Objekt im Hintergrund. Als Ergebnis ist im 3D-Scan an Objektkanten ein so genannter Kometenschweif zu beobachten.

Neben dem Auftreffwinkel spielen die Reflektionseigenschaften eine weitere Rolle bei der Distanzmessung. In Kern (2003) wird ein Zusammenhang zwischen der Reflektanz einer Oberfläche und dem Messrauschen sowie eines systematischen Streckenfehler untersucht. Es konnten jedoch keine signifikanten Abweichungen aufgrund der Oberflächenfarbe festgestellt werden. In späteren Untersuchungen konnten Einflüsse aufgrund der Reflek-

tanz von Oberflächen nachgewiesen werden. So konnten Sternberg u. a. (2005) für einen Laserscanner eine Änderung des Rauschverhaltens in Abhängigkeit zur Reflektanz der Oberfläche beobachten. Weiterhin wurden Abweichungen der Distanzmessung in Abhängigkeit zur Reflektanz der Oberfläche festgestellt. Bei dieser Untersuchung ergaben sich Abweichungen von leicht über 5 mm zwischen zwei Farben in einem Messabstand von 5 m. Eine Abhängigkeit zwischen Reflektionsverhalten und Rauschen der Distanzmessung wurde in zahlreichen Untersuchungen bestätigt (Lambertus u. a., 2017; Soudarissanane u. a., 2011; Soudarissanane u. a., 2009; Erić u. a., 2017).

Eine allgemeinere Beschreibung des Rauschverhalten gelang Wujanz u. a. (2017). Hier wurde ein Zusammenhang zwischen Intensität des reflektierten Laserlichts und Standardabweichung der Distanzmessung nachgewiesen.

### 2.2.5 Das Iterative Closest Point Verfahren (ICP)

Erste Publikationen zum ICP Algorithmus stammen von Besl und McKay (1992), Chen und Medioni (1992) und Zhang (1992). Der von Besl und McKay (1992) publizierte Algorithmus dient zur Registrierung zweier Punktwolken. Dies können 2D- oder 3D-Punktwolken sein. Gesucht wird die Transformation der Punktwolke  $\mathbf{P}$  auf  $\mathbf{M}$ , die die Abstände zwischen  $\mathbf{P}$  und  $\mathbf{M}$  minimiert (siehe Abbildung 2.9). Hierzu wird zu einem Punkt  $\mathbf{p}_i$  aus  $\mathbf{P}$  ein korrespondierender Punkt  $\mathbf{m}_i$  aus  $\mathbf{M}$  gesucht, der den minimalen Abstand zum transformierten Punkt  $\mathbf{p}_i(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \mathbf{t} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_i$  aus  $\mathbf{P}$  hat.

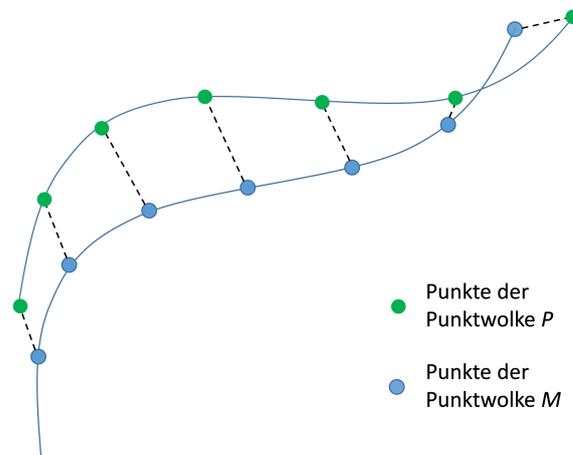


Abbildung 2.9: Minimierung des Abstandes zwischen zwei Punktgruppen, die Abstände zwischen Punktpaaren werden minimiert.

Ziel ist eine Minimierung der Abstände zwischen den Punkten der transformierten Punktwolke  $\mathbf{P}(\mathbf{R}, \mathbf{X}_0)$  und  $\mathbf{M}$ . Unbekannt sind hierbei die Transformationsparameter  $\mathbf{R}$  und  $\mathbf{X}_0$ .

Die unbekanntenen Transformationsparameter werden in einem iterativen Prozess bestimmt. Nach jedem Update von  $\mathbf{R}$  und  $\mathbf{X}_0$  müssen die Punktpaare  $\mathbf{p}_i$  und  $\mathbf{m}_i$  neu bestimmt werden. Aus den neuen Punktpaaren resultiert ein neues Minimierungsproblem und somit ein Update der Parameter  $\mathbf{R}$  und  $\mathbf{X}_0$ . Ein Abbruch des iterativen Verfahrens erfolgt nach Erreichen eines vorab definierten Abbruchkriteriums. Dies kann z.B. das Er-

reichen einer maximalen Iterationszahl sein. Ein anderes Abbruchkriterium kann sich aus der Änderung der Standardabweichung von einer zur nächsten Iteration ergeben.

Alternativ zur Minimierung zwischen Punktpaaren schlagen Chen und Medioni (1992) die Minimierung von Punkten zu Ebenen vor. Hierbei wird  $\mathbf{M}$  nicht als Punktwolke, sondern als Oberfläche  $\mathbf{O}$  betrachtet. Somit fordert Chen und Medioni (1992) die Minimierung zwischen einem Punkt  $p_i(\mathbf{R}, \mathbf{X}_0)$  zur Oberfläche  $\mathbf{O}$  (siehe Abbildung 2.10).

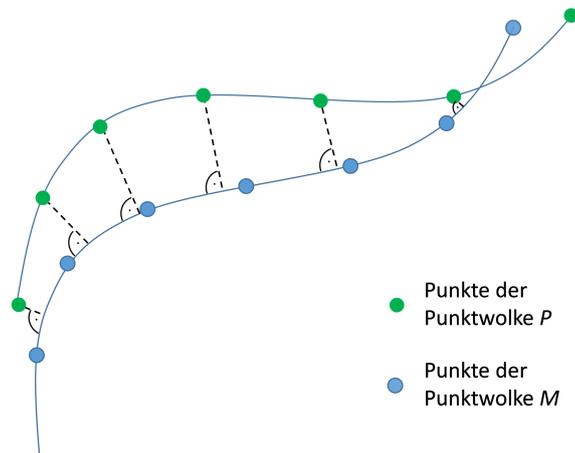


Abbildung 2.10: Minimierung des Abstandes zwischen zwei Punktwolken. Die Abstände zwischen Punkten und Geraden (im 2D Fall) oder Oberfläche (3D Fall) werden minimiert.

Seit der Erstveröffentlichung des ICP Algorithmus in Besl und McKay (1992) wurden zahlreiche Modifikationen dieses Verfahrens publiziert. Die Ziele sind beispielsweise die Steigerung der Robustheit, z.B. durch eine Verfeinerung der Auswahlstrategie von Punktpaaren zwischen  $\mathbf{P}$  und  $\mathbf{M}$  oder die Steigerung der Performance (Rusinkiewicz und Levoy, 2001), z.B. durch Reduktion der Punktpaare durch zufällige Wahl von  $n$  Punkten aus  $\mathbf{P}$ . Ein Beispiel für ein robusteres Verfahren wird in Weik (1997) vorgestellt, in welchem Zusatzinformationen, wie der Farbwert oder der Gradient eines Punktes, mit einbezogen werden. In Fitzgibbon (2003) wird alternativ eine Gewichtung der Abstände zwischen Punktpaaren vorgenommen (mittels Huber-Schätzer), um die Robustheit zu steigern. In Chetverikov u. a. (2002) werden zur Bestimmung der Transformationsparameter nur die  $n\%$  der besten Punktpaare zugelassen.

Der ICP Algorithmus ist inzwischen zu einem Standardansatz zur Registrierung von Punktwolken geworden. Aktuelle Forschungsansätze, die auf einer Abwandlung des ICP Algorithmus basieren, haben u.a. das Ziel der Registrierung von nicht starren Punktwolken zueinander (siehe Kapitel 2.4) oder das Ziel der Identifikation von deformierten Bereichen (Wujanz, 2016).

## 2.3 Windkraftanlagentechnik

Die Windkraft soll bereits 1700 v. Chr. zur Bewässerung in Mesopotanien verwendet worden sein (Gasch und Twele, 2010). Eine urkundlich belegte Nutzung gibt es im 7. Jh. n Chr. für die Nutzung von Windkraft in Afghanistan. Diese ersten Windräder hatten eine

vertikale Drehachse. In Europa entstanden die ersten Windräder mit horizontaler Achse im 12. Jh. n. Chr. (Gasch und Twele, 2010). Seit dieser Zeit wurden verschiedene Anwendungsbereiche für die Windkraft entwickelt. Erste Mühlen wurden zum Mahlen von Mehl oder zum Pumpen von Wasser verwendet. Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts wird die Windkraft zur Erzeugung von Strom verwendet. Diese Technik konnte sich jedoch lange nicht gegen alternative Energiequellen durchsetzen. Erst nach der Ölkrise im Jahre 1972 begann die Entwicklung moderner Windkraftanlagen. Nach dieser entstanden in mehreren Ländern staatlich geförderte Versuchsanlagen. Pioniere in der modernen Windkraftforschung sind Dänemark und die USA. In der Tabelle 2.1 ist eine Übersicht staatlich geförderter Windkraftanlagen dieser Zeit zu sehen.

Windkraftanlage (Land)	Rotor- durchmesser [m]	Nenn- leistung [MW]	Jahr der Inbetrieb- nahme
Nibe 1 (Nibe, DK)	40	0,63	1979
Nibe 2 (Nibe, DK)	40	0,63	1979
25m-HAT (Petten, NL)	25	0,4	1981
5x MOD-0 (Sandusky, Ohio; Clayton, New Mexico; Culebra, Puerto Rico; Block Island, Rhode Island; Kuhuku Point, Oahu-Hawaii; USA)	38,1	0,1-0,2	seit 1975
WTS-75 (Näsudden, S)	38,1	0,1-0,2	seit 1975
WTS-3 (Marglarp, S)	75	2	1983
WTS-4 (Medicine Bow, Wyoming, USA)	78,1	3	1982
MOD-1 (Boone, North Carolina, USA)	61	1	1979
5x MOD-2 (3 in Goodnoe Hills, Washington State; Medicine Bow, Wyoming; Solano, California, USA)	97,5	3,2	1987
ÉOLE (Cap Quebec, CND)	100	4	1988
GROWIAN (Kaiser-Wilhelm-Koog, D)	100,4	3	1982

Tabelle 2.1: Auswahl staatlich geförderter Versuchsanlagen (Schaffarczyk, 2016)

Ein Großteil der staatlich geförderten WEAs scheiterten. Viele von ihnen kamen aufgrund von technischen Problemen lediglich auf wenige hundert Betriebsstunden (Gasch und Twele, 2010). Eine Ausnahme war die WTS-3 die über 20000 Betriebsstunden ins Netz speiste.

Erfolgreich waren kleinere kommerzielle Anlagen mit Rotordurchmessern zwischen 12m und 15m. Zu den Pionieren gehörte u.a. Vestas (Gasch und Twele, 2010). Seit diesen ersten Anlagen wurden diese kontinuierlich weiterentwickelt. Ein deutlicher Trend ist bei der Größe der Anlagen zu sehen. Der Rotordurchmesser neu installierter Anlagen hat sich

von durchschnittlich 15 m im Jahre 1985 auf bis zu 160 m im Jahre 2016 weiterentwickelt.

### 2.3.1 Bauformen von Windkraftanlagen

Als ein primäres Unterscheidungsmerkmal zwischen Windkraftanlagen kann die Ausrichtung der Rotationsachse herangezogen werden. Unterschieden werden kann zwischen einer vertikalen Achse (wie beim Darrieusrotor) oder einer horizontalen Auslegung der Achse. Zur Stromerzeugung werden primär Windkraftanlagen mit horizontaler Achse verwendet. Lediglich bei Kleinanlagen sind auch Windkraftanlagen mit vertikaler Achse verbreitet (Jüttemann, 2018). Großanlagen mit einer Leistung von mehr als 1 MW sind nahezu ausschließlich Anlagen mit horizontaler Achse. Eine Ausnahme war die Forschungsanlage ÉOLE. Diese wurde als Darrieusrotor erbaut.

Im Folgenden werden daher nur Anlagen mit horizontaler Achse näher betrachtet. Ein primäres Unterscheidungsmerkmal ist die Anzahl der Rotorblätter sowie die Art der Drehzahlregelung. Die vorherrschende Anzahl an Rotorblättern ist drei. Dies stellt einen Kompromiss zwischen statischen (Belastung der Konstruktion aufgrund der Verteilung von Massen und Luftkräften), preislichen und aerodynamischen Aspekten dar.

In der Forschung werden neben den dreiflügeligen Anlagen, auch solche mit einem oder zwei Rotorblättern untersucht. Diese haben gegenüber einer dreiflügeligen Anlage einen deutlichen preislichen Vorteil. Sie erfordern jedoch einen höheren konstruktiven Aufwand aufgrund zusätzlicher Dämpfungselemente, wie z.B. einem zusätzlichen Schlaggelenk an der Blattwurzel.

Von der Anzahl der Rotorblätter indirekt abhängig (Gasch und Tvele, 2010) ist die Schnelllaufzahl einer WEA. Je mehr Rotorblätter eine WEA besitzt, desto geringer ist die Drehzahl.

Ein weiteres konstruktives Merkmal ist die Drehzahlregelung einer WEA. Es kann unterschieden werden zwischen Stall-geregelten und Pitch-geregelten Anlagen.

Bei Stall-geregelten Anlagen wird die Leistungsbegrenzung durch Strömungsablösung an den Rotorblättern erzielt, eine Verstellung des Blattwinkels ist somit nicht erforderlich. Bei Pitch-geregelten Anlagen wird die Leistungsbegrenzung durch aktive Verstellung der Rotorblätter erzielt.

Diese Anlagen verfügen somit über einen zusätzlichen Verstellmechanismus für die Rotorblätter um die Längsachse. Bei größeren Stall-geregelten WEAs ist der Stall-Effekt zur Regelung aufgrund der Trägheit dieses Verfahrens nicht ausreichend. Um die Regelung über den Stall-Effekt zu gewährleisten ist bei diesen Anlagen ebenfalls eine Verstellung der Rotorblätter erforderlich. Diese Form der Regelung wird als Aktiv-Stall bezeichnet.

### 2.3.2 Kräfte und Schwingungen an WEAs

Eine WEA ist ein hoch dynamisches Bauwerk, welches über die gesamte Lebensdauer starken Belastungen ausgesetzt ist. Eine Übersicht über einwirkenden Kräfte auf WEAs gibt Schaffarczyk (2016):

- Belastung durch Winddruck
- Belastungen durch Extremwindereignisse (50-Jahres-oder 100-Jahres-Böe)

- Änderung der Anströmgeschwindigkeit und -richtung durch die Verteilung der Windgeschwindigkeiten über der Höhe (Windhöhenprofil)
- Belastung durch kurzfristige Änderung der Windgeschwindigkeit (Böen)
- Belastung durch Turbulenzen
- Belastung durch Vorbeigang eines Rotors am Turm (Turmvorstau)
- Belastung durch wechselnde Druck- und Zug-Belastungen aufgrund des Eigengewichtes
- Beschleunigungskräfte des Blatteigengewichtes
- Belastungen durch Wechsel der Biegebelastung
- Belastungen durch schnelle Änderungen des Betriebszustandes (Abbremsen des Rotors, Windrichtungsnachführung, Notabschaltung)
- Unwuchten bei Rotorlagerung, Getriebe und/oder Generator
- Ungleichmäßiger Eisansatz
- Belastung durch Wellenkräfte (bei offshore WEAs)

Diese unterschiedlichen Krafteinflüsse führen zu quasi statischen, periodischen und zufälligen Verformungen der Rotorblätter und des Turms einer WEA. Um die Belastungen und die Belastungsübertragung zu mindern sind daher Dämpfungselemente erforderlich. Ein Beispiel hierfür sind die Übertragung von Schwingungen vom Rotorblattsystem auf den Generator. Hier gilt es die Krafteinwirkung auf den Triebstrang zu minimieren. Mögliche Dämpfungsverfahren sind z.B. hydraulische Systeme oder Dämpfungselemente aus Elastomere (ESM, 2018).

Schwingungen, die aufgrund von periodischer Anregung der Rotorblätter verursacht werden, sind:

- periodische Durchbiegung der Rotorblätter
- Torsionsschwingungen der Rotorblätter
- Triebstrangschwingung
- Gondel Wirl-Schwingung (zwischen Rotorblattsystem und Gondel)

Periodische Anregungen entstehen beispielsweise durch den Vorbeigang am Turm oder durch das vertikale Windprofil. Dies sind Anregungen, die periodisch bei jeder Umdrehung für jedes Rotorblatt auftreten. Somit ist eine dominierende Periodenlänge einer periodischen Schwingung gleich der Umlaufdauer der WEA. Im Regelbetrieb werden typischerweise 15 Umdrehungen in einer Minute erreicht. Eine Umdrehung benötigt somit ca. 4 Sekunden. Dies bewirkt eine Schwingung mit 0,25 Hz. Da diese Anregungen jedes Rotorblatt betreffen, kann als weitere dominierende Frequenz ein Vielfaches dieser Frequenz angenommen werden. Bei dreiflügeligen Anlagen können diese Frequenzen mit  $3 \cdot 0,25 \text{ Hz} = 0,75 \text{ Hz}$  und  $6 \cdot 0,25 \text{ Hz} = 1,5 \text{ Hz}$  abgeschätzt werden.

Für die Erfassung von periodischen Deformationen an WEAs bedeutet dies, dass mit einer Frequenz, die ca. 5-10 Mal höher als die zu erfassende Frequenz ist, abgetastet werden muss (Empfehlung nach Heunecke u. a. (2013)). Anhand der obigen Annahmen ergibt sich eine Frequenz von 15 Hz, die für die Erfassung erstrebenswert ist.

Mit dieser Frequenz sollte idealerweise eine kontinuierliche Abtastung erfolgen. Aufgrund der hohen Dynamik ist weiterhin die Erfassungsdauer von Bedeutung. Soll beispielsweise ein Blattwinkel bestimmt werden, so darf die Schlagbewegung nicht außer Acht gelassen werden. Bei einer Amplitude von 20 cm und einer Frequenz von 0,75 Hz kann der zurückgelegte Weg, in Abhängigkeit zur Phase der Schwingung, bereits nach 0,01 Sekunden 1 cm betragen. Je nach Blatttiefe kann dies bereits signifikante Winkelfehler bewirken.

## 2.4 Beschreibung und Erfassung von Deformationen

Die Beschreibung von Deformationen ist in vielen Fachdisziplinen erforderlich. Aus diesem Grund wurden in unterschiedlichen Bereichen der Technik eine Vielzahl an Verfahren entwickelt.

In dieser Arbeit wird die Betrachtung der Verformung einer WEA aus Sicht der Geodäsie vorgenommen. Ziel ist es, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem es möglich ist, über Verformungen von Rotorblättern einer WEA quantitative Aussagen zu treffen. Hierfür ist es erforderlich, Lösungen aus anderen Fachbereichen zu betrachten und diese zu einem neuen, innovativen Verfahren zu kombinieren.

In diesem Kapitel wird zunächst die geodätische Betrachtungsweise von Deformationen beschrieben.

Darauf aufbauend werden mögliche Beschreibungen von Verformungen und Verformungsprozessen aufgezeigt und diskutiert (Abschnitt 2.4.2). Es werden dazu Lösungen aus verschiedenen technischen Bereichen, wie der Computer-Vision, der Medizin oder der Strukturmechanik aufgegriffen.

### 2.4.1 Geodätische Überwachungsmessungen

Das Ziel von geodätischen Überwachungsmessungen ist die „Feststellung von Bewegungen und Verformungen eines Messobjektes“ (DIN 18709-2). Dazu werden in der Geodäsie verschiedenste Messverfahren zur Bestimmung von Deformationen bzw. Deformationsprozessen eingesetzt. Hierzu gehören sowohl die klassischen, geodätischen Messverfahren, wie die Tachymetrie und das Nivellement, als auch Dehnungsmessungen mit Dehnungsmessstreifen oder Distanzmessungen mittels Linearpotentiometer. Eine Deformation kann nach Heunecke u. a. (2013) zum einen durch Starrkörperbewegung und zum anderen durch Verformungen verursacht werden.

- **Starrkörperbewegung**

Eine Starrkörperbewegung ist die Bewegung eines in sich starren Objektes. Die innere Geometrie des Objektes bleibt erhalten. Man unterscheidet Verschiebungen, die durch Translationen beschreibbar sind und Verdrehungen, welche durch Rotationen beschrieben werden können. Eine Deformation aufgrund einer Starrkörperbewegung ist gänzlich durch eine Ähnlichkeitstransformation zu beschreiben.

- Verformungen

Bei einer Verformung handelt es sich um eine Änderung der inneren Geometrie eines Objektes. Es wird zwischen Verzerrung, Biegung und Torsion unterschieden. Bei einer Verzerrung treten Dehnungen und Schubverformungen innerhalb des Objektes auf. Von einer Biegung wird gesprochen, wenn Verformungen senkrecht zu einer Konstruktionsachse auftreten. Die Torsion ist die Verdrehung um eine Konstruktionsachse.

Eine Überwachungsmessung wird in der Regel in mehreren Epochen durchgeführt, wobei die erste Epoche meist als sogenannte Null-Epoche als Referenz dient. Alle zukünftigen Messungen sowie die hieraus ermittelten Verformungen beziehen sich auf diese Null-Epoche.

Ziel ist es, das erwartete Verhalten eines Bauwerkes zu überwachen, um bei Abweichungen ein frühzeitiges Eingreifen zu gewährleisten. Die Notwendigkeit der Überwachungsmessungen bei Rotorblättern wird durch die Zielsetzungen, die Heunecke u. a. (2013) in folgenden Stichworten zusammenfasst (gekürzt), deutlich:

- Nachweis der Funktions- und Standsicherheit
- Erfassung von Veränderungen zur Vermeidung von Gefährdungen des Messobjektes und der Umgebung
- Beweissicherung zur Klärung der Ursachen von Schäden
- Möglichkeit der Prognose des mutmaßlichen Verhaltens
- Überprüfung von Konstruktions- und Materialeigenschaften
- Erkenntnisgewinn für vergleichbare Messobjekte

Aus den Zielsetzungen lassen sich für das Beispiel WEA bereits konkrete Anwendungsszenarien für Überwachungsmessungen ableiten. Dieses sind Messungen in der Entwicklungsphase eines neuen Modells einer WEA oder Überwachungsmessungen an bestehenden Anlagen. Messungen an Prototypen dienen vor allem dem Zwecke des Erkenntnisgewinns, um das tatsächliche Verhalten einer WEA mit dem erwarteten Verhalten zu vergleichen, wohingegen Messungen an Bestandsanlagen dem Nachweis der Standsicherheit dienen. Beides wird bereits an WEAs durchgeführt. Die Überwachung der Rotorblattdeformationen sind lediglich unter Einschränkungen möglich. Bestehende Verfahren werden im Kapitel 2.5 vorgestellt und diskutiert.

Die Beschreibungen von Deformationen oder Deformationsprozessen lassen sich Einteilen nach der Art der Deformation (Starrkörperbewegung oder Verformung) und in Hinblick auf die Art der Beschreibung der Deformation. Unterschieden werden vier Auswertemodelle. Diese sind mit ihren Eigenschaften in Tabelle 2.2 dargestellt.

Es wird deutlich, dass je nach Auswertemodell unterschiedliche Ansprüche an das Messobjekt und die Informationen über das Messobjekt gestellt werden. Bei dem statischen und dem Kongruenzmodell muss sich das Objekt zum Zeitpunkt der Messung hinreichend in Ruhe befinden. Eine zeitliche Abhängigkeit wird nicht betrachtet. Bei dem kinematischen und dynamischen Modell wird hingegen eine zeitliche Änderung modelliert.

Deformationsmodell	Kongruenzmodell	kinematisches Modell	statisches Modell	dynamisches Modell
Faktor Zeit	keine Modellierung	Deformationen als Funktionen der Zeit	keine Modellierung	Deformationen als Funktion der Zeit und der Belastung
verursachende Kräfte	keine Modellierung	keine Modellierung	Deformation als Funktion der Belastung	
Zustand des Objekts	hinreichend in Ruhe	permanent in Bewegung	unter Belastung hinreichend in Ruhe	permanent in Bewegung

Tabelle 2.2: Auswertemodelle von Überwachungsmessungen (Heunecke u. a., 2013)

Ein weiteres Merkmal bezieht sich auf die Kräfte, die auf das Messobjekt wirken. Beim statischen Modell werden die auftretenden Verformungen in einen funktionalen Zusammenhang mit den auftretenden Kräften gebracht. Ein Strukturmodell des Objektes muss demnach vorliegen. Bei der dynamischen Betrachtung kann alternativ zu einem Strukturmodell ein Verhaltensmodell vorliegen, welches die Übertragung von Eingangs- zu Ausgangsgrößen beschreibt ohne eine nähere physikalische Beschreibung des Vorgangs.

Dem gegenüber sind das Kongruenzmodell und das kinematische Modell rein deskriptiv. Es werden keine Kenntnisse über die einwirkenden Kräfte vorausgesetzt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine zeitliche Beschreibung der Rotorblätter einer Windkraftanlage. Eine dynamische Modellierung ist aufgrund der komplexen Krafteinflüsse (Gravitation, turbulente Windfelder, Rotationskräfte u. a.) sowie dem komplexen Strukturverhalten praktisch kaum zu realisieren. Neben den geometrischen Messungen müssten zusätzlich Kenntnisse über die Windverhältnisse sowie detaillierte Kenntnisse über den Aufbau der Rotorblätter sowie der WEA im Ganzen vorliegen. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit ein kinematisches Modell verfolgt. Bei kinematischen Modellen sind weitaus weniger Informationen über das Messobjekt sowie die einwirkenden Kräfte erforderlich. Es wird lediglich eine Vorstellung über die Art der auftretenden Deformationen benötigt. Diese lassen sich typischerweise in Starrkörperbewegungen und Verformungen unterteilen.

#### 2.4.2 Beschreibung von Verformungen

In den meisten Anwendungen kann lediglich die Oberfläche eines Objektes erfasst und zur Beschreibung seines Verhaltens genutzt werden. Hierzu muss die Verformung der Oberfläche beschrieben werden. Je nach Art der Oberfläche und Anwendung können die Eigenschaften der Oberfläche genutzt werden, um mögliche Verformungen einzuschränken. Hierzu wurde eine Vielzahl von Verfahren entwickelt. Als Grundlage dieser Verfahren dienen Objektmodelle, die die Oberfläche beschreiben. Abhängig von der Anwendung können dies sowohl Triangulationen als auch Parameteroberflächen wie Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) oder auch Thin-Plate-Splines sein. Basierend auf der Objektrepräsentation wird ein Verformungsmodell beschrieben. Für Echtzeitanwendungen kann dies

aus wenigen Parametern bestehen. In Steimle u. a. (2013) wird beispielsweise ein Modell mit 15 DoF vorgestellt. Dieses Modell dient zur Beschreibung einer verformten, ebenen Oberfläche. Ziel dieses Vorhabens ist die Nutzung eines Blatt Papiers als Display. Die Verformungen werden durch Funktionen beschrieben, die die Durchbiegung der Oberfläche beschreiben. In Abbildung 2.11 sind die verwendeten Freiheitsgrade mit ihren Auswirkungen auf die Verformung dargestellt.

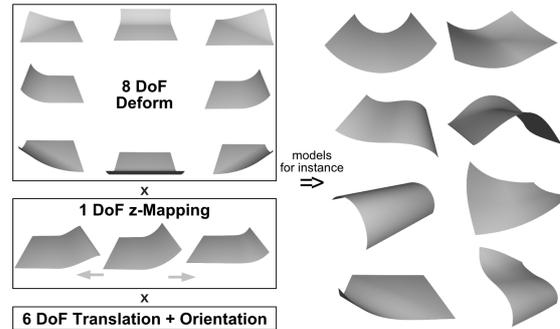


Abbildung 2.11: Darstellung der verwendeten Freiheitsgrade für die Beschreibung von Deformationen eines Blattes Papier (Steimle u. a., 2013)

Im Bereich des Motion-Tracking werden u.a. Verfahren zur Erfassung der Bewegung aus Silhouetten verwendet (Rosenhahn und Klette, 2004; Corazza u. a., 2006). Diese Ansätze sind interessant, da auf eine Markierung des Messobjektes verzichtet werden kann. Bei diesen Ansätzen soll auf Basis einer Silhouette auf die Bewegung geschlossen werden. Dies erfordert ein Objektmodell, welches die Bewegungen des menschlichen Körpers repräsentieren kann. Corazza u. a. (2006) verwenden bedingte Transformationen zwischen einzelnen starren Segmenten eines 3D-Modells einer Person. Ein Segment ist beispielsweise die Hüfte oder der Oberschenkel. Durch Einführung von Bedingungen zwischen diesen Segmenten konnte das Bewegungsmodell für einen menschlichen Körper mit 33 DoF beschrieben werden. Um ein 3D-Modell zu bestimmen, verwenden Corazza u. a. (2006) die visuelle Hülle (eng.: visual hull) (siehe auch Laurentini (1994), Laurentini (1995) und Wong (2001)), die aus mehreren Kamerabildern extrahiert wird.

Ein allgemeinerer Ansatz ist die Beschreibung der Verformungen durch die Stützstellen der Oberfläche. Im Fall einer Dreiecksvermaschung sind dies die Eckpunkte der Dreiecke. Die Anzahl der Freiheitsgrade ist abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall. In Agudo u. a. (2012) wird beispielsweise eine Translation je Stützpunkt eingeführt. Alternativ können lokale Deformationen durch Rotationen und Translationen beschrieben werden bis hin zu affinen Transformationen mit 12 DoF (Li u. a., 2009; Allen u. a., 2003; Amberg u. a., 2007).

Ein Problem bei diesem Vorgehen ist die wachsende Anzahl der Unbekannten mit zunehmenden Detaillierungsgrad der Oberfläche. Um dieses Problem zu mindern, unterteilten Szeliski und Lavallée (1994) den Objektraum in einzelne Voxel eines Octrees. Die Deformationen von Punkten innerhalb eines Voxels werden durch die Eckpunkte des umschließenden Voxels beschrieben. Die Verwendung eines Octrees hat den Vorteil, dass bei Bedarf die Voxelgröße angepasst werden kann. Ähnliche Ansätze werden in Cheng u. a. (2010), Han (2009) und Stefanescu u. a. (2004) vorgestellt. Bei diesen wird der Objek-

traum in ein gleichmäßiges Raster unterteilt.

Eine Alternative zur Unterteilung des Objektraums ist die Verwendung der Objektgeometrie. In Li u. a. (2008), Sumner u. a. (2007), Sánta und Kato (2018) und Papazov und Burschka (2011) wird die Deformation über einen Deformationsgraphen beschrieben. Der Deformationsgraph ist eine grob aufgelöste Vermaschung des ursprünglichen Objektes (Abbildung 2.12). Die Grundidee ist, dass zur Beschreibung einer Verformung nicht der volle Detailumfang eines Objektes erforderlich ist. Weiterhin wird bei diesem Vorgehen lediglich der Objektbereich parametrisiert, welcher Objektinformationen beinhaltet. Für einen Objektpunkt ergibt sich die Verformung aus dem gewichteten Mittel der benachbarten Knoten des Deformationsgraphen:

$$\tilde{\mathbf{p}}_i = \sum_{j=1}^n w_j(\mathbf{p}_i) [\mathbf{R}_j(\mathbf{p}_i - \mathbf{x}_j) + \mathbf{x}_j + \mathbf{t}_j] \quad (2.71)$$

Hierbei ist  $w_j(\mathbf{p}_i)$  die Gewichtung des Knotens  $j$  an dem Punkt  $\mathbf{p}_i$ . Die Parameter der Transformation sind in der Matrix  $\mathbf{R}$  und dem Vektor  $\mathbf{t}$  enthalten. Verwendet wurde in diesem Beispiel eine affine Transformation mit 12 DoF.

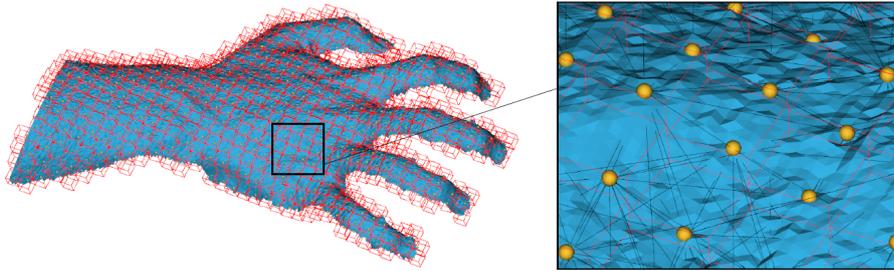


Abbildung 2.12: 3D-Modell einer Hand mit eingezeichnetem Deformationsgraphen. Die gelben Punkte sind die Stützstellen des Deformationsgraphen (Papazov und Burschka, 2011).

Ein grundlegendes Problem bei der Beschreibung von Verformungen ist die Einschränkung der möglichen Verformungen. An realen Objekten bestehen Beziehungen zwischen einzelnen Punkten einer Oberfläche. Diese Beziehungen bewirken, dass Punkte in einer Nachbarschaft sich gegenseitig beeinflussen und sich nicht unabhängig voneinander bewegen. Um diese gegenseitige Beeinflussung zu berücksichtigen, werden in Verformungsmodellen Regularisierungen und Glattheitsbedingungen eingeführt.

Die Art der Regularisierung ist ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen den einzelnen Verfahren.

Ein mögliches Vorgehen ist die Berücksichtigung von Materialeigenschaften, indem z.B. Spannungen und Dehnungen minimiert werden (Agudo u. a., 2012; Tsap u. a., 1998).

Dieses Vorgehen ist insbesondere bei vorhandenen Vorinformationen zur Art der Verformung aufgrund bekannter Material- oder geometrischer Eigenschaften interessant.

Bei medizinischen Anwendungen können dies beispielsweise Informationen zu Eigenschaften des Gewebes sein. Eine einfache Unterteilung ist hier die Einteilung zwischen

Weichgewebe und Knochen. Jäger u. a. (2006) nutzen diese Klassifizierung für die Registrierung von Computertomographie-Daten.

Ein weiteres Beispiel liefern Salzmann u. a. (2007), die u.a. durch die Einschränkung der möglichen Verformung eines Objektes dessen Verformung monokular bestimmen konnten. Hierzu schlagen sie die Einführung einer Streckentreue für die Dreiecksseiten der Vermaischung vor. Es konnte gezeigt werden, dass durch diese Einschränkung die Verformung eines Blattes Papier oder eines Stoffes mit nur einem Bild beschrieben werden kann.

Eine Alternative ist die Regularisierung über die Parameter der Verformung. Bei einer Parametrisierung in einem regelmäßigen Gitter kann dies durch Glattheitsbedingungen in den Koordinatenachsen  $X, Y, Z$  erfolgen.

Bei der Verwendung eines Deformationsgraphen kann die Regularisierung nachbarschaftsbezogen erfolgen. Li u. a. (2008) und Sumner u. a. (2007) führen hierzu Energieterme ein, die in einer Nachbarschaft ähnliche Transformationen bevorzugen.

Li u. a. (2008) präferieren hierüber hinaus eine Ähnlichkeitstransformation gegenüber einer affinen Transformation.

### 2.4.3 Die Balkentheorie

Die Balkentheorie beschäftigt sich mit der Verformung von langgestreckten, tragenden Objekten (Balken) (Gross u. a., 2016). Diese werden in der Mechanik und Statik als Grundelemente verwendet, die auf unterschiedliche Weise belastet werden können. Mögliche Belastungen sind Zug, Druck, Biegung und Torsion.

In der Statik wurden zu diesen Belastungsfällen spezielle Modelle entwickelt. Belastungen auf Zug und Druck lassen sich bspw. durch einen Zugstab beschreiben. Biegungen werden in der Theorie des Biegebalkens zusammengefasst.

Für die Beschreibung von Balken werden bei diesen Theorien Verallgemeinerungen und Vereinfachungen angenommen, um die Modellierung zu erleichtern. Als bekannteste Annahmen können die von Bernoulli aufgeführt werden. Diese sind:

- ein Querschnitt, der vor einer Verformung senkrecht zur Balkenachse steht, steht auch noch nach einer Verformung senkrecht zur Balkenachse
- Querschnitte sind eben und bleiben auch nach einer Verformung eben und unverformt

Die Euler-Bernoulli-Balkentheorie basiert auf diesen Annahmen. Eine Erweiterung dieses „Bernoulli-Balkens“ ist der „Timoshenko-Balken“, der eine Schubverformung berücksichtigt. Beim Timoshenko-Balken wird eine zusätzliche Verkippung  $\theta$  der verformten Profile zugelassen. Die Querschnitte sind somit nach einer Verformung nicht mehr rechtwinklig zur Balkenachse.

Dieser Unterschied zum Bernoulli-Balken ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

Um die Verformungen eines Balkens zu bestimmen, ist der Verlauf der Balkenachse entscheidend. Die Balkenachse (auch neutrale Faser genannt) ist eine virtuelle Bezugsachse, auf die sich Verformungen beziehen. Bei einem Euler-Bernoulli-Biegebalken ist diese Achse streckentreu bei Verformung.

Der Achsverlauf kann bei homogenen, isotropen Materialien aus dem Querschnitt bestimmt werden. Die neutrale Faser verläuft in diesem Fall durch den Schwerpunkt der

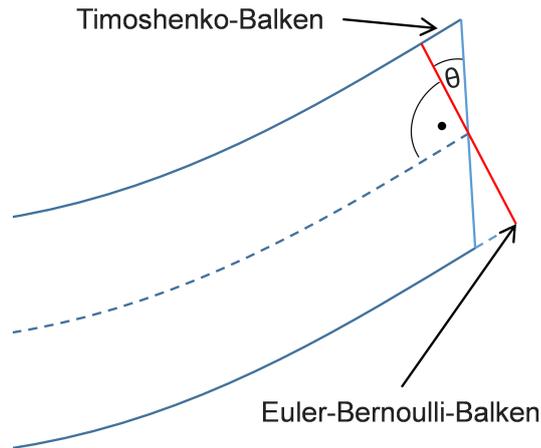


Abbildung 2.13: Unterschied zwischen einem Timoshenko-Balken und einem Euler-Bernoulli-Balken

Querschnitte. Der Schwerpunkt  $C$  kann bei einem gegebenen Polygon aus den Eckpunkten bestimmt werden:

$$X_C = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2.72)$$

$$Y_C = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2.73)$$

Hierbei ist  $A$  die Fläche des Polygons, die sich aus der Gaußschen Flächenformel ergibt:

$$2A = \sum_{i=1}^n x_i (y_{i+1} - y_{i-1}) \quad (2.74)$$

Hierbei gilt  $y_0 = y_n$  und  $y_{n+1} = y_1$ .

In der Mechanik und Statik sind in erster Linie die Verformungen bei gegebenen Kräften und Materialeigenschaften von Interesse. Wird die Verformung als gegeben bei unbekanntem Krafteinfluss oder Materialeigenschaften angenommen, so spricht man von einem inversen Problem. In Neitzel u. a. (2014) wird die Bestimmung des Elastizitätsmoduls auf Basis eines Euler-Bernoulli Biegebalkens vorgestellt. Inverse Probleme sind im Allgemeinen als schlecht gestellte Probleme bekannt. Dies wird insbesondere bei der Bestimmung von Kräften, die zur Verformung eines Objektes geführt haben, deutlich. Beispielsweise kann die Durchbiegung eines Balkens durch eine Streckenlast, die über den Balken verteilt angreift, oder eine Punktlast, die am Ende eines Balkens angreift, verursacht werden.

Somit sind Näherungen und Regularisierungen bei der Bestimmung von einwirkenden Kräften erforderlich (Li, 2005).

#### 2.4.4 Laserscanning zur Deformationserfassung

Im Bereich des Laserscannings wurden in den letzten Jahren neue Methoden zur Erfassung von Deformationen erforscht und weiterentwickelt.

Diese Arbeiten lassen sich anhand der Art der zu beschreibenden Deformation klassifizieren. Erfolgt die Deformation hinreichend langsam, so kann sie durch statisches Laserscanning erfasst werden. Bei Deformationen, die schneller ablaufen, muss das kinematische Laserscanning eingesetzt werden. In diesem Kontext wird unter kinematischem Laserscanning die Erfassung eines bewegten Objektes bei ruhendem Laserscanner verstanden. Ein weiterer Unterscheidungspunkt ergibt sich aus der Aufgabenstellung, ob absolute oder relative Deformationen beschrieben werden sollen. Im Folgenden wird an einigen Beispielen die Erfassung von Deformationen mittels Laserscanner vorgestellt.

##### Statisches Laserscanning

Statische Anwendungen für Laserscanning finden u.a. bei Bauwerksüberwachung ihren Einsatz. Hierzu zählen beispielsweise die Erfassung von Staumauern (Eling, 2009; Wang, 2013), Kühltürmen (Ioannidis u. a., 2007), Brücken (Wujanz, 2018; Paffenholz u. a., 2017) oder Schleusen. Die Erfassung einer Windkraftanlage und die hieraus abgeleiteten statischen Verformungen werden in Mitka u. a. (2019) vorgestellt. Es wurde hierbei eine sich im Stillstand befindliche Anlage erfasst. Als Ergebnis der Messung konnten Abweichungen zur geplanten Anlage festgestellt werden. Dies betrifft u.a. die Lage der Rotorblätter untereinander sowie die Neigung der Rotorblattebene.

Weitere Anwendungsfelder ergeben sich bei der Ermittlung des Aushubs im Bergbau (Wujanz, 2016).

Exemplarisch wird das Vorgehen nach Wang (2013) und Wujanz (2016) näher betrachtet. In Wang (2013) wird ein dreistufiges Verfahren zur Erfassung von Deformationen mittels Laserscanning beschrieben. Ziel ist die Bestimmung von absoluten Deformationen eines Bauwerkes. Im ersten Schritt erfolgt eine Registrierung der Scans. Als Eingangsdaten werden zunächst SIFT Punkte (scale-invariant feature transform) (Lowe, 1999) in den Intensitätsbildern der Scans extrahiert und mögliche Matches identifiziert. Zusätzlich werden signalisierte Punkte (Targets), mit den zugehörigen geodätischen Netzmessungen, einbezogen. Die Ergebnisse des ersten Schrittes sind zum einen die registrierten Scans und zum anderen Kalibrierparameter des verwendeten Laserscanners.

In einem zweiten Schritt wird die Grobform des zu erfassenden Objektes als Fläche zweiter Ordnung (z.B. Kugel, Ellipsoid oder Zylinder) bestimmt. Hierbei wird ein automatisches Verfahren zur Formerkennung nach Hesse und Kutterer (2006) verwendet. Anhand der abgeleiteten Grobform erfolgt eine Blockbildung. Hierbei wird das Objekt in Blöcke gleicher Größe zerlegt. Je Block wird ein repräsentativer Punkt mit zugehöriger Varianz abgeleitet. Diese repräsentativen Punkte dienen in einem dritten Schritt zur Feinregistrierung der Punktwolken untereinander. Ein ICP Algorithmus wird hierzu zur Schätzung einer 6-Parameter-Transformation verwendet. Alternativ wird eine Singular Value Decomposition (SVD) zur Schätzung einer 7-Parameter-Transformation untersucht.

Ein Epochenvergleich erfolgte anhand der registrierten Punktwolken.

Als Alternative werden in Wujanz (2016) zwei Verfahren vorgestellt, der ICPprox-Algorithmus und der DefoScan++-Algorithmus. Beide Verfahren haben einen direkten Vergleich zweier Scans als Ziel. Sie unterscheiden sich primär in der Kongruenzanalyse.

Für die Deformationsanalyse erfolgt zunächst eine Grobregistrierung der Punktwolken zueinander. In einem zweiten Schritt werden die Punktwolken in Cluster aufgeteilt. Hierzu dienen Voxel eines Octrees. Für jedes Cluster erfolgt eine Feinregistrierung mittels ICP. Eine Kongruenzanalyse erfolgt für die transformierten Schwerpunkte je Cluster. Das Ziel ist die Identifikation stabiler Cluster. Sind stabile Bereiche identifiziert, erfolgt eine Transformation über alle stabilen Cluster.

Die Verfahren konnten erfolgreich an mehreren Datensätzen evaluiert werden. So konnte beispielsweise die Eignung an dem Beispiel der Deformation eines Gletschers oder der Deformation eines Fahrzeugs im Crashversuch nachgewiesen werden (Wujanz, 2016).

### Kinematisches Laserscanning

Ein weiterer Anwendungsbereich des Laserscannings liegt in der Erfassung von kinematischen Deformationen. Die zulässigen Deformationsgeschwindigkeiten sind abhängig von der Aufnahme­frequenz der eingesetzten Laserscanner und des verwendeten Scan-Modus. Für die Beschreibung von kinematischen Prozessen wird in der Regel der Profil-Modus (2D-Modus) eines Laserscanners genutzt. Die Wiederholrate einer Messung ergibt sich aus der Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels. Bei handelsüblichen Laserscannern, wie dem Z&F Imager 5010C, kann diese bis zu 50 rps (rounds per second) betragen. Die aufdeckbaren Frequenzen am Messobjekt sind demnach  $< 25$  Hz. Für eine signifikante Bestimmung der Amplituden und der Frequenzen einer Objektschwingung fordern Heunecke u. a. (2013) eine 5 bis 10-fach höhere Abtastfrequenz. Bei 50 rps sollten somit Frequenzen von 5 – 10 Hz nicht überschritten werden. Bei höheren Frequenzen kann der 1D-Modus des Laserscanners genutzt werden. Dieser ermöglicht typischerweise eine Abtastung mit bis zu 1 MHz (*Technische Daten Z+F IMAGER 5010c* (2018)). Im 1D-Modus werden Distanzen in einer vorab definierten Raumrichtung gemessen. Bei vielen handelsüblichen Laserscannern ist dieser Modus aus Sicherheitsgründen vom Hersteller nicht unterstützt.

Ein weiterer begrenzender Faktor bei der Beobachtung von Deformationen ist die Messgenauigkeit von Laserscannern. Diese ist neben den geräteseitigen Einschränkungen (Messgenauigkeit, Kalibrierung und Auflösung) von dem Messobjekt und der Aufnahmekonfiguration abhängig (vergleiche Abschnitt 2.2.4). Die zu erfassenden Deformationen müssen diesen Einschränkungen genügen.

