

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

Förderkennzeichen: 0325287

Entwicklung von Verfahren zur lasergestützten Erfassung des Schwingungsverhaltens von Windkraftanlagen

Autoren

Dr.-Ing. Martin Ruckhäberle
Dipl.-Math. Benjamin Göhler
Dr. rer. nat. Ilja Kaufmann
Dipl.-Phys. Peter Lutzmann
Dipl.-Ing. Clemens Scherer
Dr. rer. nat. Norbert Scherer-Negenborn

August 2014
Karlsruhe

Bericht-Nr.: 10826

Inhalt

1	Zusammenfassende Darstellung.....	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.4	Zu Grunde gelegter wissenschaftlicher und technischer Stand	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
2	Eingehende Darstellung.....	6
2.1	Ergebnisse im Arbeitspaket 1 »Systemauslegung und Aufbau eines Mehrkanal-Laservibrometers«.....	6
2.1.1	Arbeitspaket 1.1 »Mehrkanaldetektor, Systemauslegung«.....	6
2.1.1.1	Laserwellenlänge und Augensicherheit.....	6
2.1.1.2	Untersuchung des Speckle-Einflusses.....	7
2.1.1.3	Abschätzung des Einflusses atmosphärischer Randbedingungen	13
2.1.1.4	Systemkonzepte von Mehrstrahl-Laservibrometern	15
2.1.1.5	Grundkonzept des Mehrkanal-Laser-Doppler-Vibrometers	18
2.1.2	Arbeitspaket 1.2 »Mehrkanaldetektor, Aufbau Optik, Signalverarbeitung«, Arbeitspaket 1.3 »Mehrkanaldetektor, Funktionsnachweis«	19
2.1.2.1	Polarisationstrennung zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses.....	19
2.1.2.2	Konzeption der Makro-Doppler-Kompensation.....	22
2.1.2.3	Aufbau der Makro-Doppler-Kompensation.....	27
2.1.2.4	Erzeugung synthetischer Vibrationssignale zu Testzwecken	28
2.1.2.5	Aufbau und Optimierung des Zwei-Kanal-Detektors	30
2.2	Ergebnisse im Arbeitspaket 2 »Entwicklung von Bildauswertungsverfahren für die Bewegungserfassung	33
2.2.1	Arbeitspaket 2.1 »Bildfolgenerfassung und -aufbereitung«.....	33
2.2.2	Arbeitspaket 2.2 »Bildverarbeitungsverfahren, translatorische Bewegung«.....	33
2.2.2.1	Aufgabenstellung	33

2.2.2.2	Korrelationsanalyse zur Translationsschätzung	34
2.2.2.3	Prototypische Implementierung	36
2.2.3	Arbeitspaket 2.3 »Bildverarbeitungsverfahren, Blattverfolgung«	36
2.2.3.1	Aufgabenstellung	36
2.2.3.2	Stand der Technik.....	37
2.2.3.3	Verfahren.....	38
2.2.3.4	Detektion der Rotorblattspitzen	39
2.2.3.5	Schätzung von Modellparametern bei Bildsignalen im LWIR-Band	42
2.2.3.6	Schätzung von Modellparametern bei Bildsignalen im SWIR-Band	44
2.2.4	Arbeitspaket 2.4 »Bildverarbeitungsverfahren, Blattverfolgung, Test und Validierung«, Arbeitspaket 3.1 »Systemkonzeption«	48
2.2.4.1	Aufbau eines Versuchsstands für die Blattverfolgung	48
2.2.4.2	Entwicklung eines Echtzeitverfahrens zur Blattverfolgung	49
2.3	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	53
2.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	53
2.5	Voraussichtliche Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	53
2.6	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	54
2.7	Erfolge und geplante Veröffentlichungen	54

1 Zusammenfassende Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

An einer Windkraftanlage auftretende hohe und stark variierende Schwingungsbelastungen können direkte Ursache für Schäden an der Anlage sein. Somit sind die Erfassung und die Bewertung von Schwingungen Grundlage der Betriebszustandsüberwachung (CM: Condition Monitoring) und der Diagnose.

Zur Schwingungserfassung werden aus Aufwandsgründen derzeit nur in geringem Umfang Sensoren in der Anlage verbaut. Die Schwingungsauswertung ist hierbei auf die jeweiligen Eigenschaften sowie die vorgegebene räumliche Anordnung der Sensoren beschränkt. In diesem Zusammenhang interessieren insbesondere laserbasierte Messverfahren, die ohne Anbringung von Sensorik an der Anlage Schwingungen berührungslos erfassen können. Dadurch wird grundsätzlich ein flexibler Einsatz des Messsystems für unterschiedliche Anlagen im Onshore- und Offshore-Bereich möglich. Ein weiterer Vorteil besteht in der freien Wahl des Messrasters, womit spezifische und detaillierte Schwingungsanalysen durchgeführt werden können. Ein wesentlicher Aspekt für die Anwendung bei Windkraftanlagen ist eine genügende Reichweite der Laserabtastung im Bereich mehrerer hundert Meter, um fragliche Anlagenkomponenten auch aus entsprechender Entfernung zuverlässig erfassen zu können. Am Markt verfügbare Systeme, sogenannte Laservibrometer-Systeme, bieten einen solchen Entfernungsbereich grundsätzlich nicht.

Aufgabe des durchgeführten Vorhabens war die Entwicklung von Verfahren als Grundlage eines Lasermesssystems für die Schwingungserfassung an Windkraftanlagen aus großer Entfernung. Schwerpunkte waren dabei die Anpassung der im IOSB für militärische Anwendungen entwickelten Fernlaservibrometrie an die Erfordernisse bei Windkraftanlagen sowie die Entwicklung von Bildauswertungsverfahren, die eine Kompensation der Eigenbewegung von Turm und Gondel sowie eine Nachführung des Laserstrahls auf dem rotierenden Blatt erlauben. Die Bewegungskompensation ist unverzichtbare Grundlage für die laserbasierte Schwingungserfassung an der Anlage, da der Laserfleck während der Messdauer zwingend auf einem Oberflächenpunkt der betrachteten Komponente gehalten werden muss.

1.2 Voraussetzungen

Wie bereits angedeutet, liegen die verfahrenstechnischen Grundlagen für die Durchführung des Vorhabens zum einen in der am IOSB für den militärischen Bereich entwickelten Lasermesstechnik. Zum anderen entwickelt das IOSB in mehreren Abteilungen Bildauswertungsverfahren für unterschiedliche, vornehmlich industrielle Anwendungen, so dass die in diesem Bereich vorliegenden Erfahrungen und Methoden unmittelbar für die avisierte Aufgabenstellung verwendet werden konnten.

Auch im Bereich der Signalanalyse, insbesondere der Analyse von Schwingungssignalen bestehen im IOSB langjährige Erfahrungen, die vorteilhaft in die Planung und Durchführung des Vorhabens eingebracht werden konnten.

2 Eingehende Darstellung

Gegenstand der über die Zuwendung finanzierten Vorhabens war die Entwicklung einer Verfahrensbasis für ein Lasermesssystem, mit dem Schwingungen von Komponenten einer Windkraftanlage aus angemessener Entfernung erfasst werden können. Gegenstand des Arbeitspakets 1 war die Weiterentwicklung der im IOSB vorhandenen Lasertechnologie für den Einsatz an Windkraftanlagen sowie Gegenstand des Arbeitspakets 2 die Entwicklung von Bildauswertungsverfahren zur Bewegungskompensation. Auf entsprechende Teilarbeitspakete wird im Folgenden im Detail eingegangen.

2.1 Ergebnisse im Arbeitspaket 1 »Systemauslegung und Aufbau eines Mehrkanal-Laservibrometers«

2.1.1 Arbeitspaket 1.1 »Mehrkanaldetektor, Systemauslegung«

Der Mehrkanaldetektor soll es ermöglichen, Schwingungen auf große Entfernung und ohne die Verwendung von Reflexionsmarken an der Anlage zu erfassen. Damit sollen Schwingungen am Turm sowie Vibrationen an der Gondel detailliert analysiert werden können. Das System muss dabei so ausgelegt sein, dass Dopplerverschiebungen, etwa aufgrund niederfrequenter Turmschwingungen, kompensiert werden. Des Weiteren soll der Detektor für eine Messanordnung verwendbar sein, mit der sich Schwingungen am drehenden Rotorblatt erfassen lassen. Für die hierfür erforderliche kontinuierliche Nachführung des Laserstrahls wurde ein auf Bildauswertung basierendes Tracking-Verfahren entwickelt, auf das im Abschnitt 2.2.3 eingegangen wird.

2.1.1.1 Laserwellenlänge und Augensicherheit

Hinsichtlich der Augensicherheit für größere Entfernung zwischen Lasersystem und Messobjekt wurden zwei Laserwellenlängen, nämlich 633 nm für den sichtbaren Bereich und 1550 nm für den nicht sichtbaren, nahen Infrarotbereich verglichen. Als Vergleichsmaße wurden der nominelle Augen-Gefahrenabstand (NOHD: nominal ocular hazard distance) und der erweiterte Augen-Gefahrenabstand (Extended NOHD) betrachtet. Die Berechnungsergebnisse zeigt die Tabelle 2.1. Demnach ist festzustellen, dass für den hier betrachteten Einsatzzweck Laser mit Wellenlängen im Bereich von 1550 nm zu verwenden sind.

Tabelle 2.1: Berechnungsergebnisse zur Lasersicherheit für zwei Laserwellenlängen; Systemparameter: Laserleistung 200 mW; Strahldivergenz 100 µrad; Strahldurchmesser 2,3 cm; Dauer der Strahlungseinwirkung 100 s (1550 nm), 0,25 s (633 nm).

	1550 nm	633 nm
NOHD	0 m	771 m
Extended NOHD	911 m	6920 m
Laser Class	1M	3B

2.1.1.2 Untersuchung des Speckle-Einflusses

2.1.1.2.1 Dynamischer Speckle-Effekt

Bei Messungen auf einem sich drehenden Rotorblatt einer Windkraftanlage tritt neben dem Makro-Doppler-Effekt, auf den im Abschnitt 2.1.2.2 eingegangen wird, der sogenannte dynamische Speckle-Effekt auf. Der gewöhnliche oder statische Speckle-Effekt entsteht dadurch, dass kohärente Strahlung (Laserstrahl) auf eine Oberfläche trifft, die eine Rauigkeit aufweist, welche in der Größenordnung der Wellenlänge dieser Strahlung liegt. Konstruktive und destruktive Interferenz von zurückgestreuten Strahlteilen resultieren in hellen und dunklen Bereichen, den sogenannten Speckles. In Abbildung 2.1 ist ein typisches Speckle-Muster dargestellt.

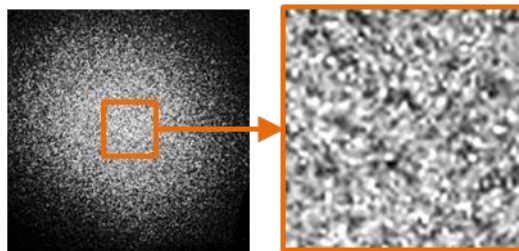


Abbildung 2.1: Typisches Speckle-Muster, das durch die Beleuchtung einer »rauen« Oberfläche mit einem Laserstrahl entsteht.

Bei einer sich bewegenden Oberfläche verändert sich kontinuierlich das erzeugte Speckle-Muster, was als dynamischer Speckle-Effekt bezeichnet wird. Im Laservibrometer entsteht dadurch das sogenannte Speckle-Rauschen. Bei Vibrometer-Messungen am drehenden Rotorblatt einer Windkraftanlage kann das Speckle-Rauschen durch folgende, in der Tabelle 2.2 aufgeführten Ursachen hervorgerufen werden:

Tabelle 2.2: Ursachen für die Entstehung des dynamischen Speckle-Effekts bei Vibrometer-Messungen am drehenden Rotorblatt einer Windkraftanlage.

Tracking-Ungenauigkeit	Messung von außerhalb der Rotorblatt-Drehachse	Rotorblatt-Drehung
Wandern des Laserstrahls um die definierte Messstelle	Verkipfung der Messoberfläche während des Rotorblattumlaufs	Drehung der Messoberfläche während des Rotorblattumlaufs

2.1.1.2.2 Bandbreite des Speckle-Rauschens

Im Folgenden wird eine ideale Strahl-Nachführung angenommen und somit die erste Ursache aus Tabelle 2.2, nämlich das Wandern des Laserstrahls um die Messstelle, für den dynamischen Speckle-Effekt vernachlässigt. Die zeitabhängige Drehung $\theta(t)$ und Verkippung $\vec{\psi}(t) = (\psi_x(t), \psi_y(t))^T$ der Messoberfläche werden für jede der acht betrachteten Windkraftanlagen der Firma Enercon (siehe Tabelle 2.7) zu N diskreten Zeitpunkten $t_1 = 0, t_2, \dots, t_N = T$ (T: Umlaufzeit eines Rotorblatts) berechnet. Daraus kann der transversale Kohärenzgrad¹ zwischen den jeweiligen FM-Signalen (also vor der Demodulation) gemäß

$$\gamma_{12T}(t_i) = \exp(-2\Delta\bar{p}(t_i)^T \Delta\bar{p}(t_i)/a^2 - k^2 a^2 \Delta\bar{q}(t_i)^T \Delta\bar{q}(t_i)/2) \quad (i \in \{1, 2, \dots, N-1\})$$

abgeleitet werden, wobei a den $1/e^2$ -Laserstrahl-Durchmesser am Sender und $k = 2\pi/\lambda$ die Kreiswellenzahl des Lasers mit Wellenlänge λ bezeichnen. Außerdem gelten für einen kollimierten Laserstrahl:

$$\begin{aligned} \Delta\bar{p}(t_i) &= \bar{p}(t_{i+1}) - \bar{p}(t_i) & \text{und} & & \bar{p}(t_m) &= L \cdot \bar{U}_{\theta(t_m)} \cdot \vec{\psi}(t_m) \\ \Delta\bar{q}(t_i) &= \bar{q}(t_{i+1}) - \bar{q}(t_i) & & & \bar{q}(t_m) &= -\bar{U}_{\theta(t_m)} \cdot \vec{\psi}(t_m) \end{aligned} \quad (m \in \{i, i+1\}) ,$$

wobei L die Entfernung zwischen Sensor und Messpunkt und $\bar{U}_{\theta(t_m)}$ die zum Winkel $\theta(t_m)$ gehörige Drehmatrix sind. Mittels der durchschnittlichen Dekorrelationszeit²

$$t_c(t_i) = -2 \cdot \frac{t_{i+1} - t_i}{\ln(\gamma_{12T}(t_i))}$$

im Zeitintervall $[t_i, t_{i+1}]$ lässt sich schließlich die Bandbreite des Speckle-Rauschens bestimmen:

$$B_{\text{dyn-Speck}}(t_i) = t_c^{-1}(t_i) .$$

Die Bandbreite $B_{\text{dyn-Speck}}$ des Speckle-Rauschens ist die maximale, durch den dynamischen Speckle-Effekt bedingte Abweichung der Momentanfrequenz von der Zwischenfrequenz («Frequenzhub») und somit ein Maß für den Störeinfluss des dynamischen Speckle-Effektes.