Als Anwendungsgebiete des kinematischen Laserscannings sind u.a. die Erfassung von Deformation an Schleusentoren, Schiffsmodellen (Wujanz u. a., 2013), Türmen oder Rotorblätter an Windkraftanlagen (Hesse u. a., 2006; Grosse-Schwiep u. a., 2015), sowie von Verformungen an Brückenbauwerken (Paffenholz u. a., 2017) zu finden. Exemplarisch werden hier Turmschwingungen und die Deformationen an Brückenbauwerken näher betrachtet. Die Erfassung von Deformationen an Rotorblättern wird im Abschnitt 2.5 ausführlicher behandelt. In Hesse u. a. (2006), Paffenholz u. a. (2008) und Kutterer u. a. (2009a) werden als Beispiele von kinematischen Deformationsanalysen die Erfassung von Turmschwingungen an WEAs vorgestellt. Die aufeinander aufbauenden Arbeiten beobachten die Schwingungen eines Turms einer WEA von zwei Standpunkten. Verwendet wurde der 2D-Modus. Für die Analyse der Daten werden die gemessenen Punkte in Klassen eingeteilt (vergleiche Abbildung 2.14). Die Einteilung erfolgte entsprechend der Höhe entlang des Turms in 1 m bzw. 0.1 m hohe Klassen. Zur Analyse des Frequenzspektrums wird eine Fourier-Analyse der Klassenmittelwerte berechnet. Es konnte die Eigenfrequenz des

Turms nachgewiesen werden.

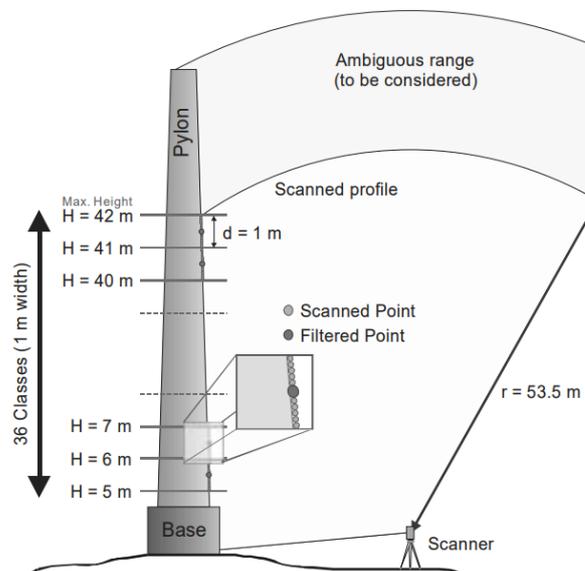


Abbildung 2.14: Bestimmung der Turmschwingung für unterschiedliche Höhen. Die Laserscannerpunkte werden in 1m breite Cluster eingeteilt (Hesse u. a., 2006).

Für weitere Analysen werden in Paffenholz u. a. (2008) Messung im 1D-Modus durchgeführt. Hierbei wurde eine Messung in 64 m Höhe realisiert. Zur Analyse der auftretenden Frequenzen wurde eine zeitliche Filterung der Daten vorgenommen, hierzu wurde ein Median-Filter verwendet. Auch bei der Messung im 1D-Modus konnte die Eigenfrequenz des Turms nachgewiesen werden.

Neben der Messung der Turmschwingung konnte die Eignung des 1D-Modus zur Erfassung von Rotorblättern festgestellt werden. Bei der gewählten Messfrequenz konnten Punktdichten von 1500 Punkten je Durchlauf eines Rotorblattes erreicht werden. Die Erfassungsdauer betrug hierbei ca. 50 ms.

### 2.4.5 Diskussion

Bei einem Vergleich der Verfahren wird deutlich, dass für eine Deformationserfassung mittels Laserscanner weniger der einzelne Punkt von Bedeutung ist als eine Gruppe oder ein Cluster von Punkten. Sowohl bei statischen Anwendungen als auch bei dynamischen Anwendungen ist die Bildung von Clustern festzustellen. Durch eine Clusterung wird meist ein repräsentativer Punkt abgeleitet, der für einen Vergleich genutzt wird. Bei der Bestimmung von Turmschwingungen ist dies z.B. das Mittel bei einer bestimmten Höhe, bei statischen Anwendungen der Schwerpunkt eines Clusters.

## 2.5 Deformationen an Rotorblättern

In diesem Abschnitt wird auf die Erfassung von Rotorblattdeformationen an Windkraftanlagen eingegangen. Der Fokus liegt auf dem Einsatz von Photogrammetrie und La-

serscannern. Neben diesen Verfahren werden für die Überwachung von Windkraftanlagen zusätzliche Sensoren, wie z.B. Frequenzmesser, Dehnungsmessstreifen oder Vibrometer eingesetzt. Einen Überblick über mögliche Verfahren zur Überwachung von WEAs geben Rumsey und Paquette (2008).

Diese Verfahren sind meist auf eine Langzeitüberwachung ausgelegt und benötigen eine permanente Installation an einer WEA.

Ziel dieser Sensoren ist nicht die Beschreibung von Verformungen, sondern die Aufdeckung von möglichen Störungen aufgrund von Unwuchten oder Materialfehlern. Im Gegensatz zu den im Folgenden betrachteten Verfahren liefern sie keine direkte Aussage über die Verformung der Rotorblätter.

Bei der Erfassung von Deformationen an Rotorblättern werden in der Forschung zumeist photogrammetrische Verfahren eingesetzt (Corten, 1996; Schmidt Paulsen u. a., 2009; Ozbek u. a., 2010; Winstroth u. a., 2014). Der Einsatz von Laserscannern zur Erfassung von Deformationen von Rotorblättern wird derzeit am IAPG untersucht. Hierbei wird in den Arbeiten von Große-Schwiep u. a. (2014) die Eignung von Laserscannern im 1D-Modus zur Erfassung von Deformationen betrachtet. Beim 1D-Modus handelt es sich um eine hochfrequente Distanzmessung in einer definierten Raumrichtung. Als kostengünstige Alternative zum Einsatz von Laserscannern werden hochfrequente Distanzmesser von der Firma Windcomp GmbH verwendet. Im Folgenden wird auf diese Lösungsansätze näher eingegangen.

Hinsichtlich der Photogrammetrie werden zumeist Standardverfahren in größerem Maßstab umgesetzt. Vergleichbare Vorgehensweisen können daher sowohl bei der Erfassung von Rotorblättern einer WEA (Winstroth u. a., 2014) als auch bei der Erfassung von Rotorblättern von Helikoptern (Fleming und Gorton, 2000) oder Flugzeugpropellern (Stasicki und Boden, 2009) gefunden werden.

### **2.5.1 Erfassung durch Laserscanner und Distanzmesser**

Ein lasergestütztes Messsystem zur Erfassung von Rotorblattverformungen einer Windkraftanlage wird von der Firma Windcom GmbH entwickelt und eingesetzt. Die Distanzmesser können mit Hilfe einer Zieleinrichtung am Gerät auf den Turm ausgerichtet werden (Abbildung 2.15), so dass Profile der Rotorblätter an einer definierten Blattstellung erfasst werden. Es werden zwei Profile in zwei unterschiedlichen radialen Abständen zur Nabe aufgenommen. Aus der zeitlichen Folge der Durchgänge werden folgende Größen abgeleitet:

- Relative Blattwinkel
- Radiale Teilung
- Turmfreigang
- Twistwinkel (Verwindung der Rotorblätter)
- Axiale Turmschwingung

Der relative Blattwinkel beschreibt die Abweichungen der Anstellwinkel aller Rotorblätter untereinander. Dieser kann durch einen Vergleich der erfassten Profile eines Durchlaufes aller drei Rotorblätter bestimmt werden. Die radiale Teilung ergibt sich aus der

zeitlichen Folge der einzelnen Rotorblattdurchläufe, wohingegen der Twistwinkel aus den simultan erfassten Profilen abgeleitet wird.

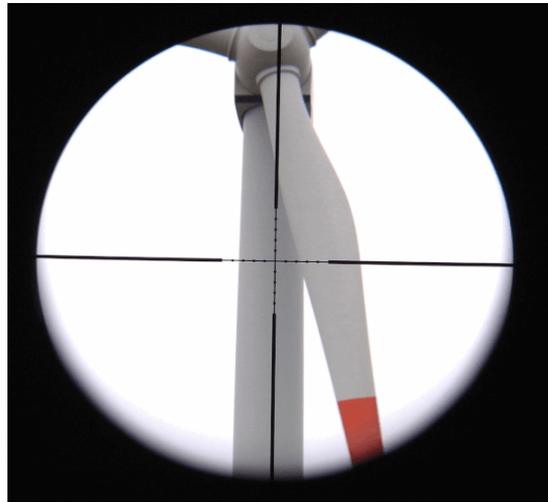


Abbildung 2.15: Anvisierung der zu messenden Rotorblattposition (Windcomp GmbH, 2018)

Bei der Bestimmung der relativen Blattwinkel sowie dem Twistwinkel muss eine Umrechnung der erfassten Distanzen über die Zeit in metrische Profile erfolgen. Das genaue Vorgehen bei dieser Umrechnung ist nicht bekannt. Kritisch bei der Umrechnung der Messdaten in metrische Profile ist die Bestimmung des Abstandes der gemessenen Profile zu der Nabe. Anhand dieses Abstandes kann eine Umlaufgeschwindigkeit bestimmt werden. Weiterhin ist der Schnittwinkel zwischen Laserdistanzmesser und Rotorblatt von Bedeutung. Bei steilen Visuren weicht der Schnittwinkel zwischen Rotorblatt und Laser zunehmend von einem idealen Winkel ab, der rechtwinklig zur Rotorblattachse sein sollte. Somit wird mit zunehmendem Winkel ein größerer radialer Bereich eines Rotorblattes erfasst, was die Auswertung erschweren dürfte.

Durch die simultane Überwachung des Turms können Schwingungen des Turms nachgewiesen werden und aus der Differenz zwischen Turm und Rotorblatt wiederum der Turmfreigang.

Als erreichbare Genauigkeiten nennt der Hersteller  $\pm 0,2^\circ$  für die relativen Blattwinkel und für die radiale Teilung. Für den Twistwinkel wird  $\pm 0,4^\circ$  angegeben. Der Turmfreigang ist mit einer Genauigkeit von  $\pm 50$  mm angegeben, die Genauigkeit der Turmschwingung mit  $\pm 10$  mm.

Nähere Details zu diesen Genauigkeitsangaben sind nicht bekannt.

Ein erweiterter Ansatz wird in Grosse-Schwiep u. a. (2015) verfolgt mit der Zielsetzung, die Erfassung von Rotorblattverformungen durch Messungen mit Laserscannern im 1D-Modus zu bestimmen. Im Gegensatz zur Windcomp GmbH (2018) ist das vorgestellte Verfahren nicht auf eine bestimmte Blattstellung begrenzt. Ziel ist die Erfassung der Torsion und der Durchbiegung in Windrichtung an einer beliebigen Blattposition. Um eine Überführung in das Koordinatensystem der Windkraftanlage zu gewährleisten erfolgt zunächst eine Transformation der 3D-Scans in das Gondelkoordinatensystem und von diesem eine Transformation in das Koordinatensystem der Nabe. Hierbei wird ein CAD-Model der Gondel als Referenz genutzt, indem zwei identische Punkte zwischen 3D-Scan

und CAD-Model genutzt wurden. Alternativ wird die Nutzung eines ICP-Algorithmus zur Bestimmung der Transformationsparameter vorgeschlagen (Große-Schwiep u. a., 2014; Grosse-Schwiep u. a., 2015). Rotationen der Anlage um die Horizontalachse werden durch zusätzliche Messungen mit einer Nikon D2x berücksichtigt. Die Erfassung erfolgt mit 1 Hz.

Details zum Auswerteprozess sind bisher nicht veröffentlicht, nach Große-Schwiep u. a. (2013) wird bei der Auswertung eine Trennung zwischen Lage und der Höhe vorgenommen. Für das Tracken der Gondel wird ein Verfahren zur Berechnung der Bewegung beschrieben. Hierbei werden markante Punkte in den Bildern verfolgt.

Angaben zur Genauigkeit des Verfahrens beziehen sich auf das Koordinatensystem der Anlage. Diese werden in Große-Schwiep u. a. (2013) mit ca. 20 cm abgeschätzt. Die Genauigkeit stellt hierbei eine Abschätzung auf Basis von Variationen der Eingangsdaten dar. Betrachtet wurden die Transformation in das Koordinatensystem der Gondel sowie die metrische Entzerrung der Einzelprofile anhand der Rotationsgeschwindigkeit. Es wird deutlich, dass die Transformation in das Koordinatensystem der Nabe der größte Unsicherheitsfaktor ist.

In späteren Veröffentlichungen (Große-Schwiep u. a., 2014; Grosse-Schwiep u. a., 2015) wird eine Genauigkeit von 2 – 5 cm angegeben. Eine Grundlage für die Genauigkeitsangaben wird in diesen letzteren Veröffentlichungen nicht angegeben, weshalb diese nicht nachvollzogen werden kann.

Prinzipiell ist eine differenzielle Betrachtung wie in Windcomp GmbH (2018) möglich. Die hieraus resultierenden relativen Genauigkeiten sind höher als die absoluten Genauigkeiten. Es sind vergleichbare Genauigkeiten wie bei Windcomp GmbH (2018) für die relative Blattwinkelstellung, die radiale Teilung der Rotorblätter und den Twistwinkel erreichbar.

Verbesserungspotenzial bei diesem Verfahren besteht bei der Ausrichtung der Laserscanner auf eine definierte Blattstellung. Bei den bisher vorliegenden Messungen konnte dies aufgrund von Gondeldrehungen nicht realisiert werden (vgl. Abbildung 2.16). Auswertungen der Torsion und der Durchbiegung erfolgten beim Hersteller der Windkraftanlage. In einem Folgeprojekt soll ein Messsystem entwickelt werden, welches die Ausrichtung der Distanzmesser vereinfacht (Luhmann u. a., 2016).

Ein kritischer Punkt bei dem vorgestellten Verfahren ist die Überführung in das Koordinatensystem der WEA (Nabe). Dies wird über einen Scan der Gondel mit anschließendem Tracking der Gondelbewegungen realisiert. Die auftretenden Schwingungen des Turms und der Gondel sind aufgrund der geringen zeitlichen Abtastung beim Scannen der Gondel sowie bei der Erfassung durch eine Kamera mit einem Bild pro Sekunde nicht ausreichend berücksichtigt.

Weiterhin ist konstruktionsbedingt durch Schwingungsdämpfer zwischen Gondel und Rotorblattsystem keine exakte Positionsbestimmung der Nabe gegenüber der Gondel möglich (siehe Kapitel 2.3.2).

Unberücksichtigt bleiben weiterhin Einflüsse auf die Entzerrung der Einzelprofile. Je nach Position der erfassten Profile betragen die Erfassungszeiten zwischen wenigen Hundertstel Sekunden bis hin zu einigen Zehntel Sekunden. Aufgrund der zu erwartenden Schwingungen an den Rotorblättern hat dies insbesondere auf die Torsion einen signifikanten Einfluss (siehe Kapitel 2.3.2).

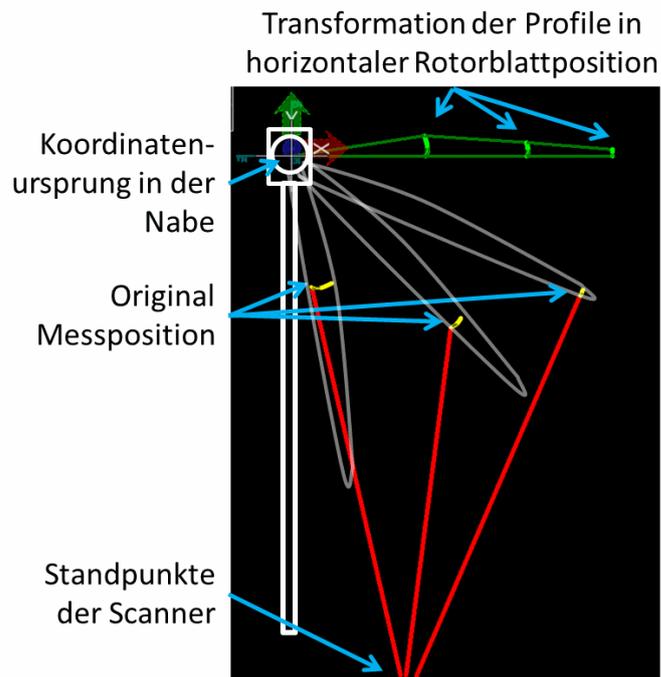


Abbildung 2.16: Erfasste Profile im Koordinatensystem der Nabe (Große-Schwiep u. a., 2013)

### 2.5.2 Erfassung mittels photogrammetrischer Verfahren

Erste Ansätze zur Erfassung von Rotorblattdeformationen an Windkraftanlagen wurden im Bereich der Photogrammetrie in Sabel (1996) und Corten (1996) veröffentlicht. Hierfür wurden Rotorblätter einer Windkraftanlage mit retroreflektierenden Marken signalisiert und durch ein Stereokamerasystem aufgenommen. Die WEA hatte eine Nabenhöhe von 15 m bei einer Rotorblattlänge von 5 m. Ein wesentliches Problem ergab sich aus der mangelnden Auflösung ( $640 \times 480$  Pixel) der Kameras. Die dadurch erforderliche Markengröße erlaubte keine Ableitung von Torsionswinkeln, da aufgrund der Größe lediglich eine Marke auf einem Profil Platz fand. Daher werden alternative Signalisierungen diskutiert. Darüber hinaus wird vermutet, dass die Reduktion des Messaufbaus auf eine Kamera möglich ist. Die grundlegende Idee besteht in der Reduktion des 3D-Problems der Punktbestimmung auf ein 2D-Problem. Zur Reduktion wird angemerkt, dass es sich bei den auftretenden Bewegungen um 2D-Bewegungen handelt. Bei einer Marke auf einem Rotorblatt ist der radiale Abstand zur Nabe konstant, von Interesse ist lediglich die Bewegung in Schlagrichtung.

Nach dem gleichen Prinzip (Kreismarken an den Rotorblättern) erfolgten in Schmidt Paulsen u. a. (2009) die Erfassung einer 500 kW WEA und in Ozbek u. a. (2010) eine 2.5 MW WEA Anlage. Bei diesen Messungen wurden drei bzw. vier Kameras verwendet. Auf Basis dieser Messungen erfolgten in späteren Arbeiten detaillierte Auswertungen (Özbek, 2013). Unter anderem wurden die Bewegungen der Rotorblattspitzen in Schlagrichtung bestimmt. Ihre Spanne betrug bei den durchgeführten Messungen im Maximum 1024 mm.

Bei den Auswertungen wurden bereits in Ozbek u. a. (2010) systematische Abweichungen festgestellt. Es wurden periodische Änderungen der radialen Abstände zwischen den



Abbildung 2.17: Punktumuster auf einem Rotorblatt. Eine erfassung der Rotorblattdeformationen an den signalisierten stellen erfolgte in Winstroth u. a. (2014)

Marken aufgedeckt, die nicht durch Verformungen der Rotorblätter zu erklären sind. Die Abweichungen betragen  $\pm 30$  mm (Özbek, 2013). Als Ursache für diese Systematik werden Abweichungen der äußeren Orientierung der Kameras vermutet.

Trotz der systematischen Effekte wurde eine mittlere Genauigkeit der Einzelpunkte von  $\pm 25$  mm erreicht.

Wie auch in Sabel (1996) und Corten (1996) war trotz höherer Auflösung eine Torsion nicht zu bestimmen, da keine zwei Marken auf einem Profil angebracht werden konnten.

Eine Alternative zur Messung von diskreten Punkten ist die flächenhafte Erfassung der gesamten Oberfläche oder von Teilen der Oberfläche. In Fleming und Gorton (2000) wird die Erfassung von Rotorblattoberflächen im Labor vorgestellt. Hierbei wurden Rotorblätter mittels Projektionsverfahren aufgenommen. Der erfasste Rotor drehte sich mit 2000 rpm. Der Rotorradius betrug 860 mm. Eine Überführung des Verfahrens auf WEAs im Feld ist aufgrund der erforderlichen Projektorleistung nicht denkbar. Eine weitere Möglichkeit besteht in der direkten Aufbringung von Texturen. Diese werden u.a. bei der Erfassung von Rotorblättern von Flugzeugen, Helikoptern (Stasicki und Boden, 2009; Sousa u. a., 2017) und Windkraftanlagen (Winstroth u. a., 2014; Wu u. a., 2019) genutzt.

Bei diesen Verfahren muss die betreffende Oberfläche über eine ausreichende Textur verfügen. In Winstroth u. a. (2014) wird hierzu ein Zufallsmuster mit schwarzen Punkten aufgebracht (Abbildung 2.17). Erfasst werden diese Bereiche mittels eines Stereokamerasystems. Zur Bestimmung der Oberfläche wird ein Least-Squares-Matching (LSM) Ansatz verwendet. Das Ergebnis sind Punkte auf der Oberfläche, aus denen Verformungen innerhalb der Rotorebene und in Windrichtung nachgewiesen wurden. Hierüber hinaus konnte die Torsion aufgrund der flächenhaften Erfassung bestimmt werden. Erreichbare Genauigkeiten werden nicht näher genannt.

Die Genauigkeiten der berechneten Torsionen liegen laut Winstroth u. a. (2014) in einer Größenordnung, die eine verlässliche Aussage derzeit nicht erlaubt.

In Winstroth u. a. (2014) wird anhand einer Simulation die zu erwartende Genauigkeit abgeschätzt. Hierbei wird eine virtuelle Bildsequenz erzeugt. Die simulierte Anlage hat einen Rotorblattdurchmesser von 114 m und eine Nabenhöhe von 93 m. Die Kameras werden in 205 m vor der WEA platziert mit einer Basis von 105 m zwischen den Kameras.

Die simulierten Kamerabilder haben eine Auflösung von  $5120 \times 5120$  Pixel.

Als Ergebnis konnten mögliche Genauigkeiten für die Durchbiegung in Windrichtung von unter 1 mm nachgewiesen werden. Die Genauigkeit der Torsion liegt bei unter  $0,1^\circ$ .

Werden diese Daten mit denen von Özbek (2013) verglichen wird deutlich, dass es sich um eine äußerst optimistische Schätzung handelt.

Dies wird insbesondere bei einem Vergleich mit Genauigkeitsuntersuchungen des LSM (Least Squares Matching)-Ansatzes deutlich. In Bethmann und Luhmann (2011) wird bspw. nachgewiesen, dass der in Winstroth u. a. (2014) genutzte affine Ansatz in Abhängigkeit zur Aufnahmegeometrie bis zu 1/4 Pixel systematisch falsche Positionen misst. Da es sich hierbei um einen systematischen Fehler in Abhängigkeit zum Aufnahmewinkel handelt, kann dieser bei der Erfassung eines Rotorblattes zu periodischen Effekten führen.

In Luhmann u. a. (2008) wird für einen erweiterten LSM-Ansatz mit projektiver Transformation, die in Winstroth u. a. (2014) nicht genutzt wird, 1/10 Pixel als Genauigkeit im Laborversuch nachgewiesen. Hierbei handelt es sich um einen Versuch unter idealen Bedingungen, wie sie bei Messungen an einer WEA nicht vorkommen.

Wird angenommen, dass die WEA formatfüllend aufgenommen ist, so beträgt ein Pixel am Objekt  $> 2$  cm. Somit kann bei einer angenommenen Genauigkeit von 1/5 Pixel eine Genauigkeit in der Rotorblattebene von  $> 0,4$  cm erwartet werden. Wird das Höhen-Basis-Verhältnis von 2 : 1 berücksichtigt (Nabenhöhe), so ergibt sich eine Unsicherheit von ca. 1 cm in Windrichtung. Selbst bei einer optimistischen Betrachtung von 1/10 Pixel liegt die resultierende Genauigkeit deutlich über der abgeschätzten.

Die angenommene Genauigkeit von 1/5 Pixel resultiert aus Laborversuchen. Bei der Überführung auf ein Messobjekt wie eine WEA ist daher mit zusätzlichen Unsicherheiten aus der Orientierung der Messsysteme zu rechnen. Diese Problematik wird bereits in Özbek (2013) angesprochen.

Trotz der vermutlich höheren Unsicherheiten als zunächst abgeschätzt, handelt es sich um ein hoch genaues Verfahren zur Erfassung von Rotorblattverformungen. Es zeigt, dass durch moderne Kameratechnik eine ausreichende Auflösung am Objekt erreicht werden kann, um selbst Torsionswinkel abzuleiten.

Durch Verwendung hochauflösender Kameras ist das Probleme der mangelnden Auflösung am Objekt inzwischen überwunden. In den genannten früheren Arbeiten war dies der begrenzende Faktor.

Ein Problem bleibt weiterhin die relative Orientierung der Kameras zueinander. Die Aufnahmeconfiguration (alle Objektpunkte liegen innerhalb einer Ebene und deren genaue Koordinaten sind unbekannt) ist für eine relative Orientierung der Kameras nur bedingt geeignet, wie in Özbek (2013) nachgewiesen wird.

# 3 Ein kinematisches Verfahren zur Deformationsbestimmung

## 3.1 Anforderungen an das Verfahren

Die Anforderungen an ein neues Verfahren zur Erfassung von Rotorblattdeformationen ergeben sich zum einen aus den Anforderungen der Hersteller und zum anderen aus dem Stand der Technik (Kapitel 2.5).

Für die Weiterentwicklung von WEAs ist die Strukturmechanik der Rotorblätter von besonderem Interesse. Eine genaue Kenntnis der auftretenden Bewegungen, Verformungen und Schwingungen kann für die gezielte Verbesserung der Struktur eines Rotorblattes genutzt werden. Von besonderem Interesse ist hierbei die Torsion und ihre zeitliche Änderung, die Torsionsschwingung. Für den Hersteller ist eine Bestimmung des Torsionswinkels mit einer Standardabweichung von  $0.1^\circ - 0.2^\circ$  wünschenswert. Die Durchbiegung ist von untergeordnetem Interesse. Genauigkeitsanforderungen liegen hier im Bereich von 10 – 20 cm.

Beim Vergleich dieser Anforderungen mit dem Stand der Technik lässt sich feststellen, dass diese von keinem existierenden Verfahren erreicht werden. Photogrammetrische Ansätze sind in der Lage Durchbiegungs- und Torsionsverläufe simultan zu bestimmen. Die Genauigkeitsanforderungen für die Durchbiegung können bei diesen Verfahren bereits erreicht werden.

Photogrammetrische Ansätze sind vergleichsweise aufwändig, da eine Signalisierung des Messobjektes erfolgen muss. Bei Verwendung von Laserdistanzmessern könnte die Winkelgenauigkeit für die Torsion erreicht werden. Verlässliche Untersuchungen liegen hierzu derzeit nicht vor. Der Abstand zwischen Turm und Rotorblatt kann als indirektes Durchbiegungsmaß mit ausreichender Genauigkeit abgeleitet werden. Es sind jedoch keine Aussagen über den Verlauf der Torsion bzw. der Durchbiegung möglich.

Als Ziel dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Verfahrens zur Ableitung von Durchbiegung und Torsion von Rotorblättern an WEAs im laufenden Betrieb definiert. Hierbei soll gänzlich auf zusätzliche Signalisierungen an den Rotorblättern und anderen Bereichen einer WEA verzichtet werden, um nicht in den Betrieb einer WEA einzugreifen.

Im Gegensatz zu anderen derzeit laufenden Arbeiten sollen lediglich handelsübliche Kameras und Laserscanner Verwendung finden. Dies schließt auch die Nutzung von Laserscannern im 1D-Modus aus, da die Hersteller dies aus Sicherheitsgründen nur für Forschungszwecke gezielt freischalten. Weiterhin werden gerätespezifische Einflüsse wie z.B. die Kalibrierung (Rietdorf, 2005; Gordon, 2008) des Gerätes, deren Genauigkeit (Vennegeerts u. a., 2010) oder der Einfluss des Auftreffwinkels (Soudarissanane u. a., 2009) sowie Reflektions- und Materialeigenschaften (Voegtle u. a., 2008) nicht näher untersucht.

## 3.2 Deformationsmodell für balkenähnliche Objekte

Zur Beschreibung der Deformation eines Rotorblattes wird in dieser Arbeit ein Balkenmodell verwendet.

In Hinblick auf die zu erwartenden Deformationen kann dies als hinreichend genau aufgefasst werden. In der Windenergieanlagenforschung ist dies eine gängige Vereinfachung der Rotorblätter, die u.a. für Lastberechnungen eingesetzt werden (Mabou u. a., 2014).

Bei der Bestimmung von Verformungen an Rotorblättern wurde hierüber hinaus implizit bei allen vorgestellten Verfahren von einem Balkenmodell ausgegangen. Die Analyse der Parameter zeigt, dass diese mit den beschreibbaren Verformungen eines Balkens übereinstimmen. So wird in Winstroth u. a. (2014) die Torsion und die Durchbiegung von Rotorblättern bestimmt wie auch in Grosse-Schwiep u. a. (2015). In Corten (1996) und Özbek (2013) konnte die Durchbiegung der Rotorblätter bestimmt werden. Sowohl die Durchbiegung als auch die Torsion sind mögliche Verformungen eines Balkenmodells.

Die Verformung eines Balkens lässt sich mit einfachen Annahmen modellieren und auf diese Weise das Verhalten eines Rotorblattes in guter Näherung beschreiben. Nach Kapitel 2.4.3 kann ein Balken durch eine einfache Raumkurve beschrieben werden, die neutrale Faser.

Diese Vereinfachung wird im Folgenden als mathematische Grundlage zur Beschreibung von Verformungen eines Rotorblattes genutzt. Hierbei steht die geometrische Beschreibung der Verformung im Vordergrund. Die Ableitung von Kräften oder Materialeigenschaften ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Der Rückschluss von gemessenen Deformationen auf Kräfte oder Materialeigenschaften ist bei komplexen Strukturen Gegenstand der Forschung. Bereits bei einfachen Strukturen und Lastverhältnissen, wie sie bspw. bei einer Zimmerdecke oder einem Damm auftreten, ist die Bestimmung von Materialeigenschaften oder Kräften mit erheblichen Rechenaufwand verbunden, wie ein Beispiel von Eichhorn (2014) zeigt. Hier werden über eine FEM-Simulation numerische Ableitungen an Stützstellen gebildet, um eine Schätzung der unbekanntenen Materialeigenschaften zu erhalten.

Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz basiert auf der Unterteilung des Rotorblatt-Modells in finite Abschnitte entlang der neutralen Faser.

Die Verformung jedes dieser Abschnitte wird durch einen Deformationsgraphen beschrieben (vgl. Kapitel 2.4.2). Bei Annahme eines Balkenmodells wird dieser auf eine Raumkurve (neutrale Faser) begrenzt. Entlang der neutralen Faser werden Transformationsknoten zur Beschreibung der Verformung definiert. Jeder dieser Knoten beinhaltet eine Translation  $\mathbf{X}$  und eine Rotation  $\mathbf{R}$  zur Beschreibung lokaler Deformationen. Anhand dieser Transformationen werden Punkte eines Rotorblatt-Modells  $\mathbf{P}_{CAD}$  von einem undeformierten Zustand in einen deformierten Zustand überführt. Der transformierte Punkt  $\mathbf{P}'_{CAD_s}$  ergibt sich aus:

$$\mathbf{P}'_{CAD_s} = \mathbf{X}_s + \mathbf{R}_s \cdot (\mathbf{P}_{CAD} - \mathbf{P}_F) + \mathbf{P}_F \quad (3.1)$$

mit  $\mathbf{P}_F$  als Lotfußpunkt des Punktes  $\mathbf{P}_{CAD}$  auf der neutralen Faser.

Die Translation  $\mathbf{X}_s$  und Rotation  $\mathbf{R}_s$  werden hierbei zwischen den zum Lotfußpunkt  $\mathbf{P}_F$  benachbarten Transformationsknoten  $\mathbf{K}_l$  und  $\mathbf{K}_{l+1}$  über die neutrale Faser interpoliert (vgl. Abbildung 3.1).

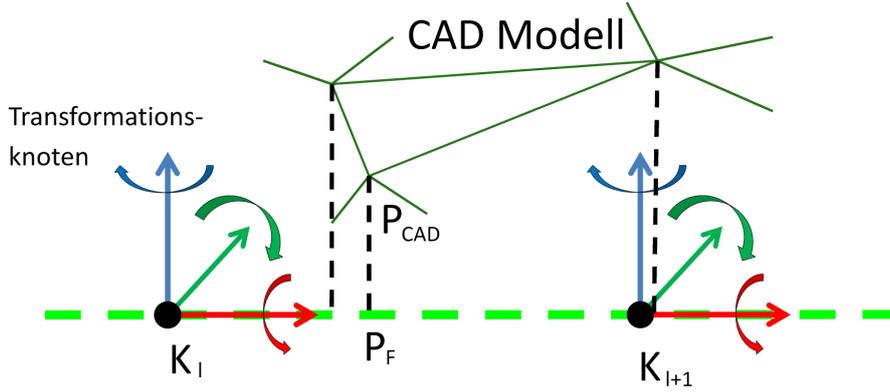


Abbildung 3.1: Transformation eines Punktes  $P_{CAD}$

Zur Beschreibung von Deformationsverläufen ist es möglich dieses Modell um eine Dimension zu erweitern. Hierbei werden die Transformationsknoten auf der neutralen Faser für unterschiedliche Zeitpunkte  $t$  definiert. Es hat eine zusätzliche Interpolation über die Zeit zu erfolgen.

Ein mögliches Verfahren ist die bilineare Interpolation. Für die Translation  $\mathbf{X}_{l,c}$  lautet diese:

$$\mathbf{X}_{l,c} = a_{l,c} \cdot \mathbf{X}_{l,c} + a_{l,c+1} \cdot \mathbf{X}_{l,c+1} + a_{l+1,c} \cdot \mathbf{X}_{l+1,c} + a_{l+1,c+1} \cdot \mathbf{X}_{l+1,c+1} \quad (3.2)$$

mit

$$a_{l,c} = (1 - d_l) \cdot (1 - d_c) \quad (3.3)$$

$$a_{l,c+1} = (1 - d_l) \cdot d_c \quad (3.4)$$

$$a_{l+1,c} = d_l \cdot (1 - d_c) \quad (3.5)$$

$$a_{l+1,c+1} = d_l \cdot d_c \quad (3.6)$$

Die Indizes  $l$  und  $c$  definieren hierbei die Reihenfolge der Transformationsknoten in einem festen Raster (vgl. Abbildung 3.1). Der Index  $l$  steht für die Reihenfolge der Transformationsknoten entlang der neutralen Faser, der Index  $c$  für die Reihenfolge über die Zeit. Die Umrechnung eines Indexes in die zugehörige Distanz  $s$  und Zeit  $t$  erfolgt über einen Skalierungsfaktor  $m_l$  für die Distanz und einem Skalierungsfaktor  $m_c$  für die Zeit sowie konstante Anteile  $l_0$  und  $s_0$ . Die Umrechnungsvorschrift lautet somit:

$$s = l \cdot m_l + l_0 \quad (3.7)$$

$$t = s \cdot m_c + s_0 \quad (3.8)$$

Bei der Verwendung der Transformationsknoten zur Deformationsanalyse werden ohne weitere Bedingungen die Annahmen der Euler-Bernoulli-Balkentheorie nicht berücksichtigt. Diese lauten:

- Die neutrale Faser ist bei Durchbiegung streckentreu.
- Profile, die rechtwinklig zur neutralen Faser sind, sind nach einer Deformation weiterhin rechtwinklig.
- Profile, die rechtwinklig zur neutralen Faser sind, bleiben eben und unverformt.

Abweichungen von dem Modell des Biegebalkens werden als vernachlässigbar angenommen. Dies sind in erster Linie Längenänderungen der neutralen Faser aufgrund von Zugkräften sowie Scherwinkel zwischen Profilen und der neutralen Faser.

Diese Verformungen sind aufgrund ihres geringen Einflusses auf die äußere Geometrie eines Rotorblattes nicht aufzudecken.

Die hier getroffenen Annahmen sind in Abbildung 3.2 grafisch dargestellt. Um sie zu erfüllen können unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Eine Variante ist die Einführung von Bedingungsgleichungen oder Pseudobeobachtungen im funktionalen Modell.

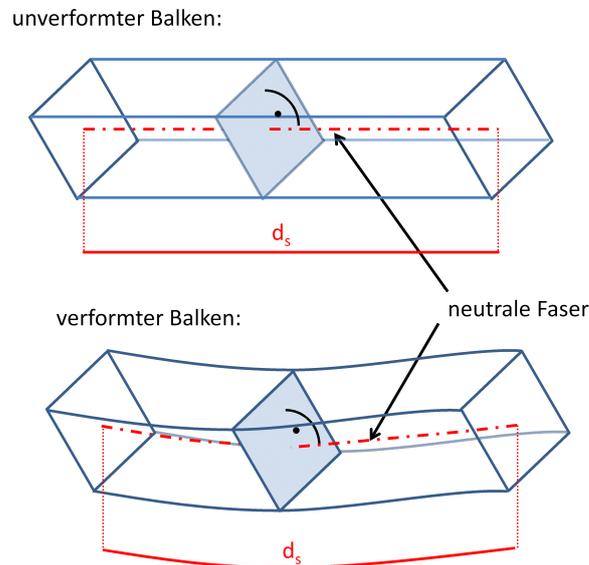


Abbildung 3.2: Prinzipskizze zu den Annahmen bei der Verformung eines Balkens

Hierbei sind drei Gleichungen erforderlich. Für die Forderung nach Streckentreue auf der neutralen Faser wird eingeführt, dass das Streckenintegral der undefor mierten neutralen Faser  $f(s)$  gleich dem Streckenintegral der deformierten neutralen Faser  $\bar{f}(s)$  ist. Diese Bedingung wird abschnittsweise zwischen zwei benachbarten Transformationsknoten definiert:

$$\int_l^{l+1} \sqrt{\dot{f}_x(s)^2 + \dot{f}_y(s)^2 + \dot{f}_z(s)^2} ds = \int_l^{l+1} \sqrt{\dot{\bar{f}}_{x_t}(s)^2 + \dot{\bar{f}}_{y_t}(s)^2 + \dot{\bar{f}}_{z_t}(s)^2} ds \quad (3.9)$$

Die Lösung des Integrals ist im Wesentlichen abhängig von der Beschreibung der neutralen Faser und der Art der Interpolation zwischen den Transformationsknoten. Wird im einfachsten Fall von einer Geraden als neutrale Faser ausgegangen mit einer linearen Interpolation zwischen den Transformationsknoten, dann ist das obige Integral als räumlicher Pythagoras definiert:

$$|\mathbf{K}_{l+1} - \mathbf{K}_l| = |\overline{\mathbf{K}}_{l+1t} - \overline{\mathbf{K}}_{lt}| \quad (3.10)$$

Hierbei sind  $\mathbf{K}_l$  und  $\mathbf{K}_{l+1}$  die Positionen der Transformationsknoten im undeforinierten Zustand und  $\overline{\mathbf{K}}_{lt}$  und  $\overline{\mathbf{K}}_{l+1t}$  die Positionen zum Deformationszeitpunkt  $t$ .

Weitere zwei Bedingungen folgen aus der Forderung nach Orthogonalität von Querprofilen zur neutralen Faser, da hierdurch die Ausrichtung der Profile bis auf die Torsion definiert werden.

Profile, die vor einer Deformation orthogonal zur neutralen Faser sind, sind nach der Bernoulli-Biegebalken-Theorie auch nach einer Deformation orthogonal zur deformierten neutralen Faser.

Für die Bedingungsgleichungen wird eine Tangente an der neutralen Faser betrachtet. Der Richtungsvektor der Tangente an der neutralen Faser kann als Normale eines Profils aufgefasst werden. Wird der Richtungsvektor an einem Transformationsknoten mithilfe der Deformationsparameter transformiert, so sollte der transformierte und normierte Richtungsvektor dem normierten Richtungsvektor der neutralen Faser im deformierten Zustand entsprechen.

Hieraus folgen drei Gleichungen (je Koordinatenrichtung eine):

$$\mathbf{0} = \mathbf{R}_{s,t} \frac{\dot{f}(s)}{|\dot{f}(s)|} - \frac{\dot{\overline{f}}(s)}{|\dot{\overline{f}}(s)|} \quad (3.11)$$

Aufgrund der Normierung des Vektors sind lediglich zwei der drei Gleichungen unabhängig. Als Bedingung oder Pseudobeobachtung können daher nur zwei Gleichungen eingeführt werden, beispielsweise für die x- und y-Komponente des Vektors.

Alternativ zur Einführung von zusätzlichen Bedingungsgleichungen können die Forderungen in die mathematische Beschreibung der Verformung aufgenommen werden.

Hierzu wird zunächst angenommen, dass die neutrale Faser eine Gerade ist, die entlang der x-Achse des Koordinatensystems verläuft. Unter Nutzung des bekannten Abstandes  $s$  zwischen zwei Transformationsknoten ist die Position eines Transformationsknoten  $\mathbf{K}_{l+1}$  durch die Koordinaten des Transformationsknoten  $\mathbf{K}_l$ , einem Richtungsvektor  $\mathbf{r}$  und der bekannten Strecke  $s$  beschreibbar. Die Position  $\mathbf{X}_{l+1}$  ergibt sich aus:

$$\mathbf{X}_{l+1} = \mathbf{X}_l + s\mathbf{r} \quad (3.12)$$

mit

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Überträgt man dies auf einen deformierten Zustand zum Zeitpunkt  $t$ , so ergibt sich die Position  $\mathbf{X}_{l+1t}$  aus:

$$\mathbf{X}_{l+1_t} = \mathbf{X}_{l_t} + s \mathbf{R}_{l_t} \mathbf{r} \quad (3.14)$$

Aus dieser rekursiven Vorschrift lassen sich bei einem gegebenen ersten Transformationsknoten die Positionen aller folgenden Knoten bestimmen (Abbildung 3.3). Hieraus ergibt sich die Translation  $\mathbf{X}_{0_t}$  an der Position  $l$  als Differenz zum undeformierten Zustand.

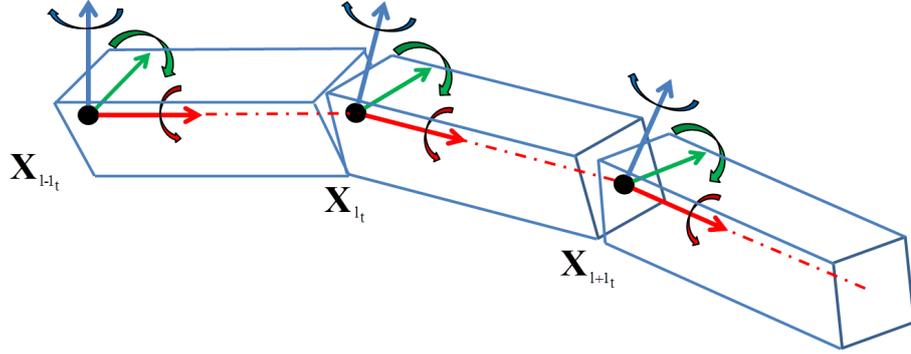


Abbildung 3.3: Bestimmung von Transformationsknoten unter Annahme eines linearen Verlaufes innerhalb der einzelnen Abschnitte

$$\mathbf{X}_{0_t} = \mathbf{X}_{l_t} - \mathbf{X}_l \quad (3.15)$$

Die Translation  $\mathbf{X}_0$  wird somit aus den Rotationen der Transformationsknoten bestimmt. Neben der Annahme, dass die neutrale Faser eine Gerade entlang der X-Achse des Koordinatensystem ist, beinhaltet dies, dass die Translation zwischen zwei Knoten  $\mathbf{K}_l$  und  $\mathbf{K}_{l+1}$  durch den Transformationsknoten  $\mathbf{K}_l$  beschrieben wird. Der Verlauf der Translation zwischen zwei Transformationskosten ist somit linear. Wird eine Interpolation zwischen den Rotationswinkeln nach 2.13 durchgeführt, ist die Forderung nach Rechtwinkligkeit lediglich an der Position  $l$  eines Transformationsknoten erfüllt. Für die geforderte Rechtwinkligkeit zur neutralen Faser muss in Gleichung 3.14 die Interpolation der Rotationsmatrizen Berücksichtigung finden. Hieraus folgt:

$$\mathbf{X}_{l+1_t} = \mathbf{X}_{l_t} + s \int \mathbf{R}_{l_t} \mathbf{r} dd \quad (3.16)$$

Im Fall einer linearen Interpolation zwischen zwei Transformationsknoten kann dieses Integral analytisch gelöst werden. Hierzu wird die Rotationsmatrix aus Formel 2.7 zu Grunde gelegt.

Für die Translation in x folgt:

$$X_{l+1_t} = X_{l_t} + s \left( \frac{\sin(c_1 \cdot d + b_1 \cdot d + c_0 + b_0)}{2 \cdot (c_1 + b_1)} + \frac{\sin(c_1 \cdot d - b_1 \cdot d + c_0 - b_0)}{2 \cdot (c_1 - b_1)} \right) \quad (3.17)$$

für die Translation in y:

$$\begin{aligned}
Y_{l+1_t} = Y_{l_t} + s & \left( -\frac{\sin(c_1 \cdot d + b_1 \cdot d + a_1 \cdot d + c_0 + b_0 + a_0)}{4 \cdot (c_1 + b_1 + a_1)} \right. \\
& + \frac{\sin(c_1 \cdot d + b_1 \cdot d - a_1 \cdot d + c_0 + b_0 - a_0)}{4 \cdot (c_1 + b_1 - a_1)} + \frac{\sin(c_1 \cdot d - b_1 \cdot d + a_1 \cdot d + c_0 - b_0 + a_0)}{4 \cdot (c_1 - b_1 + a_1)} \\
& - \frac{\sin(c_1 \cdot d - b_1 \cdot d - a_1 \cdot d + c_0 - b_0 - a_0)}{4 \cdot (c_1 - b_1 - a_1)} - \frac{\cos(c_1 \cdot d + a_1 \cdot d + c_0 + a_0)}{2 \cdot (c_1 + a_1)} \\
& \left. - \frac{\cos(c_1 \cdot d - a_1 \cdot d + c_0 - a_0)}{2 \cdot (c_1 - a_1)} \right) \quad (3.18)
\end{aligned}$$

und für die Translation in z:

$$\begin{aligned}
Z_{l+1_t} = Z_{l_t} + s & \left( \frac{\cos(c_1 \cdot d + b_1 \cdot d + a_1 \cdot d + c_0 + b_0 + a_0)}{4 \cdot (c_1 + b_1 + a_1)} \right. \\
& + \frac{\cos(c_1 \cdot d + b_1 \cdot d - a_1 \cdot d + c_0 + b_0 - a_0)}{4 \cdot (c_1 + b_1 - a_1)} - \frac{\cos(c_1 \cdot d - b_1 \cdot d + a_1 \cdot d + c_0 - b_0 + a_0)}{4 \cdot (c_1 - b_1 + a_1)} \\
& - \frac{\cos(c_1 \cdot d - b_1 \cdot d - a_1 \cdot d + c_0 - b_0 - a_0)}{4 \cdot (c_1 - b_1 - a_1)} - \frac{\sin(c_1 \cdot d + a_1 \cdot d + c_0 + a_0)}{2 \cdot (c_1 + a_1)} \\
& \left. + \frac{\sin(c_1 \cdot d - a_1 \cdot d + c_0 - a_0)}{2 \cdot (c_1 - a_1)} \right) \quad (3.19)
\end{aligned}$$

Hierbei wird für die interpolierten Rotationswinkel  $\omega, \varphi$  und  $\kappa$  folgende Interpolation angenommen:

$$\omega(d) = \omega_l + (\omega_{l+1} - \omega_l)d = a_0 + a_1 d \quad (3.20)$$

$$\varphi(d) = \varphi_l + (\varphi_{l+1} - \varphi_l)d = b_0 + b_1 d \quad (3.21)$$

$$\kappa(d) = \kappa_l + (\kappa_{l+1} - \kappa_l)d = c_0 + c_1 d \quad (3.22)$$

mit dem Definitionsbereich:

$$\mathbb{D} = \{d | 0 \leq d < 1\} \quad (3.23)$$

Mit Hilfe dieser Integrale lässt sich mit 3.15 die Translation für jede interpolierte Position  $l$  bestimmen. Der hieraus abgeleitete Verlauf der neutralen Faser im deformierten Zustand erfüllt alle oben genannten Annahmen.