Für jede der betrachteten Windkraftanlagen wird im Folgenden die zeitabhängige Bandbreite des Speckle-Rauschens berechnet. In der Abbildung 2.2 sind die Ergebnisse jeweils mit (rote Kurven) und ohne (blaue Kurven) Berücksichtigung der Oberflächen-

¹ J. H. Shapiro: »Correlation scales of laser speckle in heterodyne detection«, Applied Optics Vol. 24 No. 12 (1985)

² Die durchschnittliche Dekorrelationszeit ist die Zeit, nach der ein transversaler Kohärenzgrad von $1/e^2$ eintreten würde, wenn sich die Messoberfläche mit der Bewegung, die vom Zeitpunkt t_i zum Zeitpunkt t_{i+1} stattfand, gleichbleibend weiter verändert.

rotation dargestellt. Außerdem sind die Maximalwerte in der Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Der Berechnung wurden folgende Parameter zugrunde gelegt: $1/e^2$ -Laserstrahl-Durchmesser am Sender $a = 18 \text{ mm}$; Laserwellenlänge $\lambda = 1,54 \text{ }\mu\text{m}$; Entfernung zwischen Laser-Vibrometer und Windkraftanlage $R = 300 \text{ m}$ und Höhe des Laser-Vibrometers über dem Boden $h_0 = 1 \text{ m}$.

Tabelle 2.3: Maximale Bandbreiten des Speckle-Rauschens aus Abbildung 2.2 für acht Windkraftanlagen der Firma Enercon.

	E-33	E-44	E-48	E-53	E-70	E-82	E-101	E-126
$(B_{\text{dyn-Speck}})_{\text{max}}$	7,11 kHz	7,67 kHz	9,00 kHz	11,80 kHz	7,98 kHz	13,19 kHz	16,65 kHz	24,88 kHz

Aus den Diagrammen in Abbildung 2.2 geht hervor, dass der größte Einfluss des Speckle-Rauschens (größte Bandbreite) zum Zeitpunkt $t = T / 2$ vorliegt, wenn sich also das Rotorblatt im niedrigsten Punkt befindet. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die Messoberfläche dann die geringste Entfernung zum Sensor hat und somit die größte Winkelgeschwindigkeit des Rotorblatts relativ zum Sensor vorliegt. Der geringste Einfluss des Speckle-Rauschens liegt zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ vor (im obersten Punkt), wenn die Entfernung der Messoberfläche zum Sensor am größten und somit die Winkelgeschwindigkeit des Rotorblatts relativ zum Sensor am geringsten ist.

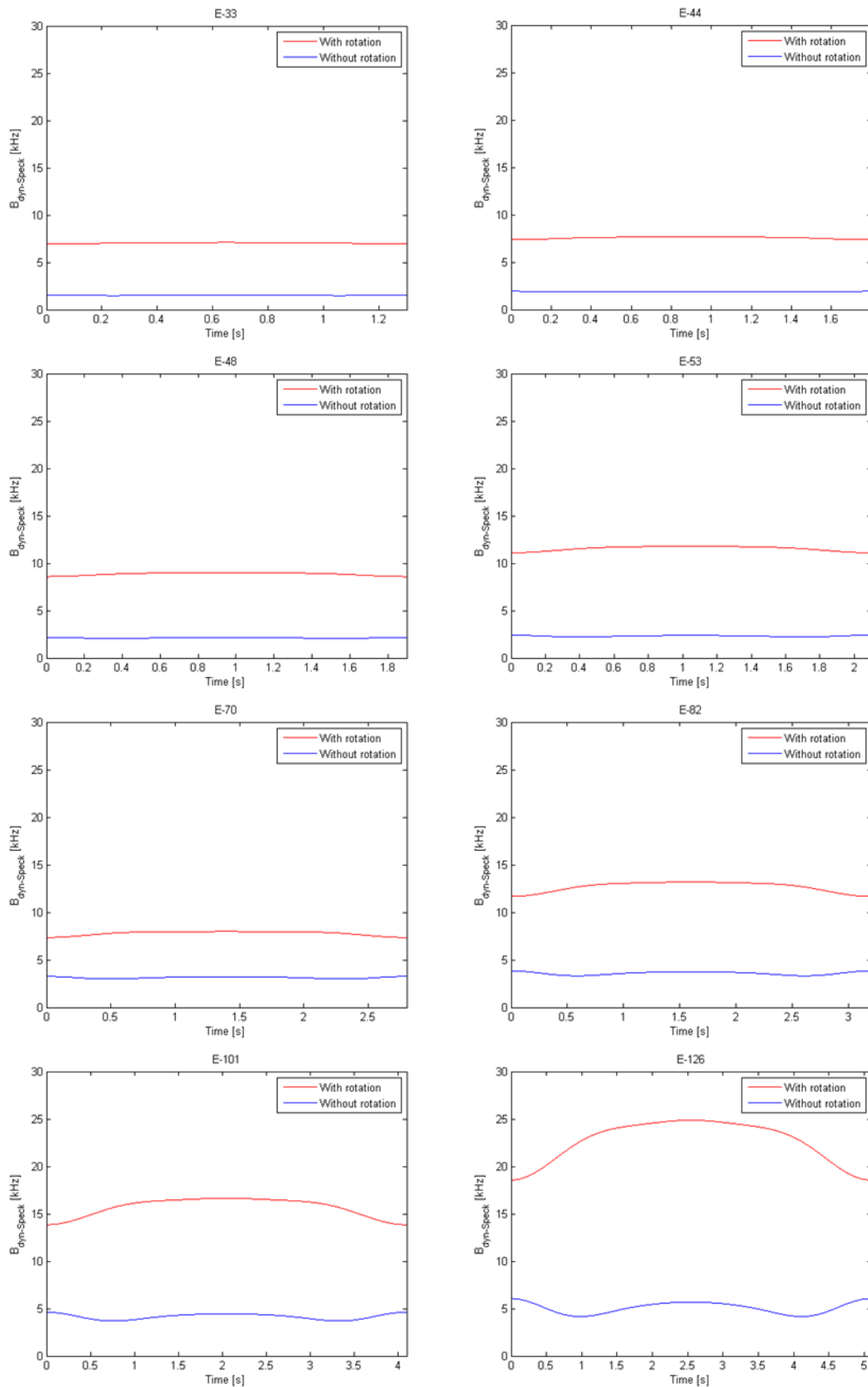


Abbildung 2.2: Bandbreite des Speckle-Rauschens $B_{\text{dyn-Speck}}$ über einen Rotorumlauf ($0 \leq t \leq T$) für acht Windkraftanlagen der Firma Enercon jeweils mit (rote Kurven) und ohne (blaue Kurven) Berücksichtigung der Oberflächenrotation.

2.1.1.2.3 Kleinste messbare Vibrationsamplitude

Mit der Definition des Modulationsindex $\beta = \Delta f / f_V$, wobei Δf der durch die sinusförmige Vibration der Meso­berfläche mit Frequenz f_V bedingte Frequenzhub ist, und mit der Formel³

$$\beta = \frac{4\pi \cdot A_V}{\lambda},$$

wobei A_V die Amplitude einer sinusförmigen Vibration der Meso­berfläche ist, erhält man

$$A_V = \frac{\lambda \cdot \Delta f}{4\pi} \cdot \frac{1}{f_V}.$$

Setzt man hier $\Delta f = B_{\text{dyn-Speck}}$ erhält man einen Zusammenhang zwischen der Vibrationsfrequenz f_V und der minimalen Amplitude $A_{V,\text{min}}$ einer sinusförmigen Vibration der Meso­berfläche, die aufgrund des Speckle-Rauschens gerade noch gemessen werden kann:

$$A_{V,\text{min}}(f_V) = \frac{\lambda \cdot B_{\text{dyn-Speck}}}{4\pi} \cdot \frac{1}{f_V}.$$

In Abbildung 2.3 sind für $\lambda = 1,54 \mu\text{m}$ und für die Maximalwerte von $B_{\text{dyn-Speck}}$ aus Tabelle 2.3 die kleinsten messbaren Amplituden einer sinusförmigen Vibration der Meso­berfläche für die acht Windkraftanlagen der Firma Enercon dargestellt.

Es wurden nur Vibrationsfrequenzen bis 300 Hz betrachtet, da die Schwingungsmoden bei größer werdenden Vibrationsfrequenzen kleiner werden und somit eine Mittelung über verschiedene Teile der Schwingungsmoden innerhalb des Laserspots auftritt, was im obigen Modell nicht berücksichtigt ist.

Aus den Diagrammen in Abbildung 2.3 lässt sich grob ableiten, dass die kleinste messbare Amplitude für niedrige Vibrationsfrequenzen (einige Hertz) im Bereich um $100 \mu\text{m}$ und für größere Vibrationsfrequenzen ($> 50 \text{ Hz}$) im Bereich um $10 \mu\text{m}$ liegt.

³ R. L. Boca, R. J. Mongeon: »Multifunction CO₂ laser radar technology«, SPIE Vol. 300 (1981), S. 19-32

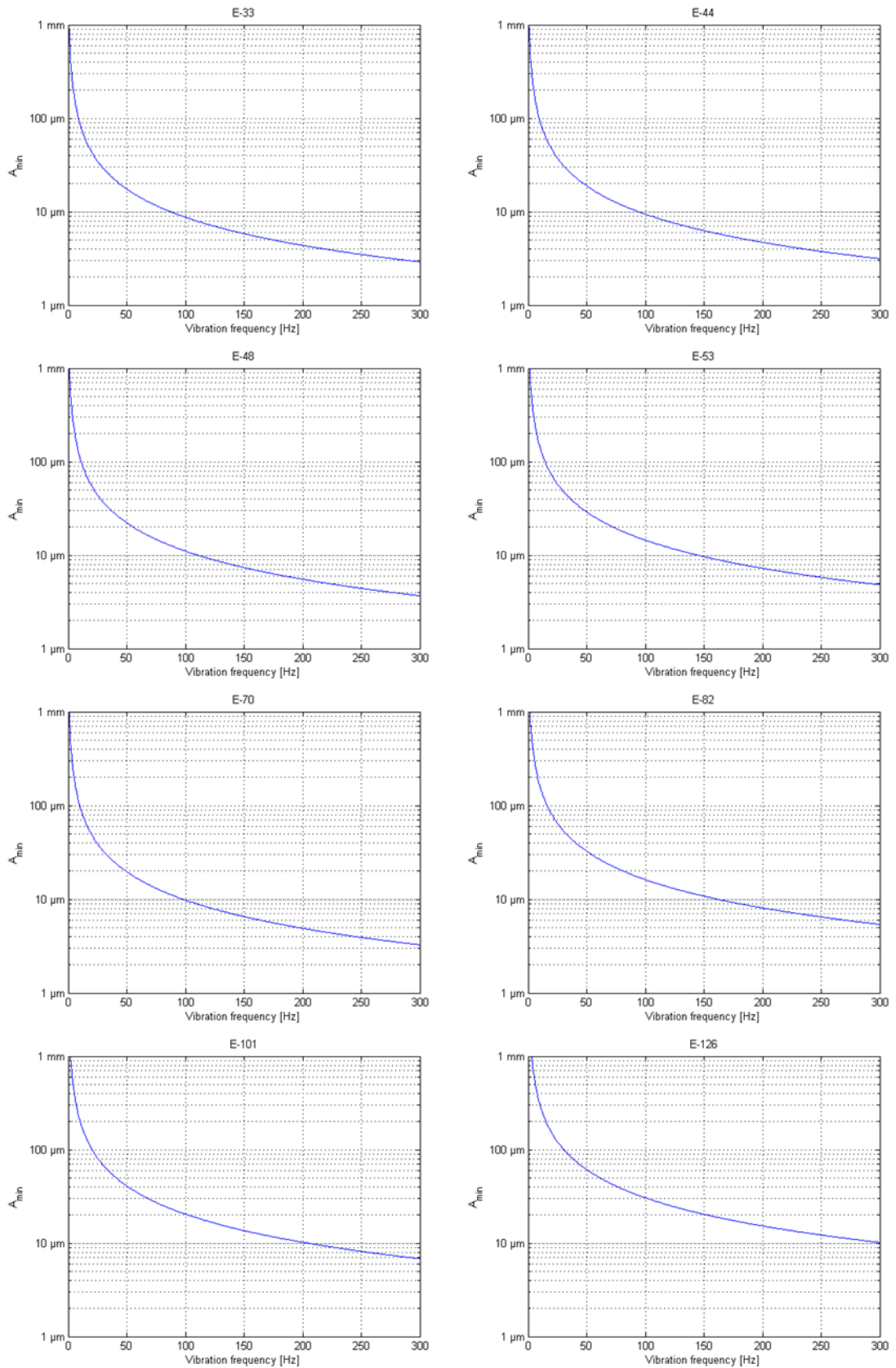


Abbildung 2.3: Aufgrund des Speckle-Rauschens kleinste messbare Amplituden einer sinusförmigen Vibration der Messoberfläche in Abhängigkeit von der Vibrationsfrequenz für acht Windenergieanlagen der Firma Enercon.

Das Fazit der vorstehenden Betrachtungen lautet, dass die maximale Bandbreite des Speckle-Rauschens, abhängig von der betrachteten Windkraftanlage, im Bereich 7-25 kHz liegt und somit die Zwischenfrequenz-Bandbreite B_F nicht kleiner als diese Werte gewählt werden darf, da sonst nur Speckle-Rauschen aufgezeichnet wird.

Außerdem liegen die minimal messbaren Amplituden einer sinusförmig vibrierenden Mesoebene aufgrund des Speckle-Rauschens im Mikrometer-Bereich. In der Literatur wurde gezeigt⁴, dass in Situationen ohne dynamischen Speckle-Effekt minimal messbare Amplituden im Nanometer-Bereich möglich sind. Somit tritt aufgrund des dynamischen Speckle-Effekts eine Verschlechterung der Empfindlichkeit des Laser-Vibrometers um drei Größenordnungen auf.

Eine sensorseitige Maßnahme zur Reduzierung des dynamischen Speckle-Effektes und somit zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses besteht in der Anwendung der »polarization diversity«-Technik (siehe Abschnitt 2.1.2.1).

2.1.1.3 Abschätzung des Einflusses atmosphärischer Randbedingungen

Bei der Konzeption von Lasermesssystemen mit großer Reichweite sind atmosphärische Einflüsse zu berücksichtigen, insbesondere die atmosphärische Extinktion und die atmosphärische Turbulenz. Gerade bei laufendem Betrieb einer Windkraftanlage tritt eine bewegungsinduzierte turbulente Umströmung des Rotorblattes auf, die bei Lasermessungen am rotierenden Blatt einen zusätzlichen Einfluss auf die Güte des rückgestreuten Laserstrahls hat. Als für den atmosphärischen Einfluss maßgebliche Kenngrößen werden hier der Extinktionskoeffizient sowie der Brechungsindex-Strukturparameter betrachtet. Nachstehende Tabellen zeigen Werte für diese atmosphärischen Kenngrößen, die bei im Weiteren beschriebenen Berechnungen verwendet wurden.

Tabelle 2.4: Extinktionskoeffizient für verschiedene Wetterbedingungen.

	Extinktionskoeffizient α in 1/km	Bemerkung
A	0.05	gute Sicht schwache Turbulenz
B	0.92	schlechte Sicht schwache Turbulenz
C	1.40	Regen 4mm/h schwache Turbulenz
D	4.04	Nebel, Normalsichtweite 1km schwache Turbulenz
E	6.06	Schnee, 2 mm/h schwache Turbulenz

⁴ Siehe Abbildung 4 in:

R. L. Boca, R. J. Mongeon: »Multifunction CO₂ laser radar technology«, SPIE Vol. 300 (1981), S. 19-32

Tabelle 2.5: Atmosphärischer Brechungsindex-Strukturparameter für verschiedene Turbulenzstärken.

	Atmosphärischer Strukturparameter C_n^2 in $m^{-2/3}$	Bemerkung
A	10^{-16}	gute Sicht schwache Turbulenz
A1	10^{-14}	gute Sicht mittlere Turbulenz
A2	10^{-12}	gute Sicht starke Turbulenz

Als Gütemaß für die Qualität des Empfangssignals wird hier das Träger-Rausch-Verhältnis (CNR) betrachtet. Die Abbildung 2.4 und die Abbildung 2.5 zeigen Verläufe dieses Gütemaßes über der Objektentfernung, berechnet für das konzipierte Lasersystem mit einer Einzelstrahlleistung von 200 mW. Die horizontale rote Linie kennzeichnet dabei den empirisch bestimmten Grenzwert für eine ausreichende Signalgüte. Aus den Abbildungen wird deutlich, dass bei guten und leicht eingeschränkten atmosphärischen Randbedingungen das konzipierte System innerhalb eines Entfernungsbereichs bis ca. 1 km eine für die Schwingungserfassung ausreichende Signalgüte aufweist.

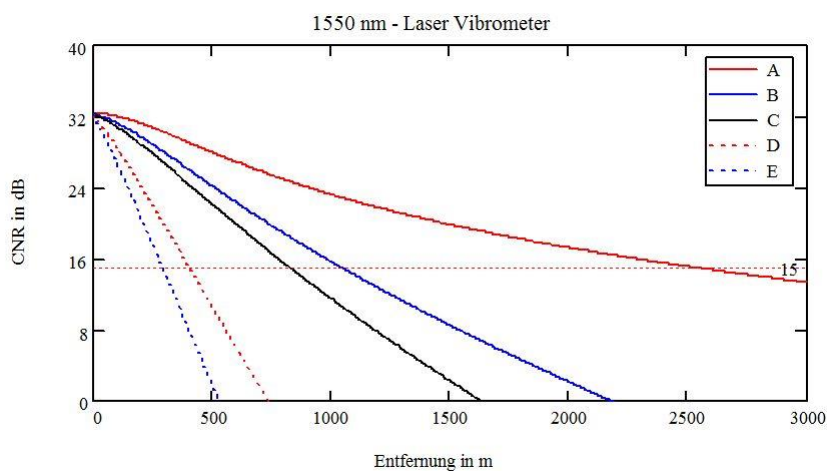


Abbildung 2.4: Träger-Rausch-Verhältnis (CNR) als Funktion der Objektentfernung für verschiedene Wetterbedingungen gemäß Tabelle 2.4.

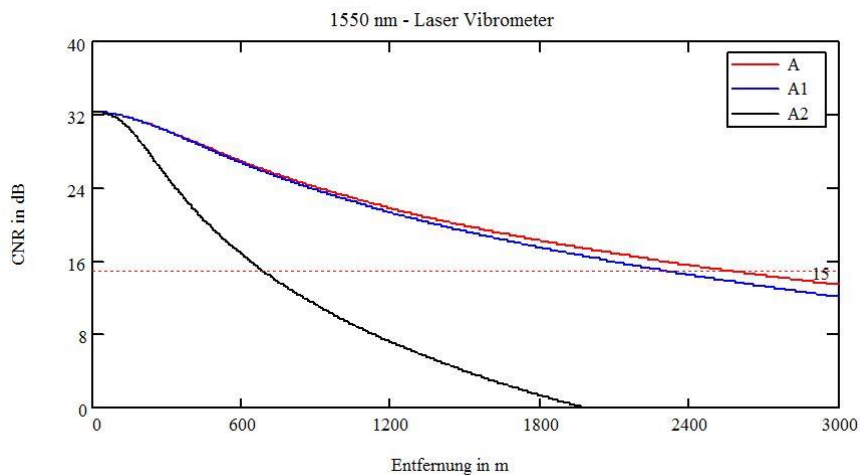


Abbildung 2.5: Träger-Rausch-Verhältnis (CNR) als Funktion der Objektentfernung für verschiedene Turbulenzstärken gemäß Tabelle 2.5.

2.1.1.4 Systemkonzepte von Mehrstrahl-Laservibrometern

Als Grundlage für eine Systemauslegung wurden verschiedene Systemrealisierungen von in der Literatur beschriebenen Mehrstrahl-Doppler-Vibrometern näher betrachtet. Die Tabelle 2.6 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Systemkonzepte. Im Wellenlängenbereich um 1550 nm sind bislang für größere Messabstände nur scannende Systeme bekannt, die zwar eine flächenhafte Schwingungsabtastung ermöglichen, jedoch keine Messung von transienten Vorgängen zulassen und sehr lange Messzeiten erfordern. Die anderen Konzepte - echte Mehrstrahl-Vibrometer - wurden bislang nur für Anwendungen mit kurzen Messentfernungen im Bereich weniger Meter realisiert.

Tabelle 2.6: Systemkonzepte unterschiedlicher 2D-Doppler-Vibrometer (X: realisiert, —: nicht realisiert)

Systemkonzept	532 nm	632 nm	1.5 μm	10.6 μm
Abtastendes Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV/Scanning Laser Doppler Vibrometer)	X	X	X	X
Mehrstrahl-Laser-Doppler-Vibrometer mit Abbildung auf Detektor-Array oder Einzeldetektoren (z.B. mit holografischen Elementen)	—	—	X	—
Vielkanalsystem basierend auf einem Set von Einpunkt-Vibrometern	X	X	X	—
Mehrstrahl-Laser-Doppler-Vibrometer mit räumlicher Frequenzkodierung des Sendestrahl	—	—	X	—

Im Folgenden werden die verschiedenen Systemkonzepte bekannter Mehrstrahl-Vibrometer näher betrachtet.

Firma MetroLaser / University of Mississippi

Ein Schlüsselement dieser in der Abbildung 2.6 schematisch dargestellten Realisierung eines Multistrahlsystems stellt das diffraktive optische Element (DOE 1) dar, mit dem der Laser in eine Linie von N Teilstrahlen aufgespalten wird. Jeder Teilstrahl erzeugt dabei einen Laserspot auf dem Ziel. Nach der Rückstreuung wird jeder Strahl mit einem separaten Lokoszillator überlagert und mit einer separaten Photodiode (PD) detektiert. Zur Anpassung des Lokoszillators auf die N Empfangsstrahlen ist ein weiteres diffraktives optisches Element (DOE 2) nötig. Die N Teilstrahlen in vertikaler Richtung werden über einen Abtastspiegel in horizontaler Richtung über das Objekt bewegt. Die älteren Systeme verwendeten als Laserquelle einen frequenz-verdoppelten Nd:YAG-Laser ($\lambda=532$ nm) und waren als Freistrahlsysteme ausgelegt. Bei den späteren Systemen wurde die Laserquelle durch einen Erbiumfaser-Laser ($\lambda=1550$ nm) und die Freistrahloptik durch eine Faseroptik ersetzt. Neben den linearen Multikanalsystemen wurden auch zweidimensionale durch Verwendung zweier DOE, die hintereinander angebracht sind, realisiert.

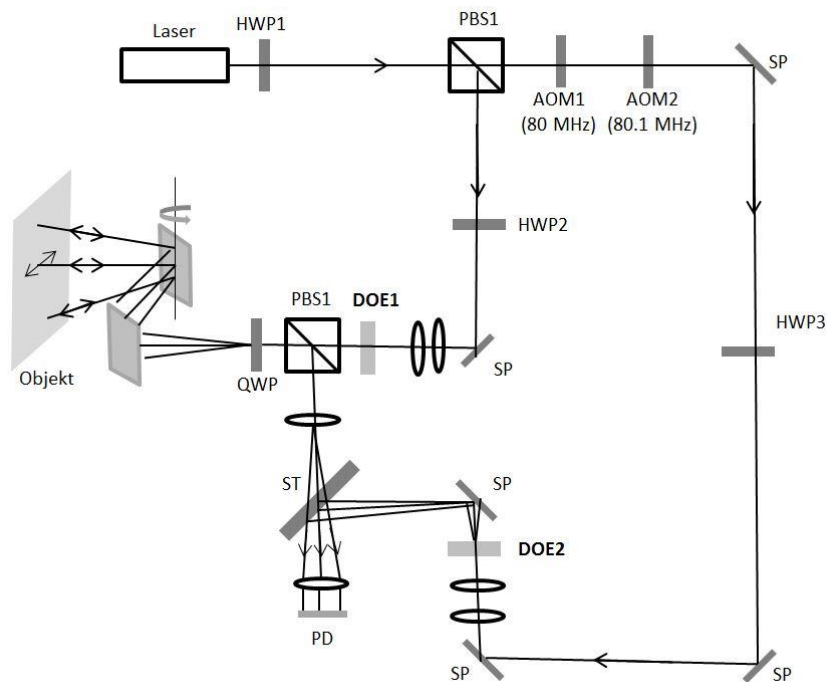


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau eines Multistrahlsystems (MetroLaser) zur gleichzeitigen Messung von N Positionen in linearer Anordnung. Zur Strahlauflösung werden diffraktive optische Elemente eingesetzt.

Nanyang Technological University (NTU) in Singapur

Dieses Systemkonzept, basierend auf einer räumlichen Frequenzkodierung, wurde von der Universität Nanyang Technological University in Singapur, mit der eine Kooperation bestand, im Labor realisiert. Dieses interessante Konzept wurde zunächst favorisiert, weil es einen kompakten Aufbau mit wenigen Komponenten erlaubt. Hauptkomponenten bei diesem Aufbau sind akusto-optische Modulatoren, mit denen der Laserstrahl

räumlich aufgespalten wird, wodurch die Teilstrahlen in der Frequenz verschoben werden. Mit Hilfe eines schnellen Einzeldetektors können dabei alle Frequenzen gleichzeitig detektiert werden und durch eine entsprechende Auswertung ist eine Zuordnung der Frequenzen zu den jeweiligen räumlichen Laser-Abtastpunkten möglich (Abbildung 2.7).

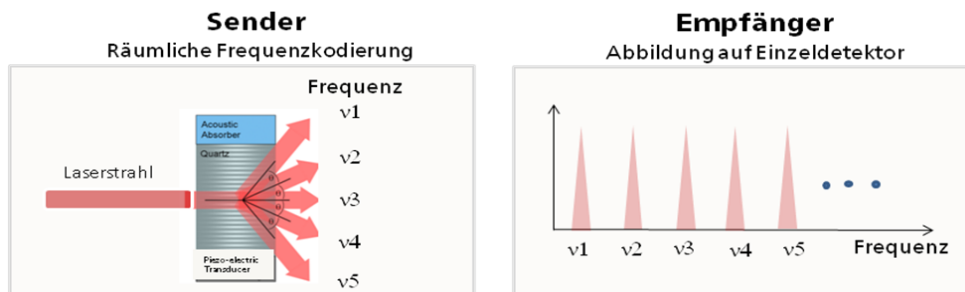


Abbildung 2.7: Prinzip der räumlichen Frequenz-Kodierung durch den Einsatz von akustooptischen Modulatoren (AOM).