Eine Einschränkung ist, dass angenommen wird, dass die neutrale Faser im undeformierten Zustand eine Gerade entlang der X-Achse repräsentiert. Diese Einschränkung kann durch die Einführung eines konstanten Anteils der Verformung berücksichtigt werden. Hieraus ergibt sich für  $\varphi_l$  und  $\kappa_l$ :

$$\varphi_l = \varphi_{l_{const}} + \varphi_{l_{var}} \quad (3.24)$$

$$\kappa_l = \kappa_{l_{const}} + \kappa_{l_{var}} \quad (3.25)$$

$\varphi_{l_{const}}$  und  $\kappa_{l_{const}}$  sind die konstanten Anteile und  $\varphi_{l_{var}}$  und  $\kappa_{l_{var}}$  die variablen. Zusätzlich wird für den ersten Transformationsknoten eine Translation eingeführt. Diese beschreibt die Verschiebung der neutralen Faser vom Koordinatenursprung.

### 3.3 Beschreibung eines Rotorblattsystems

Neben der Beschreibung eines einzelnen Rotorblattes und dessen Verformung ist die Beschreibung eines Rotorblattsystems für die Bestimmung von Abweichungen unter den einzelnen Rotorblättern einer Windkraftanlage erforderlich. Die Betrachtung eines Rotorblattsystems wird weiterhin für die Bestimmung der globalen Bewegung (Transformations) genutzt. Durch zusätzliche geometrische Beziehungen kann eine höhere Redundanz bei der Bestimmung dieser Transformationen erreicht werden.

An dieser Stelle werden lediglich die Rotorblätter und deren Beziehungen untereinander betrachtet. Auf spezielle Bauformen einer WEA, wie z.B. mit Darrieus Rotor, wird nicht eingegangen. Auf die Betrachtung der Gondel oder des Turms einer WEA wird im Folgenden verzichtet. Problematisch bei der Nutzung der Gondel oder des Turms als zusätzliche Bedingung sind die schwer abzuschätzenden Bewegungen der Komponenten untereinander. Um die Kraftübertragung zwischen Rotorblattsystem und Gondel abzuschwächen, werden bspw. Dämpfungselemente eingesetzt, die eine teilweise Entkopplung der Bewegung der Gondel und des Rotorblattsystems bewirken.

Eine indirekte Übertragung der Bewegung vom Rotorblattsystem auf die Gondel verursacht die Gondel-Whirl-Schwingung und die Turm-Gondel-Querschwingung (Gasch und Twele, 2010). Aufgrund dieser Bewegungen kann die Beziehung zwischen Gondel und Rotorblattsystem nicht ohne weitere Untersuchungen als zusätzliche Bedingung genutzt werden. Es ist denkbar, das Modell durch Integration neuer Messwerte zu erweitern.

Als erster Schritt könnte z.B. die z-Koordinate der Nabe über die Gondel bestimmbar werden und als zusätzliche Information dienen.

Im Folgenden wird auf ein Rotorblattsystem mit drei Rotorblättern und Pitch-Regelung je Rotorblatt eingegangen. Die Pitch-geregelte Anlage ist die derzeit verbreitetste Bauform. Alternative Konstruktionen unterscheiden sich in der Anzahl der Rotorblätter oder die Art der Regelung der Anlage. Neben Pitch-Regelung zur Drehzahlregelung ist die Stall-Regelung oder aktive Stall-Regelung verbreitet. Diese hat gegenüber der im Folgenden betrachteten Pitch-Regelung einen Freiheitsgrad je Rotorblatt weniger.

Betrachtet wird im Folgenden die Bewegung der Rotorblätter untereinander sowie eine globale Bewegung des Rotorblattsystems (vgl. Abbildung 3.4). Bei einer Pitch-geregelten WEA verfügt jedes Rotorblatt über eine eigene Einrichtung zum Einstellen des Pitchwinkels. Dieser kann somit von Rotorblatt zu Rotorblatt variieren. Weiterhin kann der Pitchwinkel über einen längeren Zeitraum nicht als konstant angenommen werden. Die Regulierung der Pitchwinkel dient zur Lastreduktion der WEA und wird im normalen Betrieb automatisch ausgeführt. Dies bedeutet für die Beschreibung eines Rotorblattsystems, dass für jedes Rotorblatt ein individueller Pitchwinkel eingeführt werden muss, der wieder-

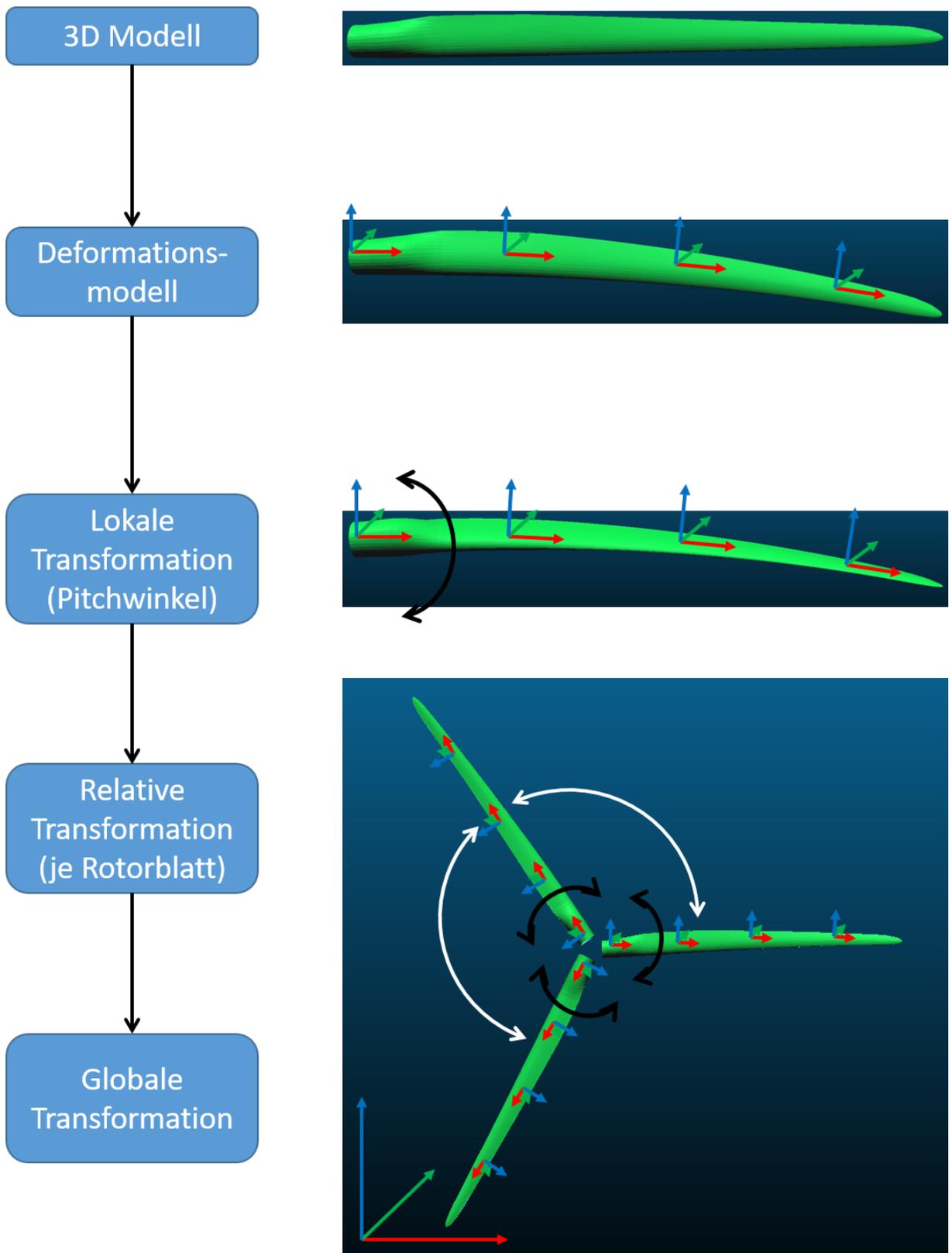


Abbildung 3.4: Beschreibung eines Rotorblattsystems

um variabel über die Zeit sein kann. Er ist definiert als Rotation um die Pitch-Achse, welche typischerweise mit einer Koordinatenachse des Rotorblattes übereinstimmt, der Längsachse. Aufgrund der zeitlichen Variation des Winkels werden über die Zeit mehrere Pitchwinkel definiert. Für einen Zeitpunkt  $t$  erfolgt eine Interpolation aus den benachbarten Pitchwinkeln. Die Definition von Pitchwinkeln erfolgt unabhängig für jedes Rotorblatt. Zur Beschreibung der relativen Lage der Rotorblätter untereinander wird für zwei der drei Rotorblätter eine konstante Transformation um die Rotationsachse des Rotorblattsystems eingeführt. Dies sind Rotationen um  $\pm 120^\circ$ .

Zur Beschreibung der Bewegung des Gesamtsystems wird abschließend eine globale zeitabhängige Transformation definiert. Diese ist für alle drei Rotorblätter identisch. Wie beim Pitchwinkel werden hier gleichabständig über die Zeit Transformationen beschrieben.

Im allgemeinen beschreibt jede Transformation drei Translationen und Rotationen (bei Quaternionen vier Parameter und eine Bedingung). In dieser Arbeit werden Quaternionen verwendet, um den Gimble-Lock-Effekt zu vermeiden. Alternativ kann durch geschickte Definition der Koordinatenachsen eine Sekundärdrehung von  $90^\circ$  vermieden werden und somit der Gimble-Lock-Effekt (vgl. Kapitel 2.1.1). Eine Interpolation zwischen den Quaternionen kann mittels *Slerp* (vgl. Gleichung 2.21) erfolgen.

In Abhängigkeit zur erwarteten Bewegung einer WEA können einzelne Komponenten des Bewegungsmodells bekannt, konstant oder unbekannt sein. Erfolgt beispielsweise keine Pitchregelung während der Aufnahme, so kann diese als konstant eingeführt werden. Es wird somit lediglich ein Pitchwinkel, der konstant über die Zeit ist, als Unbekannte je Rotorblatt betrachtet.

Weiterhin ist die Reduktion der globalen Transformationsparameter in einigen Anwendungsfällen sinnvoll, beispielsweise bei der Näherungswertsuche.

Hierbei kann eine Trennung in globale und relative Transformation erfolgen. Die globale Transformation beschreibt den Übergang in das Rotorblattsystem, die relative Transformation beschreibt die Rotation des Rotorblattsystems. Diese kann unter Umständen auf eine Rotation (innerhalb der Rotationsebene) reduziert werden oder auf eine konstante Rotationsgeschwindigkeit. Dieses Vorgehen ist insbesondere bei der Näherungswertsuche und bei der simultanen Bestimmung von Geometrie und Deformation von Rotorblättern (vgl. Kapitel 3.5.3) sinnvoll.

Der Zusammenhang zwischen einem CAD-Modell eines Rotorblattes bis hin zu einem Rotorblattsystem wird in Abbildung 3.4 dargestellt. Ein Punkt  $\mathbf{P}_{Sys}$  eines Rotorblattsystems ist somit abhängig von:

- einem Deformationsmodell ( $\delta_{Rot}(d, t)$ )
- einem zeitabhängigen Pitchwinkel  $P_{Rot}(t)$
- einer konstanten Transformation zur Beschreibung der Lage der Rotorblätter untereinander ( $\mathbf{X}_{Rot}; \mathbf{R}_{Rot}$ )
- einer globalen Transformation ( $\mathbf{X}_G(t); \mathbf{R}_G(t)$ )

Diese Parameter lassen sich in zwei Klassen einteilen: Parameter zur Beschreibung der Deformation  $\delta_{Rot_i}$  (vgl. Kapitel 3.2) eines Rotorblattes  $i$  sowie Parameter zur Beschreibung der Orientierung  $\mathbf{O}_{Rot_i}$  (globale und relative Orientierung) der Rotorblätter.

## 3.4 Definition der Beobachtungen

Basierend auf dem Deformationsmodell aus Kapitel 3.2 und der obigen Definition eines Rotorblattsystems werden im Folgenden die Beobachtungsgleichungen zur Bestimmung der unbekanntenen Deformationen und Transformationen aufgestellt. Als Beobachtungen werden photogrammetrische Bildmessungen (Kapitel 3.4.1) sowie Laserscannermessungen (Kapitel 3.4.2) eingeführt. Zusätzlich werden in Kapitel 3.4.3 optionale Pseudobeobachtungen zur Regularisierung des Gleichungssystems definiert.

### 3.4.1 Photogrammetrische Beobachtungen

Eine markante Information in einem Bild einer WEA ist die Silhouette der Rotorblätter im Bild (Abbildung 3.5). Als Beobachtung werden die Abstände der im Bild gemessenen Silhouette der Rotorblätter zu dem Rotorblattsystem minimiert. Hierzu muss das Rotorblattsystem in den Bildraum transformiert werden. Dies erfolgt für die Punkte des Rotorblattsystems  $\mathbf{P}_{Sys}$  mithilfe der Kollinearitätsgleichungen (Formel 2.60). Die topologischen Informationen zwischen den Punkten  $\mathbf{P}_{Sys}$  des Rotorblattsystems und den Punkten  $\mathbf{P}'_{Sys}$  im Bildraum werden mitgeführt.

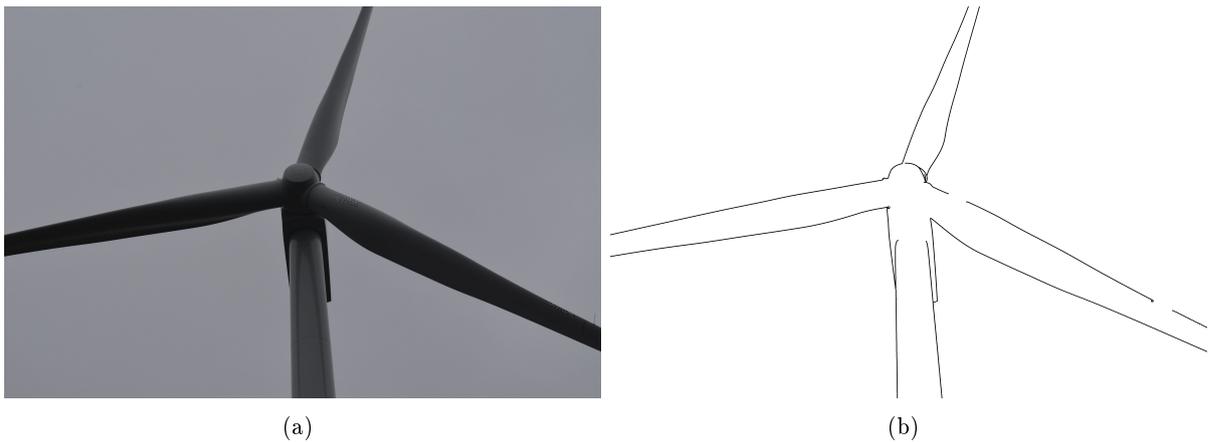


Abbildung 3.5: Zusammenhang zwischen einem Bild einer WEA (a) und der Silhouette durch Kantenextraktion mittels Canny-Operator (b)

Als Beobachtungsgleichungen wird für jeden Punkt der im Bild gemessenen Silhouette eine Abstandsminimierung zur extrahierten Silhouette durchgeführt. Hierbei wird der Abstand zwischen einem gemessenen Punkt  $\mathbf{q}_i$  und der Silhouette im Bild minimiert. Der Punkt  $\mathbf{P}'_{Int_i}$  ist hierbei der zugehörige Lotfußpunkt von  $\mathbf{q}_i$  auf der Silhouette. Nach Besl und McKay (1992) und Zhang (1994) ergibt sich folgende Beobachtungsgleichung:

$$0 + v_{d_{I_i}} = \|(\mathbf{P}'_{Int_i} - \mathbf{q}_i)\| \quad (3.26)$$

Es ist hierbei zu beachten, dass ein Punkt  $\mathbf{P}'_{Sys_i}$ , und somit auch der Lotfußpunkt  $\mathbf{P}'_{Int_i}$ , im Gegensatz zu einem Punkt beim gängigen ICP-Verfahren nicht ausschließlich von einer

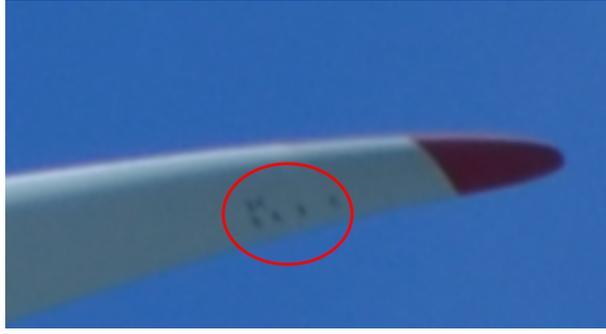


Abbildung 3.6: Markante Punkte durch Verschmutzung auf einem Rotorblatt

Transformation abhängig ist. In vorliegenden Fall gilt für den Punkt  $\mathbf{P}'_{Sys}$ :

$$\mathbf{P}'_{Sys} = F(\mathbf{IOR}_k, \mathbf{EOR}_k, \delta_{Rot_r}(t), \mathbf{O}_{Rot_r}(t)) \quad (3.27)$$

Es besteht somit eine Abhängigkeit zu den Orientierungsparametern der Kamera  $k$  sowie den Parametern der Verformung und Orientierung des Rotorblattes  $r$ .

Neben der Silhouette im Bild können vereinzelt markante Punkte im Bild vorhanden sein (vgl. Abbildung 3.6). Diese können als zusätzliche Information genutzt werden. Hierzu werden im Modell des betroffenen Rotorblattes zusätzliche Punkte  $\mathbf{P}_{CAD_M}$  definiert. Dies können bereits vorhandene Punkte des CAD-Modells sein oder auch unbekannte Punkte. Handelt es sich um einen unbekannt Punkt, so erhöht sich die Anzahl der Unbekannten um jeweils drei je Punkt. Diese Punkte werden wie andere Punkte eines Rotorblattes verwendet. Das bedeutet, dass sie anhand der Verformungs- und Orientierungsparameter transformiert werden. Aus dem Punkt  $\mathbf{P}_{CAD_M}$  folgt somit der Punkt  $\mathbf{P}_{Sys_M}$  der wiederum ins Bild transformiert werden kann. Als Beobachtung wird die zugehörige Bildkoordinate  $\mathbf{p}'_M$  eingeführt.

Es gilt somit für diese Punkte:

$$\mathbf{p}'_M + v_m = \mathbf{P}'_{Sys_M} \quad (3.28)$$

Bei Punkten, die als neue Unbekannte eingeführt wurden, ist eine Abstandminimierung zwischen Punkt und CAD-Modell erforderlich. Dies kann als Bedingung definiert werden:

$$0 = \|(\mathbf{P}_{CAD_M} - \mathbf{O}_{CAD})\| \quad (3.29)$$

In Fällen, bei dem ein markanter Punkt nicht auf einem Rotorblatt liegt sondern beispielsweise auf der Nabe, kann die Minimierung (Gleichung 3.29) des Abstandes zum CAD-Modell entfallen.

Als weitere markante Strukturen auf Rotorblättern können Raumkurven definiert werden, im einfachsten Fall als Polygon. Die Stützstellen des Polygons werden wie markante Punkte  $\mathbf{P}_{CAD_M}$  definiert.

Aufgrund von Mehrdeutigkeiten der Stützstellen auf der Kurve sind zusätzliche Bedingungen erforderlich, um die Lage der Stützstellen eindeutig zu definieren. Dies können

zum einen Abstandsbedingungen zwischen Knotenpunkten des Polygon sein oder die Definition des Anfangs- und Endpunktes in einem Bild. In dieser Arbeit wird als markante Raumkurve die Blatthinterkante verwendet. Eine explizite funktionale Beschreibung dieser ist bei der direkten Messung der Blatthinterkante erforderlich (Kapitel 3.5.2), da sie ansonsten Bestandteil des 3D-Modells ist. In Kapitel 3.5.2 wird die Blatthinterkante als Spline eingeführt und funktional beschrieben.

### 3.4.2 Beobachtungen aus Laserscannerdaten

Ein Laserscanner kann aufgrund der sequenziellen Abtastung den Deformationszustand eines Rotorblattes nur punktuell erfassen. Bei jeder Rotation des Laserscanners werden einzelne Vertikalprofile erfasst. Durchquert ein Rotorblatt diese vertikale Ebene, so wird ein Schnitt des Rotorblattes vom Laserscanner abgetastet. Die erfassten Punkte auf dem Schnitt enthalten Informationen zum Deformationszustand des Rotorblattes zum Zeitpunkt der Erfassung. Abbildung 3.7 zeigt einen Ausschnitt aus einem 3D-Scan, in dem deutlich einzelne Profile sichtbar sind.

Für die Rückführung auf die Deformation zu einem Zeitpunkt  $t$  ist es erforderlich, dass jeder Punkt der Punktwolke einen eindeutigen Zeitstempel besitzt. Dieser Zeitstempel muss mit dem Zeitstempel der Kameras übereinstimmen, da nur so eine Verknüpfung der Daten möglich ist.

Ist dies gegeben, so bilden die erfassten Punkte die Beobachtungen, die in einen funktionalen Zusammenhang zur Verformung gebracht werden müssen. Es ist zu beachten, dass jeder erfasste Punkt zu einem anderen Zeitpunkt erfasst wurde. Das bedeutet, dass streng genommen jeder Punkt bei einem anderen Deformationszustand erfasst wurde. In Kapitel 3.5.1 wird der zeitliche Versatz zwischen Punkten eines einzelnen Schnittes eines Rotorblattes genauer betrachtet.

Für die Aufstellung der Beobachtungsgleichungen ist eine unabhängige Betrachtung jedes Punktes erforderlich.

Für jeden gemessenen Punkt  $\mathbf{P}_{Scan_t}$  kann als Beobachtung die Minimierung des Abstandes zum Rotorblattsystem  $\mathbf{O}_{Sys_t}$  eingeführt werden:

$$0 + v_i = \|\mathbf{O}_{Sys_t} - \mathbf{P}_{Scan_t}\| \quad (3.30)$$

Wie bereits bei den photogrammetrischen Beobachtungen verdeutlicht, entspricht diese Minimierung nicht der typischen Vorgehensweise beim ICP-Verfahren. Die Oberfläche  $\mathbf{O}_{Sys}$  steht in Abhängigkeit zu Verformungs- und Orientierungsparametern, die abhängig vom Zeitpunkt  $t$  sind.

### 3.4.3 Beobachtungen zur Regularisierung des Gleichungssystems

Zur Sicherstellung der Lösbarkeit kann es sinnvoll sein regularisierende Beobachtungsgleichungen aufzunehmen. Mit diesen Gleichungen können auch Bereiche ohne Beobachtungen gelöst werden, die ansonsten zu einem singulärem Gleichungssystem führen. Mit den Ansatz aus Kapitel 3.2 ist diese Art der Beobachtung, insbesondere für die Verformungsparameter, sinnvoll.

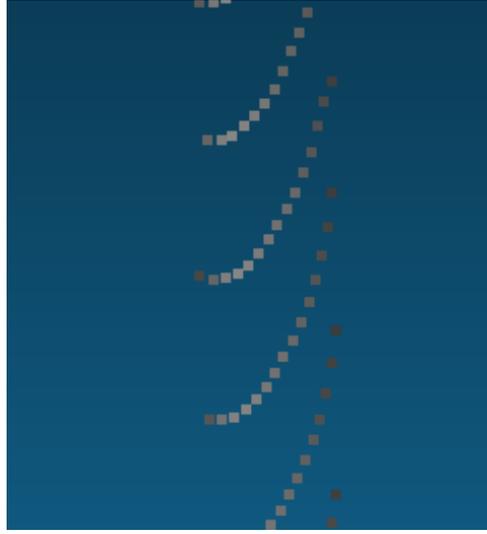


Abbildung 3.7: Detailansicht gemessener Profile im 2D-Modus (zeitlicher Ausschnitt). Jedes Profil stammt aus einer Umdrehung des Laserscanners.

Als geeignetes Verfahren bietet sich die Einführung von Neigungs- und/oder Krümmungstermen für jeden Deformationsknoten an. Hieraus folgen Energiefunktionen, welche neben den Verbesserungen der Beobachtungen aus Photogrammetrie und Laserscanning minimiert werden.

Voraussetzung für die Einführung dieser Energiefunktionen ist die Bildung von Ableitungen der zugrundeliegenden Funktionen. Da die Funktionswerte dieser Funktionen nur an diskreten Stellen (den Transformationsknoten) gegeben sind, hat die Bildung der Ableitung unter Verwendung dieser Transformationsknoten zu erfolgen.

Ein möglicher Ansatz ist die Bildung der Ableitungen durch Differenzen zwischen den gleichmäßig im Raster angeordneten Transformationsknoten. Dieses Vorgehen entspricht dem Vorgehen nach der Finiten-Differenzen-Methode (Szeliski, 2010).

Hieraus folgt für die erste Ableitung:

$$f_x = \frac{f_{i+d,j} - f_{i-d,j}}{2d} \quad (3.31)$$

$$f_y = \frac{f_{i,j+t} - f_{i,j-t}}{2t} \quad (3.32)$$

und für die zweite Ableitung:

$$f_{xx_{i,j}} = \frac{f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}}{dd} \quad (3.33)$$

$$f_{yy_{i,j}} = \frac{f_{i,j+1} - 2f_{i,j} + f_{i,j-1}}{tt} \quad (3.34)$$

$$f_{xy_{i,j}} = \frac{f_{i,j} - f_{i+1,j} - f_{i,j+1} + f_{i+1,j+1}}{dt} \quad (3.35)$$

Basierend auf diesen Ableitungen können unterschiedliche Funktionen zur Regularisierung genutzt werden.

In Weisensee (1992) und Wendt (2008) werden beispielsweise die zweiten Ableitungen minimiert, wodurch eine glatte Oberfläche gefordert wurde. Eine ähnliche Technik wird bei Thin-Plate-Splines eingesetzt, hierbei wird die Quadratsumme der zweiten Ableitungen minimiert (Szeliski, 2010). In einer abgewandelten Form erfolgt die Minimierung der ersten und zweiten Ableitungen (Thin-Plate Spline under Tension).

Als Variante verwendet Borkowski (2004) die zweiten und vierten Ableitungen zur Regularisierung bei der Beschreibung einer Oberfläche.

Eine Alternative zur Bestimmung der Ableitungen mit der Finiten-Differenzen-Methode kann die Bildung der Ableitung mittels des Finiten-Elemente-Ansatz sein. Bei diesem wird der betrachtete Parameterraum zunächst in Elemente unterteilt, diese werden durch geeignete Ansatzfunktionen  $\psi_k$  beschrieben. Der Funktionswert  $f_{i,j}$  ergibt sich aus einer Linearkombination der Ansatzfunktionen:

$$f_{i,j} = \sum_{k=1}^n w_k \psi_{k_{i,j}} \quad (3.36)$$

Hierbei beschreibt  $w_k$  die Gewichtung der zugehörigen Ansatzfunktionen  $\psi_k$  für den Transformationsknoten  $k$ .  $n$  entspricht der Anzahl der Transformationsknoten. Der Wert  $w_k$  wird auch als Wichtung bezeichnet (Merkel und Öchsner, 2015).

Eine Approximation mit Glattheitsbedingung für einen regelmäßig aufgeteilten Parameterraum wird in (Borkowski, 2004) hergeleitet. Hierbei werden lineare Ansatzfunktionen zur Beschreibung der quadratischen Elemente gewählt, auf dessen Basis die erforderlichen Ableitungen für die Energiefunktionen bestimmt werden.

Vorteile der Approximation einer Funktion durch Finite-Elemente ergeben sich insbesondere bei der Beschreibung komplexer Oberflächen und bei unregelmäßig verteilten Daten.

In dieser Arbeit erfolgt die Parametrisierung innerhalb eines regelmäßigen Gitters, weshalb die Finite-Differenzen-Methode bevorzugt wird. Als Regularisierung werden die zweiten Ableitungen minimiert. Diese werden mit den Gewichten  $P_{xx}$ ,  $P_{yy}$  und  $P_{xy}$  eingeführt.

### 3.5 Erweiterungen und alternative Ansätze

Das im Kapitel 3.2 vorgestellte Verfahren basiert auf einer mathematischen Beschreibung der Verformung eines einzelnen Rotorblattes auf Basis eines CAD-Modells. Damit ist es möglich, unter der Verwendung von Bildsequenzen und Laserscanner-Punktwolken die Verformung eines Rotorblattes zu beschreiben. In praktischen Anwendungen ist die Grundvoraussetzung, dass ein CAD-Modell des Rotorblattes verfügbar ist, meist nicht erfüllt. Daher werden im Folgenden alternative Ansätze diskutiert. Ist die ursprüngliche Form eines Rotorblattes nicht durch ein CAD-Modell gegeben, sind nur relative Aussagen möglich.

### 3.5.1 Erfassung von Pitchwinkel- und Torsionsänderungen aus Profilmessungen

Das Ergebnis eines Scans einer WEA ist zunächst eine Punktwolke, die sequenziell erfasst wurde. Über die Zeit ergeben sich hierbei einzelne Profile auf den Rotorblättern. In Abbildung 3.7 sind einige dieser Profile dargestellt. Gelingt es die Transformationen zwischen diesen Profilen zu bestimmen, können aus diesen relative Aussagen zu Winkeländerungen und Torsionsänderungen abgeleitet werden.

Entscheidende Größen bei der Erfassung von Profilen auf den Rotorblättern sind die Punktfrequenz des Laserscanners sowie die Umdrehungen pro Sekunde. In Abhängigkeit zu diesen beiden Größen kann eine Abschätzung der zu erwartenden Punkte je Profil erfolgen. Die Punktdichte ist für die Bestimmbarkeit von Torsion und relativen Blattwinkeln relevant. Sie muss ausreichend hoch sein, um ein Matching mittels ICP zwischen Profilen zu ermöglichen.

Neben der Punktdichte spielt die Zeit, die für die Erfassung eines Profils benötigt wird, eine große Rolle. Je länger ein Durchgang dauert, um so größer ist der Einfluss der Bewegung des Rotorblattes. Dies führt zu einer Verzerrung des registrierten Profils.

Die Forderung nach einer hohen Punktdichte sowie eine kurze Zeit für die Erfassung sind somit gegensätzliche Ziele.

Um den Einfluss der Erfassungszeit zu bewerten, wird im Folgenden eine Abschätzung vorgenommen. Es wird angenommen, dass ein Profil von 2 m Tiefe von einem Laserscanner in 100 m Entfernung mit 25 rps aufgenommen wird. Wird das Profil als Kreissegment betrachtet, welches durch den Laserscanner als Mittelpunkt und einen Radius von 100 m angenähert wird, so resultiert eine Erfassungszeit für dieses Segment von 0.13 ms.

Um die Verzerrung eines einzelnen Profils abzuschätzen wird der Weg berechnet, den das Rotorblatt an der betrachteten Position in der gleichen Zeit zurücklegt. Bei 15 Umdrehungen pro Minute und 50 m Rotorblattlänge ergibt sich eine Geschwindigkeit von ca. 80 m/s (ca. 288 km/h) an der Blattspitze. Dort ist die Profiltiefe zwar deutlich kleiner als 2 m, jedoch verdeutlicht dies die zu erwartende Größenordnung der resultierenden Verzerrung.

Innerhalb der 0.13 ms wird ein Weg von 1 cm an der Blattspitze zurückgelegt. Zur Korrektur dieser Verzerrung müssen das Zentrum, die Ebene, die Geschwindigkeit und Richtung der Rotation bekannt sein.

Die erreichbare Punktdichte auf dem Profil lässt sich aus der Punktfrequenz des Laserscanners ableiten. Moderne Laserscanner arbeiten mit Frequenzen von bis zu 1 MHz. Da eine hohe Frequenz ein höheres Rauschen der Distanzmessung bedeutet, wird hier von 250000 Hz ausgegangen. Bei einer Erfassungsdauer von 0.13 ms ergeben sich insgesamt 32 Punkte auf dem Profil. Dies bedeutet, dass die Punkte einen Abstand von 6 cm zueinander haben, was für eine Bestimmung von relativen Winkeln ausreichend ist.

Für die Berechnung vom Blattwinkel ist neben der Bewegungsunschärfe zusätzlich das Bezugssystem von Bedeutung. Torsionen sowie Anstellwinkel beziehen sich auf die Rotorblattachse. Ein Laserscanner erfasst für gewöhnlich vertikale Schnitte. Diese Schnitte sind nicht rechtwinklig zur Rotorblattachse (vgl. Abbildung 3.8).

Für die Ableitung von Winkeln ist eine Projektion der gemessenen Punkte in eine definierte Ebene senkrecht zur Rotorblattachse erforderlich.

Der Einfluss der Projektion in eine Referenzebene kann anhand eines Beispiels abgeschätzt werden. Der Winkel zwischen zwei Profilen wird vereinfachend als Winkel zwischen

zwei Geraden betrachtet. Zur Bestimmung beispielsweise eines relativen Blattwinkels muss das gemessene Profil in eine Referenzebene projiziert werden. Hierdurch kann sich der gemessene Winkel gegenüber dem ursprünglichen Winkel verändern. Bei einem Winkel von  $3^\circ$  zwischen zwei Profilen beträgt die Änderung ca. 1.5% bei einer  $10^\circ$  geneigten Referenzebene.

Ein weiterer einschränkender Faktor ist die Geometrie des Rotorblattes. Eine Projektion ist nur bei einem konstanten Querschnitt des Rotorblattes zulässig. Da dies nur genähert gilt, kann eine Projektion in eine Bezugsebene lediglich für einen schmalen Ausschnitt erfolgen. Kann beispielsweise ein Bereich von 1 m als konstant angenommen werden, folgt hieraus ein Bereich, in dem eine Projektion zulässig ist.

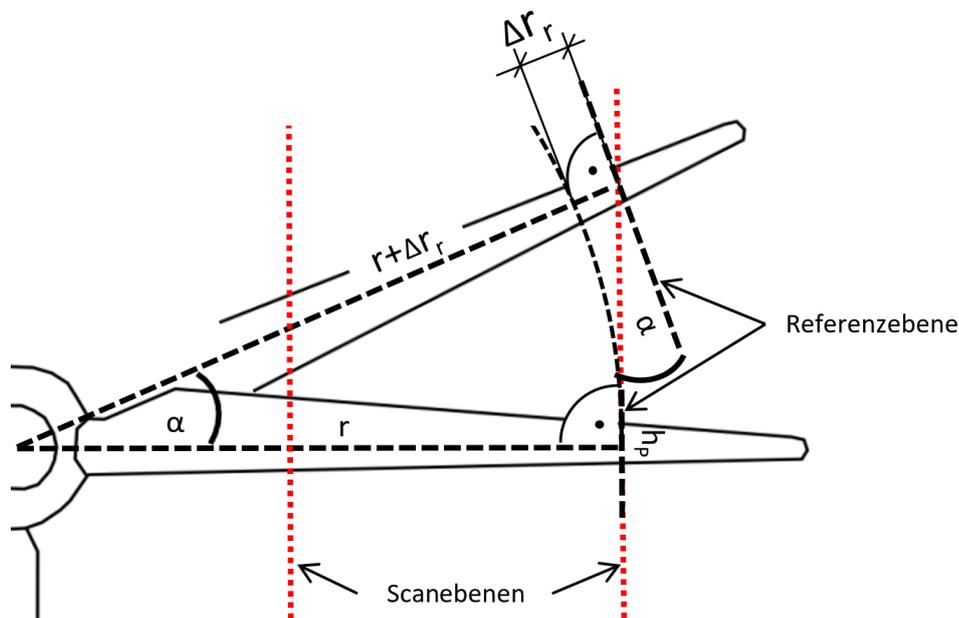


Abbildung 3.8: Erfassung eines Rotorblattes mit zwei Profilsclannern.

Es gilt folgender Zusammenhang zur Abschätzung des zulässigen Bereiches  $\Delta r$ :

$$\alpha = \arccos(r/(r + \Delta r)) \quad (3.37)$$

Ein begrenzender Faktor ist die Profiltiefe  $h_p$  des Rotorblattes. Abhängig vom Schnittwinkel  $\alpha$  zwischen Scanebene und Rotorblattachse ergibt sich ein geeigneter Bereich für die Erfassung des Profils:

$$\Delta r = h_p \tan(\alpha) \quad (3.38)$$

Aus diesen Zusammenhängen lässt sich in Abhängigkeit zum Radius und zur Profiltiefe ein zulässiger Bereich um die Horizontalstellung des Rotorblattes definieren, der zur Ableitung von Blattwinkeln geeignet ist.

In diesem Bereich ist es möglich, aus den Profilen eines oder mehrerer Laserscanner auf Winkeländerungen zu schließen. Die Bestimmung von Torsionsänderungen ist nur bei

der Verwendung von zwei synchronisierten Laserscannern möglich, sodass aufgenommene Profile eines Laserscanners dem anderen zugeordnet werden können.

Da die Laserscanner im Regelfall unabhängig voneinander betrieben werden, können die Profile nicht simultan erfasst werden. Der maximale zeitliche Versatz beträgt  $1/2 \text{ rps}^{-1}$ . Dies bedeutet bei 25 rps, dass die maximale Zeit zwischen der Erfassung von zwei Profilen mit zwei Laserscannern  $1/50 \text{ s} = 0.02 \text{ s}$  beträgt.

In Bezug auf die Torsion des Rotorblattes kann dieser zeitliche Versatz als vernachlässigbar eingestuft werden. Typische Frequenzen an einer WEA orientieren sich an der Umlaufgeschwindigkeit und der Anzahl an Rotorblätter. Bei drei Rotorblättern und 15 Umdrehungen in der Minute sind markante Frequenzen für Schwingungen bei 0.25 Hz und 0.75 Hz zu erwarten. Somit beträgt der zeitliche Versatz  $1/200$  bzw.  $1/66$  der Wellenlänge der Schwingung.

### **Bestimmung der Korrekturparameter**

Für die Erfassung von relativen Blattwinkeln wurden einige begrenzende Einflüsse für die Bestimmbarkeit der Winkel aufgeführt. Mathematisch relevant ist die Festlegung der Bezugsebene sowie die Verzerrung des erfassten Profils aufgrund der Relativbewegung zwischen Rotorblatt und Laserscanner.

Zur Korrektur der Verzerrung aufgrund der Relativbewegung sind das Rotationszentrum, die Rotationsebene, die Rotationsgeschwindigkeit und Rotationsrichtung der Rotorblätter erforderlich. Für die Projektion in eine Referenzebene kann als Näherung ein Vektor vom Rotationszentrums zum Schwerpunkt des erfassten Profils als Normalenvektor eingeführt werden.

Die Bestimmung der erforderlichen Größen kann aus einem 3D-Scan der Anlage erfolgen. Die Position der Nabe wird manuell in der Punktwolke bestimmt. Die Nabe befindet sich auf der Rotationsachse und kann als Näherung des Rotationszentrums verwendet werden. Eine bessere Näherung ist der Lotfußpunkt der Nabe auf der Rotationsebene. Die Position der Nabe wird bei diesem Vorgehen als fest angenommen. Eine Rotation der Anlage um die Horizontalachse, wegen wechselnder Windrichtung, würde einen erneuten 3D-Scan erforderlich machen. Aus diesem Grund wird in (Große-Schwiep u. a., 2013) ein alternatives Vorgehen beschrieben, bei dem die Gondelbewegung durch eine Kamera beobachtet wird. Um dies zu realisieren muss ein Modell der Gondel vorliegen. Die Verknüpfung der Kamera mit dem Laserscanner erfolgt hierbei über die Gondel der WEA, deren Rotation getrackt wird. Somit kann eine kontinuierliche Transformation der gemessenen Scandaten in das Koordinatensystem der Gondel erfolgen. Soll keine zusätzliche Kamera verwendet werden oder liegen keine CAD-Daten der Gondel vor, kann durch ein Näherungsverfahren die Position der Nabe aus den Messdaten von mindestens zwei Scannern simultan bestimmt werden. Dieses Verfahren ist in Abbildung 3.8 skizziert. Wenn zwei Scanner zum Einsatz kommen, kann das Rotationszentrum aus Strahlenschnitten bestimmt werden. Hierbei müssten die Schwerpunkte zeitgleich erfasster Profile von beiden Scannern zu Geraden verbunden werden. Da die Erfassung der Profile typischerweise nicht simultan erfolgt, muss eine Interpolation der Schwerpunkte erfolgen. Das Rotationszentrum ergibt sich aus der Minimierung der Abstände zu den beteiligten Geraden. Aufgrund der nicht geradlinigen Rotorblattform und unterschiedlicher Dicken der Rotorblätter kann dies nur eine grobe Näherung darstellen.

Von größerer Bedeutung für die Korrektur ist die Rotationsebene. Sie lässt sich als mittlere Ebene aus den gemessenen Punkten bestimmen. Um die unterschiedlichen Blattdicken teilweise zu kompensieren, wird eine Vorauswahl der Punkte entsprechend des Radius zum Rotationszentrum getroffen. Aufgrund von Verformungen der Rotorblätter kann die Rotationsebene nur genähert bestimmt werden. Einfluss hat die Ebene auf die Korrektur der Bewegungsunschärfe. Eine Abweichung der Ebene um einige Grad ist aufgrund der Größenordnung der zu erwartenden Bewegungsunschärfe tolerierbar. Hierüber hinaus sind die Geschwindigkeit sowie die Richtung der Rotation für die Korrektur relevant. Diese können aus der Profilmessung eines Scanners abgeleitet werden. Als einfaches Mittel hat sich die Betrachtung der  $z$ -Koordinaten der Profilschwerpunkte herausgestellt. Zur Identifikation der horizontalen Blattstellung werden Profile ermittelt, deren  $z$ -Koordinaten des Schwerpunkts ( $Z_S$ ) der  $z$ -Koordinate der Nabe ( $Z_N$ ) nahe kommen. Hierzu ist es erforderlich, Differenzen zwischen  $Z_N$  und  $Z_S$  zu bestimmen. Aus den Vorzeichen der Differenzen ergibt sich die Rotationsrichtung. Der Nulldurchgang dieser Differenzen gibt weiterhin Aufschluss über die Winkelgeschwindigkeit. Hierzu werden die zeitlichen Differenzen zwischen den Nulldurchgängen analysiert. Bei drei Rotorblättern wird zwischen zwei Nulldurchgängen ein Winkel von  $120^\circ$  zurückgelegt. Die Winkelgeschwindigkeit ergibt sich somit aus  $120^\circ/(\Delta t)$ .

### 3.5.2 Erfassung der dynamischen Durchbiegung durch photogrammetrische Ansätze

Die Verwendung von Silhouetten in Kapitel 3.4.1 ist ein Verfahren zur simultanen Erfassung von Torsion und Durchbiegung, aufbauend auf dem CAD-Modell eines Rotorblattes. Liegt kein Modell vor, so können nur gut definierte Bereiche durch Mehrbildphotogrammetrie erfasst werden. Texturierte Bereiche oder markante Strukturen müssen sich in Bildern eindeutig zuordnen lassen. Zu nennen sind Strukturkanten, wie die Blatthinterkante, oder auch die Trailing-Edge-Serrations TES (siehe Abbildung 3.9). Bei ausreichender Auflösung der Bildern lassen sich die Zacken der TES verfolgen, um Trajektorien zu bestimmen. Diese liefern Informationen zur Bewegung des gesamten Rotorblattsystems. Hierzu gehören die Deformationen (Torsion und Durchbiegung), die Rotation des Rotorblattsystems sowie andere Bewegungen, die auf das Rotorblattsystem übertragen werden, wie beispielsweise die Turmschwingung.

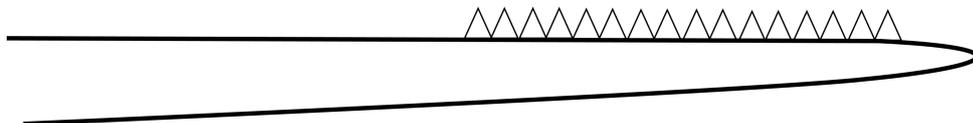


Abbildung 3.9: Skizze von Trailing Edge Serrations (auch „Hinterkantenkamm“ genannt) an einem Rotorblatt. Die Zacken an der Blatthinterkante dienen der Reduktion von Schallimmissionen.

Diese Effekte müssen zur Bestimmung der gesuchten Durchbiegungsänderung der Rotorblätter getrennt werden. Die Rotation des Rotorblattsystems kann durch die Annahme, dass es sich hierbei um einen über eine oder wenige Umdrehungen konstante Rotationsgeschwindigkeit handelt, herausgefiltert werden. Eine Möglichkeit ist ein Hochpassfilter auf

den Daten, wenn man davon ausgeht, dass die Durchbiegungsschwingung der Rotorblätter höherfrequenter ist als die Rotation.

Eine weitere Möglichkeit bieten Beobachtungen an stabilen Bereichen des Rotorblattsystems. Dies können Kanten oder Punkte nahe der Blattwurzel oder auf der Nabe der WEA sein. Je nach Ausdehnung dieser Bereiche können diese zur Bestimmung von translatorischen Schwingungen oder auch zur Bestimmung der gesamten Starrkörperbewegung genutzt werden (Rotation und Translation). Neben Messungen auf dem Rotorblattsystem sind Beobachtungen auf der Gondel zum Teil geeignet, hierbei muss die Dämpfung zwischen der Gondel zum Rotorblattsystem berücksichtigt werden.

Die Trennung der Torsion von der Durchbiegung ist anhand einzelner Punkte nicht möglich. Der Einfluss der Torsion auf eine zu erfassende Durchbiegung lässt sich anhand der zu erwartenden Torsionsschwingung sowie der Profiltiefe abschätzen. Wird die Profilmittelpunkt als Drehpunkt der Torsion angenommen, so ergibt sich ein Einfluss  $\Delta_\varphi$  aus der Amplitude der Torsionsschwingung  $\varphi_T$  und der Profiltiefe  $h_p$ :

$$\Delta_\varphi = \frac{1}{2}h_p \cdot \arcsin(\varphi_T) \quad (3.39)$$

Neben markanten Punkten auf den Rotorblättern können Kanten zur Bestimmung der Durchbiegungsänderung genutzt werden, wie die Blatthinterkante. Diese ist in vielen Bereichen lediglich wenige *mm* bis *cm* dick (vgl. Abbildung 3.10) und kann somit als Raumkurve betrachtet werden. Verfahren zur Bestimmung von Raumkurven aus Kantenmessungen im Bild sind u.a. in Gruen und Li (1997), Gruen und Akca (2005), Lee und Yu (2009) und Lee (2008) gegeben.