Dieses Konzept wurde jedoch nach näherer Analyse und Diskussionen mit Wissenschaftlern aus der Arbeitsgruppe der Universität in Singapur wieder verworfen, da es für ein hochempfindliches System einige Nachteile aufweist, die im Nachfolgenden den Vorteilen gegenübergestellt sind:

- Vorteile:
 - kompakter Aufbau
 - nur ein schneller Einzeldetektor erforderlich
 - realisierbar mit Einzeloptik
- Nachteile:
 - Abschwächung der Laser-Teilstrahlen
 - geringe Effizienz der optischen Überlagerung
 - Auftreten von Störfrequenzen
 - keine Eignung für bewegte Objekte

Firma Ometron

Die Firma Ometron realisierte ein 16 Kanal-Vibrometer (Ometron XVI), wobei eine neue Signalverarbeitungs-Architektur zum Einsatz kommt, die einen ständigen Datenstrom der 16 Einzelkanäle gewährleistet. Die 16 Einzelkanäle sind linear angeordnet, wobei zur Erzeugung zweidimensionaler Schwingungsbilder die Orientierung der Detektorzeile mittels einer geeigneten Abtast-Einheit relativ zum Objekt verändert wird.

MIT

Am MIT wurde ein 5-Strahl-Laser-Vibrometer realisiert, wobei für die Mehrstrahlerzeugung ein 1 x 5 faseroptischer Strahlteiler eingesetzt wurde.

Im Rahmen der Systemrecherche wurden zusammenfassend folgende Literaturstellen betrachtet:

[Aranchuk et al. 2006] V. Aranchuk, A. K. Lal, C. F. Hess, J. M. Sabatier: Multi-beam laser Doppler vibrometer for landmine detection, *Opt. Eng.*, vol. 45, 2006.

[Aranchuk et al. 2006] V. Aranchuk, A. K. Lal, C. F. Hess, J. M. Sabatier, R. D. Burgett, I. Aranchuk, W. T. Mayo: Speckle noise in a continuously scanning multi-beam laser Doppler vibrometer for acoustic landmine detection, *Proc. SPIE*, vol. 6217, 2006.

[Kirkpatrick and Markov 2008] J. M. Kirkpatrick, V. Markov: Matrix laser vibrometer for transient modal imaging and rapid non-destructive testing, *SPIE Proc.*, vol. 7098, 2008.

[Cupido et al. 2003] E. Cupido, S. Morel, D. Smith: Multipoint laser Doppler vibrometer for transient analysis, *IMAC-XXI*, 2003.

[Fu et al. 2010] Y. Fu, M. Guo, P. B. Phua: Spatially encoded multibeam laser Doppler, *Optics Letters*, vol. 35, pp. 1356-1358, 2010.

[Fu et al. 2011] Y. Fu, M. Guo, P. B. Phua: Multipoint laser Doppler vibrometry with single detector: principles, implementation, and signal analyses, *Applied Optics*, vol. 50, pp. 1280-1288, 2011.

2.1.1.5 Grundkonzept des Mehrkanal-Laser-Doppler-Vibrometers

Wie die im voranstehenden Abschnitt beschriebenen Systemkonzepte zeigen, gibt es derzeit Mehrstrahlssysteme nur für geringe Messentfernungen. Dies ist dadurch begründet, dass diese Systeme meistens monostatisch aufgebaut sind, d. h. Sende- und Empfangskomponente in einer optischen Einheit integriert sind.

Beim monostatischen Prinzip durchlaufen Sende- und Empfangsstrahl dasselbe optische System und ermöglichen daher einen vergleichsweise einfachen technischen Aufbau, der für die Realisierung von Mehrstrahlssystemen vorteilhaft ist. Allerdings besteht hierbei der prinzipielle Nachteil, dass diese Lasersysteme hinsichtlich ihrer Laserleistung beschränkt sind und somit für einen größeren Entfernungsbereich, wie er für die Anwendung an Windkraftanlagen erforderlich ist, nicht ausgelegt werden können.

Die für diese Anwendung notwendige Laserleistung im Bereich von 200 mW pro Einzelstrahl sowie die einzusetzende Verfahrenstechnik zur Polarisationsstrennung legen einen bi-statischen Aufbau des Mehrstrahlsystems, bei dem Sende und Empfangskomponente getrennt sind, nahe. Damit verbunden sind hohe Genauigkeitsanforderungen an die Integration und Justierung der optischen Komponenten und damit einem hohen apparativen Aufwand.

Nach derzeitigem Kenntnisstand ließe sich ein Mehrstrahlssystem mit entsprechend hoher Laserleistung nur diskret unter Kombination von Einstrahl-Teilsystemen aufbauen. Damit ließen sich allerdings nur Schwingungen an unbewegten oder allenfalls sich rein translatorisch bewegenden Anlagenkomponenten erfassen – ein System zur Schwingungserfassung am rotierenden Blatt wäre hiermit unter überschaubarem Entwicklungsaufwand nicht realisierbar. Im Laufe des Vorhabens wurde der Entwicklungsschwerpunkt

auf ein Lasersystem gelegt, mit dem sich Schwingungen am Rotorblatt im laufenden Betrieb erfassen lassen, und damit entschieden, das Mehrstrahlkonzept nicht weiter zu verfolgen.

Das gewählte, in der Abbildung 2.8 schematisch dargestellte Systemkonzept wird im Weiteren näher erläutert. Ein DFB (distributed feedback) - Erbiumfaserlaser mit einer Ausgangsleistung von 5 mW wird über einen Faser-Stahlteiler in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Der eine Teilstrahl wird über einen akusto-optischen Modulator (AOM) in der Frequenz um 60 MHz verschoben und anschließend über einen 1-Kanal-Faser-Verstärker auf die erforderliche Ausgangsleistung gebracht. Der zweite Teilstrahl dient als Lokaloszillatorstrahl. Er wird mit dem Signal des Empfängerstrahls mittels einer Panda-Faser (Polarisation erhaltende Faser) auf die Detektoreinheit geführt. Die Detektoreinheit besteht aus zwei Polarisations-Strahlteilern, die die entsprechenden senkrechten und waagrechten Polarisations-Strahlkomponenten des Empfangsstrahls und des Lokaloszillatorstrahls getrennt auf zwei Balance-Detektoren überlagern. Um auftretende systemeigene Schwingungen, sogenannte Plattformschwingungen, kompensieren zu können, ist die Integration eines dreiachsigen Beschleunigungsaufnehmers vorgesehen.

Die Detektorsignale (ZF-Signale) für die senkrechten und waagrechten Polarisationskomponenten sowie die Beschleunigungssignale werden mit der NI-PXI-Plattform getrennt aufgezeichnet und mittels eines dort implementierten Algorithmus verarbeitet.

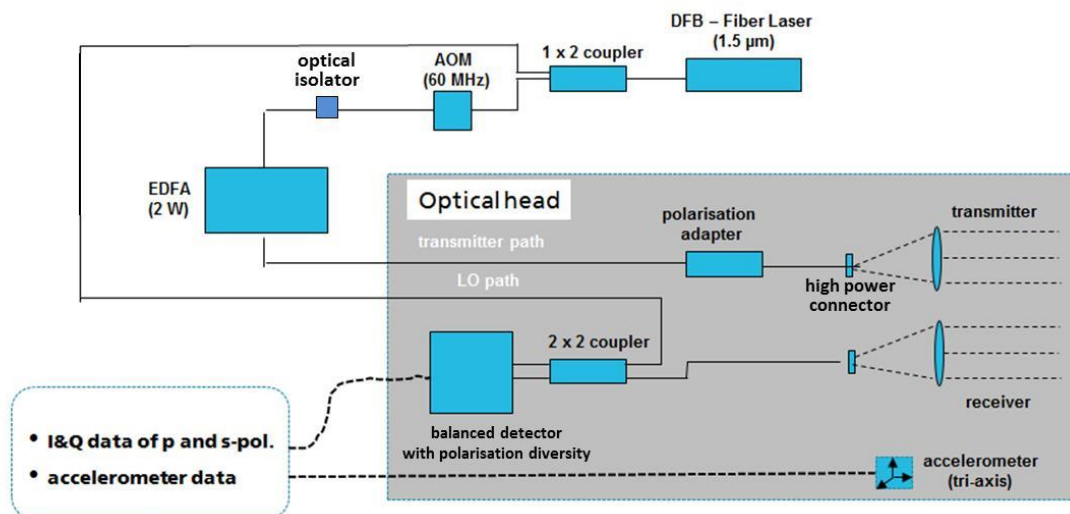


Abbildung 2.8: Systemkonzept des Zweikanal-Laser-Doppler-Vibrometers mit »polarisation diversity«-Technik und Plattform-Schwingungskompensation.

2.1.2 Arbeitspaket 1.2 »Mehrkanaldetektor, Aufbau Optik, Signalverarbeitung«, Arbeitspaket 1.3 »Mehrkanaldetektor, Funktionsnachweis«

2.1.2.1 Polarisationsstrennung zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses

Wie im Abschnitt 2.1.1.2 erläutert, tritt bei der Laserabtastung von bewegten Oberflächen ein dynamischer Speckle-Effekt auf, der zu einem erhöhten Signalrauschen führt. Aus diesem Grunde sind sensorseitig Maßnahmen zur Verbesserung des Signal-

Rausch-Verhältnisses vorzusehen. Eine Möglichkeit besteht in der separaten Behandlung von zu einander senkrecht stehenden Polarisationskomponenten des rückgestreuten Lichts («polarisation diversity«- Technik). Hierfür wurde entsprechend des in der Abbildung 2.8 gezeigten Systemkonzepts ein Versuchsaufbau mit einem Zweikanal-detektor erstellt, der zwei Signalkomponenten mit zueinander orthogonalen Polarisationsrichtungen erfasst.

Als schwingendes Messobjekt wurde ein Lautsprechersystem mit Lambert'scher Reflexionscharakteristik aufgebaut. Hierbei wurde ein Flach-Lautsprecher mit einem Membrandurchmesser von 20 cm verwendet, wobei auf die Membran eine Folie mit Lambert'scher Reflexionscharakteristik aufgebracht wurde. Dieser zeigt für den unteren Frequenzbereich bis etwa 250 Hz eine gleichmäßige Bewegung der flachen Membran über die gesamte Membranoberfläche und damit keine Modenstrukturen. Dies wiederum bedeutet eine gleichmäßige Schwingungsamplitude über die Membranoberfläche, wonach sich dieses Lautsprechersystem für eine Kalibrierung des Lasersystems – unabhängig vom Strahldurchmesser – eignet. Es können keine Interferenzen innerhalb des Bereiches, den der Laserstrahl abdeckt, auftreten. Die Abbildung 2.9 zeigt den Lautsprecheraufbau sowie beispielhaft 3D-Modelle zweier Schwingungsmoden der Lautsprechermembran.

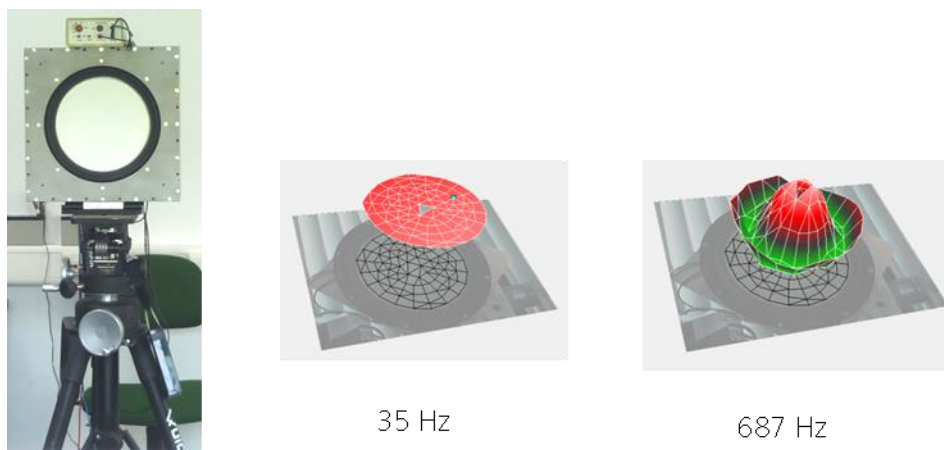


Abbildung 2.9: Kalibriertes Lautsprechersystem mit Lambert'scher Reflexionscharakteristik (links), zwei Schwingungsmoden der Membran (Mitte, rechts).

Zur Erfassung, Verarbeitung und Visualisierung der zweikanaligen Detektorsignale wurden auf der beschafften NI-PXI-Plattform mit LabVIEW entsprechende Softwarekomponenten erstellt und konfiguriert. Die Abbildung 2.10 zeigt die implementierte grafische Bedienoberfläche für die Visualisierung und Verarbeitung der Detektorsignale.

Im Experiment wurde vom Lautsprecher ein Ton mit einer Grundfrequenz von ca. 60 Hz abgestrahlt und die Lautsprechermembran im Testaufbau mit einem Lasersystem mit Zweikanal-detektor abgetastet. Die Abbildung 2.11 zeigt Leistungsdichtespektren der beiden vom Zweikanal-detektor erfassten Einzelsignale sowie das Spektrum des kombinierten Signals. Hierbei wird deutlich, dass die spektrale Komponente bei ca. 60 Hz in allen Spektren sichtbar ist, eine höherfrequente Komponente bei ca. 590 Hz allerdings

in den Spektren der Einzelsignale nicht erkennbar ist, während sie nach Kombination der Einzelsignale im Spektrum deutlich in Erscheinung tritt. Durch die Anwendung der »polarisation diversity«- Technik lässt sich demnach das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) deutlich verbessern. Der SNR-Gewinn ist dabei umso höher, je stärker sich die Speckle während der Messzeit verändern. Bei der Nachführung des Laserstrahls auf der Oberfläche etwa der Gondel oder des oberen Turmabschnitts mit großer Speckle-Änderung ist hier eine wesentliche Signalverbesserung zu erwarten. Festzustellen ist zudem, dass der SNR-Gewinn mit steigender Frequenz bis ca. 500 Hz zunimmt. Dadurch kann gerade die Signalqualität bei der Erfassung höherfrequenter Schwingungen, bei denen das SNR oft gering ist, stark verbessert werden.

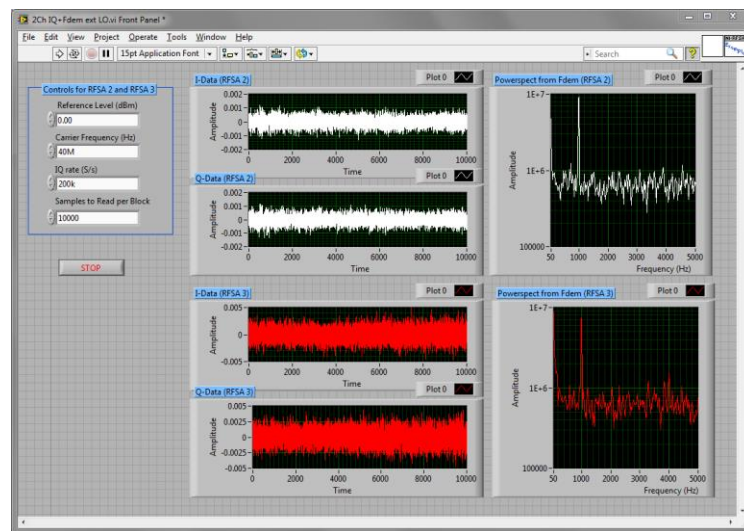


Abbildung 2.10: In LabVIEW realisierte Bedienoberfläche für die Visualisierung und Verarbeitung der Signale vom Zweikanaldetektor.

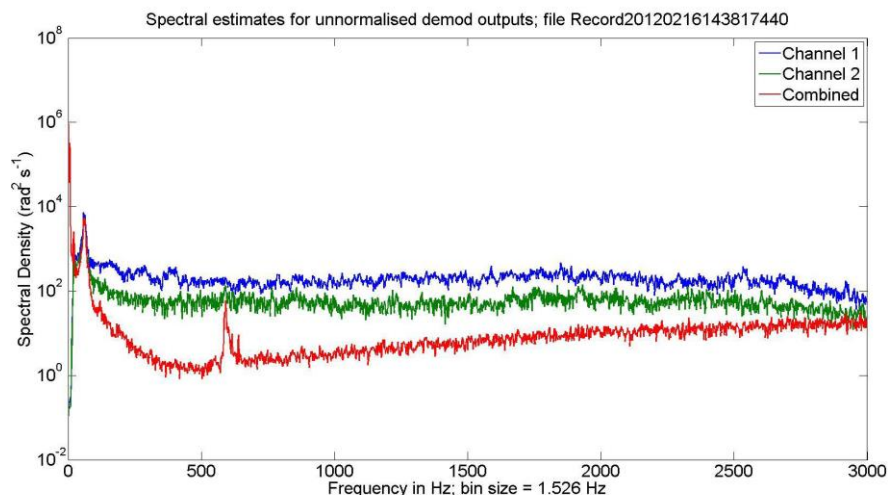


Abbildung 2.11: Leistungsdichtespektren der im Experiment vom Zweikanaldetektor erfassten Signale (blau, grün) sowie des kombinierten Signals (rot).

2.1.2.2 Konzeption der Makro-Doppler-Kompensation

Das konzipierte Laser-Doppler-Vibrometer basiert auf dem sogenannten »Offset-Homodyne«-Verfahren, bei dem der Laserstrahl in Messstrahl und Lokaloszillatorstrahl (LO) aufgeteilt wird. Bei dem aufgebauten System wurde ein Erbiumfaserlaser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1,54 \mu\text{m}$ verwendet. Während die LO-Frequenz unverändert bleibt, wird die des Messstrahls durch einen akustooptischen Modulator (AOM) um typischerweise 40 MHz oder 60 MHz verschoben. Anschließend wird der Messstrahl mit einer Teleskop-Optik auf die zu untersuchende Messstelle fokussiert. Treten dort Oberflächenschwingungen auf, wird der Messstrahl frequenzmoduliert (FM). Die Überlagerung von LO und auf den Detektor zurückgestreutem, frequenzmoduliertem Messstrahl erzeugt ein FM-Signal mit einer Trägerfrequenz von 40 MHz bzw. 60 MHz, wobei die Frequenzmodulation die Schwingungsinformation der Messoberfläche enthält. Der Vorteil dieses »Offset-Homodyne«-Verfahrens besteht darin, dass die Trägerfrequenz dieses FM-Signals deutlich geringer ist ($\sim 10^6$ Hz) als die des ursprünglichen Ausgangslaserstrahls ($\sim 10^{14}$ Hz) und somit einer geringeren Abtastfrequenz bedarf.

Bei dynamischen Messobjekten, wie z. B. Windkraftanlagen, tritt das Problem des Makro-Doppler-Effekts – also der Verschiebung der Trägerfrequenz – durch Bewegungen der Messoberfläche in Laserstrahlrichtung auf. Hierbei treten folgende Bewegungsarten auf

- Schwankung der gesamten Anlage verursacht durch
 - Windkräfte,
 - Massenunwucht der Rotorblätter,
 - aerodynamische Unwucht der Rotorblätter;
- Gondel-Drehung (Azimut) bei Änderung der Windrichtung;
- Rotorblattbewegung aufgrund der Drehung des Rotors;
- Rotorblatt-Drehung um die Blattlängsachse aufgrund der Pitch-Verstellung zur Drehzahlanpassung.

Gemäß der Gleichung $|\Delta f| = 2 v / \lambda$ ergibt sich beispielsweise für eine Geschwindigkeit der Messoberfläche in Laserstrahlrichtung von $v = 1 \text{ m/s}$ eine Trägerfrequenzverschiebung von $|\Delta f| = 1,3 \text{ MHz}$. Allerdings beträgt die Nyquist-Frequenz bei einem typischen Abtastintervall von $\Delta t = 4 \mu\text{s}$ nur $f_N = 0,5 / \Delta t = 120 \text{ kHz}$. Somit kann die eigentliche Oberflächenvibration lediglich für Trägerfrequenzverschiebungen bis maximal 60 kHz rekonstruiert werden. Eine Lösung hierfür ist natürlich, das Abtastintervall Δt zu verkleinern. Um aber z. B. eine Trägerfrequenzverschiebung von $|\Delta f| = 1,3 \text{ MHz}$ zu tolerieren, wird ein Abtastintervall von $\Delta t = 0,19 \mu\text{s}$ benötigt, also eine um den Faktor 21 größere Datenmenge. Für höhere Geschwindigkeiten der Messoberfläche steigt dieser Faktor entsprechend an.

Eine effizientere Lösung ist die Nachführung der durch das Abtastintervall entstehenden Bandbreite $B = 1 / \Delta t$ entsprechend der Verschiebung der Trägerfrequenz. Im Weiteren

wird auf die Abschätzung der zu erwartenden Trägerfrequenz-Verschiebungen eingegangen.

Für die Abschätzung wird angenommen, dass Bewegungseinflüsse aufgrund von Anlagen-Schwankung, Gondel-Drehung und Rotorblatt-Verstellung vernachlässigt werden können, da hier die Geschwindigkeiten der Messoberfläche in Laserstrahlrichtung als vergleichsweise gering anzusehen sind. Als maßgebliche Bewegung wird im Weiteren ausschließlich die Rotordrehung betrachtet. Zur Untersuchung des Bewegungseinflusses werden im Folgenden exemplarisch acht Windkraftanlagen der Firma Enercon betrachtet, da diese Modellreihe eine breite Palette hinsichtlich der Anlagengröße bietet. Der Rotordurchmesser d , die Nabenhöhe h , die maximale Rotordrehzahl D und die resultierende Rotorumlaufdauer T für diese acht Windkraftanlagen sind in Tabelle 2.7 aufgeführt.

Tabelle 2.7: Rotordurchmesser d , Nabenhöhe h , maximale Rotordrehzahl D und resultierende Rotorumlaufdauer T für die acht betrachteten Windkraftanlagen der Firma Enercon.

	E-33	E-44	E-48	E-53	E-70	E-82	E-101	E-126
d	33,4 m	44 m	48 m	52,9 m	71 m	82 m	101 m	127 m
h	37 m	45 m	50 m	60 m	57 m	78 m	99 m	135 m
D	45 min^{-1}	34 min^{-1}	31 min^{-1}	28,3 min^{-1}	21,5 min^{-1}	18,5 min^{-1}	14,5 min^{-1}	11,7 min^{-1}
$\Rightarrow T$	1,3 s	1,8 s	1,9 s	2,1 s	2,8 s	3,2 s	4,1 s	5,1 s

Für die Simulation des Makro-Doppler-Effekts wird eine Sensorhöhe über dem Boden von $h_0 = 1$ m, eine Entfernung zwischen Vibrometer und Windkraftanlage von $R = 300$ m und die maximale Rotordrehzahl D aus Tabelle 2.7 angenommen. Die simulierte Laserwellenlänge beträgt $\lambda = 1,57$ μm . Als fester Messpunkt wird die Flügelspitze eines Rotorblatts gewählt, da hier der Makro-Doppler-Effekt am größten ist.

Für einen beliebigen Zeitpunkt t , wobei t zwischen 0 s und T liegt, werden die Geschwindigkeitskomponente v_{LOS} (LOS: line of sight) der Flügelspitze eines Rotorblatts in Richtung des Laserstrahls sowie die dadurch entstehende Verschiebung der Trägerfrequenz Δf_{macro} des resultierenden FM-Signals berechnet. Zu Beginn der Simulation ($t = 0$ s) zeigt das Rotorblatt, auf dessen Flügelspitze die Messung simuliert wird, senkrecht nach oben.

In der Abbildung 2.12 sind die Geschwindigkeitskomponente v_{LOS} und die Trägerfrequenz Δf_{macro} für jede der acht betrachteten Windkraftanlagen jeweils in einem Schaubild in Abhängigkeit von der Zeit t dargestellt. Außerdem sind die Extrempunkte mit Angabe der Koordinaten markiert. Die zugehörigen Maximalwerte sind in Tabelle 2.8 zusammengestellt.

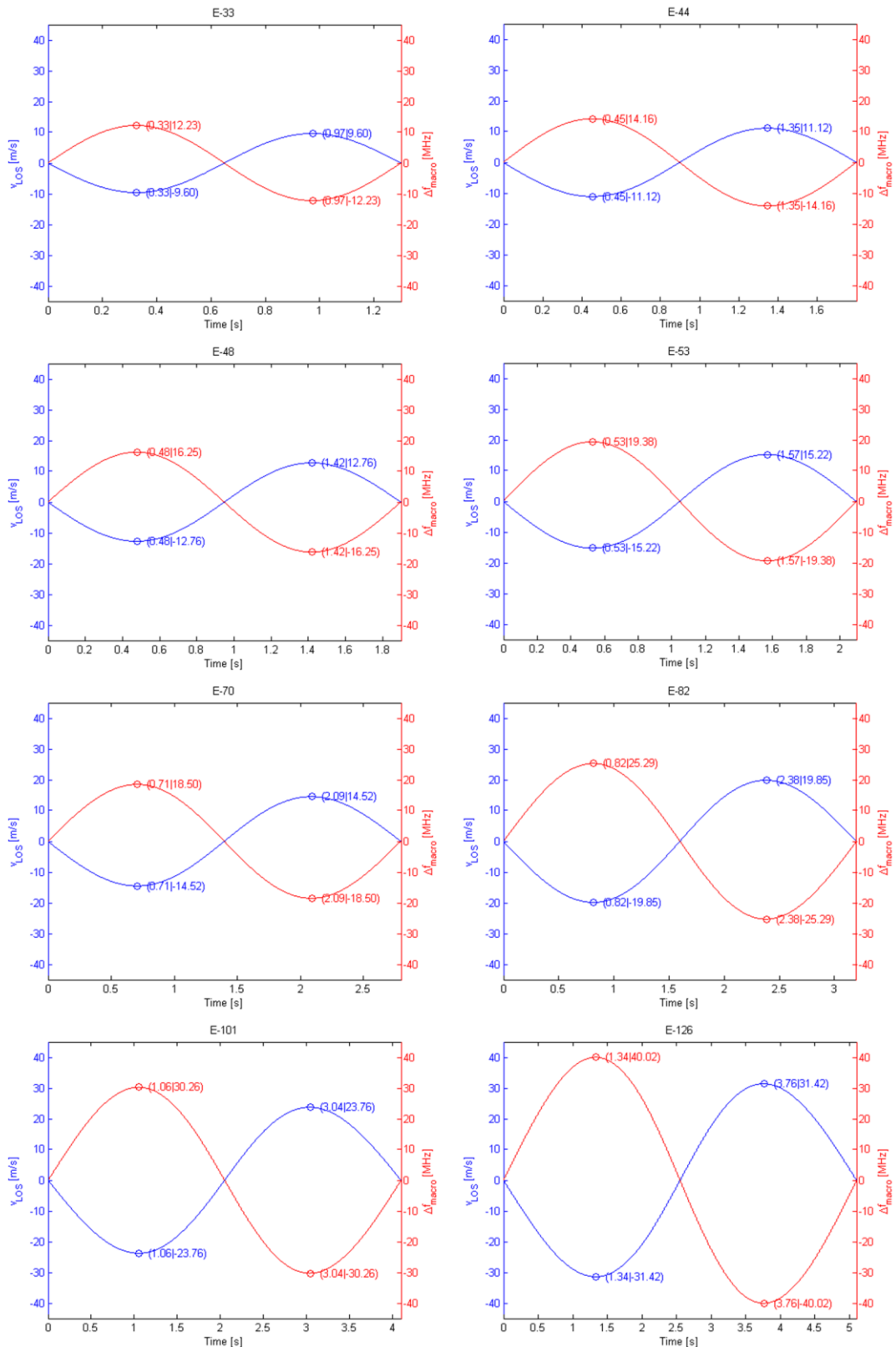


Abbildung 2.12: Ergebnisse der Simulation für die acht betrachteten Windkraftanlagen. Blaue Kurven: Geschwindigkeitskomponente v_{LoS} einer Flügelspitze in Richtung des Laserstrahls in Abhängigkeit von der Zeit t . Rote Kurven: Resultierende Verschiebung der Trägerfrequenz Δf_{macro} des aufgenommenen FM-Signals in Abhängigkeit von der Zeit t .