In Lee (2008) wird hierzu die Kurve als kubischer Spline beschrieben. Die Beschreibung als Spline hat den Vorteil, dass dieser in einer Bündelblockausgleichung integriert werden kann. Dies bietet die Möglichkeit der simultanen Bestimmung der äußeren Orientierung und der Blatthinterkante. Da die Kenntnis der äußeren Orientierung eine Voraussetzung bei der Bestimmung von Deformationen ist, wird im Folgenden ein Ansatz in Anlehnung an Lee (2008) entwickelt.

Bei einem kubischen Spline wird eine zu interpolierende Funktion in einzelne Segmente unterteilt, die durch ein Polynom dritten Grades beschrieben werden.

Für jedes Segment  $s$  der Raumkurve gilt:

$$X(k) = a_{0s} + a_{1s}k + a_{2s}k^2 + a_{3s}k^3 \quad (3.40)$$

$$Y(k) = b_{0s} + b_{1s}k + b_{2s}k^2 + b_{3s}k^3 \quad (3.41)$$

$$Z(k) = c_{0s} + c_{1s}k + c_{2s}k^2 + c_{3s}k^3 \quad (3.42)$$

Durch Einsetzen in die Kollinearitätsgleichungen erhält man für einen Punkt  $i$  im Bild folgenden funktionalen Zusammenhang:

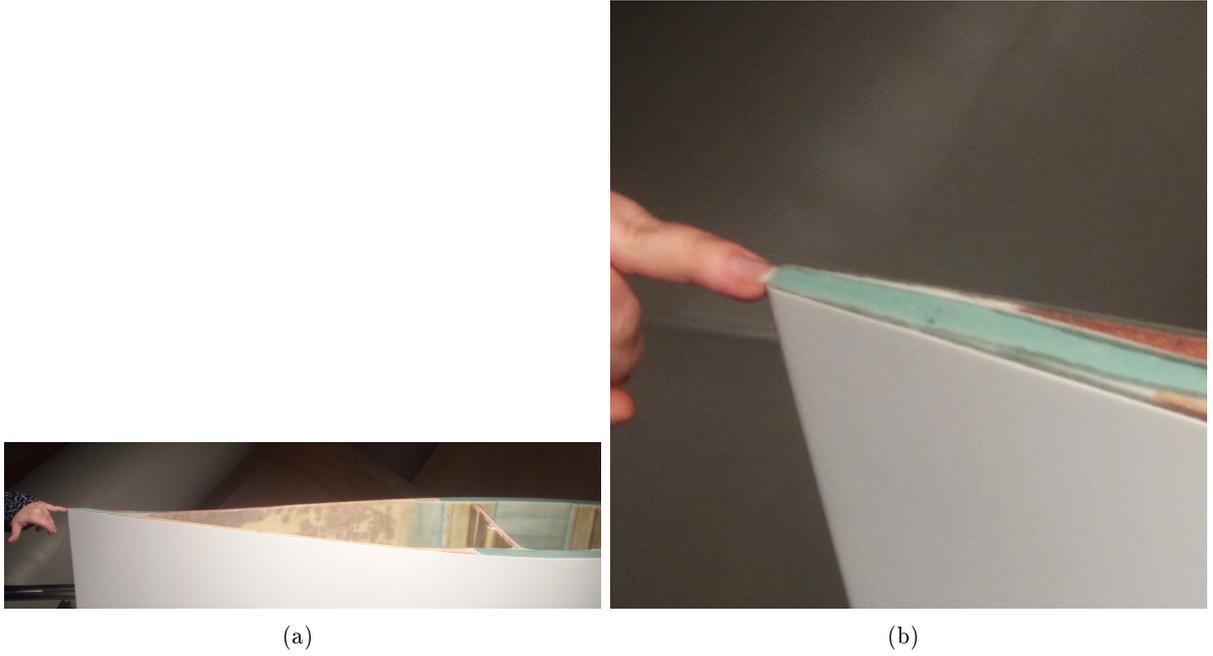


Abbildung 3.10: Querschnitt aus einem 39m langem Rotorblatt. Übersichtsbild (a), Detailansicht Blatthinterkante (b)

$$x'_i = x'_0 + z' \frac{r_{11}(X(k_i) - X_0) + r_{21}(Y(k_i) - Y_0) + r_{31}(Z(k_i) - Z_0)}{r_{13}(X(k_i) - X_0) + r_{23}(Y(k_i) - Y_0) + r_{33}(Z(k_i) - Z_0)} + \Delta x' \quad (3.43)$$

$$y'_i = y'_0 + z' \frac{r_{12}(X(k_i) - X_0) + r_{22}(Y(k_i) - Y_0) + r_{32}(Z(k_i) - Z_0)}{r_{13}(X(k_i) - X_0) + r_{23}(Y(k_i) - Y_0) + r_{33}(Z(k_i) - Z_0)} + \Delta y' \quad (3.44)$$

Das funktionale Modell wird somit erweitert um eine Unbekannte  $k_i$  je beobachtetem Punkt im Bild, sowie den Funktionsparametern  $a_{0s}, a_{1s}, a_{2s}, a_{3s}, b_{0s}, b_{1s}, b_{2s}, b_{3s}, c_{0s}, c_{1s}, c_{2s}$  und  $c_{3s}$ . Zusätzlich werden für den Übergang zwischen zwei Segmenten des Splines Glattheitsbedingungen eingeführt. Diese sind an den Stützstellen  $r_j$  zwischen den Funktionen definiert:

$$a_{1s} + 2a_{2s}k_{r_j} + 3a_{3s}k_{r_j}^2 = a_{1s+1} + 2a_{2s+1}k_{r_j} + 3a_{3s+1}k_{r_j}^2 \quad (3.45)$$

$$b_{1s} + 2b_{2s}k_{r_j} + 3b_{3s}k_{r_j}^2 = b_{1s+1} + 2b_{2s+1}k_{r_j} + 3b_{3s+1}k_{r_j}^2 \quad (3.46)$$

$$c_{1s} + 2c_{2s}k_{r_j} + 3c_{3s}k_{r_j}^2 = c_{1s+1} + 2c_{2s+1}k_{r_j} + 3c_{3s+1}k_{r_j}^2 \quad (3.47)$$

$$2a_{2s}k_{r_j} + 6a_{3s}k_{r_j} = 2a_{2s+1} + 6a_{3s+1}k_{r_j} \quad (3.48)$$

$$2b_{2s}k_{r_j} + 6b_{3s}k_{r_j} = 2b_{2s+1} + 6b_{3s+1}k_{r_j} \quad (3.49)$$

$$2c_{2s}k_{r_j} + 6c_{3s}k_{r_j} = 2c_{2s+1} + 6c_{3s+1}k_{r_j} \quad (3.50)$$

Weiterhin wird für die unbekanntenen Stützstellen gefordert, dass ihr Funktionswert in beiden Segmenten identisch ist.

$$a_{0s} + a_{1s}k_{r_j} + a_{2s}k_{r_j}^2 + a_{3s}k_{r_j}^3 = a_{0s+1} + a_{1s+1}k_{r_j} + a_{2s+1}k_{r_j}^2 + a_{3s+1}k_{r_j}^3 \quad (3.51)$$

$$a_{0s} + a_{1s}k_{r_j} + a_{2s}k_{r_j}^2 + a_{3s}k_{r_j}^3 = b_{0s+1} + b_{1s+1}k_{r_j} + b_{2s+1}k_{r_j}^2 + b_{3s+1}k_{r_j}^3 \quad (3.52)$$

$$a_{0s} + a_{1s}k_{r_j} + a_{2s}k_{r_j}^2 + a_{3s}k_{r_j}^3 = c_{0s+1} + c_{1s+1}k_{r_j} + c_{2s+1}k_{r_j}^2 + c_{3s+1}k_{r_j}^3 \quad (3.53)$$

Als Randbedingungen gelten für einen offenen Spline:

$$2a_{20}k_{r_0} + 6a_{30}k_{r_0} = 0 \quad (3.54)$$

$$2a_{2n}k_{r_n} + 6a_{3n}k_{r_n} = 0 \quad (3.55)$$

Trotz dieser Bedingungen zwischen den Segmenten verbleibt ein Rangdefekt, da die unbekanntenen Stützstellen entlang der Raumkurve verschoben werden können. Dieser kann durch die Definition eines Anfangspunktes in einem Bild sowie durch die Vorgabe des Abstandes zwischen den Stützstellen behoben werden.

Für den Anfangspunkt wird  $k = 0$  gesetzt. Der Abstand  $d$  wird aus den Näherungswerten übernommen und als konstant eingeführt. Es gilt die Bedingung:

$$d_{r_j r_{j+1}} = \sqrt{(X(k_{r_{j+1}}) - X(k_{r_j}))^2 + (Y(k_{r_{j+1}}) - Y(k_{r_j}))^2 + (Z(k_{r_{j+1}}) - Z(k_{r_j}))^2} \quad (3.56)$$

Alternativ können die Stützstellen in einem Bild vorgegeben werden, so dass für die Stützstellen die Unbekannten  $k_i$  entfallen.

Im Gegensatz zur Messung von markanten Punkten ist bei der Erfassung von Kanten keine direkte Zuordnung zwischen zwei Epochen möglich. Es besteht das Problem der Festlegung des Datums (Transformation zwischen zwei Epochen) sowie die Bestimmung der Deformation an einer Position.

Für eine Zuordnung muss zunächst eine Überführung in ein gemeinsames Koordinatensystem erfolgen. Dies kann z.B. durch stabile Bereiche geschehen, die durch ein ICP-Verfahren aufeinander transformiert werden. Weiterhin kann der Ansatz aus Kapitel 3.2 genutzt werden, um die Verformung zwischen den Raumkurven zu bestimmen. Hierbei ist zu beachten, dass dieser Ansatz Torsionen beinhaltet. Diese können aus einer Raumkurve nicht bestimmt werden und somit nicht als Unbekannte aufgenommen werden. Die Bezugskurve (neutrale Faser) ist überdies nicht bekannt. Zur Bestimmung der Durchbiegungsänderung an der Blatthinterkante wird hierzu die beobachtete Raumkurve der ersten Epoche eingeführt.

### 3.5.3 Simultane Schätzung der Geometrie und Verformung eines Rotorblattsystems

Die oben vorgestellten Ansätze sind Verfahren, die mit Einschränkungen in der Lage sind die Verformungen eines Rotorblattes zu erfassen. Durch Messung der Blatthinterkante ist es möglich die Durchbiegung zu bestimmen, durch Profilmessungen kann die Torsion in

einem begrenzten Umfang bestimmt werden. Das in Kapitel 3.2 vorgestellte Verfahren ist in der Lage diese Parameter an allen Positionen zu bestimmen, benötigt jedoch als Vorinformation die Geometrie der Rotorblätter, weshalb es als weniger praxistauglich anzusehen ist, da diese Information den Herstellern vorbehalten ist.

In Kapitel 2.2.3 wurden Verfahren zur Bestimmung der optischen Hülle eines Objektes aus Silhouetten vorgestellt. Werden diese um Bewegungs- und Verformungsparameter erweitert, so lässt sich der Ansatz aus 3.2 nutzen.

Geeignete Verfahren basieren auf Parameteroberflächen. Aufgrund der Geometrie eines Rotorblattes wird hierzu eine profilweise Betrachtung mit linearer Interpolation zwischen den Profilen vorgeschlagen. Ein Rotorblatt wird somit durch eine Folge von Profilen beschrieben. Im Folgenden werden diese Profile entlang der Hauptachse des Rotorblattes definiert. Zur Vereinfachung wird diese gleich der x-Achse gesetzt. Die Position auf der x-Achse wird vorgegeben. Zur Beschreibung eines Profils kann beispielsweise ein Spline oder Polygon verwendet werden.

Hierbei besteht das Problem der eindeutigen Definition eines Profils. Es besteht eine Abhängigkeit zwischen der Lage eines Profils zu einer Translation im Deformationsmodell. Weiterhin bestehen Abhängigkeiten zwischen Rotation, Torsion und Pitch-Winkel des Rotorblattes, die zu einem singulärem Gleichungssystem führen. Zur Behebung dieses Defektes müssen Bedingungen berücksichtigt werden. Es wird festgelegt, dass der geometrische Schwerpunkt der Stützstellen auf der x-Achse liegt. Es gilt je Profil:

$$0 = \sum_{n=1}^n x_i \quad (3.57)$$

$$0 = \sum_{n=1}^n y_i \quad (3.58)$$

Weiterhin wird durch die Definition von Stützstellen der Kurven die Abhängigkeit zur Rotation behoben. Hierzu werden Punkte auf den Koordinatenachsen mit jeweils einem Freiheitsgrad eingeführt. Stützstellen, die nicht auf einer Achse liegen, mit zwei Freiheitsgraden (vgl. Abbildung 3.11). Die Einführung von zwei Freiheitsgraden für diese Punkte hat sich in Bereichen mit größerer Krümmung als positiv herausgestellt, da Punkte sich entlang dieser Bereiche besser verteilen können.

Zur Behebung des Rangdefektes der Punkte mit zwei Freiheitsgraden sind krümmungsminimierende Glattheitsbedingungen erforderlich. Bei der Formulierung der Glattheitsbedingungen wird die Blatthinterkante als eine Unstetigkeitsstelle auf einer Koordinatenachse berücksichtigt. Für diese wird keine Glattheit gefordert.

Weiterhin werden Glattheitsbedingungen zwischen den Profilen definiert, die insbesondere für die Regularisierung benötigt werden. Dies wird bei der Betrachtung der Verteilung der Beobachtungen deutlich. Bei der Verwendung von Silhouetten werden nur Beobachtungen für Bereiche erzeugt, welche die Silhouette bilden. Dies sind bei typischen Aufnahme Konfigurationen (Kameras vor oder hinter der WEA) die Vorder- und Hinterkante des Blattes (siehe Abbildung 3.5). Als Folge werden große Bereiche der Profile durch die Glattheitsbedingungen interpoliert.

Zur Regularisierung wird eine Krümmungsminimierung eingeführt:

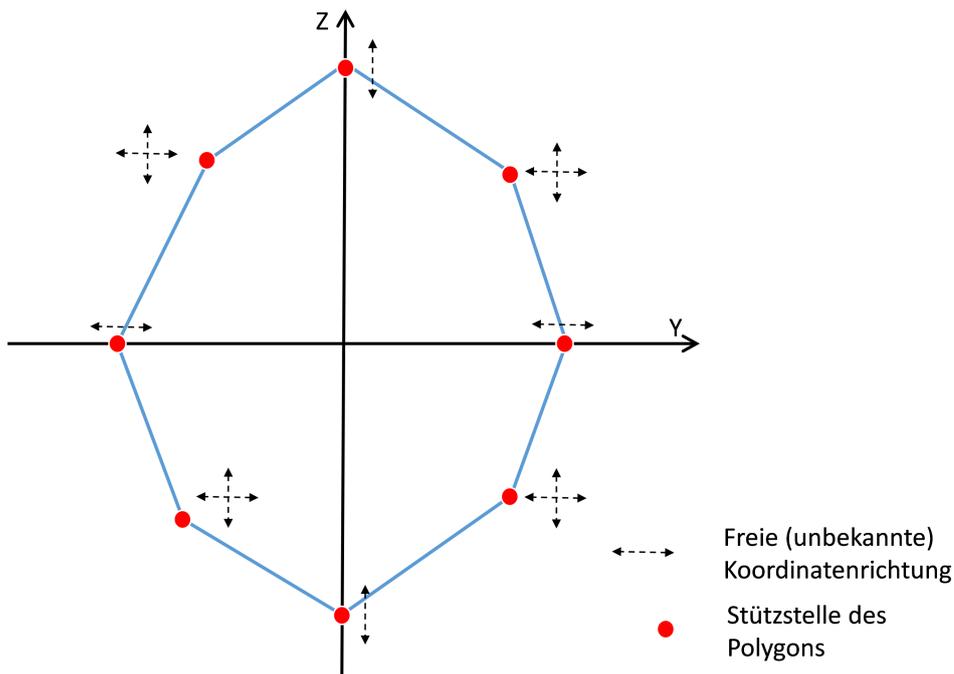


Abbildung 3.11: Freiheitsgrade der Stützstellen eines Profils. Punkte auf den Koordinatenachsen werden mit einer Unbekannten eingeführt, andere mit zwei.

$$0 = x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1} \quad (3.59)$$

$$0 = y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1} \quad (3.60)$$

Die Vernachlässigung der Abstände zwischen den Stützstellen hat bei dieser Regularisierung zur Folge, dass Punkte in Bereichen mit großer Krümmung verschoben werden.

Eine nach diesem Ansatz beschriebene Oberfläche kann als Ersatz für das CAD-Modell in Kapitel 3.2 verwendet werden. Durch die oben eingeführten Bedingungen ist die neutrale Faser gleich der x-Achse des Koordinatensystems. Dies führt dazu, dass alle Stützstellen eines Profils im Modell die gleiche Deformation aufweisen. Bei geschickter Parametrisierung kann somit die Interpolation zwischen Transformationsknoten vermieden werden. Hierzu müssen die Transformationsknoten mit den Positionen der Profile übereinstimmen.

Im Gegensatz zum ursprünglichen Ansatz in Kapitel 3.2 werden hier keine absoluten Deformationen bestimmt, sondern sie beziehen sich auf die Oberfläche, die als Unbekannte mitgeschätzt wird. Es werden somit relative Aussagen getroffen.

### 3.6 Diskussion

In diesem Kapitel wurden unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung von Rotorblattdeformationen vorgestellt. Sie lassen sich unterscheiden in Verfahren zur Ableitung von absoluten und relativen Deformationen. Die Bestimmung von absoluten Deformationen ist nur mit Vorkenntnissen möglich, z.B. mit CAD-Daten der Rotorblätter. In Kapitel

3.2 wurde hierzu ein neues Verfahren zur Bestimmung von Deformationen von balkenähnlichen Objekten vorgestellt. Mit diesem Ansatz ist es möglich, anhand von indirekten Beobachtungen wie der Silhouette im Bild auf die Verformung des Objektes zu schließen. Weiterhin können zusätzliche Sensoren, wie z.B. Dehnungsmessstreifen oder auch Beschleunigungsmesser, integriert werden.

Im Vergleich zu anderen Verfahren ist dies ein rechenintensives Verfahren. Insbesondere die Einführung von zeitabhängigen Deformationen, die bei Einbeziehung von Laserscanner-Daten erforderlich sind, erhöhen die Anzahl der Unbekannten deutlich. Weiterhin enthalten die Massendaten (Punktwolken und Bildsequenzen) viele Beobachtungen, die zum einen eine hohe Redundanz bei der Bestimmung der Unbekannten bewirken, zum anderen wiederum rechenintensiv sind.

Weiterführend wurden in Kapitel 3.5 Verfahren diskutiert, die nicht auf CAD-Daten angewiesen sind. Diese Verfahren sind lediglich in der Lage relative Aussagen zu Deformationen zu geben. Betrachtet wurde die Verwendung von Laserscanner-Profilen zur Bestimmung von relativen Blattwinkeln, die photogrammetrische Erfassung der Blatthinterkante zur Ableitung von Durchbiegungsänderungen sowie eine Erweiterung des in Kapitel 3.2 vorgestellten Verfahrens, bei dem das 3D-Modell als unbekannt eingeführt und in einer Ausgleichung geschätzt wird.

Die Bestimmung der relativen Blattwinkel sowie der Durchbiegungsänderungen sind Verfahren, die bereits zum Teil durch kommerziell verfügbare Software abgedeckt sind. Beide haben aufgrund des vergleichbar geringen Rechenaufwandes das Potential für ein Echtzeitüberwachungssystem.

Bei der simultanen Bestimmung des 3D-Modells muss mit Genauigkeitseinbußen, bei gleichen Messdaten, im Vergleich zu einer Auswertung mit CAD-Modell gerechnet werden, da zusätzliche Parameter für die Oberfläche zu bestimmen sind. Da die Oberfläche, abgesehen von der Deformation, als konstant angenommen werden kann, ist anzunehmen, dass mit zunehmender Messzeit (und dadurch Redundanz im Gleichungssystem) die Unsicherheit der Oberfläche eine untergeordnete Rolle bei der Bestimmung der Deformation spielt.



## 4 Prototypische Implementierung

Bei der prototypischen Implementierung wird auf eine flexible Gestaltung des Programmablaufs geachtet. Wie in Kapitel 3 deutlich wird, sind verschiedene Abläufe und Parametrisierungen denkbar. Ein allgemeiner Ablauf einer Berechnung wird in Kapitel 4.1 beschrieben.

Der Übersicht halber wird in den folgenden Kapiteln lediglich auf wesentliche Punkte des Programmablaufs eingegangen.

Ein wesentlicher Aspekt ist die Trennung der geometrischen Beschreibung eines Objektes von der mathematischen Beschreibung des Modells (z.B. dem verwendeten Deformationsmodell). Um eine möglichst weitreichende Unabhängigkeit zwischen den verwendeten mathematischen Modellen zur Beschreibung der Deformation und Bewegung eines Objektes und der geometrischen Beschreibung eines Objektes zu gewährleisten, wird auf Techniken des automatischen Differenzierens zurückgegriffen. Auf diese wird in Kapitel 4.2 näher eingegangen.

Kapitel 4.3 und 4.4 beschreiben die Bestimmung der Beobachtungen aus Silhouetten im Bild sowie aus Punkten einer Punktwolke. Insbesondere die Extraktion der Silhouette aus einem gegebenen CAD-Modell ist ein für die Berechnung wesentlicher Bestandteil.

### 4.1 Allgemeiner Ablauf einer Berechnung

Ein einzelner Ablauf einer Berechnung ist nach dem EVA-(Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe) Prinzip gestaltet. Es erfolgt zu Programmstart die Übergabe aller für eine Berechnung erforderlichen Parameter und Daten. Hierbei können, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, verschiedene Eingangsdaten kombiniert werden. Im weiteren Programmablauf werden diese gefiltert und vorverarbeitet.

Die Eingangsdaten sind hierbei die Messwerte der einzelnen Systeme (Punktwolken und Bilder jeweils mit Zeitstempel) sowie Orientierungsdaten der Systeme. Zu den Orientierungsdaten gehören bei Laserscannern und Kameras eine Translation und Rotation des Messsystems sowie ein zeitlicher Offset für den Zeitstempel. Neben diesen Sensordaten werden weiterhin eine Beschreibung des Objektes (CAD-Modell oder mathematische Beschreibung), ein Deformationsmodell sowie ein Bewegungsmodell benötigt.

Bis auf die Messwerte können alle Eingangsdaten Unbekannte enthalten. Diese werden von den Eingangsdaten abgefragt, um die Unbekannten für ein Gleichungssystem zu definieren. Mögliche Unbekannte beziehen sich auf die Orientierungsdaten von Messsystemen, zeitliche Offsets von Zeitstempeln, sowie auf die im Kapitel 3 vorgestellten Modelle der Deformation, Bewegung und Geometrie eines zu beschreibenden Objektes.

Je nach Anwendungsfall können einzelne Bestandteile Unbekannte enthalten oder nicht. Für eine Näherungswertfindung kann es beispielsweise sinnvoll sein, das Bewegungsmodell oder Deformationsmodell als bekannt einzuführen.



Als Beobachtungen gehen Bilddaten und Laserscannerdaten ein. Diese müssen gegebenenfalls vorverarbeitet werden. Ein Kernproblem ist hierbei das Matching zwischen CAD-Modell und Kamerabild, welches im Kapitel 4.3 näher beschrieben wird.

Die Ausgabe des Ergebnisses erfolgt in einem Ausgabeordner. Geschrieben werden mehrere Dateien, wie z.B. CAD-Modelle (mit Deformation) sowie eine Ausgabedatei mit den Deformationsparametern und den zugehörigen Standardabweichungen.

Zur schnellen visuellen Kontrolle der Ergebnisse werden zusätzlich Bilder mit überlagerten Modellen erzeugt und ausgegeben.

## 4.2 Automatisches Differenzieren zum Lösen von Gleichungssystemen

Das Verfahren des automatischen Differenzierens (oder auch algorithmisches Differenzieren genannt) dient zur automatischen Bestimmung von Ableitungen einer Funktion.

Nach Bücken u. a. (2006) kann das automatische Differenzieren, insbesondere bei Programmiersprachen, die eine Operatorüberladung unterstützen, effizient eingesetzt werden. Hierbei wird zu einem funktionalen Ausdruck (z.B.  $a + b$ ) simultan die Ableitung unter Verwendung der Kettenregel bestimmt.

Die Vorteile der automatischen Differenzierung liegen primär im Zeitgewinn, weil eine explizite Formulierung der Ableitung durch den Programmierer entfällt. Im Vergleich zu numerischen Verfahren ergeben sich Vorteile bezüglich der Rechenzeit (Kowarz, 2008), da nicht, wie bei der Differenzierung durch finite Differenzen, die Funktion mehrfach aufgestellt werden muss.

In Kersten und Clemen (2015) wird darüber hinaus der Nutzen des automatischen Differenzierens für Ausgleichsprobleme hervorgehoben. Am Beispiel der Linearen Regression mit dem Newton-Raphson-Verfahren werden die Vorteile des automatischen Differenzierens verdeutlicht.

Bei der konkreten Umsetzung des Verfahrens wird zwischen zwei Methoden unterschieden, der Forward- und der Backward-Methode. Bei der Forward-Methode wird eine Ableitung bei der Auswertung eines Berechnungsschrittes simultan mitgeführt, hierbei kommt die Kettenregel zum Einsatz. Bei der Backward-Methode erfolgt die Auswertung nach Aufstellen der Funktion anhand des Berechnungsgraphens (siehe Abbildung 4.2).

Hier wird die Technik des automatischen Differenzierens innerhalb einer Bibliothek für Ausgleichsprobleme verwendet, die auf die speziellen Anforderungen dieser Arbeit angepasst wurde. Zu nennen sind neben den Anforderungen des automatischen Differenzierens nach einzelnen Werten die Unterstützung von Matrix- und Vektordatentypen (z.B. Rotationsmatrizen und Punktvektoren) und Optionen zur Definition spezieller Funktionen, wie z.B. Splinefunktionen.

Für die zu lösenden Ausgleichsprobleme ist es erforderlich, dass sowohl Beobachtungen als auch Bedingungen explizit formuliert werden können.

In dieser Arbeit spielt die sequenzielle Ausgleichung eine wichtige Rolle. Bei der sequenziellen Ausgleichung wird die Normalgleichungsmatrix direkt aufgestellt. Eine Jacobi-Matrix ist lediglich für die aktuell betrachtete Beobachtungsgleichung erforderlich (siehe Kapitel 2.1.2) und die Beobachtung muss nach Aufstellung dieser nicht weiter vorgehalten werden. Dies ermöglicht eine speichereffiziente Implementierung der Ausgleichung.

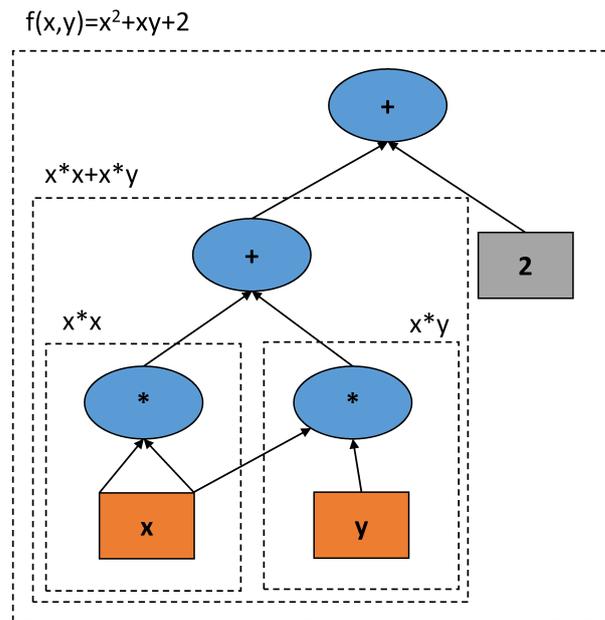


Abbildung 4.2: Beispiel für einen Berechnungsgraphen zur Berechnung des funktionalen Ausdrucks:  $x^2 + xy + 2$

Beobachtungen können nach der Aufstellung ihrer Jacobi-Matrix aus dem Speicher gelöscht werden. Eine Allokierung von Speicher für die Jacobi-Matrix ist lediglich für die betrachtete Beobachtung erforderlich. Bei Hunderttausenden von Beobachtungen ist dies ein nicht unwesentlicher Faktor. Hierüber hinaus kann das Aufstellen des Gleichungssystems effizient umgesetzt werden, da für jeden funktionalen Zusammenhang nur die Ableitungen nach den Unbekannten bestimmt werden und dies bei der Aufstellung der Normalgleichungsmatrix berücksichtigt wird.

Es kann somit gezielt die Ableitung nach den verwendeten Unbekannten genutzt werden, wodurch der Aufwand bei der Erstellung der Normalgleichungsmatrix reduziert wird.

Weiterhin ist es möglich, das Gleichungssystem in mehreren Threads parallel aufzustellen. Es hat sich hierbei gezeigt, dass ein wesentlicher Teil der Berechnungszeit beim Aufstellen der Normalgleichungsmatrix bei der Berechnung des Ausdrucks  $\mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i$  verwendet wird.

Im Gegensatz hierzu werden bei der normalen Ausgleichung alle Beobachtungen benötigt. Hierbei ist der Vorteil, dass die Beobachtungen nicht für jede Iteration neu aufgestellt werden. Die aktualisierten Ableitungen werden für jede Iteration neu bestimmt.

Die Verwendung aller Beobachtungen in einer A-Matrix ermöglicht darüber hinaus die detaillierte Betrachtung der Redundanzanteile jeder Beobachtung sowie die Verwendung aufwendiger Ausreißererkennungen. Zum Beispiel sind iterative Verfahren, wie sie bei modifizierten m-Schätzern verwendet werden, möglich.

Dies ist bei iterativen sequentiellen Verfahren nur bedingt möglich, da hierzu eine Regewichtung einer Beobachtung erforderlich ist und diese somit nicht gelöscht werden kann. Es können somit lediglich die Verbesserungen einer Beobachtung für die Ausreißererkennung verwendet werden.

Neben diesen Verfahren zur Lösung von Gleichungssystemen stehen Werkzeuge zur

Analyse bereit. Dies sind die Berechnung von Standardabweichungen der Unbekannten, die Berechnung von Redundanzanteilen einzelner Beobachtungen, die Bestimmung von Korrelationen zwischen Unbekannten, die Eigenwertanalyse eines Gleichungssystems, die Simulation einer Ausgleichung zur Genauigkeitsabschätzung sowie die Möglichkeit der Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung.

### Verwendung innerhalb des Programmablaufs

Durch die Verwendung des automatischen Differenzierens können in einer Ausgleichung zunächst die unbekannt Elemente extrahiert und die Ableitungen nach den Unbekannten automatisch analytisch gebildet werden. Dieser Aufbau erlaubt somit eine maximale Flexibilität sowie die einfache Anpassung des funktionalen Modells. Es können ohne großen Aufwand neue Unbekannte oder neue Berechnungsschritte integriert werden. So lässt sich beispielsweise die Position der Kameras als Unbekannte mit aufnehmen, indem man diesem das Flag „unknown“ zuweist.

Bezogen auf die Bestimmung von Deformationsparametern zu einem gegebenen Modell bedeutet dies, dass im Programmablauf jeder Punkt eines CAD-Modells grundsätzlich als Funktion  $\mathbf{f}_{pkt}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  aufgefasst wird. Jede Weiterverarbeitung dieses Punktes bedeutet eine Erweiterung der Funktion. So ist beispielsweise eine Transformation als Transformation einer Funktion zu verstehen:

$$\mathbf{f}_Z(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mathbf{X}_0 + \mathbf{R} \cdot \mathbf{f}_{pkt}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

oder konkreter als neue Funktion, die von  $\mathbf{X}_0(x_0, y_0, z_0)$ ,  $\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)$  und  $\mathbf{f}_{pkt}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  abhängig ist:

$$\mathbf{X}_Z(\mathbf{X}_0(\dots), \mathbf{R}(\dots), \mathbf{f}_{pkt}(\dots)) = \mathbf{X}_0(x_0, y_0, z_0) + \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \mathbf{f}_{pkt}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.2)$$

Auf Basis des somit definierten funktionalen Zusammenhanges werden die Beobachtungen (siehe Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4) angebracht, indem sie sequenziell dem Gleichungssystem hinzugefügt werden.

Das Aufstellen und Lösen des Gleichungssystems erfolgt iterativ. In jeder Iteration werden die Korrespondenzen zwischen Bildpunkten und Objektmodell (bestehend aus einem geometrischen Modell, einem Bewegungsmodell und einem Deformationsmodell) sowie zwischen Laserscanner-Punkten und Objektmodell neu bestimmt.

## 4.3 Ermittlung der Beobachtungen aus Bildmessungen

Unterstützte Beobachtungen in Bildern sind definierte, zugeordnete Punkte und Linien, welche optional als Eingangsdaten geladen werden, sowie Kanten im Bild, die durch ein ICP-Verfahren den korrespondierenden Kanten einer Silhouette eines Objektmodells zugeordnet werden.

Die Messung und Zuordnung von definierten Punkten oder Linien ist nicht Bestandteil des hier vorgestellten Programmablaufs. Hierzu können gängige Verfahren aus dem Bereich der Photogrammetrie genutzt werden, beispielsweise das LSM (Gruen, 1985; Först-

ner und Gülch, 1987). Dieses ist u.a. in der Software PISA des IAPG integriert (Luhmann u. a., 2008). Die gemessenen Punkte und Linien können als Beobachtungen importiert werden.

Im Folgenden wird die Extraktion der Silhouette aus einem CAD-Modell und das Matching zwischen gemessenen Kanten im Bild und der Silhouette näher betrachtet.

### 4.3.1 Extraktion der Silhouette aus einem Objektmodell

Für das Matching zwischen einer im Bild gemessenen Silhouette und der Silhouette des Objektmodells im Bild ist es erforderlich, die Silhouette des Objektmodells im Bild zu extrahieren. Hierzu wird eine Dreiecksvermaschung bezogen auf den Zeitpunkt der Aufnahme verwendet. Zur Bestimmung der Silhouette wird anhand dieses Modells zunächst ein Backface Removal durchgeführt. Hierfür müssen je Dreieck der Vermaschung die Vertices  $\mathbf{V}_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) so gespeichert sein, dass die Normale eines Dreiecks, die mittels

$$\mathbf{N}_D = (\mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_1) \times (\mathbf{V}_3 - \mathbf{V}_1) \quad (4.3)$$

berechnet wird, in Richtung der sichtbaren Fläche zeigt. Ein Dreieck ist für die Kamera sichtbar, wenn gilt:

$$\mathbf{N}_D \cdot \mathbf{N}_C > 0 \quad (4.4)$$

Hierbei ist  $\mathbf{N}_C$  die Blickrichtung der Kamera, die definiert ist als dritte Spalte ihrer Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$ .

Durch diese Prüfung werden alle Dreiecke des Modells, deren Vorderseite nicht in Richtung der Kamera zeigen, als nicht sichtbar markiert. Die Silhouette des Modells ergibt sich aus dem Übergang von sichtbaren zu nicht sichtbaren Dreiecken des Modells. Neben der Silhouette können bei Verdeckungen oder konkaven Geometrien Kanten innerhalb einer Silhouette als Ergebnis bestimmt werden. Diese Kanten werden durch weitere Berechnungsschritte eliminiert. Hierzu werden alle Schnitte zwischen einem Bildstrahl der Kamera zu dem Kantenpunkt mit dem Modell bestimmt. Ergeben sich hierbei ausschließlich Dreiecke, die an der zu prüfenden Kante angrenzen, muss es sich um eine Silhouettenkante handeln. Ansonsten wird sie entfernt. Ein Ergebnis zeigt Abbildung 4.3.

Sonderfälle ergeben sich durch teilweise Überdeckung durch andere Flächen. Hierbei lassen sich zwei Fälle unterscheiden (Abbildung 4.4):

- Fall 1: Eine Verdeckung liegt zwischen den beiden Endpunkten vor.
- Fall 2: Eine Verdeckung tritt am Endpunkt einer Kante auf.

In beiden Fällen ist ein Clipping der Kanten erforderlich. Für die Nutzung der Silhouette zum Matching ist dieser Schritt der Verfeinerung des Ergebnisses nicht erforderlich, da Zusatzinformationen wie die Ausrichtung der Kanten genutzt werden, die aus den sichtbaren Dreiecken übernommen werden. Bei der oben definierten Ausrichtung der Dreieckskanten (im Uhrzeigersinn) ist sichergestellt, dass das Innere der Silhouette von der Kante aus

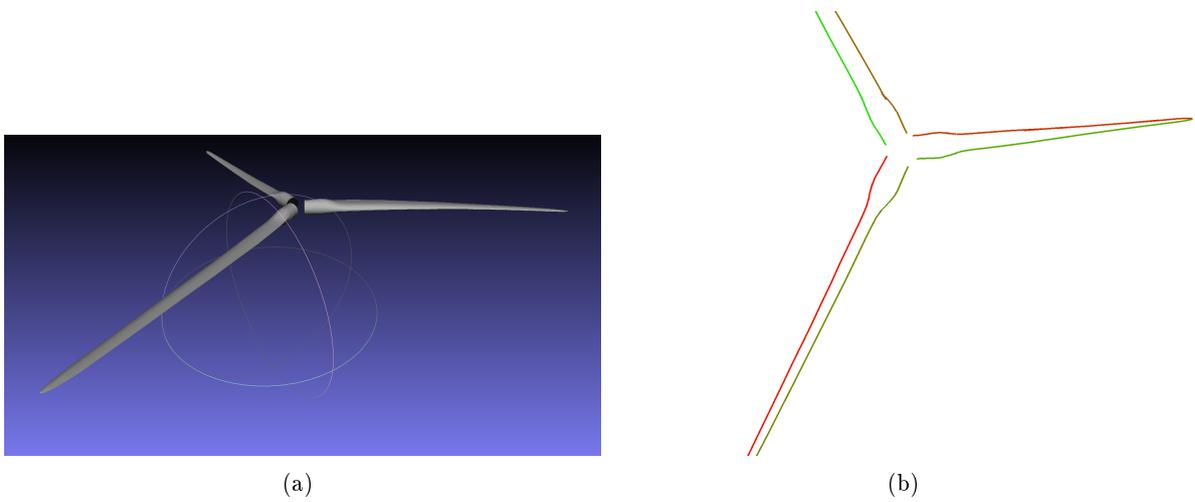


Abbildung 4.3: CAD-Modell eines Objektmodells (a); Extrahierte Silhouetten aus einem Objektmodell im Bild mit entsprechend der Gradientenausrichtung farblich hervorgehobenen Silhouettenkanten (b).

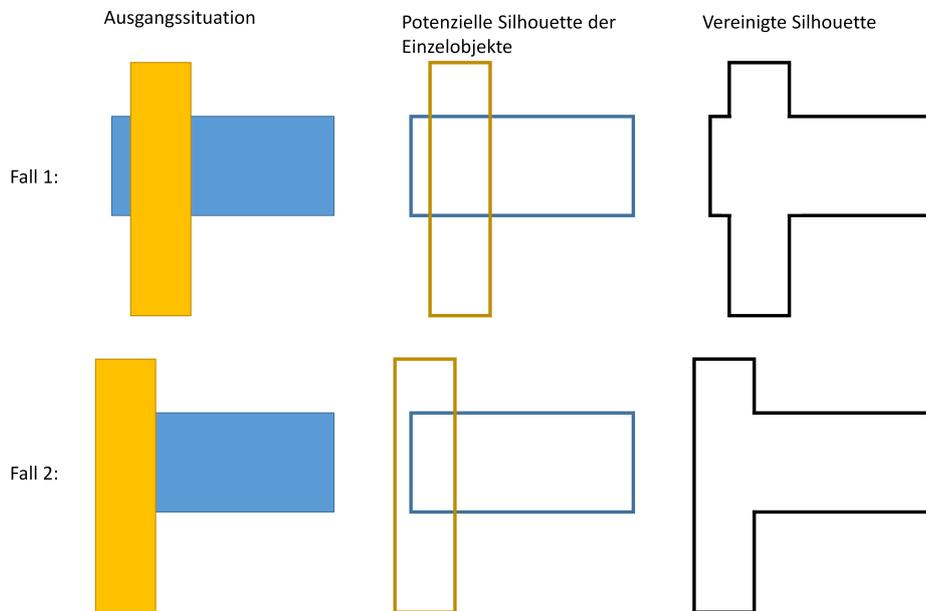


Abbildung 4.4: Sonderfälle bei der Extraktion einer Silhouette durch teilweise Verdeckung von Kanten.

auf der rechten Seite liegt. Durch diese Information lässt sich ein Gradient der Kante bestimmen:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (4.5)$$

In den Messbildern kann der Gradient aus den Grauwerten mittels eines Sobel-Filters abgeleitet werden. Hierbei ist das Vorzeichen des Gradienten zu beachten, das abhängig von der Ausleuchtung der Szene ist. Bei einem hellen Hintergrund wird  $\gamma$  daher mit  $-1$  multipliziert.

#### 4.3.2 Matching zwischen Bildkanten und Silhouette eines Objektmodells

Die Voraussetzung für ein Matching ist die Bestimmung der Kontur im Bild. Hierzu werden mittels Canny-Operator alle Kanten im Bild extrahiert, die eine bestimmte Mindestlänge haben. Es folgt eine Subpixel-Interpolation von Konturpunkten. Hierbei wird neben der Position die Ausrichtung der Kante anhand des Gradienten bestimmt:

$$\gamma_{image} = \arctan\left(\frac{\Delta y_{image}}{\Delta x_{image}}\right) \quad (4.6)$$

Für ein Matching zwischen CAD-Silhouette und Bildmessung müssen die Kantenpunkte im gleichen Koordinatensystem vorliegen wie die Silhouettenpunkte des CAD-Modells. Daher werden sowohl die gemessenen Bildpunkte als auch die Gradienten in das Bildkoordinatensystem, in dem auch die Silhouettenpunkte des CAD-Modells vorliegen, transformiert und verzeichnungskorrigiert.

Für eine Zuordnung zwischen Bildpunkt und Silhouette wird eine Gruppierung der CAD-Kanten entsprechend ihrer Gradienten im Bild vorgenommen. Die gruppierten Kanten werden in separaten Quadrees gespeichert.

Die Gruppierung führt zur Reduktion der möglichen Korrespondenzen zwischen Objektmodell und Kanten im Bild. Insbesondere bei schlechten Näherungen ist dies erforderlich, da ansonsten Fehlzuordnungen zwischen gemessenen Kanten und einer Silhouette auftreten können. In Abbildung 4.5 wird deutlich, dass eine korrekte Zuordnung nur unter Berücksichtigung der Gradienteninformation möglich ist.

Für jeden im Bild gemessenen Punkt wird daher entsprechend seines Gradienten der kürzeste Abstand zur Silhouette des Objektmodells gebildet. Hierbei werden die Gruppe, in die der Bildpunkt fallen würde, und die benachbarten Gruppen betrachtet. Als Ergebnis wird die Kante mit dem kürzesten Abstand zum Punkt ausgegeben. Die Beobachtungsgleichung ergibt sich durch die Minimierung des Abstandes zwischen Bildpunkt und Kante der Silhouette.

Hierbei ist zu beachten, dass die Kanten der Silhouette u.a. von der Deformation und den Orientierungsparametern des Objektmodells abhängig sind.

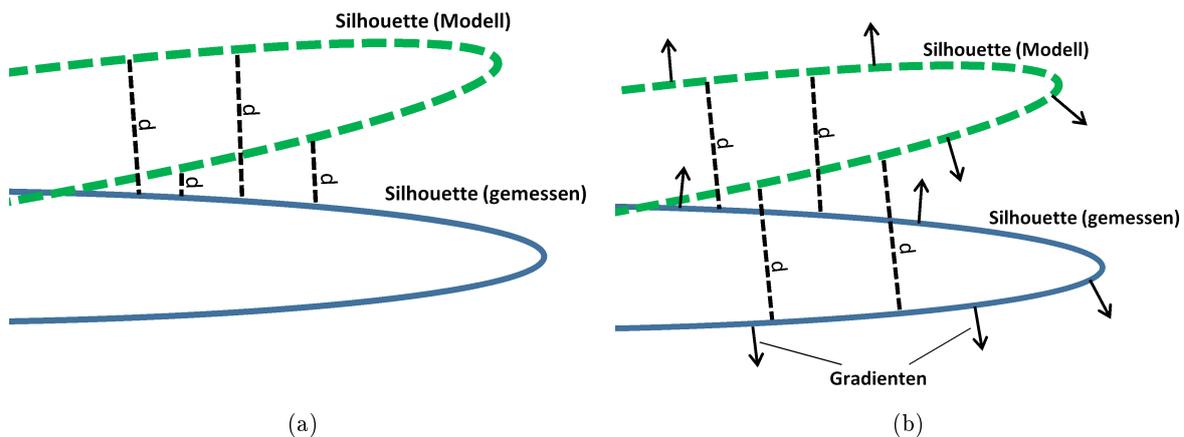


Abbildung 4.5: Bestimmung der kürzesten Abstände ohne Zusatzinformation (a); Bestimmung der kürzesten Abstände unter Berücksichtigung der Kantenausrichtung (Gradienten) (b).

## 4.4 Ermittlung der Korrespondenzen zwischen Punktwolke und Modell

Bei der Bestimmung von Korrespondenzen zwischen 3D-Punktwolken aus 3D-Scandaten und einem Objektmodell können zwei Methoden unterschieden werden. Es kann zum einen eine Minimierung des Abstands zwischen einem Punkt der Punktwolke und dem zu orientierenden Objekt durchgeführt werden oder zum anderen die Minimierung des Abstandes eines Punktes der Punktwolke entlang eines Strahls, gebildet aus dem Laserscanner-Standpunkt und einem Punkt der Punktwolke, zum Objekt.

Bei einem langgestreckten Objekt muss bei der zweiten Variante zusätzlich die Bestimmung des kürzesten Abstandes zwischen Strahl und Objekt betrachtet werden, wenn kein Schnittpunkt vorhanden ist.

Die Minimierung des Abstandes auf dem Raumstrahl impliziert eine höhere Genauigkeit für Winkelmessungen gegenüber der Streckenmessung. Dies ist bei modernen Laserscannern nicht gegeben (vgl. Kapitel 2.2.4).

Als Alternative zur Minimierung des Abstandes zwischen Punkt und Oberfläche kann die Richtung zwischen Punkt und Oberfläche berücksichtigt werden. Anschließend lässt sich auf Basis dieser Richtung eine Varianzfortpflanzung zur realistischen Genauigkeitsabschätzung für den Abstand verwenden.

In den folgenden Auswertungen wird eine Minimierung des Abstandes zwischen den Punkten einer Punktwolke und dem Objektmodell vorgenommen. Um diese Nächste-Nachbar-Abfragen zu beschleunigen, wird das Objektmodell in einem Octree gespeichert.

Erschwerend ist hierbei die zeitliche Komponente der Verformung. Wie in Abbildung 4.6 skizziert, ist die Oberfläche in ständiger Bewegung. Dies bedeutet für die Bestimmung des kürzesten Abstandes zwischen einem gemessenen Punkt und dem Objektmodell, dass für jeden gemessenen Punkt eine neue Oberfläche interpoliert werden muss, um die Distanz zum Modell zu bestimmen.