In Abbildung 2.12 ist ersichtlich, dass während eines Rotorumlafs die maximale Geschwindigkeitskomponente der Messoberfläche in Richtung des Laserstrahls von 9,6 m/s für die kleinste Windkraftanlage E-33 bis 31,4 m/s für die größte Windkraftanlage E-126 reicht. Die resultierenden Trägerfrequenz-Verschiebungen liegen folglich bei maximal 12,2 MHz bzw. 40 MHz.

Neben der maximalen Trägerfrequenz-Verschiebung ist deren maximale Änderungsrate eine wichtige Größe, die bei der technischen Umsetzung der Makro-Doppler-Kompensation berücksichtigt werden muss.

Deshalb werden im Folgenden zu einem beliebigen Zeitpunkt t , wobei t wieder zwischen 0 s und T liegt, die Änderungsrate der Geschwindigkeitskomponente v_{LOS} (also die Beschleunigung) und die Änderungsrate der Trägerfrequenz-Verschiebung Δf_{macro} berechnet und mit dv_{LOS}/dt bzw. $d\Delta f_{macro}/dt$ bezeichnet. Zugehörige Verläufe sind in Abbildung 2.13 für jede der acht betrachteten Windkraftanlagen jeweils in einem Schaubild in Abhängigkeit von der Zeit t dargestellt. Entsprechende Maximalbeträge sind ebenfalls in Tabelle 2.8 zusammengestellt.

In Abbildung 2.13 ist ersichtlich, dass während eines Rotorumlafs der Betrag der maximalen Änderungsrate der Trägerfrequenz-Verschiebung von 42,4 MHz/s für die Windkraftanlage E-70 bis 59,5 MHz/s für die kleinste Windkraftanlage E-33 reicht. Als Begründung für das nicht monoton ansteigende Verhalten dieser Änderungsrate für größer werdende Windkraftanlagen kann die größer werdende Rotorumlaufdauer T (siehe Tabelle 2.7) herangezogen werden.

Die beschriebene Abschätzung der Makro-Doppler-Größen, die bei der Laserabtastung eines Punktes auf dem Rotorblatt auftreten, bietet die Grundlage für die technische Umsetzung der Makro-Doppler-Kompensation.

Tabelle 2.8: Maximalwerte der Geschwindigkeitskomponente v_{LOS} , der Trägerfrequenz-Verschiebung Δf_{macro} und der Änderungsrate der Trägerfrequenz-Verschiebung $d\Delta f_{macro}/dt$ für die acht betrachteten Windkraftanlagen.

	E-33	E-44	E-48	E-53	E-70	E-82	E-101	E-126
$v_{LOS,max}$	9,6 m/s	11,1 m/s	12,8 m/s	15,2 m/s	14,5 m/s	19,9 m/s	23,8 m/s	31,4 m/s
$\Delta f_{macro,max}$	12,2 MHz	14,2 MHz	16,3 MHz	19,4 MHz	18,5 MHz	25,3 MHz	30,3 MHz	40 MHz
$(d\Delta f_{macro}/dt)_{max}$	59,5 MHz/s	50 MHz/s	54,4 MHz/s	59 MHz/s	42,4 MHz/s	51,3 MHz/s	48,8 MHz/s	53,4 MHz/s

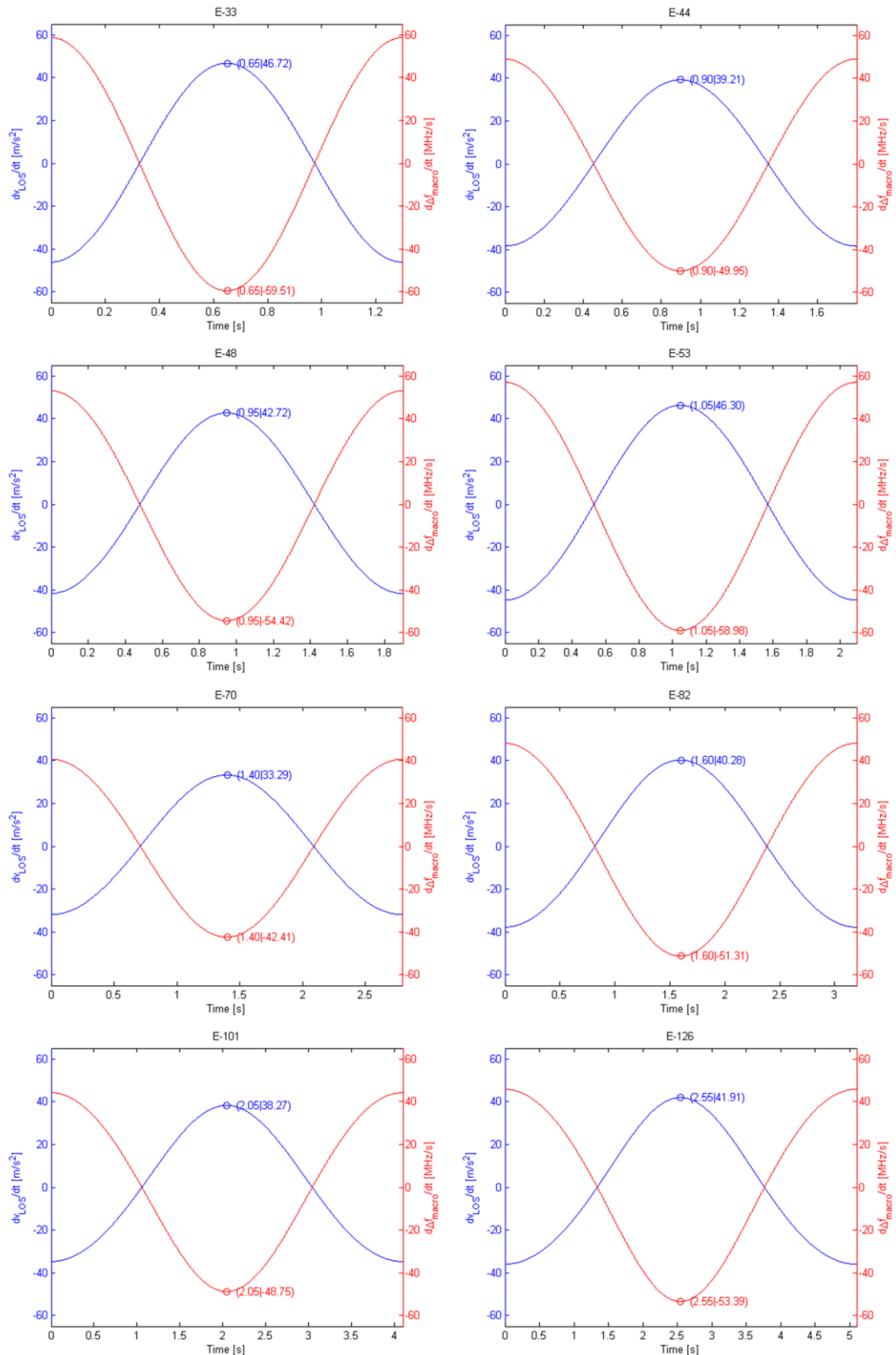


Abbildung 2.13 Ergebnisse der Simulation für die acht betrachteten Windkraftanlagen. Blaue Kurven: Änderungsrate der Geschwindigkeitskomponente v_{LOS} einer Flügelspitze in Richtung des Laserstrahls in Abhängigkeit von der Zeit t . Rote Kurven: Änderungsrate der resultierenden Verschiebung der Trägerfrequenz Δf_{macro} des aufgenommenen FM-Signals in Abhängigkeit von der Zeit t .

2.1.2.3 Aufbau der Makro-Doppler-Kompensation

Zum Test des Dynamikverhaltens des Laser-Vibrometers zusammen mit der Regelungselektronik wurde ein Makro-Doppler-Simulator aufgebaut, der die Dopplerefrequenzen und -beschleunigungen, die bei der Blattnachführung auftreten können, abdecken kann (siehe dazu Abschnitt 2.1.2.2). Der Makro-Doppler-Simulator, wie in der Abbildung 2.14 links gezeigt, besteht aus einem schnell rotierenden Rad mit einem Durchmesser von 20 cm und einer Laufflächenbreite von 4 cm. Bei der Raddrehzahl von 2500 U/min wird eine maximale Dopplerverschiebung von ± 67 MHz erreicht.

Wie die Prinzipskizze in Abbildung 2.14 rechts verdeutlicht, ist die Doppler-Verschiebung entsprechend der tangentialen Geschwindigkeitskomponente abhängig von der jeweiligen Lage des Auftreffpunktes des Laserstrahls auf der Lauffläche des rotierenden Rades. Durch die periodische Auf- und Abwärtsbewegung des Auftreffpunktes um den Mittelpunkt lässt sich eine sinusförmige Änderung der Doppler-Verschiebung simulieren, die dem zu erwartenden Doppler-Verhalten bei der Nachführung des Laserstrahls auf einem Rotorblatt entspricht. Im Versuch wurde das Laser-Vibrometer hierzu auf einem Schwenk-Neigekopf montiert, mit dem die sinusförmige Neigebewegung ausgeführt wurde.

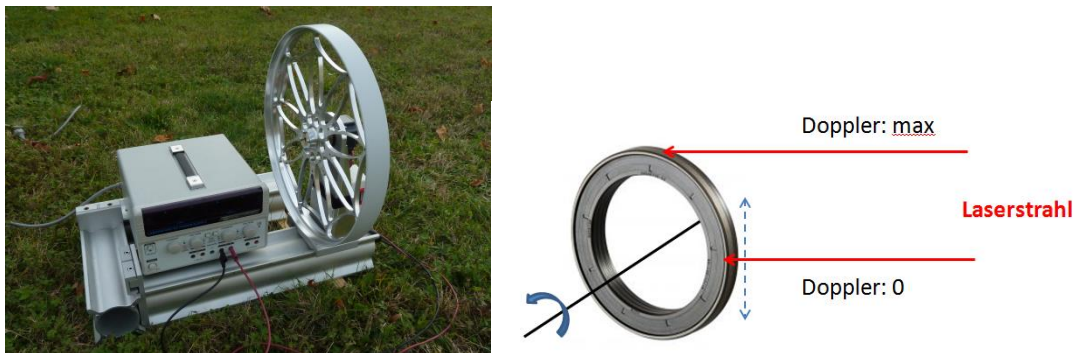


Abbildung 2.14: Experimenteller Aufbau (links) und Prinzip (rechts) des Makro-Doppler-Simulators. Durch eine vertikale Bewegung des Laserstrahls auf der Lauffläche des sich drehenden Rades (blaue gestrichelte Linie) kann die auf den Laserstrahl aufgeprägte Makro-Doppler-Verschiebung geändert werden.

Um gleichzeitig auch einen Mikro-Doppler (Vibrationen) zu erzeugen, wird der transmittierte Strahl periodisch in der Frequenz geringfügig verschoben. Zu beachten ist, dass der Strahl hier im Gegensatz zur realen Messung an der Windkraftanlage bereits moduliert auf das Ziel trifft und somit ein geändertes Speckle-Verhalten zeigen kann. Der Vorteil der gewählten Versuchsanordnung besteht zum einen in ihrem vergleichsweise einfachen Aufbau. Zum anderen kann mit ihr ein definierter Modulationshub, der einer entsprechenden Schwingungsamplitude entspricht, mittels eines elektrischen Signalgenerators exakt eingestellt werden.

Prinzipiell kann die Nachführung des Makro-Dopplers auf zwei Arten erfolgen:

- Verwendung eines PLL (phased lock loop)-Regelkreises,

- Auswertung der vom bildbasierten Trackingmodul gelieferten aktuellen Relativgeschwindigkeit zwischen Laser-Vibrometer und Rotorblatt.

Im Testaufbau mit einem Zwei-Kanal-Detektor wurde die Nachführung bislang über einen PLL-Regelkreis realisiert. Hierbei konnte ein zufriedenstellendes dynamisches Verhalten dieser Makro-Doppler-Nachführung festgestellt werden. Die Abbildung 2.15 zeigt die graphische Darstellung der Messergebnisse bei einem erfolgreichen Test der Nachführ-Elektronik. Die Messungen erfolgten am Makro-Doppler-Simulator, der in einer Entfernung von ca. 70 m aufgestellt wurde.