Bezogen auf die Speicherung im Octree ist die zeitliche Komponente problematisch,

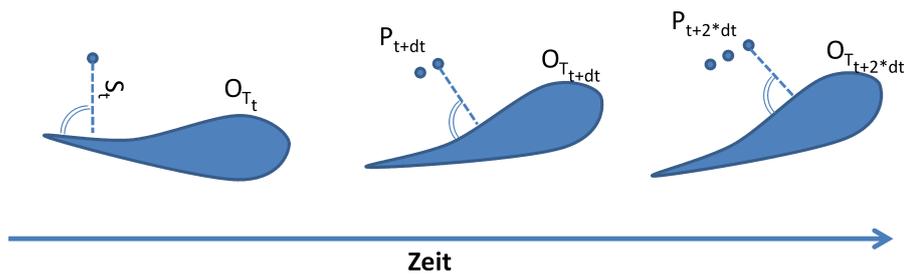


Abbildung 4.6: Problem der Deformation bei der Zuordnung von Punkten zum Objektmodell.  
 Eine Oberfläche  $O$  zum Zeitpunkt  $t$  kann nicht einem Punkt  $P$  zum Zeitpunkt  $t + dt$  zugeordnet werden.

weil sich die Dimension einer Geometrie im Octree jeweils um eins erhöht. Ein Punkt beschreibt eine Raumkurve und eine Gerade wiederum eine Oberfläche über die Zeit. Daher reduziert sich der Vorteil der optimierten Speicherung in einem Octree. Ein Punkt an der Rotorblattspitze beschreibt über die Zeit eine Raumkurve, deren Bounding Box nahezu der des Octrees entspricht. Um dieses Problem zu mindern, wird für einzelne Zeitintervalle, bspw. eine Sekunde, ein Octree aufgestellt. Hierdurch kann die Größe der einzelnen Objekte im Octree begrenzt werden. Die Einteilung in zeitliche Abschnitte stellt einen Kompromiss zwischen Performance und Speicherbedarf da.

# 5 Experimentelle Untersuchung

Im Folgenden wird die Eignung der in Kapitel 3 vorgestellten Verfahren für die Bestimmung von Deformationsparametern untersucht. Hierzu werden zunächst in Abschnitt 5.1 Untersuchungen anhand von simulierten Daten durchgeführt. Ziel ist die Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten. Hierfür werden Monte-Carlo-Simulationen eingesetzt.

In Abschnitt 5.2 folgen zwei Laborversuche, in denen Aluminiumbalken in deformierten Zuständen erfasst werden. Als Referenz dienen hierbei photogrammetrische Punktmesungen.

Im Abschnitt 5.3 wird die Überführbarkeit ins Feld untersucht. Am Beispiel einer Messung an einer WEA wird u.a. die Bestimmung der relativen Orientierung zwischen den Messsystemen näher betrachtet.

## 5.1 Untersuchung auf Basis simulierter Daten

In diesem Kapitel wird die Bestimmung von Deformationen an WEAs anhand von simulierten Daten untersucht. Dies ermöglicht eine erste Abschätzung des Genauigkeitspotenzials der verschiedenen Ansätze.

Hierzu wird das Verfahren der Monte-Carlo-Simulation verwendet. Es bietet gegenüber anderen Verfahren, z.B. der simulierten Ausgleichung, den Vorteil, dass die zu untersuchende Berechnung als Black-Box betrachtet werden kann. Nachteilig ist der hohe Rechenaufwand, da die Unsicherheiten durch wiederholte Variationen der Eingangsdaten bestimmt werden. Somit wird der als Black-Box betrachtete Algorithmus häufig durchlaufen. So haben beispielsweise die Berechnungen zu den folgenden Auswertungen je Testfall mehrere Tage in Anspruch genommen.

Der Vorteil einer Monte-Carlo-Simulation liegt in der hohen Flexibilität, da die Manipulation der Eingangsdaten entsprechend der zu erwartenden Unsicherheiten quasi beliebig erfolgen kann. Bezogen auf die vorliegende Anwendung ist die Betrachtung der Abweichungen eines CAD-Modells gegenüber dem realen Bauteil ein Faktor, der durch andere Verfahren nur bedingt abgebildet werden kann.

Für die folgende Simulation werden als genauigkeitseinschränkende Faktoren die Unsicherheiten der Messsysteme sowie die Genauigkeit der 3D-Modelle, welche als Eingangsdaten dienen, betrachtet. Für die Analysen wird ein simulierter Datensatz erzeugt (Kapitel 5.1.1). Die hierzu verwendeten Verformungen der WEA dienen im Weiteren als Referenz. Für eine realitätsnahe Betrachtung erfolgt die Auswertung auf Basis von simulierten Bildern, nicht auf Kantenpunkten. Auf diese Weise sind die Einflüsse des Bildmessoperators sowie die des mathematischen Modells zur Deformationsbestimmung berücksichtigt. Das Verrauschen der Eingangsdaten wird in Abschnitt 5.1.2 näher beschrieben.

Im Abschnitt 5.1.3 werden einige Szenarien betrachtet, die folgende Fälle berücksichtigen:

- Bestimmung der Deformation mit CAD-Information.
- Einfluss der Laserscannerdaten auf das Ergebnis.
- Einfluss der Vorinformationen auf das Ergebnis.
- Bestimmung der Deformation ohne CAD-Information.

Ziel ist eine Abschätzung der Genauigkeit für die Deformation eines Rotorblattes.

Es ist hierbei anzunehmen, dass bei zunehmender Anzahl an Vorinformationen (z.B. CAD-Modelle der Rotorblätter oder Kenntnisse über das Rotationsverhalten) die Qualität der Ergebnisse steigt.

Neben diesem Einfluss der Vorinformationen wird eine Abhängigkeit zwischen den Verformungen der Rotorblätter und der räumlichen Lage (Transformation) der Rotorblätter vermutet. Diese Korrelation wurde bereits in früheren Untersuchungen nachgewiesen (Jepping und Luhmann, 2016), ihre Auswirkung auf das Ergebnis jedoch noch nicht quantifiziert.

Die Korrelation zwischen Transformation ins Rotorblattsystem und Deformation der Rotorblätter ist ein generelles Problem aller bisherigen Verfahren (siehe Kapitel 2.5). Es wird im Allgemeinen von einem undeformierten Bereich ausgegangen, über den die Orientierung bestimmt wird und somit indirekt der Betrag einer Deformation, da Deformationen zu den undeformierten Bereichen in Relation gesetzt werden. Eine Unsicherheit in der Orientierung wirkt sich somit auf die Unsicherheit der Deformation aus.

### 5.1.1 Erzeugung eines simulierten Datensatzes

Die folgenden Simulationen beziehen sich auf ein Aufnahmeszenario, bei dem eine WEA mit einer Nabenhöhe von 90 m und einer Rotorblattlänge von ca. 62 m erfasst werden soll.

Für die Untersuchung des Verfahrens wird ein Datensatz, bestehend aus drei Kameras und zwei Laserscannern, simuliert. Hierzu wurde das in Bethmann u. a. (2013) entwickelte Simulationsverfahren um ein Deformationsmodell für Balken erweitert. Weiterhin wurde ein Laserscanner als Messsystem integriert.

Das in Bethmann u. a. (2013) vorgestellte Verfahren zur Simulation kann Sequenzen von mehreren Kameras simulieren. Hierbei liegt der Fokus auf einer hohen geometrischen Genauigkeit der Bilder. Dies umfasst ein Verzeichnungsmodell für die Kameras sowie ein aufwendiges Resampling der Bilder (AreaSampling und Multisampling (Catmull, 1978)).

Zur Simulation der Deformation eines Balkens wird die Durchbiegung quer zur Balkenachse sowie die Torsion funktional beschrieben. Der funktionale Zusammenhang ist hierbei ein parabelförmiger Verlauf sowohl der Torsion als auch der Durchbiegung, wobei die Parameter der Parabel in Abhängigkeit zur Zeit stehen. Eine Parabel wurde gewählt, da diese Form eine Durchbiegung bei einer Punkt- oder Streckenlast beschreibt und somit einen Großteil der zu erwartenden Deformation an einem Rotorblatt. Für präzisere Simulationen könnten die Eigenformen und Eigenfrequenzen der Rotorblätter verwendet werden.

Zur Beschreibung der Durchbiegung in einer Richtung für einen Zeitpunkt  $t$  wird in einem definierten Abstand  $d$  auf der Balkenachse eine sinusförmige Deformation vorgegeben.

Für einen Zeitpunkt  $t$  ergibt sich somit eine zugehörige Deformation  $\Delta_t$ . Mit der Annahme, dass die Deformation am Balkenanfang 0 ist, kann hieraus eine Parabel beschrieben werden. Die Parabel beschreibt die Durchbiegung an einem beliebigen Abstand  $d$  auf der Achse. Das gleiche Vorgehen wird für die zweite Durchbiegung sowie zur Beschreibung der Torsion verwendet.

Es gilt somit für die Durchbiegung in Schlagrichtung:

$$\Delta Z_t = a_t \cdot x^2 \quad (5.1)$$

mit:

$$a_t = A_Z \cdot \sin(t \cdot \omega_Z + \gamma_Z) / x_R^2 \quad (5.2)$$

Hierbei gilt:

$A_Z$  = Amplitude der Deformation in  $Z$  an der Referenzposition  $x_R$

$x_R$  = Referenzposition zur Definition einer Deformation

$\omega_Z$  = Kreisfrequenz der Deformation in  $Z$

$\gamma_Z$  = Phasenverschiebung der Deformation in  $Z$

Optional kann der Balkenanfang entlang der Balkenachse verschoben werden. Die Deformation wird dann ab dieser Position in positiver Achsrichtung angebracht, während Bereiche vor diesem Anfangspunkt keine Verformung aufweisen.

Die Verkürzung des Balkens wird in Achsrichtung angebracht, so dass die verformte Balkenachse die gleiche Länge wie die ursprüngliche hat.

Auf diese Weise kann für jeden Punkt  $P$  eines CAD-Modells eine reproduzierbare Deformation beschrieben werden. Diese gilt für die folgenden Auswertungen als Soll. In Abbildung 5.1 sind einige Beispielbilder aus dem simulierten Datensatz dargestellt.

Die Verformung der Rotorblätter wird unter den Bedingungen aus Tabelle 5.1 angebracht.

Umdrehungen / Minute	5.1 rpm
Frequenz Deformationen	0.13 Hz
Amplitude Deformation XZ	2.5 m
Amplitude Torsion	0.09 rad

Tabelle 5.1: Annahmen für die Deformationen innerhalb der Simulation

Die Annahmen zur Deformation sind im Vergleich zu Messungen an WEAs (siehe Kapitel 2.5) relativ hoch während die Frequenzen niedriger angesetzt sind.

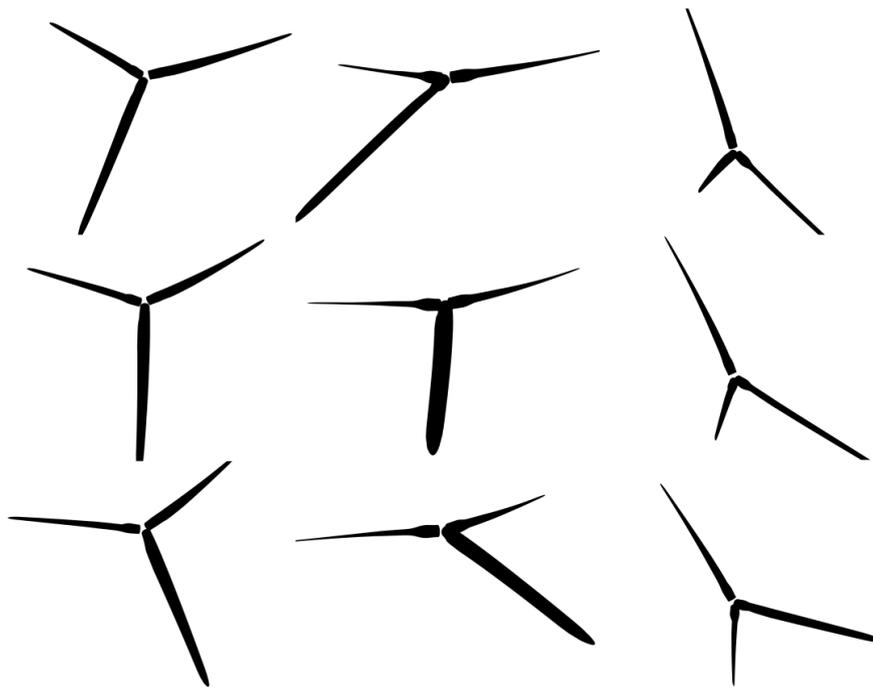


Abbildung 5.1: Beispielbilder aus den simulierten Bildsequenzen

Die simulierten Kameras sind in einem Dreieck vor der WEA angeordnet. Hierbei befindet sich eine Kamera 20 m vor der WEA, die zwei anderen Kameras haben einen Abstand zwischen ca. 80 m und 85 m. Die Basen zwischen den Kameras liegen zwischen ca. 60 m und 72 m (siehe hierzu Abbildung 5.2).

Für die simulierten Laserscanner wird eine Position nahe einer der entfernteren Kameras angenommen. Der Abstand zur WEA beträgt ca. 60 m.

Die Unsicherheiten der verwendeten Messsysteme werden in der Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt. Der erzeugte Datensatz wird zunächst als fehlerfrei angenommen.

Ein erzeugtes Modell der WEA ist mit allen Messungen der Laserscanner in Abbildung 5.3 dargestellt. Es sind die unterschiedlichen radialen Abstände der Profile von der Nabe zu erkennen.

Die unterschiedlichen Positionen wurden unter dem Gesichtspunkt gewählt, dass ein gemessenes Profil nahe der Nabe eine Transformation des Gesamtmodells stützt, wohingegen ein Profil an der Blattspitze für die Bestimmung der Deformationsparameter relevant ist.

### 5.1.2 Erzeugung verrauschter Eingangsdaten

Für eine Monte-Carlo-Simulation ist es erforderlich, alle Eingangsgrößen entsprechend ihren Eigenschaften zu verrauschen.

Für die Abschätzung der einzelnen Unsicherheitsfaktoren wird angenommen, dass ein ähnliches Vorgehen wie in Kapitel 5.3 zur Bestimmung der Orientierung der einzelnen Messsysteme verwendet wird. Dort werden die Orientierungen der Kameras aus Tachymetermessungen abgeleitet. Die äußere Orientierung der Kameras wird über im Labor eingemessene Referenzkoordinatensysteme auf den Kameras hergestellt. Dies ermöglicht die Bestimmung der 3D-Lage der Kameras im übergeordneten Koordinatensystem. Die

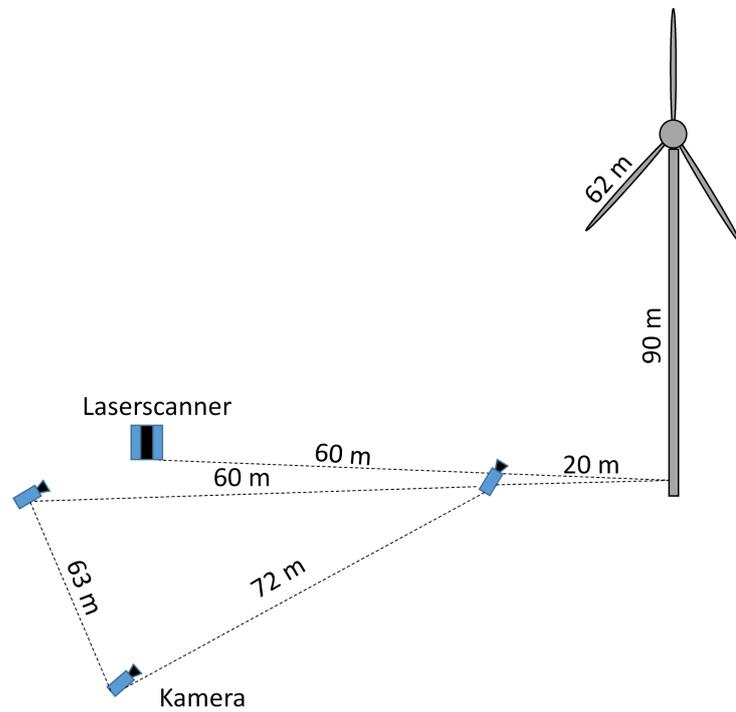


Abbildung 5.2: Skizze der verwendeten Aufnahmesituation für die Simulation

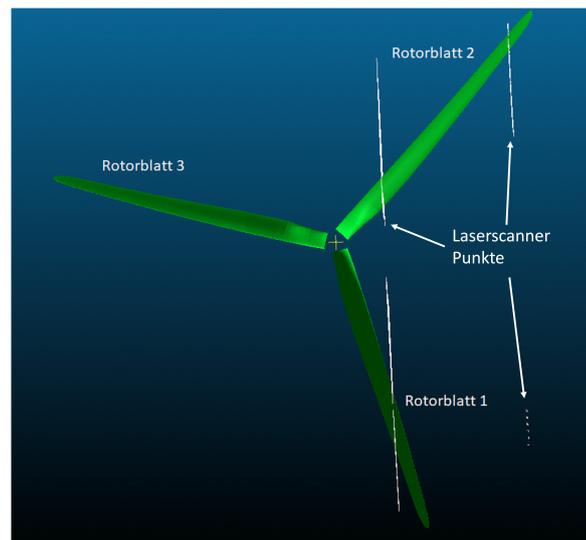


Abbildung 5.3: Simulierte Rotorblattgeometrie mit den über die Zeit erzeugten Laserscanner-Punkten.

Rotation kann bei diesem Vorgehen lediglich als Näherung verwendet werden. Die Position der Kameras kann je nach Messaufwand und verwendetem Tachymeter mit einer Genauigkeit im Bereich weniger Millimeter abgeschätzt werden.

Wird die Position der Kameras in einer geodätischen Netzmessung erfasst, sind Unsicherheiten unter 1 mm realistisch.

Aufgrund der zu erwartenden Unsicherheit der Rotationen der Kameras kann es sinnvoll sein, diese durch zusätzliche Beobachtungen zu bestimmen. Eine Möglichkeit besteht in der simultanen Bestimmung der Deformationsparameter mit den Rotationsparameter. Eine weitere Möglichkeit bieten Messungen von Punkten oder Raumkurven, die in einer Bündelblockausgleichung zur Bestimmung der Rotation verwendet werden können.

In der Monte-Carlo-Simulation können die Positionen der Kameras mit der Genauigkeit der Tachymetermessungen eingeführt werden. Typische Genauigkeiten liegen zwischen 1 mm und 3 mm für eine Einzelmessung (*Datenblatt Trimble S6 Totalstation 2018*) im Nahbereich unter 100 m. Hieraus wird eine Unsicherheit von 2 mm für die Kamerapositionen innerhalb der Simulation abgeleitet.

Problematischer sind die Unsicherheiten der Rotation, insbesondere da starke Korrelationen zwischen der äußeren Orientierung von Kameras und der inneren Orientierung aus der Literatur bekannt sind (Reznicek u. a., 2016).

Am Beispiel einer Bündelblockausgleichung lassen sich starke Korrelationen des Hauptpunktes zur Rotation einer Kamera feststellen (Tabelle 5.2). Daher wird eine Abweichung im Hauptpunkt durch die äußere Orientierung zum Großteil kompensiert.

	Ck	Xh	Yh	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2
x	-0.143	-0.022	0.034	0.073	-0.022	0.018	-0.034	0.033	0.025	-0.049
y	<b>-0.916</b>	-0.015	0.122	0.409	-0.114	0.095	-0.016	0.118	0.060	0.047
z	<b>-0.923</b>	-0.011	0.133	0.419	-0.119	0.098	-0.014	0.131	0.002	0.033
rx	-0.003	<b>-0.850</b>	-0.030	0.026	-0.022	0.012	-0.803	-0.018	0.055	-0.016
ry	0.169	0.026	<b>-0.801</b>	-0.076	0.033	-0.026	0.013	-0.754	0.018	-0.028
rz	-0.188	0.089	<b>0.904</b>	0.080	-0.033	0.027	0.090	0.851	-0.024	-0.050

Tabelle 5.2: Beispiel für die Korrelationen zwischen innerer und äußerer Orientierung. Die Korrelationen sind abhängig von der Ausrichtung der Kamera. Hier ist die Blickrichtung der Kamera nahezu in z-Richtung mit einer Rotation um die z-Achse von ca. 90°.

In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse einer Kalibrierung einer Kamera aus dem Feldversuch (Kapitel 5.3) zu sehen. Auffällig ist die Hauptpunktlage mit einer relativ hohen Standardabweichung von ca. 1/10 Pixel (Pixelgröße 0.011 mm), trotz eines *RMS*-Wertes der Bildkoordinaten von unter 1/30 Pixel in der Kalibrierung. Die hohe Bildmessgenauigkeit bestätigt, dass die innere Orientierung der Kamera nicht ohne ihre äußere Orientierung betrachtet werden darf, da ansonsten die Bildmessgenauigkeit im Bereich von 1/10 Pixel liegen müsste.

Weitere Kalibrierungen zeigen, dass die Standardabweichung des Hauptpunktes mit der Kamerakonstanten korreliert ist. Bei längerer Brennweite des Objektivs steigt die Unsicherheit der Hauptpunktlage. Bei Kalibrierungen mit einer Brennweite von 36 mm konnten Standardabweichungen von leicht unter 1/2 Pixel beobachtet werden.

In den folgenden Simulationen wird die innere Orientierung mit der Varianz-Kovarianz-Matrix aus Tabelle A.1 eingeführt. Es handelt sich hierbei um eine Kalibrierung mit ver-

Parameter	Wert	Stabw.
Ck	-21.4	0.0019
Xh	0.135	0.0011
Yh	-0.10	0.0011
A1	-2.05E-04	2.73E-07
A2	4.35E-07	3.08E-09
A3	-7.07E-11	1.23E-11
B1	-8.36E-08	4.83E-07
B2	1.03E-07	4.80E-07
C1	-1.13E-04	3.46E-06
C2	-1.52E-05	3.46E-06

Tabelle 5.3: Beispiel einer inneren Orientierung mit Standardabweichung. Die Pixelgröße der verwendeten Kamera beträgt 0.011 mm.

gleichsweil schlecht bestimmten Parametern der inneren Orientierung (vergleiche Tabelle 5.3).

Diese wird gewählt, da angenommen wird, dass bei routinemäßigen Messungen einer WEA eine geringere Qualität der inneren Orientierung erreicht wird.

Die Korrelation zur äußeren Orientierung wird in den ersten Simulationen durch eine simultane Schätzung der Rotationen bei der Bestimmung der Deformationsparameter berücksichtigt. Es erfolgt lediglich ein Verrauschen der Startwerte mit 0.0001 rad. Dies entspricht einer Unsicherheit von 1 cm in 100 m Entfernung. Bei Auswertungen mit gegebener Orientierung der Kamera wird auf ein Verrauschen der inneren Orientierung verzichtet und lediglich die äußere Orientierung verrauscht. Ein von der äußeren Orientierung unabhängiges Rauschen der inneren Orientierung würde zu unrealistischen Genauigkeitsmaßen führen. Die Unsicherheit der Bildmessungen wird darüber hinaus mit einem um ca. Faktor vier größerem Rauschen angenommen als bei der Kalibrierung erreicht wird.

Für die Bildmessungen wird durch das Verrauschen der Bilder der Effekt des Bildmessoperators berücksichtigt. Da die Bildmessung trotz verrauschter Bilder im Vergleich zur erwarteten Bildmessgenauigkeit zu optimistische Werte liefert, wird ein zusätzliches normalverteiltes Rauschen von 1/5 Pixel auf die Bildmessungen addiert.

Die Genauigkeit der äußeren Orientierung der Laserscanner wird mit der typischen Genauigkeit eines 3D-Laserscanners abgeschätzt. Hierbei wird angenommen, dass die Orientierung der Laserscanner über Targets erfolgt, die zuvor mittels eines Tachymeters eingemessen wurden.

Hierauf basierend wird als Positionsunsicherheit 2 mm und für die Richtungsunsicherheit 0.0057° (Einfluss 2 mm bei einer Entfernung von 20 m) abgeschätzt.

Die Genauigkeit der Einzelmessungen wird entsprechend der typischen Spezifikationen eines 3D-Laserscanners verrauscht. Für die vorliegende Messentfernung von über 100 m wird für die Streckenmessung eine Unsicherheit von 5 mm und für die Richtungsmessung 0,007° eingeführt. Nicht berücksichtigt werden Unsicherheiten, die durch den Auftreffwinkel und aus der Materialoberfläche resultieren. Es wird angenommen, dass es sich hierbei um systematische Effekte handelt, die durch eine Vorkorrektur der Messwerte berücksichtigt werden können.

## Unsicherheiten der Rotorblattgeometrie

Ein wesentlicher Bestandteil der Simulation ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten der CAD-Modelle, die als Eingangsdaten dienen. Die Herausforderung ist hier ein realitätsnahes Modell zur Beschreibung von Abweichungen. Aufgrund des Produktionsprozesses können Unstetigkeiten in der Oberfläche ausgeschlossen werden. Wahrscheinlicher sind flächenhafte Abweichungen. Somit ist ein punktwises Verrauschen des CAD-Modells nicht zielführend. Um eine realitätsnahe Modellierung zu gewährleisten, wird die Verformung über einen Zylinder beschrieben. Wie in Abbildung 5.4 zu sehen ist, wird dieser um das CAD-Modell des Rotorblattes gelegt. Die Verformung eines Punktes des Rotorblattes wird über den radialen Durchstoßpunkt mit dem Zylinder bestimmt. Hierbei dienen die zylindrischen Koordinaten (Abstand  $d$  auf der Achse, Richtungswinkel  $\gamma$ ) zur Interpolation der Verformung.

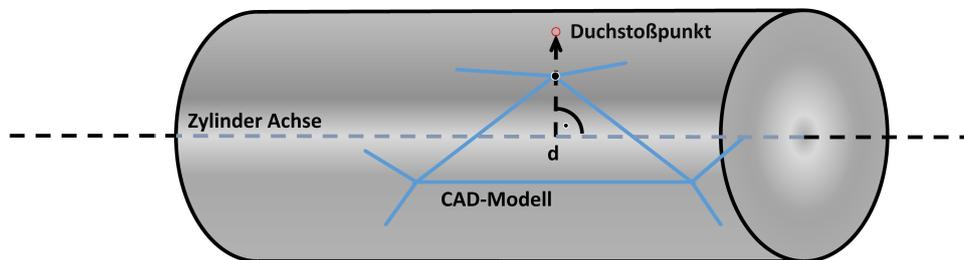


Abbildung 5.4: Bestimmung des Durchstoßpunktes auf einem umliegenden Zylinder. Die Koordinaten des Durchstoßpunktes werden zur Ableitung eines Punktfehlers verwendet.

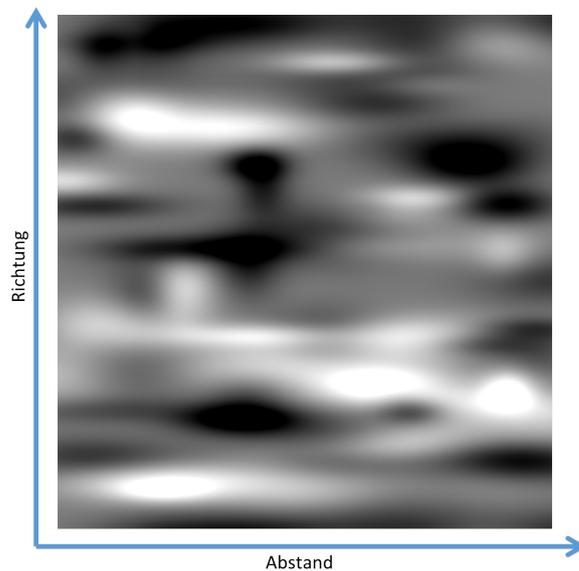


Abbildung 5.5: In Graustufen dargestellte Deformationskarte für ein CAD-Modell. Das Bild kann als Abwicklung eines umliegenden Zylinders aufgefasst werden, wobei die erste Achse entlang der Achse des Zylinders definiert ist und die zweite über den Richtungswinkel.

Zur Beschreibung der flächenhaften Abweichungen werden auf der abgewickelten Zylinderoberfläche zufällig zweidimensionale Gauß-Kurven verteilt, wobei die Größe und das Maximum/Minimum zufällig variiert werden. Der Funktionswert der resultierenden Oberfläche beschreibt die Verformung in radialer Richtung. Zur Vereinfachung wird die Oberfläche in diskreter Form, als Deformationsbild, vorgehalten. In Abbildung 5.5 ist ein Beispiel einer solchen Oberfläche (als Graustufenbild) dargestellt. Die hellen Bereiche repräsentieren positive Werte, die schwarzen negative. Ein Funktionswert wird bilinear interpoliert. Die Abweichungen werden in radialer Richtung an die ursprünglichen CAD-Punkte angebracht. Auf diese Weise kann eine zufällige Variation des Modells erreicht werden, mit räumlicher Korrelation zwischen den CAD-Punkten. Das Ergebnis dieses Schrittes sind verauschte CAD-Modelle, die als Eingangsdaten für die Deformationsberechnung dienen.

Für die folgenden Simulationen werden Deformationen von bis zu 3 cm angenommen.

### 5.1.3 Monte-Carlo-Simulation

Das Ziel der folgenden Simulationen ist die Abschätzung einer zu erwartenden Genauigkeit für eine ermittelte Deformation, abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren. Dies sind zum einen die verwendeten Messsysteme (Kameras und Laserscanner) und zum anderen der Genauigkeitsverlust bei einer simultanen Schätzung der Objektgeometrie.

Betrachtet wird im Folgenden ein Zeitraum von 1 Sekunde des simulierten Datensatzes.

Die Nummerierung der Rotorblätter erfolgt entsprechend der Abbildung 5.3. Das Rotorblatt mit der Nummer 1 ist zum ausgewerteten Zeitraum nahezu senkrecht nach unten ausgerichtet. Es wird vom Scan 1 im betrachteten Zeitraum zum Teil erfasst (nach ca. 0.5 Sekunden). Das Rotorblatt 2 wird bei einem Vertikalwinkel zwischen ca. 30° bis 60° erfasst. Dieses Rotorblatt wird als einziges von allen Laserscannern im betrachteten Zeitraum erfasst. Das Rotorblatt 3 wird durchgehend rein photogrammetrisch beobachtet, bei diesem liegen keine Laserscannermessungen vor.

Aufgrund der hohen Rechenzeiten wird die Anzahl der Monte-Carlo-Durchläufe auf 100 für jeden untersuchten Fall begrenzt. Die Begrenzung auf 100 Iterationen wird als hinreichend für die Schätzung der Varianzen der Unbekannten angenommen. Zur Abschätzung eines Konfidenzbereiches für die Varianzen kann die Student-t-Verteilung verwendet werden.

Untersucht wird im Folgenden die erreichbare Standardabweichung für die Deformation. Wie bereits angedeutet, kann diese nicht unabhängig von der Transformation des Rotorblattsystems betrachtet werden. Auf diese Problematik der Korrelation zwischen globaler Transformation und Deformation wird gesondert eingegangen.

### 5.1.4 Erfassung von Deformationen bei gegebener Objektgeometrie

Bei der folgenden Auswertung wird ein CAD-Modell vorgegeben. Die Bestimmung der Deformation erfolgt in drei Kombinationen: eine rein photogrammetrische Auswertung, eine Auswertung mit einem zusätzlichen Laserscanner, der Profile bei einem Abstand von ca. 20 m zur Nabe erfasst und eine Auswertung mit einem zweiten Laserscanner mit Profilen bei einem Abstand von ca. 50 m zur Nabe.

Bei den Auswertungen wird jedes Rotorblatt durch Deformationsknoten mit einem Abstand von 5 m zueinander beschrieben. Der letzte Deformationsknoten liegt bei 65 m und ist somit außerhalb des CAD-Modells (Rotorblattlänge ca. 63 m).

Der erfasste Zeitraum wird in 11 Epochen eingeteilt (beginnend bei 2 Sekunden, endend bei 3 Sekunden).

Aufgrund der Menge an Daten wird aus Übersichtsgründen auf eine Darstellung aller Zeitpunkte für alle Kenngrößen verzichtet. Es wird anhand eines Zeitpunktes (bei 2.5 Sekunden) ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Auswertevarianten herangezogen. Dieser wird als repräsentativ für die anderen Zeitpunkte angesehen. Im Folgenden wird unterschieden zwischen systematischen Abweichungen und einem stochastischen Anteil.

Für den stochastischen Anteil wird eine Standardabweichung zum Mittelwert bestimmt. Die Abweichungen des Mittelwertes zum Soll ergeben den systematischen Anteil. Es ist darauf hinzuweisen, dass die systematischen Abweichungen nur für den gewählten Zeitpunkt systematisch wirken. Der systematische Anteil ist u.a. abhängig von der jeweiligen Deformation sowie von der Rotorblattstellung. Je nach Blattstellung wirkt sich dieser anders aus. Ursachen für die systematischen Anteile werden im Folgenden betrachtet.

Verglichen werden die im Modell bestimmten Deformationen. Der Vergleich erfolgt für die Deformationen in den Koordinatenrichtungen Y und Z des Rotorblattkoordinatensystems sowie für den Torsionswinkel. Eine Deformation in Y-Richtung beschreibt im Folgenden eine Deformation innerhalb der Rotorebene, wohingegen eine Deformation in Z-Richtung eine Verformung senkrecht dieser Ebene in Schlagrichtung beschreibt.

Verglichen werden die absoluten Deformationen, es werden also keine relativen Änderungen betrachtet.

Der Übersicht wegen werden die Daten der Verformungen (Abweichungen zum Soll der Deformation und zugehörige Standardabweichungen) nach Rotorblättern und Art der Verformung in einzelnen Diagrammen dargestellt, um ihre Interpretierbarkeit zu steigern. Die Verformungen in Y- und Z-Richtung werden zusammengefasst. Einzeldiagramme für die Deformation in den einzelnen Achsen können dem Anhang A.1 entnommen werden.

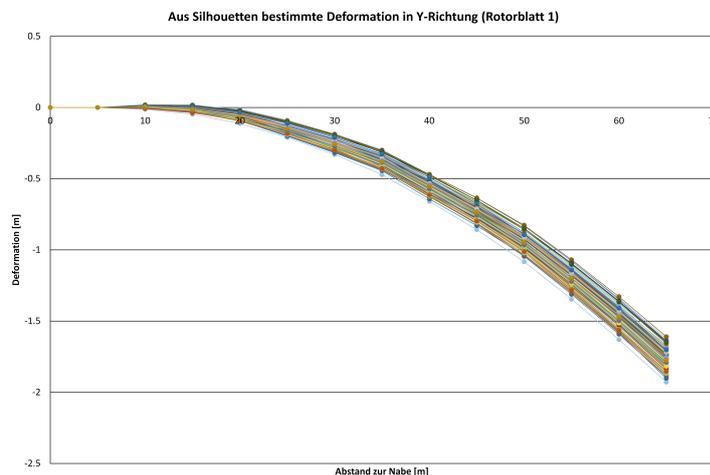


Abbildung 5.6: Aus den Daten abgeleitete Deformationen in y-Richtung für 100 Iterationen der Monte-Carlo-Simulation bei der Verwendung von zwei terrestrischen Laserscannern.

In Abbildung 5.7 sind die systematischen Abweichungen der Deformationen zu sehen (Betrag aus Deformation Y und Z). Die hier erkennbaren Abweichungen sind als signifikant

zu bewerten. Eine Betrachtung anderer Zeitpunkte hat gezeigt, dass die Abweichungen über die Zeit variieren, jedoch korreliert sind. Exemplarisch sind die abgeleiteten Deformation in y-Richtung für ein Rotorblatt und eine Aufnahmeconfiguration in der Abbildung 5.6 dargestellt.

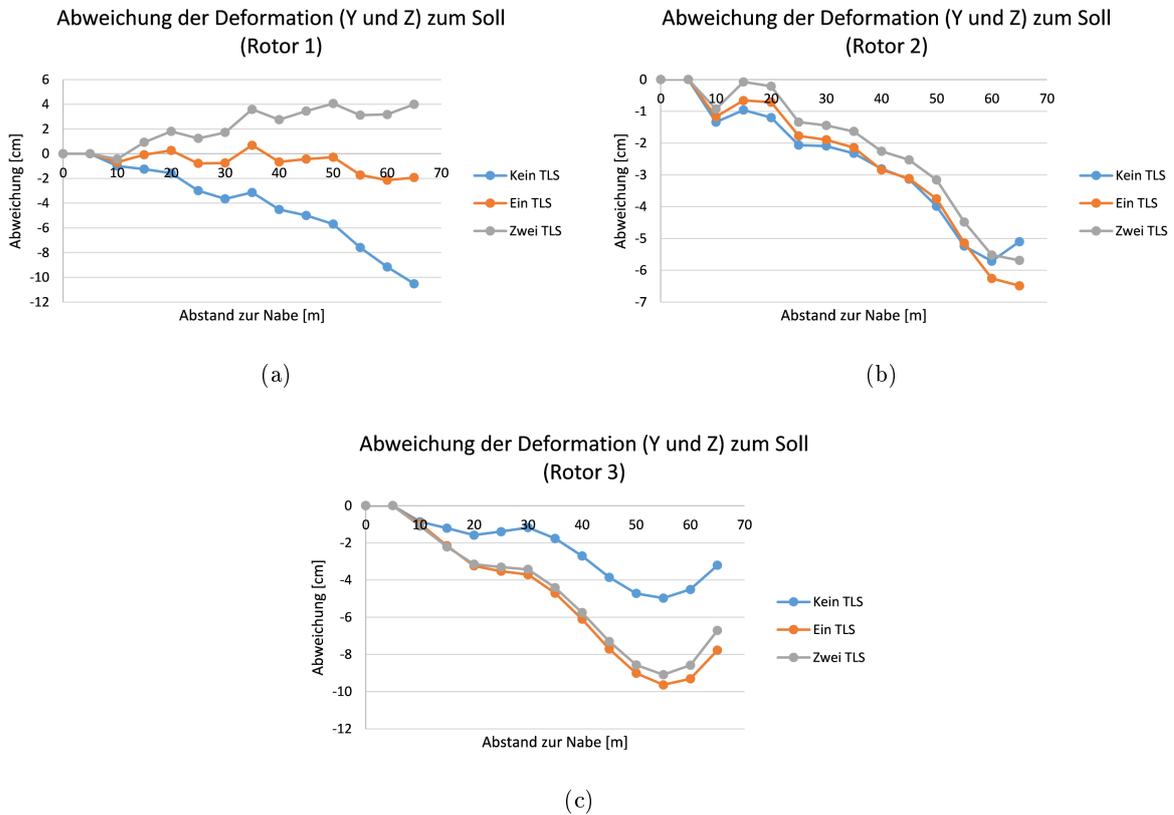


Abbildung 5.7: Systematische Abweichungen der berechneten Durchbiegung an den Rotorblättern bei einer unterschiedlichen Anzahl an terrestrischen Laserscannern (TLS).

Die Abweichungen erreichen für diesen Zeitpunkt ein Maximum von ca. 10 cm beim Rotorblatt 1. Die Standardabweichungen der Deformationsparameter sind stetig anwachsend mit zunehmenden Abstand zur Nabe. An der Blattspitze erreichen sie 5 cm bis 8 cm. Eine leichte Reduktion der Standardabweichung durch die Einführung von Laserscannern ist am Rotorblatt 3 festzustellen. Durch den Einsatz dieser Messtechnik konnte die Standardabweichung für die Deformation in Y-Richtung um 0.7 mm an der Blattspitze reduziert werden.

Die Abweichungen des Torsionswinkels sind in Abbildung 5.8 zu sehen. Auffällig sind die hohen Werte nahe der Nabe bei bis zu 10 m Abstand. Diese betragen einige Grad. Die Betrachtung des CAD-Modells bietet eine einfache Erklärung für diese hohe Abweichung. Zum einen sind in den ersten Metern keine Beobachtungen vorhanden, zum anderen hat das Rotorblatt hier eine Zylinderform, was eine Bestimmung der Torsion verhindert. Erst ab ca. 10 m Abstand zur Nabe bildet sich ein typisches Rotorblattprofil aus.

Im weiteren Verlauf lassen sich systematische Abweichungen von bis zu 0.6° feststellen. Die Auswirkungen der Integration der Laserscanner sind beim Rotorblatt 2 zu erkennen.

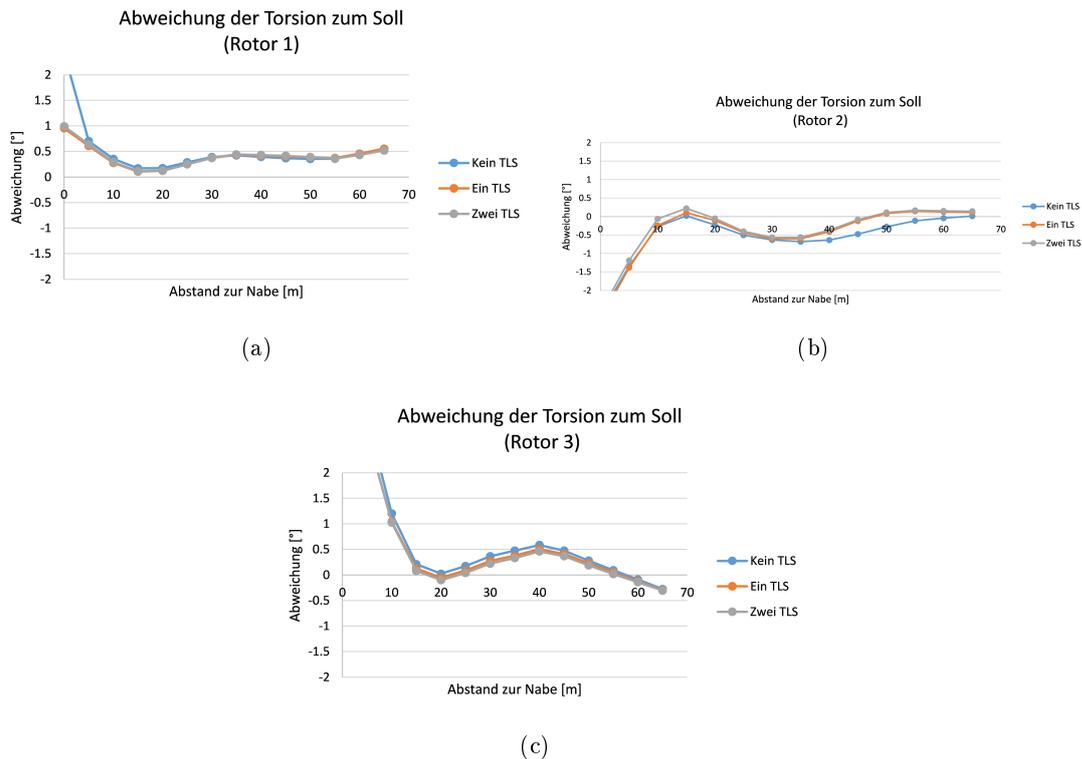


Abbildung 5.8: Systematische Abweichungen der bestimmten Torsion an den Rotorblättern

Das erfasste Profil hat einen Abstand von ca. 50 m zur Nabe. Die systematischen Abweichungen verringern sich in diesem Bereich gegenüber der Erfassung ohne Laserscannerdaten. Gleichzeitig erhöht sich in diesem Bereich die Standardabweichung der Torsion. Bei dem Einsatz von einem Laserscanner verdoppelt sich diese von  $0.11^\circ$  auf  $0.24^\circ$ . Die Erhöhung der Standardabweichung kann auf Unsicherheiten des Modells des Rotorblattes sowie auf Unsicherheiten der Laserscannerdaten zurückzuführen sein. Im Gegensatz zu photogrammetrischen Beobachtungen liegen Laserscannerdaten nur in einem vergleichsweise schmalen Bereich vor. Die Torsion wird somit nur über diesen Bereich definiert.

Der Einflussbereich der Laserscannerbeobachtungen wird in den systematischen Abweichungen deutlich. Es ist eine Verbesserung ab ca. 30 m Abstand zur Nabe zu beobachten. Dennoch kann die naheliegende Annahme, dass Laserscannerdaten positiv für eine Messung sind, nicht pauschal anhand der Deformationsparameter bestätigt werden. Das Rotorblatt 2 ist das einzige der drei Rotorblätter, welches zum Zeitpunkt 2.5 s durch Laserscannerdaten abgedeckt wird. Hier lässt sich eine Verbesserung der systematischen Abweichungen in Y-Richtung, Z-Richtung und in der Torsion erkennen.

Der Einfluss auf die nicht direkt von Laserscannerdaten betroffenen Rotorblätter ist hingegen deutlich größer. Beim Rotorblatt 3 kann beispielsweise das beste Resultat bei der Auswertung ohne Laserscannerdaten erzielt werden. Dieses weist an der Rotorblattspitze 3 cm geringere Systematiken im Gegensatz zu den Auswertungen mit Laserscannerdaten auf.

Wird anstelle der Deformation die globale Transformation in Koordinatensystem der WEA betrachtet, so ist das Ergebnis eindeutig. Durch die Verwendung von Laserscanner-

daten verbessert sich die Standardabweichung der einzelnen Parameter signifikant.

Die Standardabweichung der Translation in Z-Richtung wird von 18 cm auf 1 cm reduziert (siehe Tabelle 5.4). Erstaunlich ist hierbei, dass das hohe Rauschen der globalen Orientierung kaum einen Einfluss auf die Deformationsparameter hat.

	ohne Laserscannerdaten	mit Laserscannerdaten
$S_{X_G}$ [m]	0.075	0.010
$S_{Y_G}$ [m]	0.138	0.006
$S_{Z_G}$ [m]	0.178	0.009
$S_{\omega_G}$ [rad]	0.0020	0.0011
$S_{\varphi_G}$ [rad]	0.0019	0.0010
$S_{\kappa_G}$ [rad]	0.0014	0.0011

Tabelle 5.4: Vergleich der Standardabweichungen der globalen Transformation ins Koordinatensystem der WEA mit und ohne Laserscannerdaten.

Die Ursache hierfür liegt in der Orientierung der Kameras. Diese weisen ähnliche Systematiken in den Rotationen auf, die durch die Verwendung von Laserscannerdaten deutlich reduziert werden. Eine Berechnung der Korrelation zwischen den Rotationen der Kameras und den globalen Transformationen bestätigt diese Annahme.

Im Fall, dass keine Laserscannerdaten verwendet werden, besteht eine hohe Korrelation zwischen den Rotationswinkeln der Kameras und der Translation der globalen Transformation, wie in den Tabelle 5.5, 5.6 und 5.7 zu sehen ist. Diese Korrelation ist bei der Verwendung von Laserscannerdaten nahezu vollständig verschwunden (für alle kleiner 0.2)(siehe Tabellen 5.8-5.10).

Wird die Korrelation zwischen den Deformationsparametern betrachtet, kann hier ein gegenläufiges Verhalten beobachtet werden. Bei dem Datensatz ohne Laserscannerdaten ist lediglich eine geringe Korrelation zwischen der Deformation an einer Rotorblattspitze zur globalen Transformation festzustellen. Mit Laserscannerdaten steigen diese deutlich an.

Dies bedeutet, dass die Trennbarkeit zwischen Verformung und Orientierung des Rotorblattsystems abnimmt und somit Abweichungen der Orientierung zunehmend von Parametern der Deformation kompensiert werden.

Dies lässt erwarten, dass sich durch eine Steigerung der Genauigkeit der globalen Transformation auch die Bestimmung der Deformation verbessert.

Dies kann zum einen durch eine präzisere Orientierung der Messsysteme erreicht werden oder zum anderen durch die Einführung von Vorinformationen. Die Orientierung der Kameras kann u.a. durch homologe Punkte in den Bildern unabhängig von der Deformation bestimmt werden und somit als bekannt in der Deformationsbestimmung eingeführt werden.

### Einführung von Vorinformationen

Eine mögliche Vorinformation an der WEA bietet die Rotationsachse. Zu ihrer Bestimmung werden in der Literatur verschiedene Ansätze genannt. In Grosse-Schwiep u. a. (2015) wird die Rotationsachse durch Messungen an der Gondel abgeleitet. In Winstroth

	$X_G$	$Y_G$	$Z_G$	$\omega_G$	$\varphi_G$	$\kappa_G$
$\omega_{Kam_1}$	0.75	<b>-0.92</b>	<b>0.94</b>	0.75	0.47	-0.03
$\varphi_{Kam_1}$	<b>-0.89</b>	0.58	-0.65	-0.42	-0.19	0.32
$\kappa_{Kam_1}$	<b>-0.94</b>	0.60	-0.78	-0.42	-0.32	0.29

Tabelle 5.5: Korrelation zwischen Kamera 1 und der globalen Transformation (ohne Laserscanner). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt.

	$X_G$	$Y_G$	$Z_G$	$\omega_G$	$\varphi_G$	$\kappa_G$
$\omega_{Kam_2}$	0.69	<b>-0.94</b>	<b>0.87</b>	0.79	0.34	-0.06
$\varphi_{Kam_2}$	<b>-0.94</b>	0.64	-0.72	-0.47	-0.19	0.35
$\kappa_{Kam_2}$	-0.40	0.01	-0.37	0.08	-0.51	-0.11

Tabelle 5.6: Korrelation zwischen Kamera 2 und der globalen Transformation (ohne Laserscanner). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt.

	$X_G$	$Y_G$	$Z_G$	$\omega_G$	$\varphi_G$	$\kappa_G$
$\omega_{Kam_3}$	0.70	<b>-0.93</b>	<b>0.92</b>	0.76	0.43	-0.01
$\varphi_{Kam_3}$	<b>-0.93</b>	0.67	<b>-0.86</b>	-0.51	-0.45	0.18
$\kappa_{Kam_3}$	-0.76	0.41	-0.71	-0.24	-0.51	0.05

Tabelle 5.7: Korrelation zwischen Kamera 3 und der globalen Transformation (ohne Laserscanner). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt.

	$X_G$	$Y_G$	$Z_G$	$\omega_G$	$\varphi_G$	$\kappa_G$
$\omega_{Kam_1}$	-0.01	0.01	-0.13	-0.07	-0.14	-0.05
$\varphi_{Kam_1}$	-0.05	-0.07	-0.04	-0.05	0.02	-0.11
$\kappa_{Kam_1}$	0.05	0.04	-0.02	0.04	0.09	-0.07

Tabelle 5.8: Korrelation zwischen Kamera 1 und der globalen Transformation (mit zwei Laserscannern). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt.

	$X_G$	$Y_G$	$Z_G$	$\omega_G$	$\varphi_G$	$\kappa_G$
$\omega_{Kam_2}$	-0.05	-0.08	-0.06	0.03	-0.10	-0.10
$\varphi_{Kam_2}$	0.06	-0.01	0.19	-0.10	0.04	-0.12
$\kappa_{Kam_2}$	0.05	0.01	-0.01	0.02	0.11	-0.02

Tabelle 5.9: Korrelation zwischen Kamera 2 und der globalen Transformation (mit zwei Laserscannern). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt.

	$X_G$	$Y_G$	$Z_G$	$\omega_G$	$\varphi_G$	$\kappa_G$
$\omega_{Kam_3}$	0.14	-0.11	0.09	0.04	-0.04	-0.03
$\varphi_{Kam_3}$	0.04	-0.02	-0.11	0.05	-0.02	-0.17
$\kappa_{Kam_3}$	-0.02	0.05	-0.07	0.03	0.09	-0.02

Tabelle 5.10: Korrelation zwischen Kamera 3 und der globalen Transformation (mit zwei Laserscannern). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt.

u. a. (2014) wird eine mittlere Bezugsebene eingeführt, die sich aus dem Mittel über mehrere Umdrehungen ergibt.

Ähnliche Vorgehensweisen wären auch hier möglich. Daher wird in einer weiteren Auswertung die Rotationsachse als bekannt vorgegeben. Dies soll die Abhängigkeit zwischen Deformation und Transformation des Rotorblattsystems veranschaulichen. Eine Unsicherheit für die Achse wird nicht angebracht, diese ist von der Art der Bestimmung der Rotationsachse abhängig und von den hierbei vernachlässigten Effekten an dem Rotorblattsystem (z.B. Schwingungen).

Eine Abschätzung ergibt Ungenauigkeiten, die als vernachlässigbar angesehen werden können. Bei einer Standardabweichung unter 0.0001 rad ist der Anteil der Unsicherheit der Rotation an der Rotorblattspitze mit einer Standardabweichung von 0.6 cm vernachlässigbar.

Zum Vergleich liegt die Unsicherheit bei der simultanen Bestimmung der vollen Transformation bei einer Standardabweichung von 0.001 rad je Rotationswinkel (unter Verwendung von Laserscannerdaten). Die systematischen Abweichungen, die sich auf die Deformationsbestimmung auswirken, liegen in der gleichen Größenordnung.

Hieraus folgen drei weitere Fälle, die untersucht werden:

- Orientierung der Kameras bekannt (mit Unsicherheit)
- Rotationsachse bekannt
- Rotationsachse und Orientierung der Kameras bekannt

Für die Unsicherheit der Rotationswinkel der Kameras wird im Folgenden 0.0001 rad angenommen. Dies entspricht einer Unsicherheit am Objekt von ca. 1 cm.

Bei der Untersuchung dieser drei Fälle ist zunächst keine Verbesserung bei den systematischen Abweichungen der Durchbiegung zu beobachten (siehe Abbildung 5.9). Bei Verwendung einer bekannten Rotationsachse ergibt sich eine Verschlechterung der Ergebnisse.

Eine bekannte Kameraorientierung hingegen bewirkt bereits leichte Verbesserungen. Dennoch treten weiterhin Abweichungen von mehr als 10 cm auf. Dies ist aufgrund der hohen Korrelation zwischen den Orientierungen der Kameras und der globalen Transformation (vergleiche Tabelle 5.7) zu erwarten. Im dritten Fall, bei dem sowohl die Orientierung der Kameras vorgegeben wurde als auch die Rotationsachse, reduziert sich die systematische Abweichung signifikant. Die verbleibenden Abweichungen sind nahezu vollständig innerhalb der Rotationsebene und nicht wie vorher in Schlagrichtung der Rotorblätter.

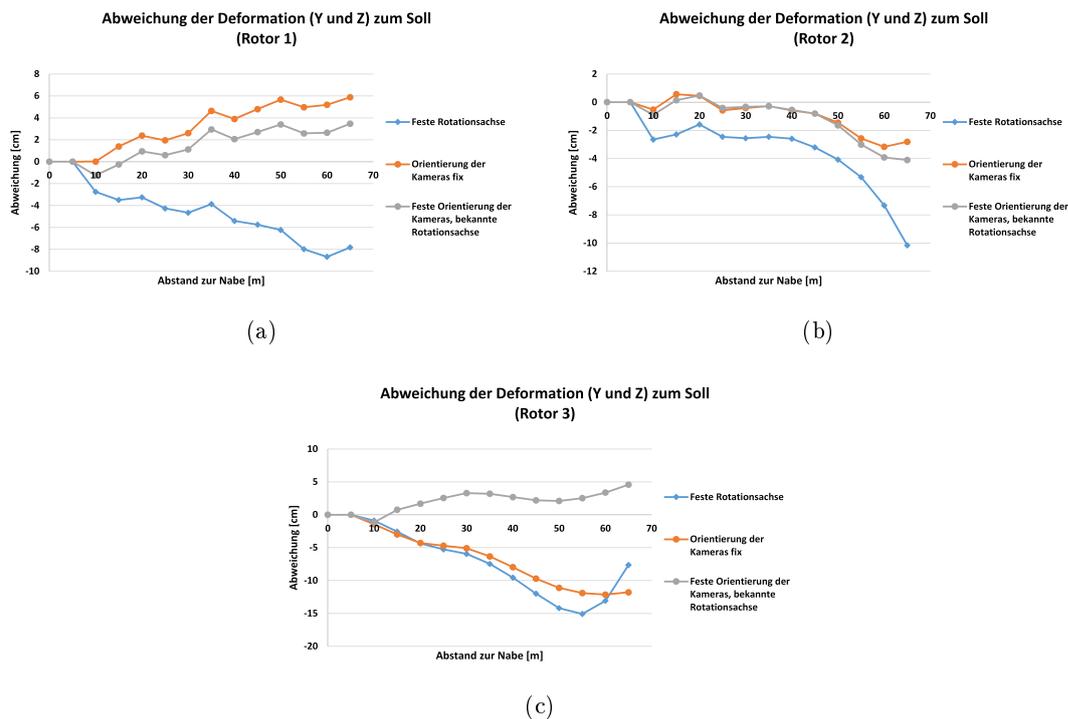


Abbildung 5.9: Systematische Abweichungen der Durchbiegung an den Rotorblättern

Um diese Abweichungen zu minimieren, wären zusätzliche Informationen zur Bewegung des Rotorblattsystems erforderlich, z.B. durch Einführung einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit für eine Umdrehung.

Der Einfluss auf die Torsion (Abbildung 5.10) ist gering. Je nach betrachteten Fall sind leichte Veränderungen bezüglich der Torsion festzustellen. Die Abweichungen sind jedoch mit denen aus den ursprünglichen Untersuchungen vergleichbar.

Hinsichtlich der Standardabweichungen kann an den Positionen der Laserscannerprofile bei 50 m eine Veränderung beobachtet werden (siehe Abbildung 5.11). Ohne zusätzliche Bedingungen tritt hier eine Verdoppelung der Standardabweichung durch Einführung von Laserscannermessungen auf. Bei bekannter Rotationsachse und bekannten Kameraorientierungen sinkt die Standardabweichung der Torsion auf das Niveau wie zuvor ohne Laserscannermessungen.

Betrachtet man die Standardabweichungen der Durchbiegung (Abbildungen 5.12 und 5.13), so fällt auf, dass sie in Z-Richtung deutlich abnehmen, dagegen in Y-Richtung zunehmen. Die Standardabweichungen in Z-Richtung betragen nach Einführung der bekannten Orientierung der Kameras sowie der Einführung der festen Rotationsachse lediglich 1 – 2 cm. Die Standardabweichungen in Y-Richtung erreichen hingegen 10 – 12 cm (vorher 5 – 8 cm) an den Rotorblattspitzen. Somit bleiben die Standardabweichungen für die Gesamtdeformation (Y- und Z-Richtung) auf dem gleichen Niveau.

Die systematischen Abweichungen sind aufgrund der Vorinformationen deutlich reduziert. Sie betragen maximal ca. 4 cm bei 60 m und treten nahezu ausschließlich innerhalb der Rotorebene auf.

Bei einem Vergleich zwischen dem Soll-CAD-Modell (mit Soll-Deformationen) und ei-

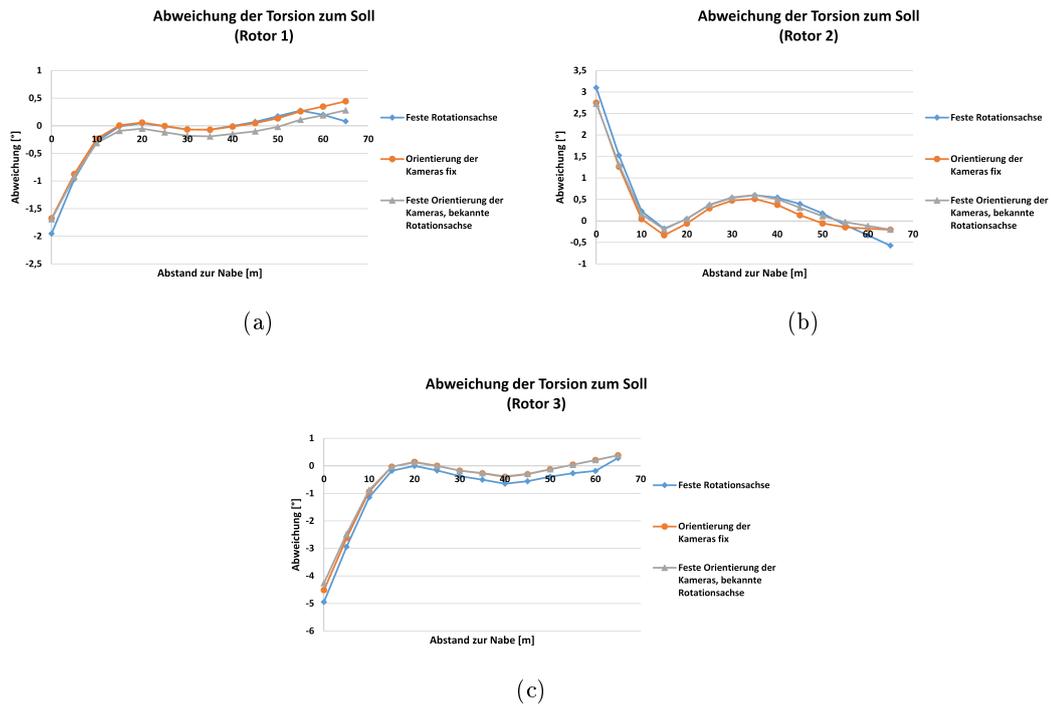


Abbildung 5.10: Vergleich der systematischen Abweichungen der Torsion je Rotorblatt bei unterschiedlichen Annahmen zu bekannten Parametern

dem Ergebnismodell aus der Simulation wird die Abhängigkeit der Parameter ebenfalls deutlich. Bei unkorrelierten Parametern würde man mit einer vergleichbar großen Abweichung am CAD-Modell rechnen, wie es die Standardabweichungen sowie die systematischen Abweichungen andeuten. Es fällt jedoch auf, dass die der Orientierung des Rotorblattsystems sowie die Unsicherheiten der Deformationsparameter sich zu einem Großteil aufheben. Der exemplarische Vergleich zeigt eine Standardabweichung von 1.8 cm für das gesamte Modell (siehe Abbildung 5.14).

Somit kann die Annahme, dass die Unsicherheiten der globalen Transformation des Rotorblattsystems für die Systematiken verantwortlich sind, bestätigt werden.

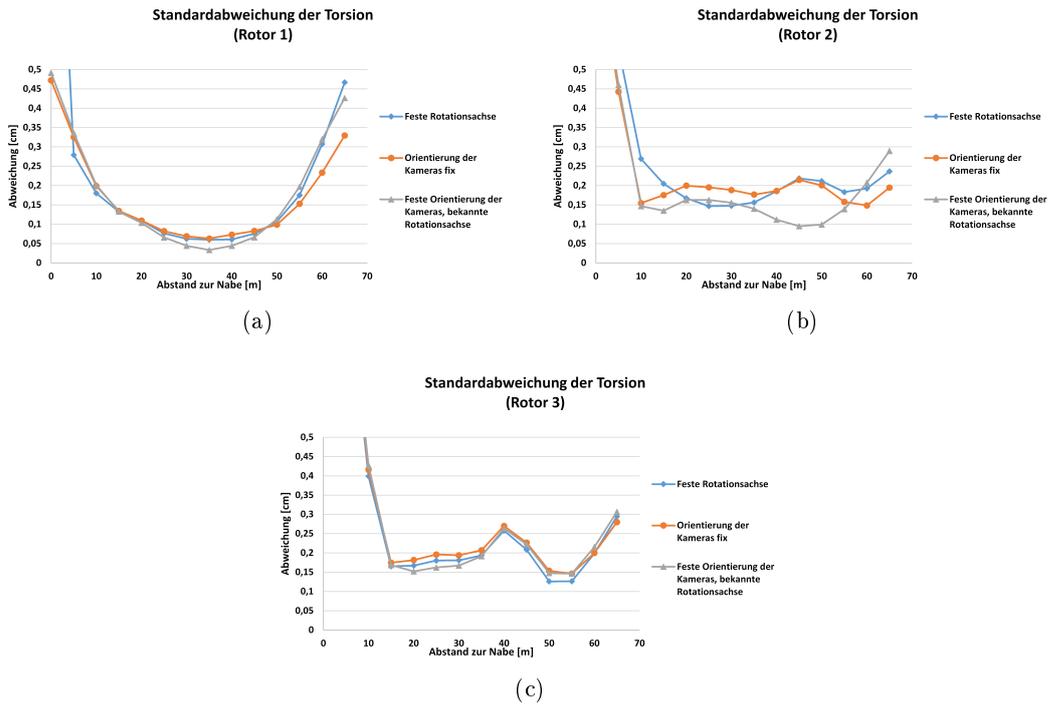


Abbildung 5.11: Vergleich der Standardabweichungen der Torsionen bei unterschiedlichen Vorinformationen

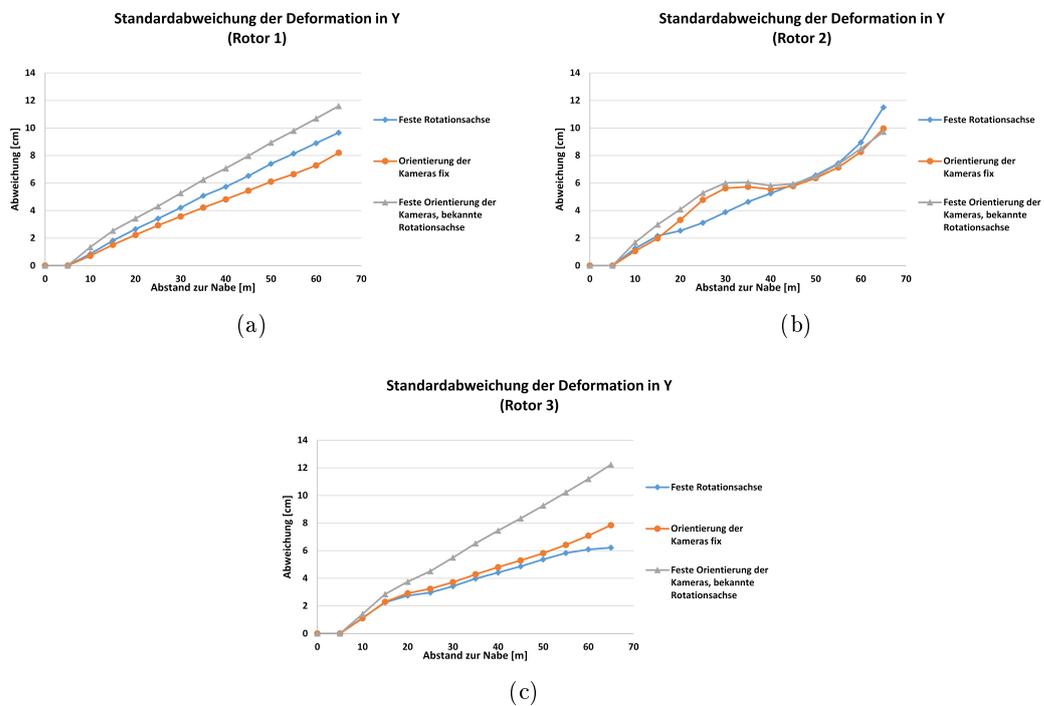


Abbildung 5.12: Vergleich der Standardabweichungen der Deformation in Y-Richtung bei unterschiedlichen Vorinformationen

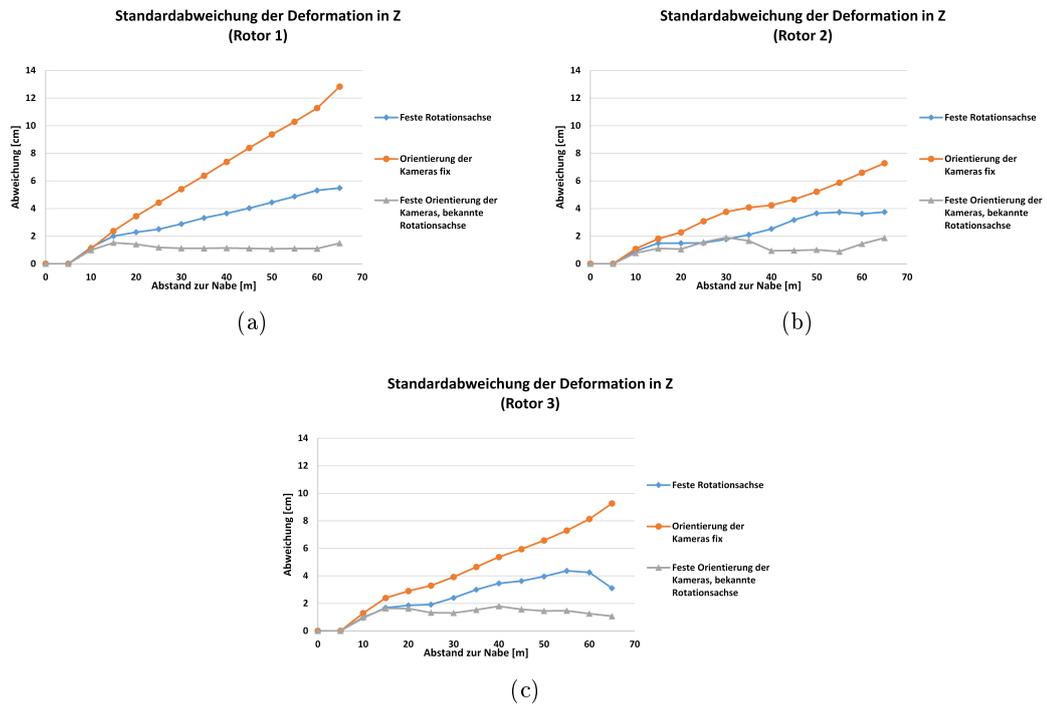


Abbildung 5.13: Vergleich der Standardabweichungen der Deformation in Z-Richtung bei unterschiedlichen Vorinformationen

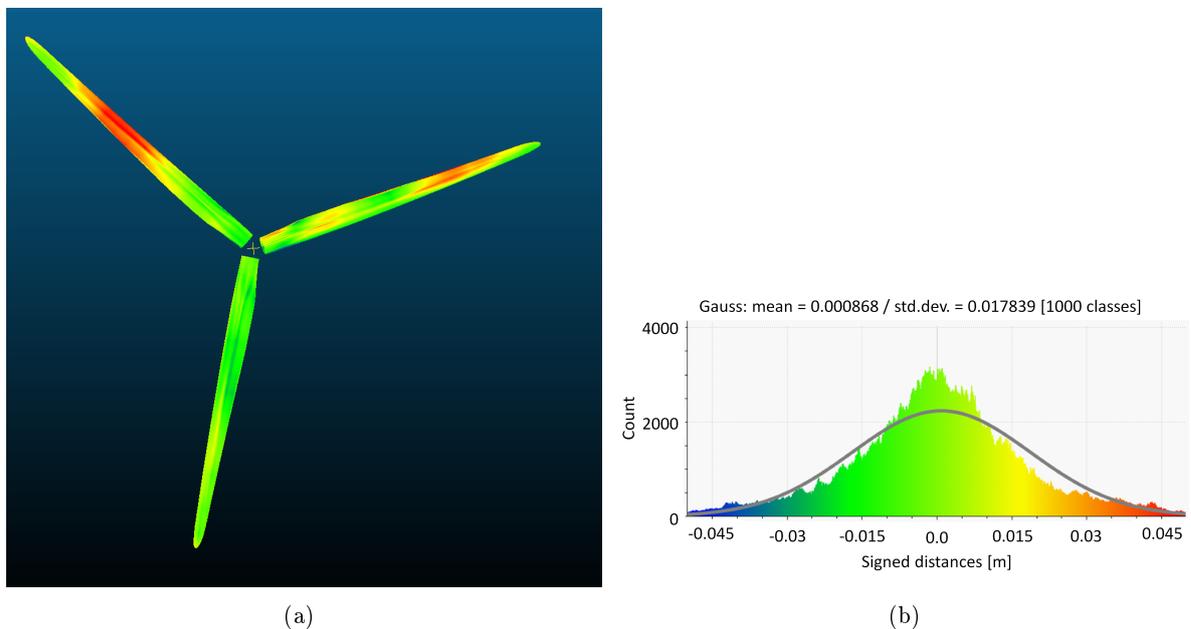


Abbildung 5.14: Vergleich der Soll-Geometrie des Rotorblattsystems mit dem Ergebnis eines Monte-Carlo-Durchlaufes.

### 5.1.5 Erfassung von Deformationen bei unbekannter Objektgeometrie

Die Bestimmung von Deformationsparametern wurde im vorhergehenden Kapitel unter Kenntnis des CAD-Modells der Rotorblätter durchgeführt. In praktischen Anwendungen ist dies meist nicht gegeben bzw. wird vom Hersteller nicht zur Verfügung gestellt.

Aus diesem Grund wird in der folgenden Auswertung angenommen, dass die Geometrie der Rotorblätter unbekannt ist. Ihre Modellierung erfolgt nach dem im Kapitel 3.5.3 vorgestellten Verfahren. Es wird ein Modell für alle drei Rotorblätter eingeführt.

Aufgrund der Modellierung mittels Querprofilen kann die Blattspitze nicht modelliert werden, die Rotorblätter werden daher bis zu einem Radius von 58 m beschrieben. Hierbei werden Profile in 2 m Abständen als Unbekannte eingeführt. Die letzten ca. 5 m des Rotorblattes werden somit nicht modelliert.

Im Gegensatz zu Kapitel 5.1.4 wird im Folgenden ein Zeitraum von neun Sekunden betrachtet. Der längere Beobachtungszeitraum wurde aufgrund der zusätzlichen Unbekannten gewählt. Durch die längere Beobachtungszeit werden die Rotorblätter aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen, weiterhin ist hierdurch eine hohe Abdeckung mit Laserscanner-Beobachtungen gewährleistet. Durch die hohe Redundanz soll die Bestimmbarkeit der Rotorblatt-Geometrie gesteigert werden und somit indirekt die Genauigkeit der Deformationsparameter.

Wegen der Abhängigkeit zwischen der Orientierung der Kameras und des Rotorblattsystems werden auch hier die Bedingungen einer bekannten Rotationsachse sowie bekannte Kameraorientierungen verwendet.

Aufgrund des unbekanntes CAD-Modells werden im folgenden nur Differenzen zwischen Deformationszuständen betrachtet, keine absoluten Deformationen. Untersucht werden die Differenzen zwischen  $R = 20$  m und  $R = 50$  m. Aufgrund der relativen Betrachtungen wird auf die Darstellung einer Einzelepoch verzichtet und stattdessen die Deformationen über die Zeit betrachtet.

In Abbildung 5.15 werden die systematischen Abweichungen der Deformationsdifferenzen dargestellt. Wie zuvor bei den Auswertungen mit bekannter Rotorblattgeometrie können systematische Abweichungen beobachtet werden. Diese verhalten sich über einen längeren Zeitraum zufällig. Es können jedoch teilweise höhere Korrelationen zwischen den Deformationen beobachtet werden.

Weiterhin sind höhere Korrelationen zwischen den globalen Transformationen des Rotorblattsystems und den Deformationen der Rotorblätter festzustellen. Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus den vorhergehenden Berechnungen. Bei der Betrachtung der Standardabweichungen (Tabelle 5.11) fällt auf, dass die Standardabweichung in Z-Richtung deutlich kleiner ausfällt als die in Y-Richtung. Dies kann durch die Annahme einer bekannten Rotationsachse erklärt werden. Bei einem Vergleich der systematischen Abweichungen zu den Standardabweichungen der Deformationsparametern fällt auf, dass alle Abweichungen innerhalb eines  $3\sigma$  Bereiches liegen.

Stabw. $\Delta Y$	5,0 cm
Stabw. $\Delta Z$	2,3 cm
Stabw. Torsion	0,17°

Tabelle 5.11: Standardabweichungen der Deformationsdifferenzen

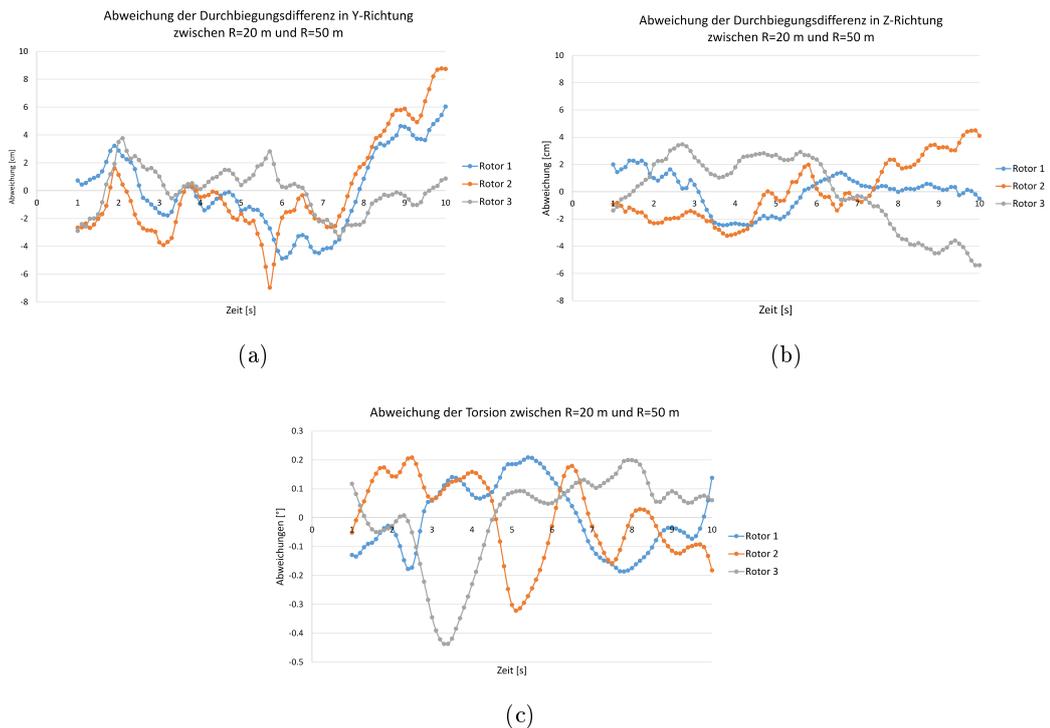


Abbildung 5.15: Systematische Abweichungen der berechneten Durchbiegungsdifferenzen an den Rotorblättern

Ein Rotorblattmodell, welches mit dieser Methode bestimmt wurde, ist in Abbildung 5.16 zu sehen. Abgesehen von Falten an den Enden des Rotorblattes ist die Geometrie eines Rotorblattes deutlich erkennbar.

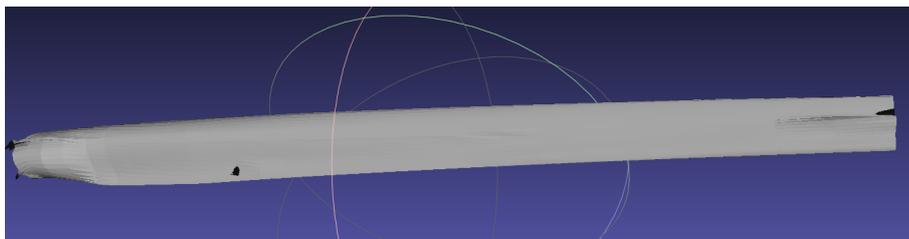


Abbildung 5.16: Beispiel eines aus den Messdaten bestimmten Modells eines Rotorblattes.

Aufgrund der Vorannahmen kann dieses Ergebnis als optimistisch angesehen werden. Zusätzliche Unsicherheiten, die aufgrund der Bestimmung der Rotationsachse entstehen, wurden nicht berücksichtigt. Weiterhin sind Abweichungen in der Geometrie der Rotorblätter untereinander in dieser Simulation nicht berücksichtigt worden. Im Vergleich zu Auswertungen mit bekanntem CAD-Modell können nur geringe Unterschiede in den Genauigkeiten festgestellt werden.

Die Geometrie der Rotorblätter lässt sich somit bei einem ausreichend langen Auswertzeitraum hinreichend genau bestimmen, sodass eine Deformationsbestimmung auch ohne bekannte CAD-Daten möglich ist.

### 5.1.6 Diskussion

Bei den durchgeführten Monte-Carlo Simulationen konnten zum einen die zu erwartenden Genauigkeiten bei einer Deformationserfassung an Rotorblättern einer WEA nachgewiesen werden und zum anderen genauigkeitseinschränkende Faktoren aufgedeckt werden. So wird beispielsweise deutlich, dass eine hohe Korrelation zwischen der Transformation des Rotorblattsystems und den Deformationsparametern vorliegt. Somit ist ein wesentlicher Faktor bei der Deformationsbestimmung die Beschreibung der Orientierung des Rotorblattsystems. Abweichungen bei der Orientierung des Rotorblattsystems führen zu Abweichungen bei den Deformationsparametern.

Insgesamt sind Standardabweichungen von ca. 10 cm an den Rotorblattspitzen realistisch. Bei der Torsionsbestimmung sind mehrere Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Die Blatttiefe, die Abdeckung mit Laserscanndaten, sowie die Orientierung des Rotorblattes. Bei günstigen Bedingungen sind Standardabweichungen von  $0.2^\circ$  bis  $0.3^\circ$  realistisch. Bei schlechten Bedingungen können Abweichungen  $> 1^\circ$  auftreten.

In einer weiteren Untersuchung konnte die Geometrie der Rotorblätter als Unbekannte bestimmt werden. Die simultane Bestimmung von Deformationsparametern und Rotorblattgeometrie hat vergleichbare Ergebnisse erzielt wie die Bestimmung der Deformation mit bekanntem Rotorblattmodell. Einschränkend konnte nicht das gesamte Rotorblatt modelliert werden. Die Modellierung eines gesamten Rotorblattes erfordert eine Erweiterung des vorgestellten Verfahrens, da die Betrachtung von einzelnen Profilen des Rotorblattes nicht zur Modellierung der Blattspitze geeignet ist.

Bei der Betrachtung von Deformationsdifferenzen konnten Standardabweichungen von ca. 5 cm für die Durchbiegungsdifferenzen festgestellt werden und ca.  $0.2^\circ$  für die Torsion. Diese Werte beziehen sich im Gegensatz zu den Standardabweichungen bei bekanntem CAD-Modell auf relative Deformationen zwischen einem Radius von 20 m und 50 m.

Aufgrund von Annahmen bei der Simulation sind die Deformationsdifferenzen als optimistisch einzuschätzen. Dies gilt insbesondere für die Durchbiegung der Rotorblätter, da hier eine bekannte Rotationsachse vorgegeben wurde. Werden die Unsicherheiten der Orientierung des Rotorblattsystems aus Kapitel 5.1.4 angenommen (ca.  $0.001^\circ$ ), so kann mit einer Unsicherheit der Durchbiegungsdifferenzen von ca. 8 cm gerechnet werden.

Insgesamt kann die Eignung des vorgestellten Verfahrens zur Deformationsbestimmung bestätigt werden. Die aufgedeckten Abhängigkeiten zwischen der Orientierung eines Rotorblattsystems und der Deformation eines Rotorblattes beziehen sich nicht nur auf dieses Verfahren, sondern sind generelle Probleme bei der Erfassung von Deformationen.

## 5.2 Untersuchung an Balken im Labor

Im vorhergehenden Kapitel wurde die Eignung des Verfahrens anhand von Simulationen geprüft. Hier sollen diese durch zwei praktische Versuche an Aluminium-Balken gestützt werden. In einem statischen Experiment wurde eine hochgenaue Referenzmessung durchgeführt und ein Vergleich zur theoretischen Biegelinie vorgenommen.

Bei einem zweiten kinematischen Versuch wird eine Schwingung eines Aluobjektes aufgenommen und ausgewertet. Hierbei wird als Referenz die Messung von signalisierten Punkten verwendet.

### 5.2.1 Erfassung eines Balkens unter Last

Im folgenden Laborversuch wird ein Aluminiumbalken mit rechteckigem Profil ( $30\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 540\text{ mm}$ ) beobachtet. Der Balken wurde unter Eigenlast und mit einer zusätzlichen Einzellast (ca. 150 g) am Ende des Balkens erfasst.

Dabei wurde der Aluminiumbalken einseitig eingespannt. Um eine möglichst definierte Einspannung zu gewährleisten, wurde der Balken zwischen Alu-Blöcken fixiert.

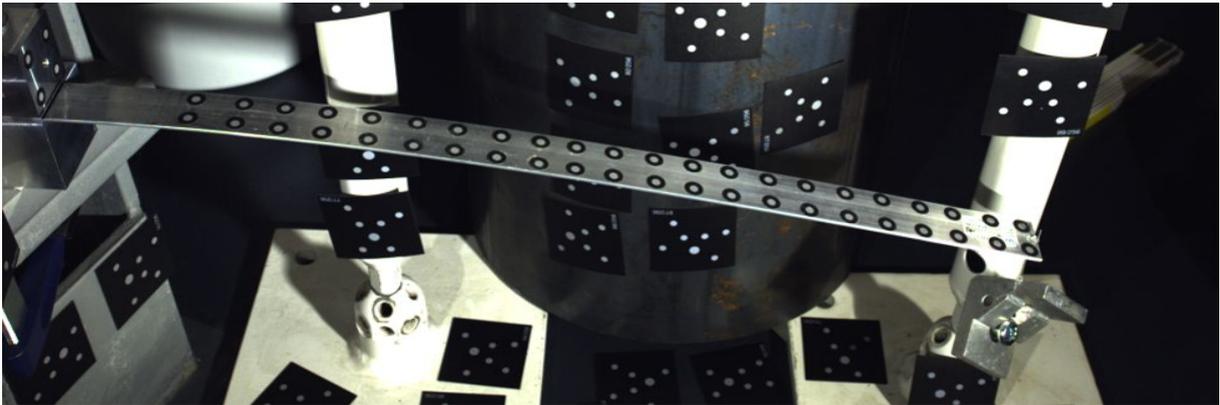


Abbildung 5.17: Bild des erfassten Balkens mit Einzellast am Balkenende.

Als Referenzmessung dient bei diesem Versuch eine photogrammetrische Einmessung in einem Mehrbildverband.

Hierfür wurde eine Nikon D2x verwendet. Als innere Genauigkeit wurde eine Standardabweichung der Objektpunkte  $< 0.01\text{ mm}$  erreicht.

Die zur Erfassung der Deformation verwendeten Kameras wurden relativ zueinander orientiert. Als gemeinsamer Bezug wird die Referenzmessung verwendet. Eine Transformation in die Referenzmessung ist durch homologe Punkte gegeben.

Zur Deformationsmessung wurden zwei PCO Dimax HD+ Kameras mit einer Basis von 583 mm verwendet.

Zur Modellierung der Deformation werden Transformationsknoten in 30 mm Abstand zueinander definiert.

Das Ergebnis des Vergleiches ist in Abbildung 5.18 zu sehen. Die Markendicke von 0.1 mm ist berücksichtigt. Es lässt sich erkennen, dass die Verformung von bis zu 75 mm mit einer Genauigkeit von wenigen  $1/10\text{ mm}$  erfasst wurde. Die Vergleiche gegen die photogrammetrische Auswertung zeigen leichte systematische Abweichungen von 0.04 mm bei der Durchbiegung unter Eigenlast und 0.02 m bei der Erfassung mit zusätzlichem Gewicht am Ende des Balkens.

Der zufällige Anteil liegt bei einer Standardabweichung von 0.04 mm bei der Erfassung unter Eigengewicht und 0.11 mm bei der Erfassung mit zusätzlicher Einzellast. Zum Vergleich, die Pixelgröße der Kameras am Objekt beträgt ca. 0.5 mm.

In Jepping u. a. (2016) wurde anhand dieses Versuches ein Vergleich mit der theoretischen Durchbiegung des Balkens vorgenommen. Es zeigte sich, dass die theoretische Durchbiegung mit der aus der Balkentheorie innerhalb der Unsicherheiten der Eingangsdaten übereinstimmt. Weiterhin wurde offenkundig, dass anhand der ermittelten Deformationsparameter auf innere Beanspruchungen eines Bauteils geschlossen werden kann.

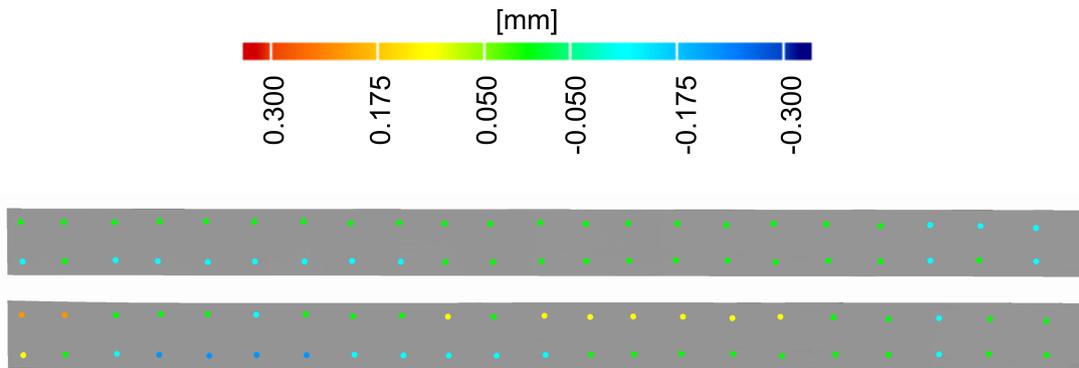


Abbildung 5.18: Vergleich zwischen Referenzmessung und berechneter Verformung aus Silhouetten. Oben: Verformung unter Eigengewicht, unten: Verformung mit Einzellast am linken Ende.

Dieser Versuch bezieht sich auf die Untersuchung eines isotropen Materials in einem statischen Versuch unter Verwendung eines klar definierten Lastfalls. In Bezug auf ein Rotorblatt und seine Deformation ist der Rückschluss auf die innere Beanspruchung deutlich komplexer. Sie bestehen aus einem Verbundstoff, der sich anisotrop verhält. Weiterhin sind die Lastfälle lediglich genähert durch Lidar (light detection and ranging) Messungen des Windfeldes zu bestimmen.

### 5.2.2 Erfassung eines Balkens unter Schwingung

Im vorhergehenden Abschnitt ging es um die Erfassung eines Balkens unter einer statischen Belastung. Dieser Versuch ermöglichte eine hochpräzise Referenzmessung mit einer photogrammetrischen Bündelausgleichung.

Im Folgenden wird ein kinematischer Fall betrachtet. Hierzu wird ein Aluminium-Balken unter Schwingung beobachtet. Als Erweiterung wird der Balken um ein Querstück ergänzt, sodass die zu erfassende Geometrie ein „T“ ergibt (siehe Abbildung 5.19).

Das rechteckige Profil des Aluminium-Balkens beträgt bei diesem Versuch  $30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ . Die Länge des Balkens beträgt ca. 500 mm und die des T-Stücks 250 mm.

Die Messung erfolgte wie im vorhergehenden Versuch mit zwei PCO Dimax HD+ Kameras. Erfasst wird eine Schwingung des T-Balkens mit 50 Hz.

Aufgrund der hohen Kinematik des Versuches wird die Referenzmessung mit den gleichen Kameras durchgeführt wie die Erfassung der Deformationsparameter. Als Referenzmessung dienen Kreismarken auf dem Balken, die photogrammetrisch bestimmt werden. Hierzu wurde die Softwarebibliothek „Metrology“ von AXIOS 3D Systems GmbH verwendet.

Modelliert werden drei Balken, ein langer (ca. 480 mm) sowie zwei kurze für das T-Stück (ca. 125 mm). Zur Bestimmung der Deformation werden diese in 50 mm Abschnitte unterteilt.

Weiterhin wird der Winkel zwischen dem langen Balken und dem T-Stück als unbe-

kannt, jedoch konstant über die Zeit, eingeführt. Dies erfolgt aufgrund der Unsicherheit der Verklebung zwischen den Aluminiumbalken.

Die zeitliche Modellierung erfolgt durch eine Unterteilung in 0.02 s Abschnitte. Insgesamt wird eine Sequenz aus 50 Bildpaaren ausgewertet, also ein Zeitraum von einer Sekunde.

Die Endstücke der kurzen Balken sind in den Messbildern ausmarkiert, da die Länge der Balken nicht mit ausreichender Genauigkeit (kleiner 0.1 mm) bestimmt werden konnten und somit Messungen der Balkenenden zu einer Verfälschung des Ergebnisses führen. Diese Endstücke werden beim 3D Vergleich mit der Referenz nicht berücksichtigt.

In Abbildung 5.20 sind 3D-Vergleiche zwischen der ermittelten (deformierten) Geometrie und den Punktmessungen dargestellt. Einzelne Punkte wurden nicht automatisch gemessen, hier sind Lücken zu sehen. Der Vergleich zeigt eine mittlere Abweichung von 0.018 mm bei einer Standardabweichung von 0.12 mm. Zum Vergleich beträgt die Pixelgröße am Objekt ca. 0.3 mm.

In den Ergebnissen lässt sich deutlich eine gedämpfte Schwingung erkennen, die zu Beginn eine Amplitude von ca. 13 mm aufweist (Abbildung 5.21).

Bei der Betrachtung der Abweichungen wird deutlich, dass die kurzen Balken den T-Stücks höhere Abweichungen aufweisen als die des langen Balkens. Dies kann durch die Aufnahmebedingung erklärt werden. Die Hauptbewegungsrichtung des langen Balkens ist nahezu senkrecht zu den Kanten im Bild. Die kurzen Balken werden im Bild unter einem deutlich spitzeren Winkel erfasst. Hierdurch bestehen hier schlechtere Bedingungen für die Bestimmung der Bewegung und Verformung, wodurch die höheren Abweichungen zu erklären sind.

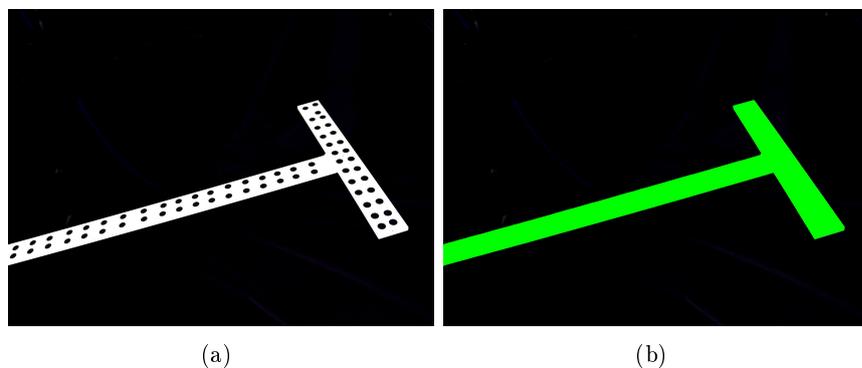


Abbildung 5.19: Messbild aus der Erfassung der Deformationen eines Balkens (a); Überlagerung mit dem deformierten Objektmodell (b).