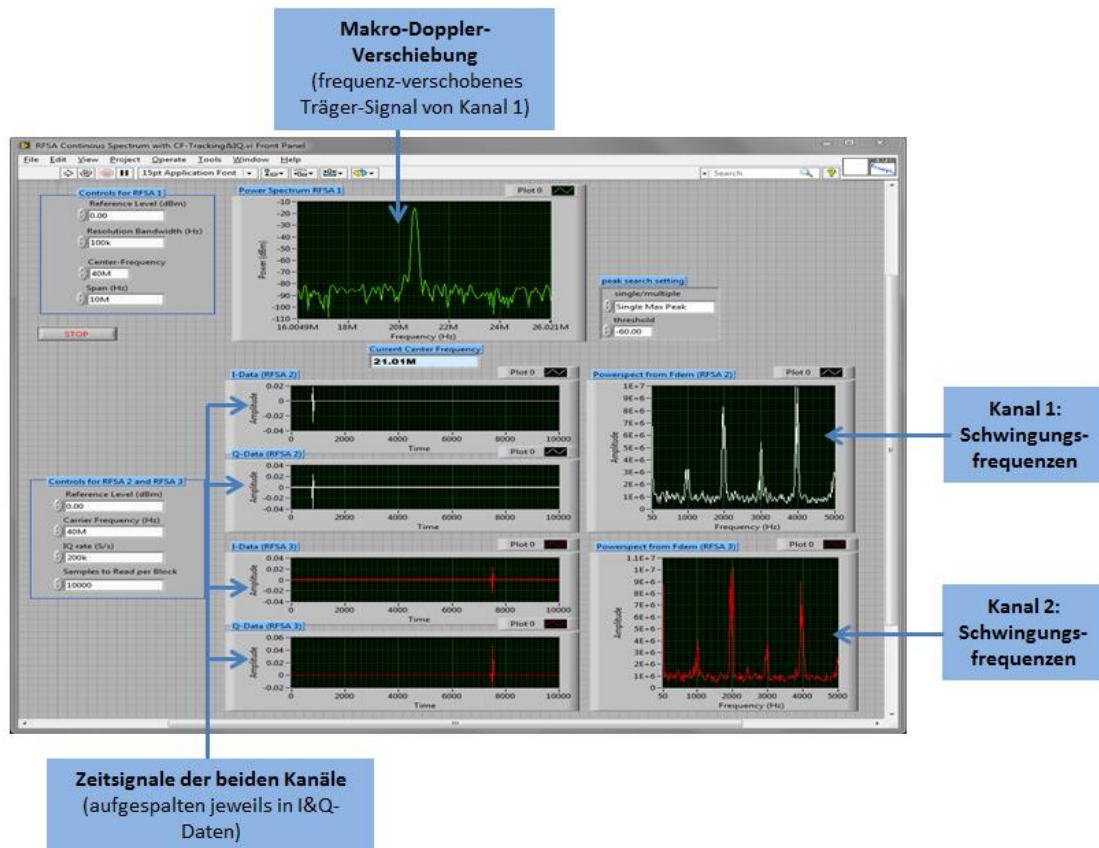


Abbildung 2.15: In LabVIEW realisierte graphische Bedienoberfläche mit der Darstellung von Messergebnissen beim Test der Makro-Doppler-Nachführungs-Elektronik.

2.1.2.4 Erzeugung synthetischer Vibrationssignale zu Testzwecken

Mit dem im voranstehenden Abschnitt beschriebenen Makro-Doppler-Simulator können zwar realistische Makro-Doppler-Verschiebungen erzeugt werden, aber andere Effekte, wie der Speckle-Effekt, können nicht realistisch im Sinne der späteren Anwendungen realisiert werden. So reicht die Speckle-Bandbreite, die am schnell drehenden Rad des Makro-Doppler-Simulators auftritt, weit in den MHz-Bereich. Die theoretisch abgeschätzten geringeren Speckle-Bandbreiten (siehe Tabelle 2.3), wie sie für den realen Betrieb zu erwarten sind, liegen demgegenüber lediglich im Bereich bis höchstens 25 kHz, welches die Erfassung geringer Schwingungsamplituden begünstigt.

Um realistische Tests der gesamten Signalverarbeitungskette, die wie bereits erläutert auf einer National Instruments-Plattform realisiert wurde, durchführen zu können, wurde ein Softwarewerkzeug auf MATLAB-Basis entwickelt. Hiermit ist es möglich, folgende synthetischen Testsignale zu erzeugen und Störeinflüsse zu simulieren:

- Frequenzmoduliertes Trägersignal,
- Interferenz durch das Auftreten zusätzlicher Träger,
- Additiv und multiplikativ (Speckle) überlagertes Gaußsches Rauschen,
- FM-Demodulation durch Anwendung einer Autokorrelation-Methode mit entsprechenden Bandpass-Filterungs-Möglichkeiten.

Die mit dem Softwarewerkzeug erzeugten Signaldaten werden über einen sogenannten Vektor-Signalgenerator, der auch auf der NI-Plattform implementiert ist, als Spannungssignale ausgegeben und zu Testzwecken anstatt realer Laser-Vibrometer-Signale in die elektronische Verarbeitungskette des Laser-Vibrometers eingespeist. Die Abbildung 2.16 zeigt den gerätetechnischen Aufbau der NI-Plattform.

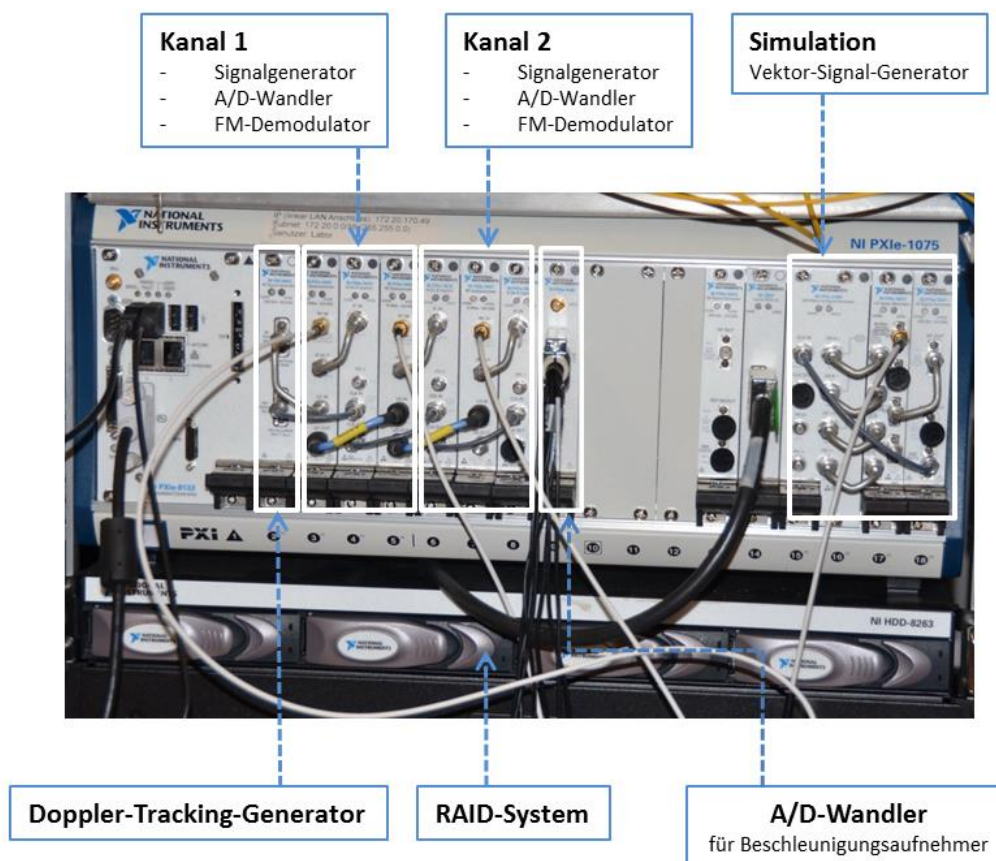


Abbildung 2.16: National Instruments-Plattform zur Datenaufnahme und Visualisierung mit RAID-System zur schnellen Speicherung großer Datenmengen; Erweiterung durch ein Vektor-Signalgenerator-Modul zum flexiblen Test der Verarbeitungskette.

2.1.2.5 Aufbau und Optimierung des Zwei-Kanal-Detektors

Die Abbildung 2.17 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Zwei-Kanal-Systems mit einem »polarisation diversity«- Detektor und mit passiven und aktiven Maßnahmen zur Kompensation von Schwingungen der das Lasersystem tragenden Plattform.

Das Gesamtsystem besteht aus den drei getrennten Einheiten Lasereinheit, Sensorkopf und Rechereinheit, die im Weiteren beschrieben werden.

- **Lasereinheit**

Beim »Offset-Homodyne«-Verfahren wird dieselbe Laserquelle für Sende- und Lokaloszillator benutzt, wobei der Sendestrahl über einen akusto-optischen Modulator (AOM) in der Frequenz verschoben wird. Ein DFB (distributed feedback) – Erbiumfaserlaser mit einer Ausgangsleistung von 10 mW wird über einen Faser-Stahlteiler in drei Teilstrahlen aufgeteilt. Der eine Teilstrahl wird über einen AOM in der Frequenz um 60 MHz verschoben und anschließend über einen 1-Kanal-Faser-Verstärker auf die erforderliche Ausgangsleistung gebracht. Die Ausgangsleistung kann hierbei auf 2 W verstärkt werden, sie wird aber im Normalfall auf 200 mW begrenzt. Ein zusätzlicher optischer Isolator zwischen AOM und Strahlteiler verhindert eine unerwünschte Rückkopplung der durch den AOM frequenzverschobenen Strahlung in die Fasern der zwei Lokaloszillatoren. Die zwei anderen Teilstrahlen des 1:3-Strahlteilers dienen als Lokaloszillatorstrahlen (senkrechte und waagrechte Polarisationsrichtung getrennt).

- **Sensorkopf**

Die drei Laserausgänge der Lasereinheit werden über 5 m lange Panda-Fasern (Polarisation erhaltende Fasern), die zusätzlich eine bewegliche Metallummantelung zum Schutz haben, in der »slow-axis« der Faser mit dem optischen Kopf verbunden. Beide Lokaloszillatorstrahlen werden innerhalb des optischen Kopfes mit dem Signal des Empfängerstrahls mittels einer Panda-Faser über einen 2x2-Faserkoppler auf die zwei Detektoreinheiten (senkrechte und waagrechte Polarisation) geführt. Die Verwendung von Balance-Detektoren dient zu einer zusätzlichen Reduzierung von Laser-Intensitätsschwankungen (RIN: laser intensity noise). Um eine einfachere Justierung des Sende- auf den Empfangsstrahl zu ermöglichen, wurde ein zusätzlicher Faser-Zirkulator vor der Empfangsoptik in den optischen Pfad eingebracht. Der Zirkulator ermöglicht es, einen zusätzlichen Justierlaser von außen anzukoppeln. Der Strahl wird nur in Richtung des Empfängers durchgelassen. Mit Hilfe einer Kamera können dann beide Strahlen auf dem Ziel in Deckung gebracht werden. Für die genaue Justierung des Sende- und Empfangsstrahls wurden elektrisch ansteuerbare XYZ-Positionierer eingebaut. Zur Kompensation von Plattform-Schwingungen wurde ein 3-achsiger Beschleunigungsaufnehmer in der Nähe der Sendeoptik verbaut.

- **Rechereinheit**

Die Detektorsignale (ZF-Signale) für die senkrechten und waagrechten Polarisationskomponenten und die Signale des 3-achsigen Beschleunigungsaufnehmers werden getrennt mit der NI-PXI-Plattform aufgezeichnet, verarbeitet und visualisiert.

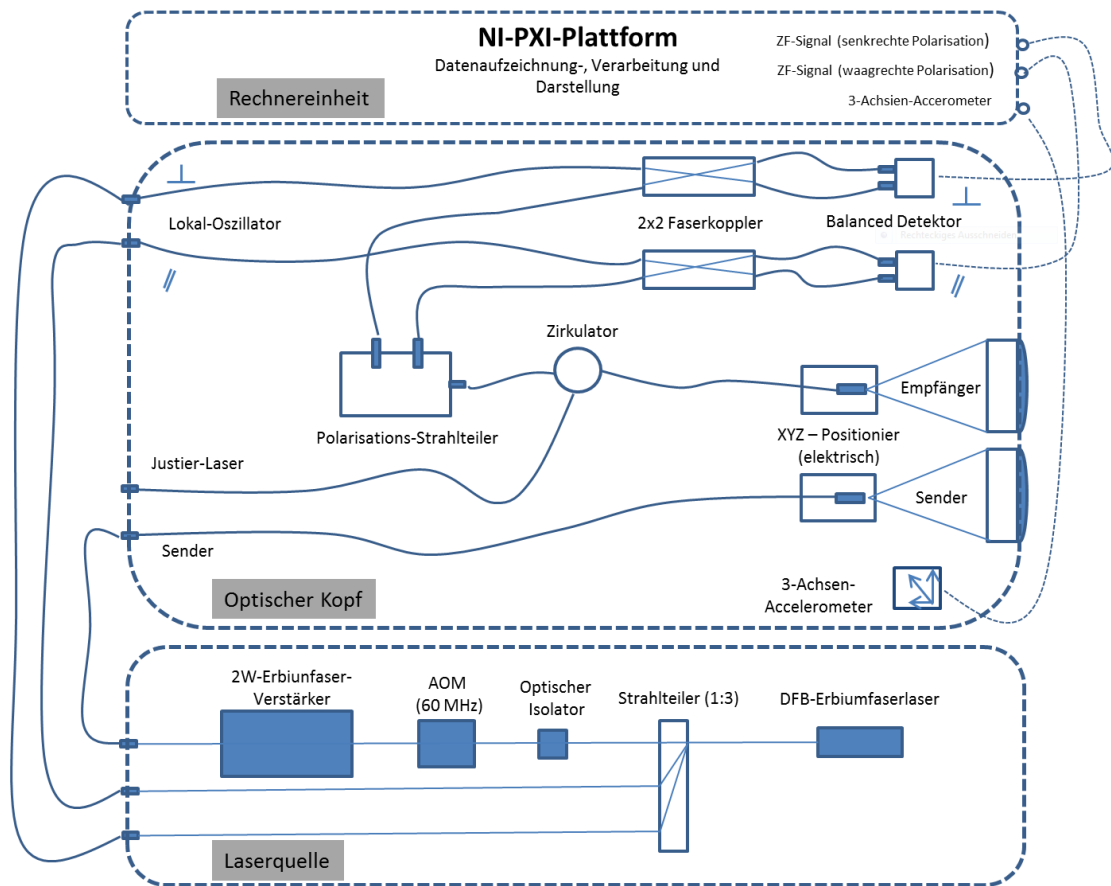


Abbildung 2.17: Aufbau des Zwei-Kanal-Systems mit passiven und aktiven Maßnahmen zur Plattform-Schwingungskompensation.

Auf die Erweiterung des Systems zur Kompensation von Plattform-Schwingungen wird im Weiteren näher eingegangen.