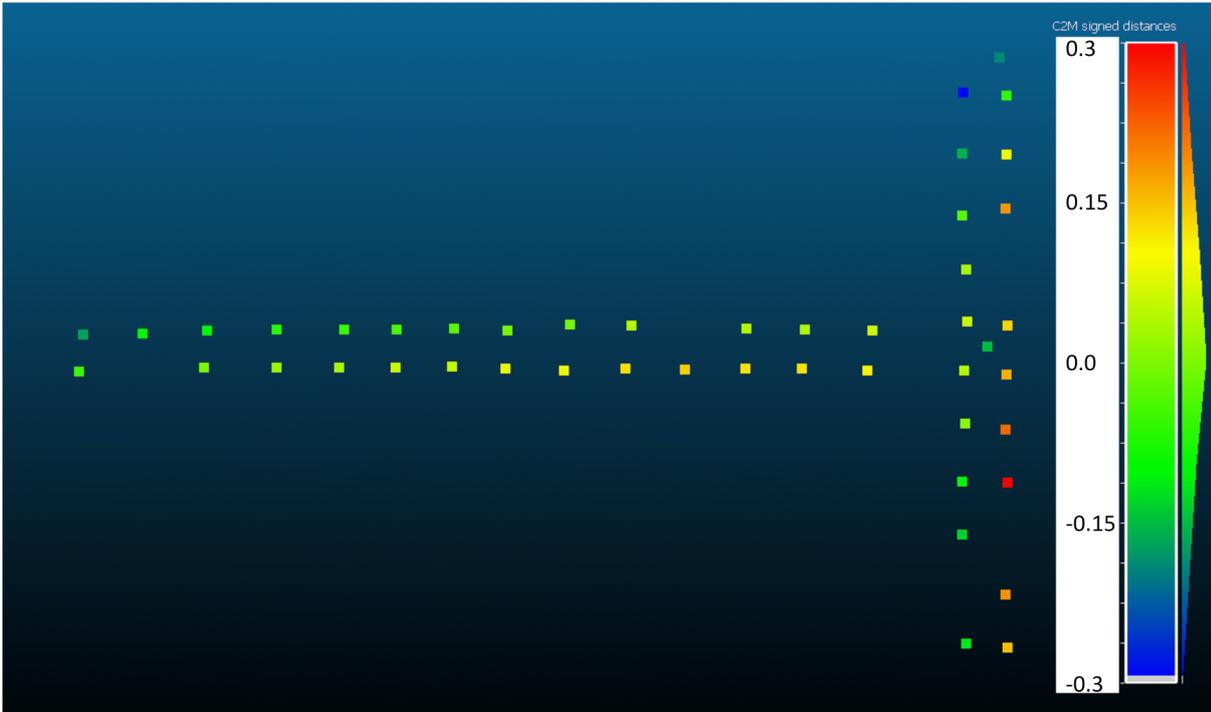


Abbildung 5.20: Vergleich der abgeleiteten Deformation mit der Referenzmessung.

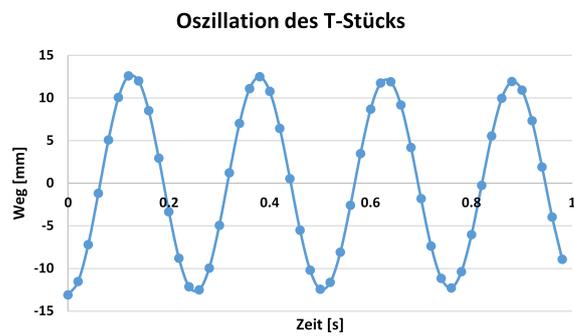


Abbildung 5.21: Aus Silhouettenmessungen abgeleitete Oszillation des T-Balkens.

### 5.3 Messung an einer WEA

Im Folgenden wird eine Messung an einer Windkraftanlage (Abbildung 5.22) der Firma Senvion vorgestellt. An diesem Beispiel soll die Überführbarkeit der Verfahren aus Kapitel 3 ins Feld demonstriert werden. Eine unabhängige Verifizierung der bestimmten Deformationen ist anhand dieser Messung nicht möglich. Es kann lediglich auf Erfahrungen aus den Monte-Carlo-Simulationen aus Kapitel 5.1 zurückgegriffen werden.



Abbildung 5.22: Bild der aufgenommenen Windkraftanlage.

Bei der Überführung vom Labor ins Feld ist insbesondere die Bestimmung der relativen Orientierungen der Messsysteme zueinander sowie ihre Synchronisation eine Herausforderung.

Zur Synchronisation der Kameras sowie der Laserscanner wird ein TTL-Signal verwendet. Die Bestimmung der inneren Orientierung der Kameras erfolgte mittels einer Testfeldkalibrierung vor Ort.

Für die Bestimmung der äußeren Orientierung der Messsysteme können für Laserscanner Standardverfahren verwendet werden, wie sie bei gewöhnlichen Aufnahmen zum Einsatz kommen. Bei den Kameras ist dies nicht möglich. Eine Orientierung über bekannte Punkte würde es erforderlich machen, dass Signalisierungen im Sichtfeld der Kameras angebracht werden. Da die Kameras zum Messobjekt ausgerichtet sind, ist dies nur erschwert möglich. Bisher verwendete Verfahren zur Orientierung basieren auf signalisierte Punkte am Objekt (u.a. Winstroth u. a. (2014)). Über diese kann eine relative Orientierung zwischen den Kameras bestimmt werden. Eine Orientierung relativ zu den Laserscannern ist nicht möglich.

Hierüber hinaus soll bei der Messung gänzlich auf Signalisierungen an der Windkraftanlage verzichtet werden.

Zur Lösung des Orientierungsproblems wird ein neues Verfahren vorgestellt, welches im Abschnitt 5.3.1 näher betrachtet wird.

Aufgrund der kurzen Zeitfenster für einzelne Messungen und erforderlicher Umbauten konnten keine simultanen Messungen mit den Laserscannern und den Kameras durchgeführt werden.

Es wird daher getrennt auf die jeweiligen Messverfahren eingegangen.

### 5.3.1 Orientierung der Messsysteme

Für die Orientierung der Messsysteme werden geodätische Messverfahren eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass für die Orientierung der Laserscanner auf Standardverfahren zurückgegriffen werden kann.

Die Laserscanner konnten mittels signalisierter Punkte (Targets) verknüpft werden. Um einen Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem zu realisieren wurden die Targets mittels Tachymeter (Trimble S6) eingemessen. Die Streckengenauigkeit dieses Tachymeters beträgt laut Datenblatt  $1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$  mit Prisma und  $3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$  ohne Prisma, die Winkelmessungen werden mit  $0.1 \text{ mgon}$  aufgelöst.

Die Herausforderung besteht somit nicht in der Verknüpfung der Laserscanner sondern, in der Einbeziehung der Kameras in diesem Koordinatensystem. Um auch die Kameraposition innerhalb des geodätischen Netzes zu bestimmen, wurden Marken auf den Kameras verwendet. Diese können, wie in Abbildung 5.23 zu sehen ist, mit dem Tachymeter angemessen werden.



Abbildung 5.23: Bestimmung der Position der Kamera, die Punktmarken sind im Koordinatensystem der Kamera bekannt. Die Messung der Strecke erfolgt mit einem Prisma.

Die Aufnahme erfolgte von zwei Standpunkten aus. Das resultierende Netz ermöglicht eine Orientierung der Laserscanner sowie der Kameras mit einer Genauigkeit von  $1 \text{ mm}$  bis  $2 \text{ mm}$ .

Um die Kameras in diesem Netz zu orientieren ist es erforderlich, dass die Marken auf den Kameras im Koordinatensystem der Kameras bekannt sind. Die Orientierungen der Kameras ergeben sich in diesem Fall durch Transformation vom Kamerakoordinatensystem ins übergeordnete Netz.

Die Positionen der Marken auf den PCO-Kameras wurden vorab im Labor (Abbildung 5.24) bestimmt.

Die Einmessung der Marken erfolgt photogrammetrisch mit einer Nikon D2Xs. Es wurde hierzu ein photogrammetrischer Bildverband aufgenommen.

Die Marken auf den Kameras werden zunächst in einem globalen Koordinatensystem erfasst, dass zunächst noch keinen Bezug zum Koordinatensystem der einzumessenden Kamera (PCO Dimax HD+) hat. Um diesen Bezug herzustellen wird ein Bild der vorab kalibrierten Kamera (innere Orientierung bekannt) in der Bündelausgleichung eingeführt. Anhand dieser Aufnahme kann die Position der Kamera im globalen Koordinatensystem



Abbildung 5.24: Bild des Messaufbaus zur Bestimmung der Koordinaten der Marken auf den Kameras im Koordinatensystem der Kameras.

(Nikon D2Xs) bestimmt werden. Es handelt sich hierbei um einen photogrammetrischen Rückwärtsschnitt. Die Positionen der Marken auf der Kamera im Koordinatensystem der Kamera ergeben sich durch eine Transformation vom globalen Koordinatensystem mittels der äußeren Orientierung der PCO-Kamera ins Koordinatensystem der PCO-Kamera.

Zur Steigerung der Redundanz wurden je PCO-Kamera vier Positionen (äußere Orientierungen) verwendet. Die äußeren Orientierungen wurden durch Rotation der Kamera, soweit wie es der Messaufbau ermöglichte, variiert. Die resultierenden Koordinaten im Koordinatensystem der PCO-Kameras wurden gemittelt. Die Standardabweichung der Marken im Koordinatensystem der Kamera kann mit  $< 0.1$  mm abgeschätzt werden.

Da ein Transport der Kameras nicht mit Objektiv erfolgen sollte (sicherer Transport in Transportbox), wurde zusätzlich der Effekt des Objektivtausches und der Umfokussierung abgeschätzt. Hierzu wurde die Bestimmung der Koordinaten der Marken auf der Kamera mit zwei Fokuseinstellungen wiederholt. Gleichzeitig erfolgte ein Austausch des Objektivs. Es wurde hierzu ein baugleiches Objektiv verwendet. Der größte Effekt wurde in Aufnahme­richtung der Kamera beobachtet. Durch Umfokussierung von Nah auf Fern hat sich das Koordinatensystem der PCO-Kamera um ca. 1 mm in Aufnahme­richtung geändert. Dies kann als ausreichend genau für die Bestimmung von Deformationen an einer WEA angenommen werden (Pixelgröße am Objekt ca. 5 cm).

Die Positionen der Kameras zueinander können somit mit einer Genauigkeit  $< 2$  mm abgeschätzt werden.

Die Rotationen der Kamera können mittels Tachymeter nicht ausreichend genau bestimmt werden. Der zu erwartende Winkelfehler hätte am Objekt einen Einfluss von ca. 0.5 mm (ein Winkelfehler von 0.005 rad entspricht einem Bogen von 0.5 mm bei einem Radius von 10 cm).

Die Rotation der Kameras muss somit separat bestimmt werden. Aufgrund der bekannten Translationen reduziert sich die Anzahl der Unbekannten auf drei je Kamera. Zur Bestimmung der Rotationen werden homologe Punkte in allen drei Bildern identifiziert. Pro 3D-Punkt erhöht sich die Anzahl der Unbekannten um drei, so dass bei drei Kameras eine Bestimmung der Rotationen ab drei homologen Punkten möglich ist.

Alternativ kann, wie in Kapitel 3.5.3, die Rotation der Kamera simultan mit der Deformation geschätzt werden.

Aufgrund einer Asynchronität einer Kamera von  $< 0.005$  s werden im Folgenden zwei Ansätze zur Bestimmung der relativen Orientierung der Kameras verfolgt. Zur Bestimmung der Blatthinterkante aus photogrammetrischen Messungen (Kapitel 3.5.2) werden zwei der drei Kameras verwendet, da eine Berücksichtigung der Asynchronität aufgrund der epochenweisen Betrachtung nicht möglich ist. Für die Orientierung der beiden Kameras wird ein Folgebildanschluss verwendet. Hierzu werden Punkte auf der Gondel, dem Turm sowie den Rotorblattspitzen verwendet. Im Folgenden wird eine Orientierung verwendet, bei der 9 homologe Punkte verwendet wurden. Für einen Folgebildanschluss sind mindestens 5 homologe Punkte erforderlich. Der Maßstab wird von der Tachymetermessung übernommen. Die Standardabweichung des Folgebildanschlusses beträgt am Objekt 2.5 cm (0.5 Pixel). Das geringe Genauigkeitsniveau kann durch die schlechte Identifizierbarkeit der Objektpunkte erklärt werden. Diese sind teilweise schwach texturiert und wurden durch manuelle Cursor-Messungen bestimmt.

Bei der Verwendung von drei Kameras ist daher eine simultane Bestimmung der Orientierung und der Blatthinterkante zu bevorzugen, da die Messungen der Blatthinterkanten ein höheres Genauigkeitsniveau aufweisen. Typischerweise können für Punkte auf einer Linie Genauigkeiten von  $< 1/5$  Pixel erreicht werden. Die Integration einer Raumkurve in einer Bündelausgleichung ist in Kapitel 3.5.2 beschrieben.

Bei der Bestimmung von Deformationen auf Basis eines Objektmodells kann die Asynchronität im Ausgleichungsansatz berücksichtigt werden. Daher werden bei diesem Ansatz alle drei Kameras verwendet. Die Rotation der Kameras wie auch die Asynchronität werden im Gleichungssystem als Unbekannte eingeführt.

### 5.3.2 Bestimmung relativer Blattwinkel aus Profilmessungen

Exemplarisch wird die relative Änderung des Blattwinkels eines Rotorblattes bei horizontaler Blattstellung bestimmt. Werden mehrere synchronisierte Laserscanner eingesetzt, lassen sich aus den Winkeländerungen Torsionsänderungen ableiten. Die Messung erfolgt mit einem *Z&F 5010C* bei 25 rps. Das untersuchte Profil ist ca. 1.1 m tief und ca. 100 m vom Scanner entfernt. Bei der gewählten Auflösung des Scanners werden je Profil ca. 12 Punkte erfasst, mit einem Punktabstand von ca. 8 cm. Zur Identifizierung der Profile bei horizontaler Blattstellung wird die Z-Koordinate des Schwerpunktes betrachtet. In der ersten Epoche wird ein Profil nahe der Horizontalstellung ausgewählt. Ausgehend von diesem Profil werden die Winkeländerungen für folgende Profile betrachtet. Über die Differenzen zu einem gegebenen Referenzwert für Z kann auf die Horizontalstellung geschlossen werden. Für Vergleiche mit der Referenzepoche werden jeweils die beiden nächstgelegenen Profile je Rotorblatt und Umlauf verwendet.

Zur Bestimmung der Winkeländerung werden die Profile mit einem modifizierten ICP-Algorithmus auf die Referenzepoche transformiert. Die Minimierung des Abstandes erfolgt zwischen einem Referenz-Polygon und den gemessenen Punkten der Folgeepochen.

Die Standardabweichung der Transformation mittels ICP beträgt 2.7 mm (gemittelt aus 100 Transformationen). Dies ergibt eine Standardabweichung der Rotation von  $0.3^\circ$ . Zur Verifizierung wurde die Bestimmung der relativen Blattwinkel mit zwei anderen Referenzprofilen wiederholt. Hierbei wird angenommen, dass in den ca. 0.08 s zwischen dem ersten Referenzprofil und dem letzten Referenzprofil keine signifikante Änderung des Blattwinkels aufgetreten ist. Aus der Mittelung der Blattwinkel konnte wiederum eine Standardabwei-

chung abgeleitet werden. Es wurden hierbei 50 Blattwinkel betrachtet, die jeweils mit drei unterschiedlichen Referenzprofilen bestimmt wurden. Aus den jeweils drei Ergebnissen je Winkel wurde ein Mittelwert abgeleitet sowie eine Standardabweichung. Das Mittel über alle Standardabweichungen (Mittel aus 50) ergibt eine empirische Standardabweichung von  $0.35^\circ$  für einen abgeleiteten Winkel.

Bei der Betrachtung eines Einzelprofils kann eine Winkeländerung von ca.  $1^\circ$  (bei  $3\sigma$ ), bei einem 1.1 m tiefen Profil, signifikant bestimmt werden. Durch die Einbeziehung von zwei oder drei Referenzprofilen lässt sich das Signifikanzniveau für Winkeländerung auf  $0.6 - 0.7^\circ$  steigern. Ein Ergebnis, gemittelt aus drei Referenzprofilen, ist in Abbildung 5.25 zu sehen. Winkeländerungen größer  $0.6^\circ$  können als signifikant angenommen werden. Die verwendeten Profile sowie die aufeinander transformierten Profile sind in Abbildung 5.26 dargestellt.

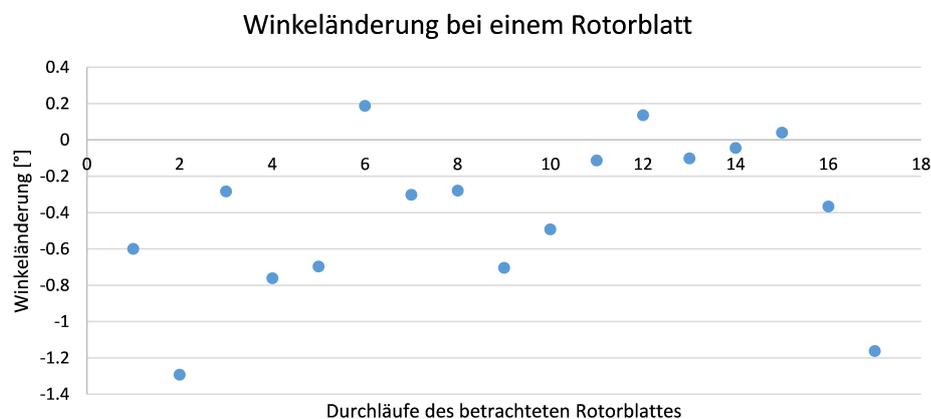


Abbildung 5.25: Winkeländerung eines Rotorblattes bei horizontaler Blattstellung, betrachtet über mehrere Durchläufe.

Die Genauigkeitsangaben beziehen sich auf ein 1.1 m tiefes Profil. Neben der Tiefe spielt die Geometrie eine entscheidende Rolle. Ein nahezu kreisförmiges Profil ist weniger zur Bestimmung eines Winkels geeignet als ein flaches. Zur Steigerung der Genauigkeit kann weiterhin die Redundanz durch die Erfassungsrate des Laserscanners gesteigert werden. Es ist zum Beispiel möglich eine höhere Punktfrequenz zu verwenden oder die Erfassungszeit eines Profils zu erhöhen, indem die Umdrehungen pro Sekunde von 25 auf bspw. 12.5 rps reduziert werden. Durch diese Maßnahmen kann die Punktdichte beispielsweise verdoppelt werden.

Bei einer Verdoppelung der Punktzahl pro Profil erhöht sich die Redundanz bei der Bestimmung des Blattwinkels, was eine theoretische Verbesserung der Standardabweichung zur Folge hat. Aufgrund der Strahldivergenz des Lasers ist die Erhöhung der Punktdichte am Objekt nur bis zu einem gewissen Grad sinnvoll. Bei einer Messentfernung von ca. 100 m ist die Punktgröße des Laserstrahls am Objekt bereits ca. 3 cm im Durchmesser. Eine Punktdichte unter 3 cm führt zu einer zunehmenden Korrelation zwischen den Messungen.

Durch Anpassung der Messoptionen bei der Erfassung der Profile ist ein zu realisierender Punktabstand von ca. 1 cm möglich. Dies sollte die Genauigkeit bei der Erfassung

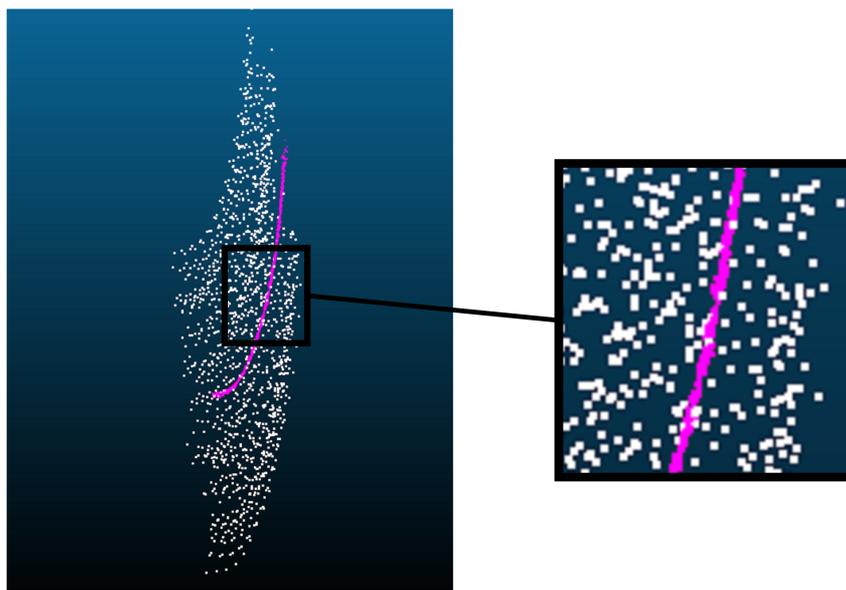


Abbildung 5.26: Zur Transformation verwendete Profile (weiß) und aufeinander transformierte Profile (magenta).

deutlich steigern, wodurch Genauigkeiten von  $< 0.5^\circ$  ( $3\sigma$ ) möglich sind. Ein begrenzender Faktor ist hierbei die Zunahme des Rauschens einer Einzelmessung bei Erhöhung der Punktfrequenz des Laserscanners.

### 5.3.3 Bestimmung der Blatthinterkante

Zur Ableitung von Durchbiegungen ist es möglich mittels photogrammetrischer Verfahren die Blatthinterkante zu messen. Da diese wie in Kapitel 3.5.2 als Raumkurve aufgefasst werden kann und hierüber hinaus direkt im Bild identifiziert werden kann, ist es möglich diese direkt aus mindestens zwei Bildern zu bestimmen. Im Folgenden wurde die Blatthinterkante als Spline eingeführt und in einer Bündelausgleichung bestimmt.

Die Ergebnisse in Abbildung 5.27 sind durch die Messung aus zwei Kameras entstanden. Die hierbei erzielte Standardabweichung ist aufgrund der geringen Überbestimmung (zwei Kameras) zu optimistisch, weshalb zur Genauigkeitsabschätzung eine simulierte Ausgleichung auf Basis der Aufnahmegeometrie durchgeführt wurde. Für die simulierte Ausgleichung wird eine a priori Standardabweichung für die Kantenmessungen vorgegeben, um die Standardabweichung eines 3D-Punktes auf einem Spline abzuleiten. Hieraus ergibt sich bei einer Bildmessgenauigkeit von  $1/5$  Pixel und einem Aufnahmeabstand von ca. 100 m eine Standardabweichung von ca. 1 cm quer zur Aufnahme- und 3 cm in Aufnahme-richtung. Die Genauigkeit ist abhängig von der Aufnahmegeometrie, die durch Verwendung von drei Kameras verbessert werden kann. Da es sich um ein rotierendes Objekt handelt, ändern sich je nach Blattstellung die Schnitte der Epipolarlinien gegenüber der zu erfassenden Kante. Fallen die Ausrichtung der Kante mit der Ausrichtung der Epipolarlinie eines Kantenpunktes in den Bildern überein, kann die Kante nicht bestimmt werden. Die Kante befindet sich somit in der gleichen Ebene wie die Kameras. Bei der im Versuch erfassten Kante lagen gute Schnittbedingungen vor (nahezu rechtwinklig). Sind

diese schlechter, so verringert sich die Bestimmbarkeit der Kante.

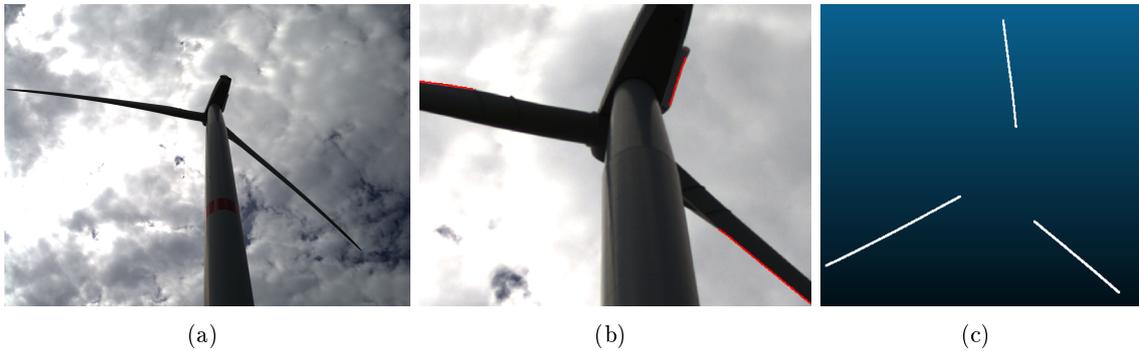


Abbildung 5.27: Eingangsbild (a); Detailansicht der Kantenmessung in einem Eingangsbild (b); Ergebnis der Konturbestimmung. Zur Visualisierung wurden auf dem Spline Zwischenpunkte berechnet (c)

Für die Bestimmung von Durchbiegungsänderungen ist es erforderlich, die gemessenen Punkte in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen. Bei einer signalisierten Erfassung der Verformung (Winstroth u. a., 2014) erfolgt dies durch gemessene Punkte im ersten Drittel der Rotorblätter. In diesem Bereich können die Rotorblätter als ausreichend steif angenommen werden. Das gleiche Vorgehen kann auch hier genutzt werden, indem die Transformation zwischen zwei Epochen mittels eines ICP-Verfahrens bestimmt werden, indem Punkte des ersten Drittels je Rotorblatt verwendet werden.

#### 5.3.4 Bestimmung der Deformation unter Verwendung eines Deformationsmodells

Die vorgestellten Auswertungen sind bezüglich der abzuleitenden Deformationen stark eingeschränkt. Die relativen Blattwinkel können lediglich in einem schmalen Bereich nahe der Horizontalstellung bestimmt werden. Die Messung der Blatthinterkante ermöglicht lediglich die Erfassung von Durchbiegungsverläufen.

Für detailliertere Aussagen kann das Verfahren nach Kapitel 3.5.3 eingesetzt werden. Dabei wird ein Modell des Rotorblattes simultan mit den Deformationen bestimmt.

Hierzu werden im Folgenden alle drei Kameras eingeführt. Wie in Kapitel 5.1.3 werden die Rotationen der Kameras simultan mitbestimmt. Da eine der drei Kameras asynchron aufgezeichnet hatte, wurde zusätzlich die Asynchronität als Unbekannte im Gleichungssystem eingeführt. Die Transformation eines Punktes des Objektmodells  $P_{Sys}$  erweitert sich hierbei um eines konstanten zeitlichen Offset  $\Delta t$  für die Kamera. Die Transformation des Punktes  $P_{Sys}$  in Bild (Formel 3.27) erweitert sich somit zu:

$$P'_{Sys} = F(\mathbf{IOR}_k, \mathbf{EOR}_k, \delta_{Rot_r}(t + \Delta t), \mathbf{O}_{Rot_r}(t + \Delta t)) \quad (5.3)$$

Bei der Erfassung der Windkraftanlage konnten aufgrund wechselnder Windbedingungen, die schnelle Anpassungen des Messaufbaus erforderten, keine simultane Messung mit einem Laserscanner durchgeführt werden.

Untersucht wird im Folgenden ein Rotorblattmodell mit einer Gesamtlänge von 40 m. Es wird in 21 Profile unterteilt, die jeweils durch 49 Punkte beschrieben werden.

Die Deformation wird durch Deformationsknoten im Abstand von 15 m beschrieben. Insgesamt wird ein Zeitraum von 0.3 s ausgewertet, bei einer Bildfrequenz von 100 fps (frames per second) sind dies je Kamera 33 Bilder.

Aufgrund der Ergebnisse aus den Monte-Carlo-Simulationen (siehe Abschnitt 5.1.5) kann angenommen werden, dass alle Deformationen, die hier anhand der Bilddaten bestimmt wurden, nicht signifikant sind.

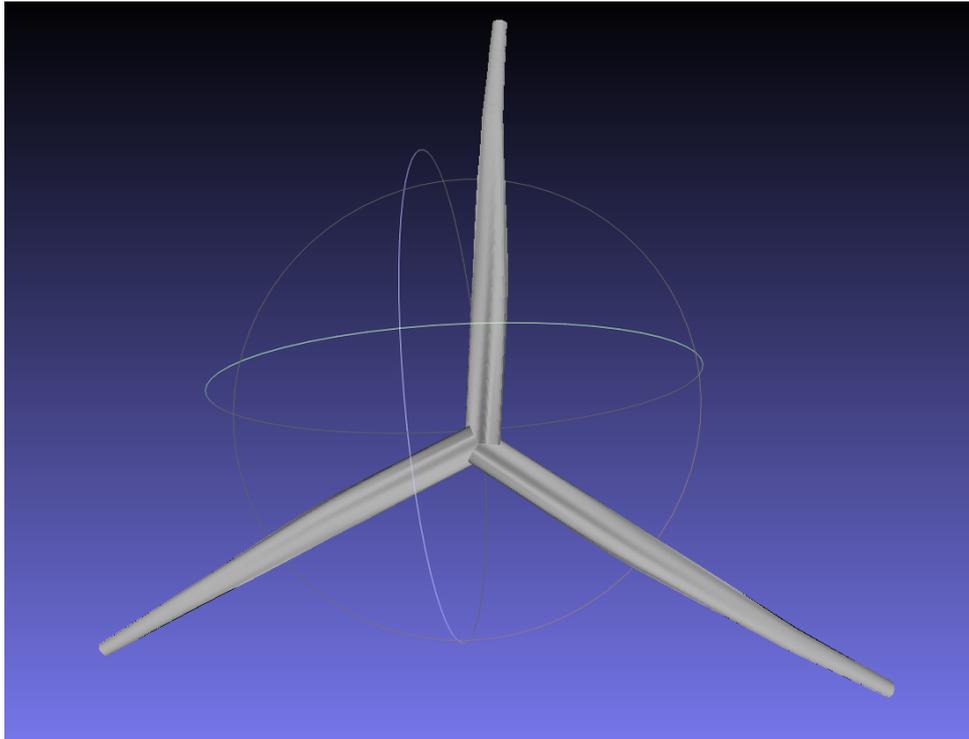


Abbildung 5.28: 3D-Modell bestimmt aus Silhouetten.

Dennoch zeigt dieses Beispiel die Überführbarkeit des Verfahrens ins Feld. Exemplarisch wird in Abbildung 5.28 das geschätzte Modell der Rotorblätter dargestellt. Aufgrund der Messdaten liegen keine flächenhaften Informationen zur Bestimmung des Modells vor, wodurch die leichte Faltenbildung zu erklären ist. Durch den Einsatz von Laserscannern kann die 3D-Geometrie besser bestimmt werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese vorliegende Dissertation befasst sich mit der Modellierung von kinematischen Rotorblattdeformationen auf Basis sequentiell erfasster Bild- und Oberflächendaten. Ziel ist die Entwicklung eines signalisierungsfreien Messverfahrens, welches es ermöglicht, die Deformationen von Rotorblättern im laufenden Betrieb zu erfassen. Es konnten die Vorteile der etablierten Messverfahren, Photogrammetrie und Laserscanning, zu einem gemeinsamen Messverfahren vereinigt werden. Der Fortschritt im Vergleich zu bisherigen photogrammetrischen Verfahren besteht darin, dass keine Signalisierung am Objekt benötigt und stattdessen die Silhouette der Rotorblätter genutzt wird.

Die Voraussetzungen waren die Weiterentwicklung und Umsetzung neuer Ansätze und Methoden. Besonders die Verbindung eines mechanischen Modells mit einem 3D-Modell des zu erfassenden Objektes, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, ermöglichte eine signalisierungsfreie Aufnahme und die Beschreibung von hoch dynamischen Deformationsprozessen.

In dem Entwicklungsprozess stellte sich heraus, dass für bestimmte Einflüsse, Voraussetzungen und Vorinformationen unterschiedliche Auswertungsansätze benötigt werden.

Hierzu gehören z.B. die Verwendung bekannter oder unbekannter Geometrieinformationen, Asynchronitäten von Messsystemen oder unterschiedliche Freiheitsgrade der Verformung.

Das entwickelte Verfahren wurde daher um diese Variationen ergänzt und in einer exemplarischen Implementierung umgesetzt. Vorausschauend wurde, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, auf Techniken des automatischen Differenzierens zurückgegriffen. Dieses ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Anpassung und Erweiterung der Implementierung. So konnten unvorhergesehene Probleme, wie beispielhaft die Asynchronität einer Kamera (Kapitel 5.3), einfach und ohne großen Aufwand berücksichtigt werden. Ein weiterer Vorteil ergab sich bei der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Verfahrens. Dies wird am Beispiel der Erweiterung um die simultane Bestimmung der Rotorblattgeometrie (Kapitel 3.5.3) deutlich, welche ohne diese Flexibilität in der Umsetzung eine weitaus höhere Komplexität dargestellt hätte.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren wurde mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation ausgiebig untersucht. Diese Untersuchungen ergaben Aufschlüsse über erreichbare Genauigkeiten und Einschränkungen der Umsetzung. So konnte zum einen die Eignung des Verfahrens nachgewiesen und zum anderen weitere Herausforderungen aufgedeckt werden. Eine dieser Herausforderungen ist die Definition des geodätischen Datums am Objekt, welches ein objektfestes Koordinatensystem beschreibt. Um dieses zu definieren müssen Annahmen über stabile Bereiche an der WEA getroffen werden. Exemplarisch werden einige Zusatzinformationen in den Monte-Carlo-Simulationen betrachtet (Kapitel 5.1.3), beispielsweise wird der Einfluss von Vorinformationen, wie die Orientierung der Kameras oder die Rotationsachse der WEA, untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch diese Maßnahmen die Genauigkeit der Deformation in Schlagrichtung deutlich verbessert

werden kann. So konnte die Standardabweichung der Durchbiegung in Schlagrichtung von ca. 6 cm an der Rotorblattspitze auf unter 2 cm reduziert werden. Ähnliches gilt für systematische Effekte. Diese konnten durch die zusätzlichen Informationen nahezu eliminiert werden. Ohne die Zusatzinformationen betragen diese zwischen ca. 4 und 13 cm in Schlagrichtung je nach Aufnahmesituation.

In vorhergehenden Arbeiten wurde der Einfluss der Datumsfestlegung untergeordnet berücksichtigt.

Neben den Monte-Carlo-Simulationen wurde sowohl in Laborversuchen als auch in einem Feldversuch die Übertragbarkeit ins Feld demonstriert. Weder bei den Laborversuchen noch bei dem Feldversuch konnte eine simultane Erfassung mit Laserscannern durchgeführt werden. Im Laborversuch wurde eine unabhängige Referenzmessung durch eine photogrammetrische Bündelblockausgleichung realisiert. Der Vergleich weist Unsicherheiten im Subpixelbereich (wenige 1/10 mm am Objekt) auf. In einem weiteren dynamischen Versuch konnten signalisierte Punkte als Vergleichsgrundlage verwendet werden. Es konnten ähnliche Genauigkeiten wie im statischen Versuch festgestellt werden. Für die Realisierung eines Versuchsaufbaus mit Laserscannern müsste eine Skalierung des Messaufbaus erfolgen. In dem erfassten Volumen (ca. 0.6 m) stellen die Orientierungen der Laserscanner sowie die Genauigkeit eines Punktes einschränkende Faktoren dar.

Die geplante simultane Erfassung beim Feldversuch konnte aufgrund von un stetigen und wechselnden Windverhältnissen nicht durchgeführt werden. Die Veränderung der Windrichtung und die damit einhergehende Drehung der Anlage löste eine Anpassung der Messkonfiguration und somit einen Umbau des Messequipments aus. In Kombination mit der eingeschränkten zeitlichen Verfügbarkeit der Anlage hatte dies zur Folge, dass eine Messung durchgeführt werden musste, sobald eines der Messverfahren einsatzbereit war.

Auch wenn diese Daten zeitversetzt erfasst wurden, konnte trotzdem mit diesen Daten die Erfassbarkeit von Deformationen mit dem entwickelten Verfahren an der WEA nachgewiesen werden. Hierzu wurde auf die Laserscannerdaten zunächst verzichtet. Um jedoch aus diesen Daten Informationen ableiten zu können, wurden angepasste Auswertemöglichkeiten erarbeitet und umgesetzt.

Das erarbeitete Verfahren liefert eine Grundlage, auf die zukünftige Untersuchungen und Arbeiten aufbauen können. Erweiterungen, Optimierungen und Anpassungen sind an mehreren Stellen denkbar und sinnvoll. Auf einige Möglichkeiten und Erweiterungen wird bereits innerhalb dieser Dissertation eingegangen. Naheliegende Erweiterungen beziehen sich auf die Einbeziehung zusätzlicher Informationen. Dies können beispielsweise Anlagendaten und zusätzliche Sensordaten, z.B. aus Dehnungsmessungen, sein. Alternativ können Vereinfachungen und Annahmen im Modell vorgenommen werden. Die individuelle Betrachtung von einzelnen Laserscannerpunkten ist aufgrund der hohen Messfrequenz nicht erforderlich, stattdessen könnten bspw. einzelne Profile betrachtet werden, was die Auswertzeit verkürzen würde. Zudem wäre es denkbar, die Steifigkeit eines Rotorblattes bei der Regularisierung des Gleichungssystems zu berücksichtigen. Hierüber hinaus sind weitere Laborversuche denkbar, bei denen beispielsweise Beleuchtungsabhängigkeiten untersucht werden.

Weiterhin ist die Adaption auf neue Problemstellungen vorstellbar. Das in dieser Arbeit zugrunde gelegte Modell eines Balkens findet sich in der Statik an vielerlei Stellen wieder. Beispiele hierfür sind Fachwerkbauten aus Stahl, wie Brücken, Türme oder Strommasten. Durch die Einbeziehung weiterer statischer Modelle, wie Flächentragwerke, kann die Liste

möglicher Bauwerke deutlich erweitert werden.

Neben der Erfassung einer Deformation ist die Interpretation dieser ein wesentlicher Aspekt. Je nach Automatisierungsgrad und Einsatz eines Monitorings kann dies durch Einzelprüfungen erfolgen oder muss selbst automatisiert werden. Für die automatisierten Prüfungen von Datenreihen haben sich u.a. Verfahren aus der Computational Intelligence (Kramer, 2009) bewährt. Weitere Fragestellungen ergeben sich aus der Forschung. Es besteht beispielsweise wissenschaftliches Interesse in der simultanen Erfassung von Windfeldern und Deformationen. In einem Folgeprojekt (TurbuMetric<sup>1</sup>) soll dies für Messungen in einem Windkanal ermöglicht werden. Bei diesen Messungen bestehen ähnliche Einschränkungen wie bei einer realen Anlage. Ein Problem stellt die Signalisierung der Rotorblätter dar, da diese das Strukturverhalten nicht beeinflussen dürfen. Dies schließt beispielsweise Papiermarken aus, da der verwendete Kleber sowie die Dicke der Marken und somit ihre Steifigkeit einen signifikanten Einfluss auf das Strukturverhalten haben.

---

<sup>1</sup>Optische 3D-Messtechniken zur Erfassung von dynamischen Fluid-Struktur-Interaktionen in turbulenten Windumgebungen



# A Anhang

## A.1 Anhänge zur Monte-Carlo-Simulation

### A.1.1 Eingangsdaten

	Ck	Xh	Yh	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2
Ck	4,7E-05	0,0E+00	-4,2E-06	-3,2E-09	1,1E-11	-3,5E-14	-1,2E-10	-1,7E-09	-3,6E-09	-2,4E-09
Xh	0,0E+00	1,3E-05	7,4E-07	-9,5E-11	1,6E-12	-6,1E-15	5,6E-09	2,2E-10	-4,3E-09	2,7E-09
Yh	-4,2E-06	7,4E-07	1,4E-05	1,9E-10	-1,2E-13	-1,7E-15	3,5E-10	5,6E-09	-1,2E-10	2,8E-10
A1	-3,2E-09	-9,5E-11	1,9E-10	8,1E-13	-8,5E-15	3,3E-17	-8,0E-14	7,2E-14	1,2E-13	4,6E-13
A2	1,1E-11	1,6E-12	-1,2E-13	-8,5E-15	1,1E-16	-4,6E-19	1,1E-15	6,6E-17	5,7E-16	-1,3E-15
A3	-3,5E-14	-6,1E-15	-1,7E-15	3,3E-17	-4,6E-19	1,9E-21	-3,9E-18	-9,0E-19	-9,5E-19	2,9E-18
B1	-1,2E-10	5,6E-09	3,5E-10	-8,0E-14	1,1E-15	-3,9E-18	2,6E-12	1,1E-13	-2,1E-12	2,0E-12
B2	-1,7E-09	2,2E-10	5,6E-09	7,2E-14	6,6E-17	-9,0E-19	1,1E-13	2,4E-12	-8,6E-13	-5,1E-14
C1	-3,6E-09	-4,3E-09	-1,2E-10	1,2E-13	5,7E-16	-9,5E-19	-2,1E-12	-8,6E-13	1,2E-10	1,3E-12
C2	-2,4E-09	2,7E-09	2,8E-10	4,6E-13	-1,3E-15	2,9E-18	2,0E-12	-5,1E-14	1,3E-12	1,2E-10

Tabelle A.1: Verwendete Varianz-Kovarianzmatrix für die Innere Orientierung der Kameras.

	Ck	Xh	Yh	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2
Ck	1	0	-0,163	-0,511	0,148	-0,117	-0,011	-0,161	-0,049	-0,033
Xh	0	1	0,054	-0,029	0,042	-0,038	0,952	0,039	-0,111	0,069
Yh	-0,163	0,054	1	0,056	-0,003	-0,01	0,057	0,947	-0,003	0,007
A1	-0,511	-0,029	0,056	1	-0,892	0,829	-0,055	0,051	0,012	0,047
A2	0,148	0,042	-0,003	-0,892	1	-0,982	0,064	0,004	0,005	-0,011
A3	-0,117	-0,038	-0,01	0,829	-0,982	1	-0,055	-0,013	-0,002	0,006
B1	-0,011	0,952	0,057	-0,055	0,064	-0,055	1	0,043	-0,118	0,112
B2	-0,161	0,039	0,947	0,051	0,004	-0,013	0,043	1	-0,051	-0,003
C1	-0,049	-0,111	-0,003	0,012	0,005	-0,002	-0,118	-0,051	1	0,011
C2	-0,033	0,069	0,007	0,047	-0,011	0,006	0,112	-0,003	0,011	1

Tabelle A.2: Verwendete Korrelationen zwischen den Parametern der inneren Orientierung.

Ck	6,87E-03
Xh	3,64E-03
Yh	3,76E-03
A1	9,02E-07
A2	1,05E-08
A3	4,41E-11
B1	1,62E-06
B2	1,56E-06
C1	1,08E-05
C2	1,08E-05

Tabelle A.3: Verwendete Standardabweichung der Parameter der inneren Orientierung.

## A.1.2 Detaillierte Ergebnisse bei bekannter Rotorblattgeometrie

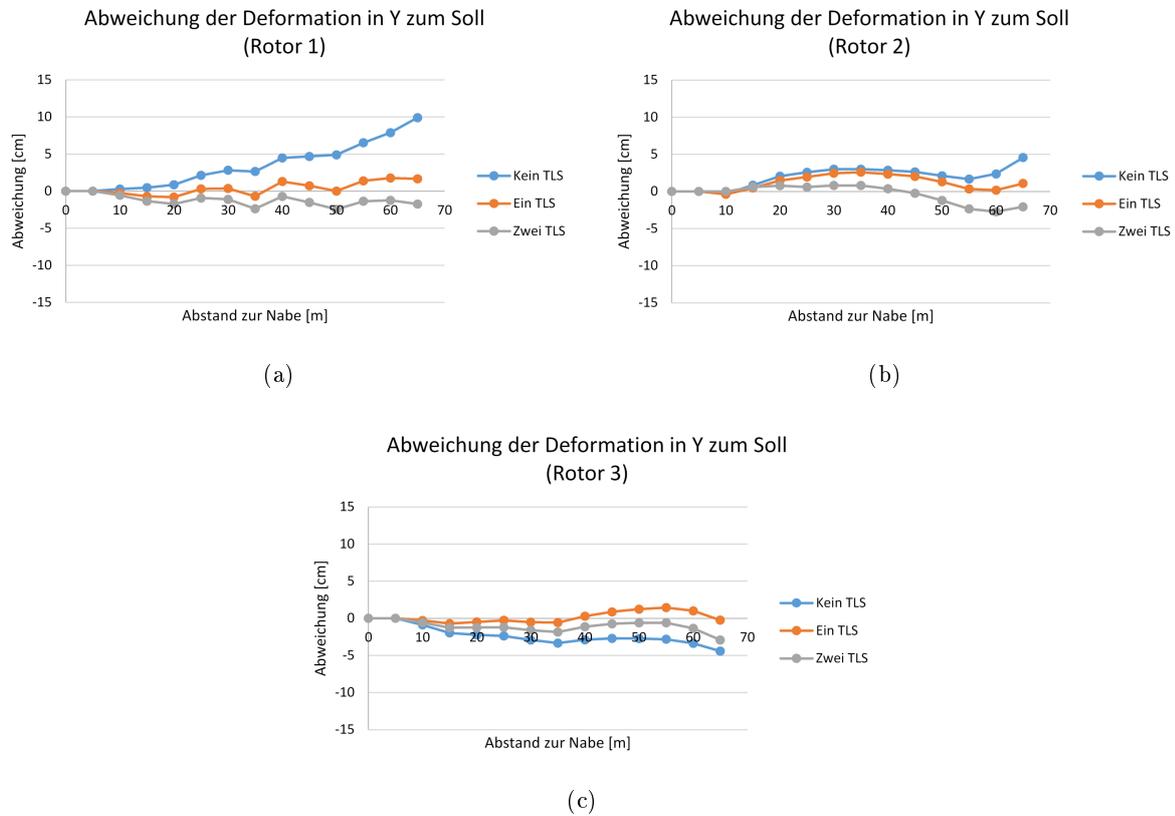
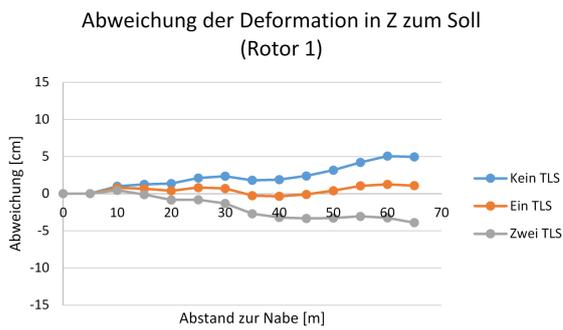
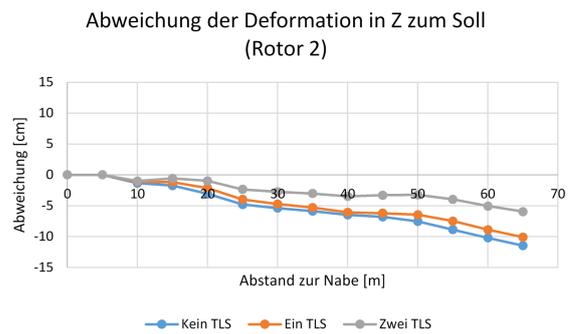


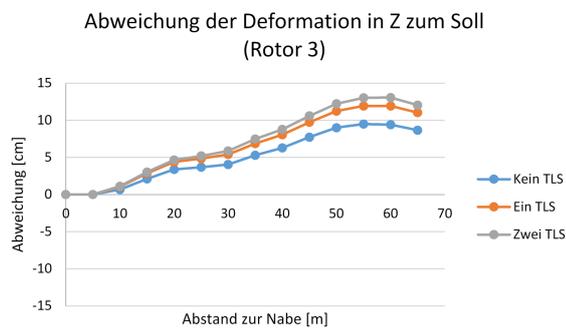
Abbildung A.1: Vergleich der systematischen Abweichungen in Y-Richtung bei einer unterschiedlichen Anzahl von Laserscannern



(a)

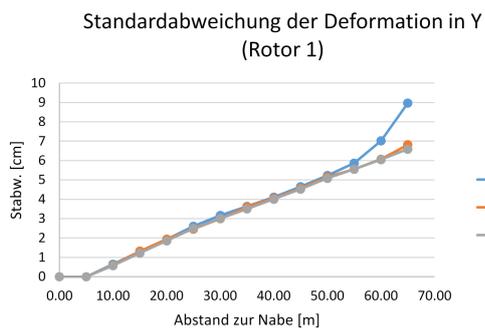


(b)

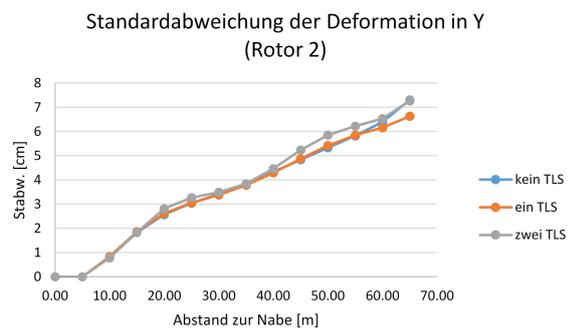


(c)

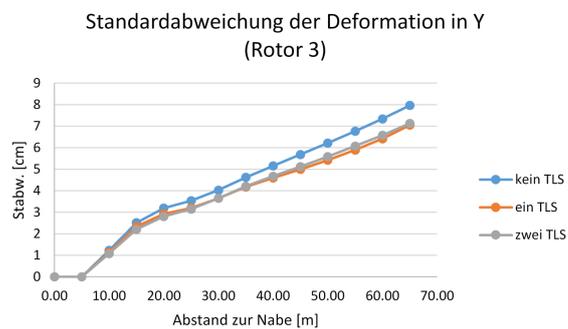
Abbildung A.2: Vergleich der systematischen Abweichungen in Z-Richtung bei einer unterschiedlichen Anzahl von Laserscannern



(a)

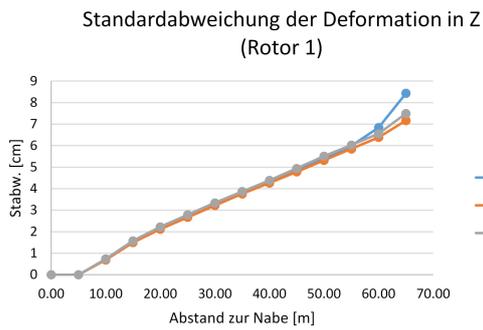


(b)

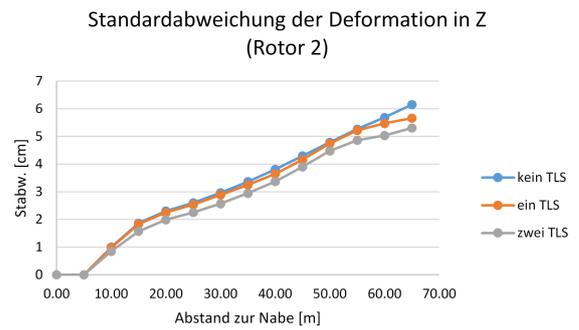


(c)

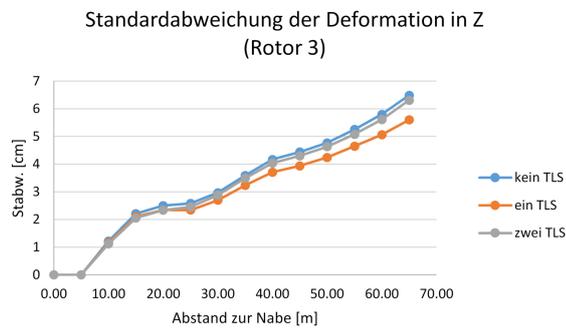
Abbildung A.3: Vergleich der Standardabweichungen der Durchbiegung in Y-Richtung bei unterschiedlicher Anzahl von Laserscannern



(a)

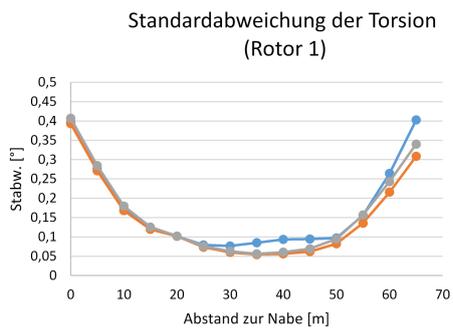


(b)

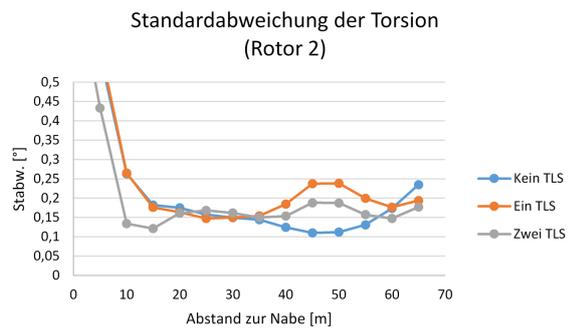


(c)

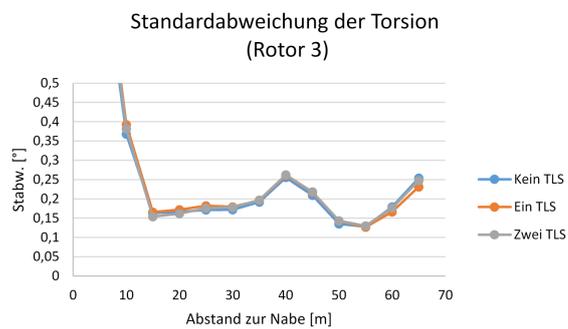
Abbildung A.4: Vergleich der Standardabweichungen der Durchbiegung in Z-Richtung bei unterschiedlicher Anzahl von Laserscannern



(a)

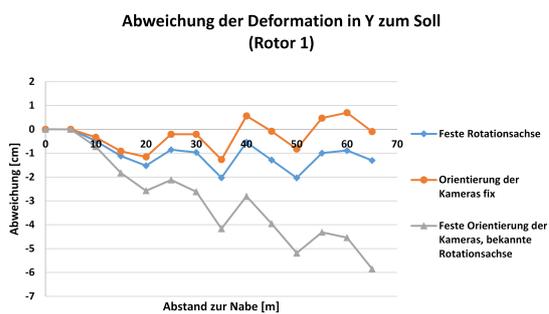


(b)

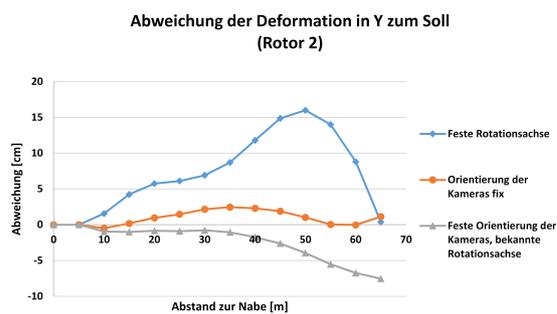


(c)

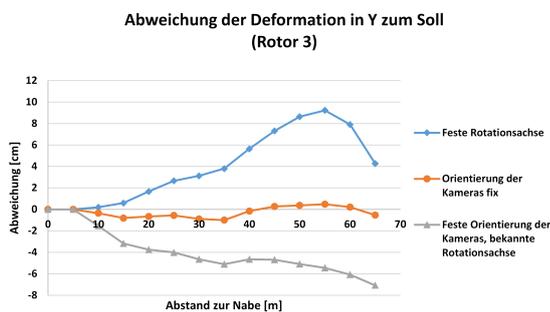
Abbildung A.5: Vergleich der Standardabweichungen der Torsion bei unterschiedlicher Anzahl von Laserscannern



(a)

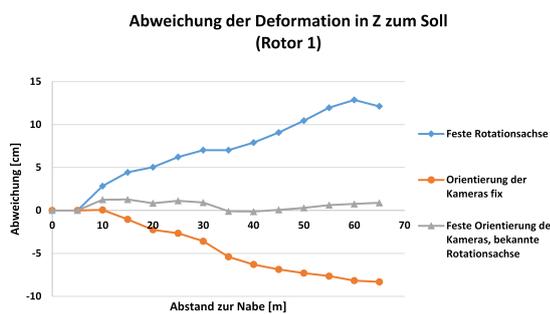


(b)

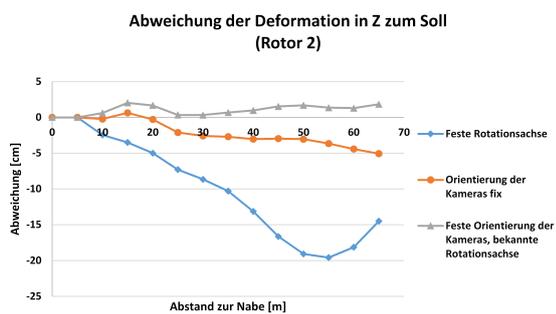


(c)

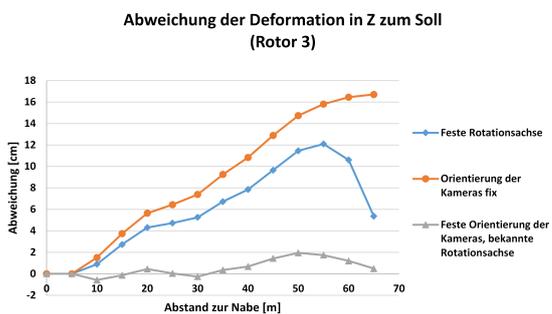
Abbildung A.6: Vergleich der systematischen Abweichungen in Y-Richtung bei unterschiedlichen Vorinformationen



(a)



(b)



(c)

Abbildung A.7: Vergleich der systematischen Abweichungen in Z-Richtung bei unterschiedlichen Vorinformationen

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Rotation eines Objektes um eine Achse . . . . .	8
2.2	Das Prinzip der Lochkamera . . . . .	17
2.3	Volumenrekonstruktion mittels Octree-Repräsentation aus Silhouetten (Szeliski, 2010) . . . . .	22
2.4	Prinzip der Bestimmung der visuellen Hülle aus Schnitten extrudierter Silhouetten (Yous u. a., 2007). . . . .	23
2.5	Unterschiede zwischen den Rekonstruktionsarten. Von links nach rechts: Prinzipskizze der Octree-Rekonstruktion, der Rekonstruktion aus Schnitten der Sichtkegel und der Rekonstruktion als Parameteroberfläche . . . . .	24
2.6	Ablauf der Positionsschätzung aus Silhouetten nach Han u. a. (2008) (übersetzt und angepasst) . . . . .	24
2.7	Panorama-Scanner Z&F Imager 5010C. . . . .	25
2.8	Ausschnitt aus einem Intensitätsbild eines 3D Panorama Scans (a), Ausschnitt aus einer Punktwolke (b) . . . . .	26
2.9	Minimierung des Abstandes zwischen zwei Punktgruppen, die Abstände zwischen Punktpaaren werden minimiert. . . . .	28
2.10	Minimierung des Abstandes zwischen zwei Punktgruppen. Die Abstände zwischen Punkten und Geraden (im 2D Fall) oder Oberfläche (3D Fall) werden minimiert. . . . .	29
2.11	Darstellung der verwendeten Freiheitsgrade für die Beschreibung von Deformationen eines Blattes Papier (Steimle u. a., 2013) . . . . .	36
2.12	3D-Modell einer Hand mit eingezeichnetem Deformationsgraphen. Die gelben Punkte sind die Stützstellen des Deformationsgraphen (Papazov und Burschka, 2011). . . . .	37
2.13	Unterschied zwischen einem Timoshenko-Balken und einem Euler-Bernoulli-Balken . . . . .	39
2.14	Bestimmung der Turmschwingung für unterschiedliche Höhen. Die Laser-scannerpunkte werden in 1m breite Cluster eingeteilt (Hesse u. a., 2006). . . . .	42
2.15	Anvisierung der zu messenden Rotorblattposition (Windcomp GmbH, 2018)	44
2.16	Erfasste Profile im Koordinatensystem der Nabe (Große-Schwiep u. a., 2013)	46
2.17	Punktmuster auf einem Rotorblatt. Eine erfassung der Rotorblattdeformationen an den signalisierten stellen erfolgte in Winstroth u. a. (2014) . . . . .	47
3.1	Transformation eines Punktes $P_{CAD}$ . . . . .	51
3.2	Prinzipskizze zu den Annahmen bei der Verformung eines Balkens . . . . .	52
3.3	Bestimmung von Transformationsknoten unter Annahme eines linearen Verlaufes innerhalb der einzelnen Abschnitte . . . . .	54
3.4	Beschreibung eines Rotorblattsystems . . . . .	57

3.5	Zusammenhang zwischen einem Bild einer WEA (a) und der Silhouette durch Kantenextraktion mittels Canny-Operator (b) . . . . .	59
3.6	Markante Punkte durch Verschmutzung auf einem Rotorblatt . . . . .	60
3.7	Detailansicht gemessener Profile im 2D-Modus (zeitlicher Ausschnitt). Jedes Profil stammt aus einer Umdrehung des Laserscanners. . . . .	62
3.8	Erfassung eines Rotorblattes mit zwei Profilsclannern. . . . .	65
3.9	Skizze von Trailing Edge Serrations (auch „Hinterkantenkamm“ genannt) an einem Rotorblatt. Die Zacken an der Blatthinterkante dienen der Reduktion von Schallimmissionen. . . . .	67
3.10	Querschnitt aus einem 39m langem Rotorblatt. Übersichtsbild (a), Detailansicht Blatthinterkante (b) . . . . .	69
3.11	Freiheitsgrade der Stützstellen eines Profils. Punkte auf den Koordinatenachsen werden mit einer Unbekannten eingeführt, andere mit zwei. . . . .	72
4.1	Vereinfachte Darstellung des Berechnungsablaufes mit Eingangsdaten, Zwischenergebnissen und Ausgaben . . . . .	76
4.2	Beispiel für einen Berechnungsgraphen zur Berechnung des funktionalen Ausdrucks: $x^2 + xy + 2$ . . . . .	78
4.3	CAD-Modell eines Objektmodells (a); Extrahierte Silhouetten aus einem Objektmodell im Bild mit entsprechend der Gradientenausrichtung farblich hervorgehoben Silhouettenkanten (b). . . . .	81
4.4	Sonderfälle bei der Extraktion einer Silhouette durch teilweise Verdeckung von Kanten. . . . .	81
4.5	Bestimmung der kürzesten Abstände ohne Zusatzinformation (a); Bestimmung der kürzesten Abstände unter Berücksichtigung der Kantenausrichtung (Gradienten) (b). . . . .	83
4.6	Problem der Deformation bei der Zuordnung von Punkten zum Objektmodell. Eine Oberfläche $\mathbf{O}$ zum Zeitpunkt $t$ kann nicht einem Punkt $\mathbf{P}$ zum Zeitpunkt $t + dt$ zugeordnet werden. . . . .	84
5.1	Beispielbilder aus den simulierten Bildsequenzen . . . . .	88
5.2	Skizze der verwendeten Aufnahmesituation für die Simulation . . . . .	89
5.3	Simulierte Rotorblattgeometrie mit den über die Zeit erzeugten Laserscanner-Punkten. . . . .	89
5.4	Bestimmung des Durchstoßpunktes auf einem umliegenden Zylinder. Die Koordinaten des Durchstoßpunktes werden zur Ableitung eines Punktfehlers verwendet. . . . .	92
5.5	In Graustufen dargestellte Deformationskarte für ein CAD-Modell. Das Bild kann als Abwicklung eines umliegenden Zylinders aufgefasst werden, wobei die erste Achse entlang der Achse des Zylinders definiert ist und die zweite über den Richtungswinkel. . . . .	92
5.6	Aus den Daten abgeleitete Deformationen in y-Richtung für 100 Iterationen der Monte-Carlo-Simulation bei der Verwendung von zwei terrestrischen Laserscannern. . . . .	94

5.7	Systematische Abweichungen der berechneten Durchbiegung an den Rotorblättern bei einer unterschiedlichen Anzahl an terrestrischen Laserscannern (TLS). . . . .	95
5.8	Systematische Abweichungen der bestimmten Torsion an den Rotorblättern	96
5.9	Systematische Abweichungen der Durchbiegung an den Rotorblättern . . .	100
5.10	Vergleich der systematischen Abweichungen der Torsion je Rotorblatt bei unterschiedlichen Annahmen zu bekannten Parametern . . . . .	101
5.11	Vergleich der Standardabweichungen der Torsionen bei unterschiedlichen Vorinformationen . . . . .	102
5.12	Vergleich der Standardabweichungen der Deformation in Y-Richtung bei unterschiedlichen Vorinformationen . . . . .	102
5.13	Vergleich der Standardabweichungen der Deformation in Z-Richtung bei unterschiedlichen Vorinformationen . . . . .	103
5.14	Vergleich der Soll-Geometrie des Rotorblattsystems mit dem Ergebnis eines Monte-Carlo-Durchlaufes. . . . .	103
5.15	Systematische Abweichungen der berechneten Durchbiegungsdifferenzen an den Rotorblättern . . . . .	105
5.16	Beispiel eines aus den Messdaten bestimmten Modells eines Rotorblattes. .	105
5.17	Bild des erfassten Balkens mit Einzellast am Balkenende. . . . .	107
5.18	Vergleich zwischen Referenzmessung und berechneter Verformung aus Silhouetten. Oben: Verformung unter Eigengewicht, unten: Verformung mit Einzellast am linken Ende. . . . .	108
5.19	Messbild aus der Erfassung der Deformationen eines Balkens (a); Überlagerung mit dem deformierten Objektmodell (b). . . . .	109
5.20	Vergleich der abgeleiteten Deformation mit der Referenzmessung. . . . .	110
5.21	Aus Silhouettenmessungen abgeleitete Oszillation des T-Balkens. . . . .	110
5.22	Bild der aufgenommenen Windkraftanlage. . . . .	111
5.23	Bestimmung der Position der Kamera, die Punktmarken sind im Koordinatensystem der Kamera bekannt. Die Messung der Strecke erfolgt mit einem Prisma. . . . .	112
5.24	Bild des Messaufbaus zur Bestimmung der Koordinaten der Marken auf den Kameras im Koordinatensystem der Kameras. . . . .	113
5.25	Winkeländerung eines Rotorblattes bei horizontaler Blattstellung, betrachtet über mehrere Durchläufe. . . . .	115
5.26	Zur Transformation verwendete Profile (weiß) und aufeinander transformierte Profile (magenta). . . . .	116
5.27	Eingangsbild (a); Detailansicht der Kantenmessung in einem Eingangsbild (b); Ergebnis der Konturbestimmung. Zur Visualisierung wurden auf dem Spline Zwischenpunkte berechnet (c) . . . . .	117
5.28	3D-Modell bestimmt aus Silhouetten. . . . .	118
A.1	Vergleich der systematischen Abweichungen in Y-Richtung bei einer unterschiedlichen Anzahl von Laserscannern . . . . .	126
A.2	Vergleich der systematischen Abweichungen in Z-Richtung bei einer unterschiedlichen Anzahl von Laserscannern . . . . .	127

A.3	Vergleich der Standardabweichungen der Durchbiegung in Y-Richtung bei unterschiedlicher Anzahl von Laserscannern . . . . .	128
A.4	Vergleich der Standardabweichungen der Durchbiegung in Z-Richtung bei unterschiedlicher Anzahl von Laserscannern . . . . .	129
A.5	Vergleich der Standardabweichungen der Torsion bei unterschiedlicher Anzahl von Laserscannern . . . . .	130
A.6	Vergleich der systematischen Abweichungen in Y-Richtung bei unterschiedlichen Vorinformationen . . . . .	131
A.7	Vergleich der systematischen Abweichungen in Z-Richtung bei unterschiedlichen Vorinformationen . . . . .	132

# Tabellenverzeichnis

2.1	Auswahl staatlich geförderter Versuchsanlagen (Schaffarczyk, 2016) . . . . .	30
2.2	Auswertemodelle von Überwachungsmessungen (Heunecke u. a., 2013) . . . . .	35
5.1	Annahmen für die Deformationen innerhalb der Simulation . . . . .	87
5.2	Beispiel für die Korrelationen zwischen innerer und äußerer Orientierung. Die Korrelationen sind abhängig von der Ausrichtung der Kamera. Hier ist die Blickrichtung der Kamera nahezu in z-Richtung mit einer Rotation um die z-Achse von ca. 90°. . . . .	90
5.3	Beispiel einer inneren Orientierung mit Standardabweichung. Die Pixelgröße der verwendeten Kamera beträgt 0.011 mm. . . . .	91
5.4	Vergleich der Standardabweichungen der globalen Transformation ins Koordinatensystem der WEA mit und ohne Laserscannerdaten. . . . .	97
5.5	Korrelation zwischen Kamera 1 und der globalen Transformation (ohne Laserscanner). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt. . . . .	98
5.6	Korrelation zwischen Kamera 2 und der globalen Transformation (ohne Laserscanner). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt. . . . .	98
5.7	Korrelation zwischen Kamera 3 und der globalen Transformation (ohne Laserscanner). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt. . . . .	98
5.8	Korrelation zwischen Kamera 1 und der globalen Transformation (mit zwei Laserscannern). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt. . . . .	98
5.9	Korrelation zwischen Kamera 2 und der globalen Transformation (mit zwei Laserscannern). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt. . . . .	98
5.10	Korrelation zwischen Kamera 3 und der globalen Transformation (mit zwei Laserscannern). Zur besseren Interpretation wird für die Korrelation eine Winkelrepräsentation anstelle von Quaternionen gewählt. . . . .	99
5.11	Standardabweichungen der Deformationsdifferenzen . . . . .	104
A.1	Verwendete Varianz-Kovarianzmatrix für die Innere Orientierung der Kameras. . . . .	124
A.2	Verwendete Korrelationen zwischen den Parametern der inneren Orientierung. . . . .	125
A.3	Verwendete Standardabweichung der Parameter der inneren Orientierung. . . . .	125



# Literaturverzeichnis

- Agudo, A., B. Calvo und J. Montiel (2012). "Finite element based sequential bayesian non-rigid structure from motion". In: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on*. IEEE, S. 1418–1425.
- Ahuja, N. und J. Veenstra (1989). "Generating octrees from object silhouettes in orthographic views". In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11.2, S. 137–149.
- Allen, B., B. Curless und Z. Popović (2003). "The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans". In: 22.3, S. 587–594.
- Amberg, B., S. Romdhani und T. Vetter (2007). "Optimal step nonrigid icp algorithms for surface registration". In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR'07. IEEE Conference on*. IEEE, S. 1–8.
- Andresen, K. (1991). "Ermittlung von Raumelementen aus Kanten im Bild". In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 59(6), S. 212–220.
- Baarda, W (1968). "A testing procedure for use in geodetic networks". In: *Publication on Geodesy, New Series* 2.
- Baumgart, B. G. (1974). *Geometric modeling for computer vision*. Techn. Ber. STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE.
- Berkhout, V. u. a. (2013). *windenergie report Deutschland 2012*. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES). ISBN: 978-3-8396-0536-3.
- Besl, P. J., N. D. McKay u.a. (1992). "A method for registration of 3-D shapes". In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 14.2, S. 239–256.
- Bethmann, F., C. Jepping und T. Luhmann (2013). "Generation of synthetic image sequences for the verification of matching and tracking algorithms for deformation analysis". In: *Videometrics, Range Imaging, and Applications XII; and Automated Visual Inspection*. Bd. 8791. International Society for Optics und Photonics, 87910K.
- Bethmann, F. und T. Luhmann (2011). "Least-squares matching with advanced geometric transformation models". In: *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation* 2011.2, S. 57–69.
- Boochs, F., S. Eckhardt und B. Fischer (2003). "A PC-based stereo system for the collection of 3D-data for as-built documentation". In: *Neue Anwendungen der Informations und Messtechnik*. Bd. 3. i3mainz - Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, S. 32–42.
- Borkowski, A. (2004). "Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten". Diss. Fakultät für Forst-, Geo-und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden.
- Brand, M., K. Kang und D. B. Cooper (2004). "Algebraic solution for the visual hull". In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference*. Bd. 1. IEEE, S. I–I.
- Brown, D. C. (1971). "Close-range camera calibration". In: *Photogrammetric Engineering* 37.8, S. 855–866.
- Brox, T. u. a. (2006). "High accuracy optical flow serves 3-D pose tracking: exploiting contour and flow based constraints". In: *Computer Vision–ECCV 2006*, S. 98–111.

- Bücker, H. M. u. a. (2006). *Automatic differentiation: applications, theory, and implementations*. Bd. 50. Springer Science & Business Media.
- Burger, T und W. Busch (2000). “Using knowledge about shape and position of plant elements in photogrammetric as-built-documentation”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33.B5/1; PART 5, S. 107–113.
- Catmull, E. (Aug. 1978). “A Hidden-surface Algorithm with Anti-aliasing”. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 12.3, S. 6–11. ISSN: 0097-8930. DOI: [10.1145/965139.807360](https://doi.org/10.1145/965139.807360).
- Chen, Y. und G. Medioni (1992). “Object modelling by registration of multiple range images”. In: *Image and vision computing* 10.3, S. 145–155.
- Cheng, Z.-Q. u. a. (2010). “Non-rigid registration in 3d implicit vector space”. In: *Shape Modeling International Conference (SMI), 2010*. IEEE, S. 37–46.
- Chetverikov, D. u. a. (2002). “The trimmed iterative closest point algorithm”. In: *Pattern Recognition, 2002. Proceedings. 16th International Conference on*. Bd. 3. IEEE, S. 545–548.
- Corazza, S. u. a. (2006). “A markerless motion capture system to study musculoskeletal biomechanics: visual hull and simulated annealing approach”. In: *Annals of biomedical engineering* 34.6, S. 1019–1029.
- Corten, G. (1996). *Optical motion analysis of wind turbines*. Netherlands Energy Research Foundation ECN.
- Cremers, D. und K. Kolev (2011). “Multiview stereo and silhouette consistency via convex functionals over convex domains”. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 33.6, S. 1161–1174.
- Dam, E. B., M. Koch und M. Lillholm (1998). *Quaternions, interpolation and animation*. Bd. 2.
- Dambreville, S. u. a. (2008). “Robust 3d pose estimation and efficient 2d region-based segmentation from a 3d shape prior”. In: *Computer Vision–ECCV 2008*, S. 169–182.
- Datenblatt Trimble S6 Totalstation* (2018). Trimble GmbH.
- Deumlich, F und R Staiger (2002). *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, 9. Aufl., Her. Wichmann Verlag, Heidelberg*.
- DIBt (2012). “Windenergieanlagen Richtlinie, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung”. In: *Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)*.
- Eichhorn, A. (2014). “Ursache und Wirkung bei Deformationsprozessen -analytische und numerische Ansätze”. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten : AVN* 10, S. 354–361.
- El-Hakim, S (1986). “Real-time image metrology with CCD cameras”. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52.11, S. 1757–1766.
- Eling, D. (2009). “Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung”. Diss. Leibniz-Universität.
- Elliott, N. u. a. (2018). “Single view silhouette fitting techniques for estimating tennis racket position”. In: *Sports Engineering*, S. 1–11.
- Erić, V., M. Göring und T. Luhmann (2017). “Intensity of the terrestrial laser scanning data: Incident angle and surface reflectance effects”. In: *Photogrammetrie Laserscanning optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017*. Thomas Luhmann und Christina Müller, S. 40–49.
- ESM (2018). *Hydraulische Schwingungsdämpfer*. URL: <https://www.esm-gmbh.de/de> (besucht am 17.06.2018).
- Fischler, M. A. und R. C. Bolles (1981). “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”. In: *Communications of the ACM* 24.6, S. 381–395.

- Fitzgibbon, A. W. (2003). “Robust registration of 2D and 3D point sets”. In: *Image and Vision Computing* 21.13-14, S. 1145–1153.
- Fleming, G. A. und S. A. Gorton (2000). “Measurement of rotorcraft blade deformation using projection moiré interferometry”. In: *Shock and Vibration* 7.3, S. 149–165.
- Förstner, W. und B. P. Wrobel (2016). *Photogrammetric Computer Vision – Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction*. Springer.
- Förstner, W. und E. Gülch (1987). “A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features”. In: *Proc. ISPRS intercommission conference on fast processing of photogrammetric data*, S. 281–305.
- Franco, J.-S. und E. Boyer (2009). “Efficient polyhedral modeling from silhouettes”. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 31.3, S. 414–427.
- Franco, J.-S., M. Lapiere und E. Boyer (2006). “Visual shapes of silhouette sets”. In: *3D Data Processing, Visualization, and Transmission, Third International Symposium on*. IEEE, S. 397–404.
- Gasch, R. und J. Twele (2010). *Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*. Springer-Verlag.
- Gordon, B. (2008). “Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner”. Diss. Technische Universität.
- Gottwald, R., H. Heister und R. Staiger (2009). “Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern –eine Standortbestimmung”. In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 2, S. 88–96.
- Große-Schwiep, M., J. Piechel und T. Luhmann (2013). “Measurement of rotor blade deformations of wind energy converters with laser scanners”. In: *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Bd. II-5/W2. ISPRS, S. 97–102.
- Große-Schwiep, M., J. Piechel und T. Luhmann (2014). “Measurement of rotor blade deformations of wind energy converters with laser scanners”. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Bd. 524. 1. IOP Publishing.
- Gross, D. u. a. (2016). *Technische Mechanik Band 1, 13. aktualisierte Auflage*. Springer Vieweg.
- Grosse-Schwiep, M., J. Piechel und T. Luhmann (2015). “An Approach for the Measurement of Rotor Blade Deformations during Operation”. In: *Conference for Wind Power Drives*. Bd. 2, S. 571–577.
- Gruen, A. (1985). “Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique”. In: *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography* 14.3, S. 175–187.
- Gruen, A. und D. Akca (2005). “Least squares 3D surface and curve matching”. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59.3, S. 151–174.
- Gruen, A. und H. Li (1997). “Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes”. In: *Photogrammetric engineering and remote sensing* 63.8, S. 985–994.
- Han, D. u. a. (2008). “Combined registration methods for pose estimation”. In: *Advances in Visual Computing*, S. 913–924.
- Han, J. (2009). “One-to-one edge based registration and segmentation based validations in hybrid imaging.” Diss. University of Erlangen-Nuremberg.
- Heister, H. (2006). “Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)”. In: *Schriftenreihe des DVW* 51, S. 35–44.
- Hesse, C. und H. Kutterer (2006). “Automated form recognition of laser scanned deformable objects”. In: *Geodetic deformation monitoring: from geophysical to engineering roles*. Springer, S. 103–111.

- Hesse, C. u. a. (2006). “A Concept for Monitoring Wind Energy Turbines with Geodetic Techniques”. In: *Proceedings of the 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurement*.
- Heunecke, O. u. a. (2013). *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. Hrsg. von M. Möser, G. Müller und H. Schlemmer. Bd. 2.
- Hirschmuller, H. (2005). “Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information”. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05)*. Bd. 2. IEEE, S. 807–814.
- Ioannidis, C. u. a. (2007). “Alternative techniques for the creation of 3d models for finite element analysis –application on a cooling tower”. In: *Optical 3-D Measurement Techniques VIII II*, S. 187–193.
- Jäger, F. u. a. (2006). “Wissensbasierte nicht-starre Registrierung von SPECT/CT Datensätzen”. In: *Bildverarbeitung für die Medizin 2006*. Springer, S. 236–240.
- Jäger, R., T. Müller und H. Saler (2005). *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren: ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern*. Wichmann. ISBN: 9783879073702.
- Jäger, R. (2005). *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren: ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern*. Wichmann.
- Jepping, C. und T. Luhmann (2016). “Object Deformations from Image Silhouettes using a Kinematic Finite Element Beam Model”. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* 41, S. 41–47.
- Jepping, C., F. Bethmann und T. Luhmann (2014). “Congruence analysis of point clouds from unstable stereo image sequences”. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40.5, S. 301–306.
- Jepping, C., J.-U. Schulz und T. Luhmann (2016). “Konzept zur Modellierung kinematischer Rotorblattverformungen an Windkraftanlagen”. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten : AVN* 1, S. 3–10.
- Jüttemann, P. (2018). *Kleine Windkraftanlagen*. URL: <https://www.klein-windkraftanlagen.com/> (besucht am 17.06.2018).
- Kern, F. (2003). “Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten”. Diss. Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- Kersten, J. und C. Clemen (2015). “Automatisches Differenzieren zum Lösen nichtlinearer Gleichungssysteme in der Ausgleichsrechnung”. In: *VDV magazin* 1, S. 33–34.
- Kowarz, A. (2008). “Advanced concepts for automatic differentiation based on operator overloading”. Diss. Technische Universität Dresden.
- Kramer, O. (2009). *Computational Intelligence: Eine Einführung*. Informatik im Fokus. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 9783540797395.
- Kriegman, D. J., B. Vijayakumar und J. Ponce (1992). “Constraints for recognizing and locating curved 3D objects from monocular image features”. In: *European Conference on Computer Vision*. Springer, S. 829–833.
- Kutterer, H., J.-A. Paffenholz und H. Vennegerts (2009a). “Kinematisches terrestrisches Laserscanning”. In: *Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 2, S. 79–87.
- Kutterer, I. H. u. a. (2009b). *Deformationsmessungen an Bauwerken mit kinematischem Laserscanning*.
- Lambertus, T., D. Belton und P. Helmholz (2017). “Empirical investigation of a stochastic model based on intensity values for terrestrial laser scanning”. In: *Photogrammetrie Laserscanning*

- optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017*. Thomas Luhmann und Christina Müller, S. 27–39.
- Laurentini, A. (1994). “The visual hull concept for silhouette-based image understanding”. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 16.2, S. 150–162.
- Laurentini, A. (1995). “How far 3D shapes can be understood from 2D silhouettes”. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17.2, S. 188–195.
- Lazebnik, S., Y. Furukawa und J. Ponce (2007). “Projective visual hulls”. In: *International Journal of Computer Vision* 74.2, S. 137–165.
- Lee, W. H. (2008). “Bundle Block Adjustment with 3D Natural Cubic Splines”. Diss. Ohio State University.
- Lee, W. H. und K. Yu (2009). “Bundle block adjustment with 3D natural cubic splines”. In: *Sensors* 9.12, S. 9629–9665.
- Li, H., R. W. Sumner und M. Pauly (2008). “Global Correspondence Optimization for Non-Rigid Registration of Depth Scans”. In: *Computer graphics forum*. Bd. 27. 5. Wiley Online Library, S. 1421–1430.
- Li, H. u. a. (2009). “Robust single-view geometry and motion reconstruction”. In: 28.5, S. 175.
- Li, J. (2005). “Inverse Problems in Structural Mechanics”. Diss. Virginia Polytechnic Institute und State University.
- Lowe, D. G. (1991). “Fitting parameterized three-dimensional models to images”. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 13.5, S. 441–450.
- Lowe, D. G. (1999). “Object recognition from local scale-invariant features”. In: *Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision*. Bd. 2. Ieee, S. 1150–1157.
- Luhmann, T., M. Große-Schwiep und C. Jepping (2016). “Optische Messung der Verformung von Rotorblättern unter Windlast”. In: *VDI-Fachtagung Optische Messung von Funktionsflächen*. Bd. VDI-Bericht 2285. VDE Verlag, S. 33–45.
- Luhmann, T. (2010). *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag CH Beck.
- Luhmann, T. (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie*. 4. Aufl. Wichmann.
- Luhmann, T. u. a. (2008). “Comparison and verification of optical 3-d surface measurement systems”. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37, S. 51–56.
- Mabou, H., S. Hauptmann und L. Schön (2014). *Advanced Multi-Body Modeling of Rotor Blades - Validation and Application*.
- McGlone, J. C. (2013). *Manual of Photogrammetry*. 6. Aufl. American Society for Photogrammetry und Remote Sensing.
- Merkel, M. und A. Öchsner (2015). *Eindimensionale finite Elemente: ein Einstieg in die Methode*. Springer-Verlag.
- Mettenleiter, M u. a. (2015). *Laserscanning-Phasenbasierte Lasermesstechnik für die hochpräzise und schnelle dreidimensionale Umgebungserfassung*. Süddeutscher Verlag onpact GmbH, München.
- Mitka, B., P. Klapa und J. Gniadek (2019). “Use of Terrestrial Laser Scanning for Measurements of Wind Power Stations”. In: *Geomatics and Environmental Engineering* 13.1.
- Neitzel, F., S. Weisbrich und C.-C. Wu (2014). “Integration der Finite-Elemente-Methode in die Ausgleichsrechnung zur Parameteridentifikation”. In: *Ingenieurvermessung*.
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung*. 2. Aufl. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG. ISBN: 978-3-11-019055-7.

- Otepka, J. (2004). "Precision target mensuration in vision metrology". Diss. Technische Universität Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- Otepka, J. O. und C. S. Fraser (2004). "Accuracy enhancement of vision metrology through automatic target plane determination". In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35(B5), S. 873–879.
- Özbek, M. (2013). "Optical monitoring and operational modal analysis of large wind turbines". Diss. Technische Universität Delft.
- Ozbek, M. u. a. (2010). "Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry". In: *Energy* 35.12, S. 4802–4811.
- Paffenholz, J.-A., H. Vennegeerts und H. Kutterer (2008). "High frequency terrestrial laser scans for monitoring kinematic processes". In: *Proceedings of the international Conference on Engineering Surveying*.
- Paffenholz, J.-A. u. a. (2017). "3D-Punktwolken-basiertes Monitoring von Infrastrukturbauwerken am Beispiel einer historischen Gewölbebrücke". In: *Terrestrisches Laserscanning 2017, Beiträge zum 165. DVW-Seminar*.
- Papazov, C. und D. Burschka (2011). "Deformable 3D shape registration based on local similarity transforms". In: *Computer Graphics Forum*. Bd. 30. 5. Wiley Online Library, S. 1493–1502.
- Potmesil, M. (1987). "Generating octree models of 3D objects from their silhouettes in a sequence of images". In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 40.1, S. 1–29.
- Reznicek, J. u. a. (2016). "Analysen zur Datumsfestlegung in photogrammetrischen Projekten großer Volumina". In: *Publikationen der DGPF* 25, S. 259–270.
- Rietdorf, A. (2005). *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. Reihe C: Dissertationen Nr. 582. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.
- Rohrig, K. H. (2018). *windenergie report Deutschland 2017*. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES). ISBN: 978-3-8396-1358-0.
- Rosenhahn, B. und R. Klette (2004). "Geometric algebra for pose estimation and surface morphing in human motion estimation". In: S. 583–596.
- Rosenhahn, B., G. Sommer und R. Klette (2004). *Pose Estimation of Free-form Objects*. Bd. 0401. Institut für Informatik und Praktische Mathematik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Rumsey, M. A. und J. A. Paquette (2008). "Structural health monitoring of wind turbine blades". In: *Proc. SPIE*. Bd. 6933, 69330E.
- Rusinkiewicz, S. und M. Levoy (2001). "Efficient variants of the ICP algorithm". In: *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings*. IEEE, S. 145–152.
- Sabel, J. (1996). "Optical 3D motion measurement". In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1996. IMTC-96. Conference Proceedings. Quality Measurements: The Indispensable Bridge between Theory and Reality., IEEE*. Bd. 1. IEEE, S. 367–370.
- Salzmann, M. u. a. (2007). "Surface deformation models for nonrigid 3D shape recovery". In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 29.8, S. 1481–1487.
- Sánta, Z. und Z. Kato (2018). "Elastic Alignment of Triangular Surface Meshes". In: *International Journal of Computer Vision* 126.11, S. 1220–1244.
- Schaffarczyk, A. P. (2016). *Einführung in die Windenergietechnik*. Carl Hanser Verlag.
- Schmidt Paulsen, U. u. a. (2009). "Wind Turbine Operational and Emergency Stop Measurements Using Point Tracking Videogrammetry". In: *SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Albuquerque, NM (US)*.

- Schneider, D. (2008). “Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten”. Diss. Fakultät für Forst-Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden.
- Shoemake, K. und T. Duff (1992). “Matrix animation and polar decomposition”. In: *Proceedings of the conference on Graphics interface*. Bd. 92. Citeseer, S. 258–264.
- Soudarissanane, S. u. a. (2009). “Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points”. In: *Proceedings ISPRS Workshop Laserscanning 2009, Paris, Frankreich*. ISPRS.
- Soudarissanane, S. u. a. (2011). “Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points”. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66.4, S. 389–399.
- Sousa, P. J. u. a. (2017). “Displacement measurement and shape acquisition of an RC helicopter blade using Digital Image Correlation”. In: *Procedia Structural Integrity* 5, S. 1253–1259.
- Stasicki, B. und F. Boden (2009). “Application of high-speed videography for in-flight deformation measurements of aircraft propellers”. In: *28th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*. Bd. 7126. International Society for Optics und Photonics, S. 712604.
- Stefanescu, R., X. Pennec und N. Ayache (2004). “Grid powered nonlinear image registration with locally adaptive regularization”. In: *Medical image analysis* 8.3, S. 325–342.
- Steimle, J., A. Jordt und P. Maes (2013). “Flexpad: highly flexible bending interactions for projected handheld displays”. In: S. 237–246.
- Sternberg, H., T. Kersten und N. Conseil (2005). “Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 - Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung”. In: *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005*. Thomas Luhmann und Christina Müller, S. 56–65.
- Sumner, R. W., J. Schmid und M. Pauly (2007). “Embedded deformation for shape manipulation”. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. Bd. 26. 3. ACM, S. 80.
- Szeliski, R. (1993). “Rapid octree construction from image sequences”. In: *CVGIP: Image understanding* 58.1, S. 23–32.
- Szeliski, R. (2010). *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media.
- Szeliski, R. und S. Lavallée (1994). “Matching 3-D anatomical surfaces with non-rigid deformations using octree-splines”. In: S. 144–153.
- Tangelder, J. W., G. Vosselman und F. A. Van Den Heuvel (2000). “Object-oriented measurement of pipe systems using edge matching and CSG models with constraints”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII*, S. 132–139.
- Technische Daten Z+F IMAGER 5010c* (2018). Zoller+Fröhlich GmbH.
- Tsap, L. V. u. a. (1998). “Efficient nonlinear finite element modeling of nonrigid objects via optimization of mesh models”. In: *Computer Vision and Image Understanding* 69.3, S. 330–350.
- Vennegeerts, H. u. a. (2010). “Genauigkeitsuntersuchungen zum kinematischen Einsatz terrestrischer Laserscanner”. In: *AVN (4)*, S. 140–147.
- Voegtle, T., I. Schwab und T. Landes (2008). “Influences of different materials on the measurements of a terrestrial laser scanner (TLS)”. In: *Proc. of the XXI Congress, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Bd. 37, S. 1061–1066.
- Vosselman, G. und H. Maas (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing. ISBN: 9781439827987.

- Wang, J. (2013). “Towards deformation monitoring with terrestrial laser scanning based on external calibration and feature matching methods”. Diss. Leibniz-Univ., Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik.
- Weik, S. (1997). “Registration of 3-D partial surface models using luminance and depth information”. In: *3-D Digital Imaging and Modeling, 1997. Proceedings., International Conference on Recent Advances*. IEEE, S. 93–100.
- Weisensee, M. (1992). “Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen”. Diss. Technische Universität Darmstadt.
- Wendt, A. (2008). “Objektraumbasierte simultane multisensorale Orientierung”. Diss. Leibniz Universität Hannover.
- Wicki, F. (1999). “Robuste Schätzverfahren für die Parameterschätzung in geodätischen Netzen”. Diss. ETH Zurich.
- Windcomp GmbH (2018). *Windcomp Homepage*. URL: <https://windcomp.jimdo.com/> (besucht am 23.06.2018).
- Winstroth, J u. a. (2014). “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*. Bd. 524. 1. IOP Publishing, S. 012064.
- Witte, B. und P. Sparla (2015). *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. 8. Aufl. Wichmann.
- Wong, K.-Y. K. (2001). “Structure and motion from silhouettes”. Diss. Department of Engineering, University of Cambridge.
- Wrobel, B. P. (2012). “Circular targets in perspective projection –in an image and in bundle adjustment”. In: *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation 3*, S. 221–236.
- Wu, R. u. a. (2019). “Health monitoring of wind turbine blades in operation using three-dimensional digital image correlation”. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 130, S. 470–483.
- Wujanz, D. (2016). “Terrestrial Laser Scanning for Geodetic Deformation Monitoring”. Diss. Technische Universität Berlin, Fakultät VI - Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik.
- Wujanz, D. (2018). “Identifizierung von statistisch signifikanten Deformationen in multi-temporalen Laserscans unter Berücksichtigung eines erweiterten Fehlerhaushaltes”. In:
- Wujanz, D. u. a. (2013). “Untersuchungen zur Erfassung bewegter Objekte durch kinematisches terrestrisches Laserscanning”. In: S. 56–67.
- Wujanz, D. u. a. (2017). “Ein intensitätsbasiertes stochastisches Modell für terrestrische Laserscanner - erste Untersuchungen der Z+F IMAGER 5006h und 5010”. In: *Photogrammetrie Laserscanning optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017*. Thomas Luhmann und Christina Müller, S. 16–26.
- Yous, S. u. a. (2007). “Gpu-based shape from silhouettes”. In: *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*. ACM, S. 71–77.
- Zhang, Z. (1992). “Iterative point matching for registration of free-form curves”. In: *Research Report 1658, INRIA Sophia-Antipolis*.
- Zhang, Z. (1994). “Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces”. In: *International journal of computer vision* 13.2, S. 119–152.

## Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die allgemeinen Prinzipien wissenschaftlicher Arbeit und Veröffentlichungen, wie sie in den Leitlinien guter wissenschaftlicher Praxis der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg festgelegt sind, befolgt habe.

---

Datum, Ort

---

Unterschrift