Die Leistungsfähigkeit eines Laser-Vibrometers kann durch den Einfluss interner und externer Schwingungsquellen bzw. akustischer Störquellen stark vermindert werden. Dies zeigt sich besonders beim Einsatz in rauer Umgebung. Deshalb wurden bei dem aufgebauten Laser-Vibrations-System sowohl passive als auch aktive Techniken untersucht, um es gegen diese Störeinflüsse unempfindlicher zu machen. So können Störeinflüsse, die durch Eigenschwingungen der Sensor-Plattform hervorgerufen werden, durch passive und aktive Maßnahmen reduziert werden.

Zu den passiven Maßnahmen zählen neben akustischen Dämpfungsmaßnahmen, wie der Einsatz schwingungsarmer mechanischer Komponenten, auch folgende optische Maßnahmen. So wurden die einzelnen optischen Weglängen des Systems möglichst ähnlich gewählt, so dass sie zeitlich den gleichen Störeinflüssen unterliegen. Insbesondere sind bei einem faser-basierten System gleiche optische Weglängen von Sende- und Lokaloszillatorstrahl wesentlich, welches hier durch die Verwendung von »Twin«-Fasern realisiert wurde. Beide Strahlen, d.h. Sendestrahl und LO-Strahl, werden hierbei vom externen Laser über diese »Twin«-Fasern zum optischen Kopf geführt.

Für eine aktive Kompensation der Plattformschwingungen wurde ein dreiachsiger Beschleunigungssensor in der Nähe der Sende-/Empfängeroptiken angebracht. Im

Versuch wurden die Vibrometersignale (I&Q-Daten) sowie die drei Signale des dreiachsigen Beschleunigungssensors synchron erfasst und hinsichtlich der Schwingungskompensation offline ausgewertet. Für die adaptive Filterung der Vibrometersignale wurde ein »Least-Mean-Squares« (LMS)-Algorithmus verwendet, der inzwischen auch in einer Echtzeitumgebung realisiert wurde. Bei dieser adaptiven Filterung erfolgt eine Subtraktion derjenigen Anteile des Nutzsignals, die mit dem jeweiligen Beschleunigungssignal als Referenzsignal korreliert sind.

Zur Verfahrensentwicklung und Validierung der adaptiven Filterung wurde im Experiment eine Lautsprechermembran mit dem Laservibrometer aus einer Entfernung von ca. 70 m abgetastet und wurde während der Messung die Plattform durch starkes Fingerklopfen zu Schwingungen angeregt.

Die Abbildung 2.18 zeigt beispielhaft ein im Versuch gewonnenes Leistungsdichtespektrum (rote Kurve) sowie das hieraus durch adaptive Filterung erhaltene Spektrum (grüne Kurve), wobei hier im Versuch die Lautsprechermembran mit einer Frequenz von 82 Hz angeregt wurde. Beim Vergleich der beiden Spektren ist eine deutliche Verbesserung des lokalen Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) im gefilterten Spektrum bei der fraglichen Frequenz von 82 Hz festzustellen. Allerdings wird hier im höheren Frequenzbereich das Rauschniveau durch die adaptive Filterung angehoben.

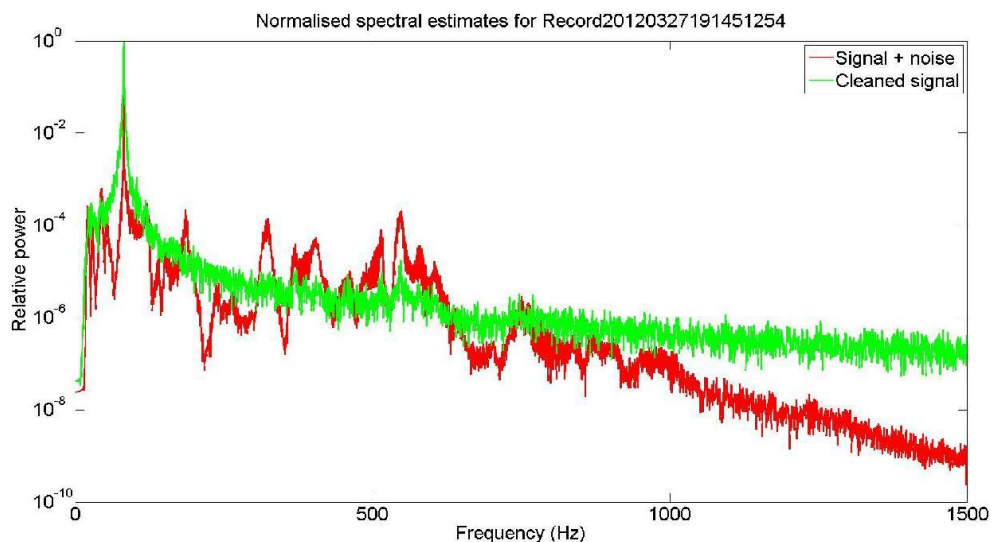


Abbildung 2.18: Leistungsdichtespektrum vor (rot) und nach (grün) der Störungskompensation mit adaptiver Filterung.

Die Abbildung 2.19 zeigt ein weiteres Beispiel für die Anwendung der adaptiven Filterung. Die Schwingfrequenz des Lautsprechers wurde hier auf 620 Hz eingestellt und liegt damit in dem Frequenzbereich, in dem auch maßgeblich Energie durch das Fingerklopfen in die System-Plattform eingebracht wurde und zu starken Störungen im Bereich um 600 Hz führt. Mit der hier angewendeten Störungskompensation mittels adaptiver Filterung wird das lokale SNR des Nutzsignales bei 620 Hz deutlich verbessert sowie die Rauschleistung im gesamten betrachteten Frequenzbereich reduziert, wie beim Vergleich der beiden in der Abbildung 2.19 gezeigten Spektren deutlich wird.

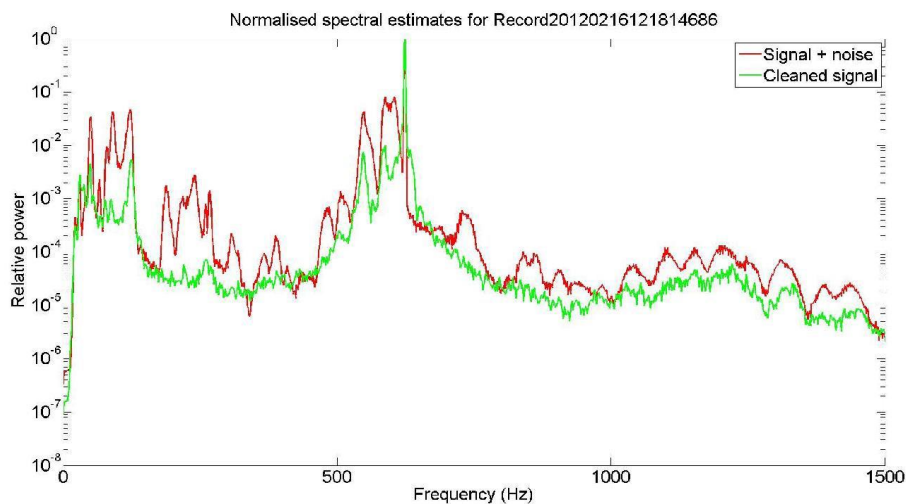


Abbildung 2.19: Leistungsdichtespektrum vor (rot) und nach (grün) Störungskompensation mit adaptiver Filterung.

2.2 Ergebnisse im Arbeitspaket 2 »Entwicklung von Bildauswertungsverfahren für die Bewegungserfassung

2.2.1 Arbeitspaket 2.1 »Bildfolgenerfassung und -aufbereitung«

Für die Entwicklung der Bildauswertungsverfahren zur kamerabasierten Verfolgung des Rotorblatts wurden an einer Windkraftanlage Bildfolgen aufgezeichnet. Um von Beleuchtungseinflüssen, die die Auswertung von Bildern im sichtbaren Bereich erschweren, möglichst weitgehend unabhängig zu sein, wurden für die Bilderfassung auch Kameras mit hoher Empfindlichkeit im Infrarotbereich eingesetzt. Insbesondere wurden bezüglich der Bildauswertungsverfahren zur Verfolgung des drehenden Rotorblatts als Grundlage für die Nachführung des Laserstrahls Bilder im kurzwelligen Infrarotbereich (SWIR-Band⁵) sowie im langwelligen Infrarotbereich (LWIR-Band⁶) aufgezeichnet. Auf die Auswertung derartiger Bildfolgen wird im Abschnitt 2.2.3 eingegangen.

2.2.2 Arbeitspaket 2.2 »Bildverarbeitungsverfahren, translatorische Bewegung«

2.2.2.1 Aufgabenstellung

Zumindest aufgrund der windinduzierten Eigenbewegung der Windkraftanlage tritt eine Relativbewegung zwischen Messsystem und Anlage auf. Bei der laserbasierten Schwingungserfassung muss der Laser dieser Bewegung nachgeführt werden, damit der

⁵ Das SWIR-Band (engl. short-wavelength infrared) bezeichnet den Wellenlängen-Bereich von 1,4 μm bis 3 μm .

⁶ Das LWIR-Band (engl. long-wavelength infrared) bezeichnet den Wellenlängen-Bereich von 8 μm bis 15 μm .

Laser-Zielfleck innerhalb des erforderlichen Abtastzeitraums auf der avisierten Stelle an der Anlage verbleibt. Die Bewegung wird hierbei optisch mittels einer Kamera erfasst, wobei die Kamera kontinuierlich Bilder aufzeichnet, aus denen dann mittels digitaler Bildverarbeitung schritthaltend die Bewegungsparameter ermittelt werden, mit denen wiederum die Nachführeinheit gesteuert wird. Im Rahmen des hier betrachteten Arbeitspakets wird davon ausgegangen, dass das Messsystem feststeht und sich nur die Anlagenkomponenten bewegen. Des Weiteren werden hier der Turm und insbesondere die Gondel betrachtet. Auf Methoden zur Erfassung der Rotorbewegung wird im Abschnitt 2.2.3 eingegangen. Aufgrund des räumlichen Abstands zwischen Messsystem und Anlage sowie der Verwendung eines Kameraobjektivs mit großer Brennweite erscheint unter diesen Voraussetzungen die Relativbewegung im Bild in guter Näherung als eine reine Translation. Zur Erfassung dieser vergleichsweise einfachen Bewegung können vorteilhafterweise leistungsfähige Algorithmen herangezogen werden, mit denen der Echtzeitanforderung der Lasernachführung Rechnung getragen wird. Beispielhaft zeigt die Abbildung 2.20 zwei überlagerte Bilder einer Gondel für die Situation, dass sich die Anlage im Zeitraum zwischen den Aufnahmezeitpunkten der beiden Bilder relativ zum Messsystem bewegt hat.

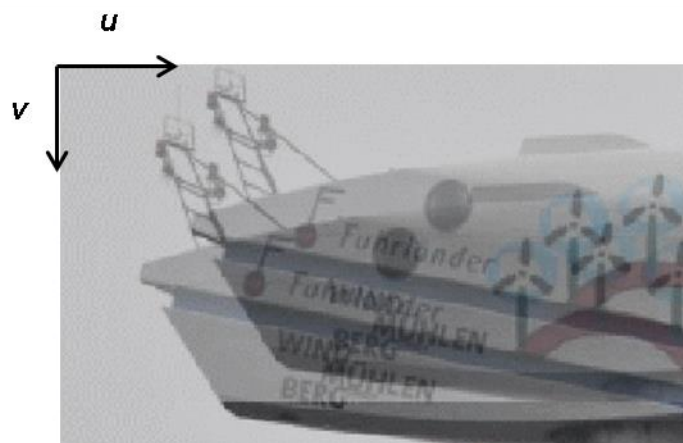


Abbildung 2.20: Zwei überlagerte Bilder einer Gondel bei ausgeprägter Relativbewegung zwischen Messsystem und Anlage, (u,v)-Bildkoordinatensystem.

2.2.2.2 Korrelationsanalyse zur Translationsschätzung

Eine Standardmethode zur Translationsschätzung basiert auf der Berechnung und Auswertung der Kreuzkorrelationsfunktion. Korrelationsfunktionen lassen sich sowohl im Ortsbereich als auch unter Anwendung der schnellen Fourier-Transformation (FFT) im Frequenzbereich berechnen. Die Berechnung im Frequenzbereich bietet bei einem großen Umfang zu verarbeitender Signaldaten und daher insbesondere bei Bilddaten gegenüber der Berechnung im Ortsbereich einen deutlichen Vorteil hinsichtlich des Rechenaufwands. Aus diesem Grund wurde hier die Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion im Frequenzbereich auf Basis der schnellen Fourier-Transformation implementiert. Die Abbildung 2.21 zeigt den Verlauf des Kreuzkorrelationskoeffizienten als Ergebnis der schnellen Korrelation der in der Abbildung 2.20 dargestellten Bilder.

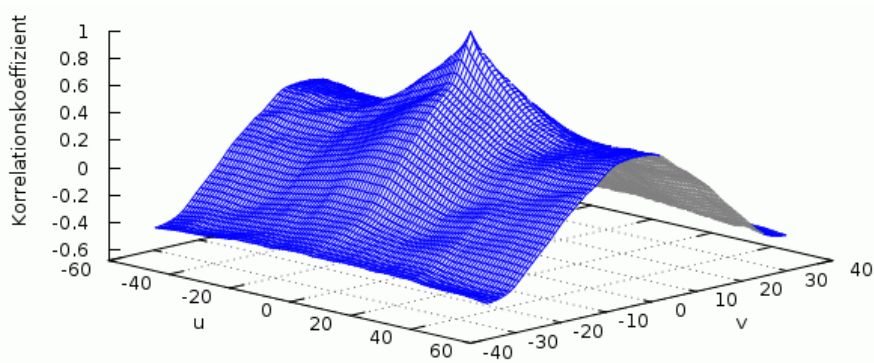


Abbildung 2.21: Kreuzkorrelationsfunktion der in der Abbildung 2.20 gezeigten Bilder.

Unter Zugrundelegung des in der Abbildung 2.20 gezeigten Koordinatensystems kennzeichnen die Koordinaten (u, v) des absoluten Maximums dieser Funktion den gesuchten Verschiebungsvektor (du, dv) . Damit bestimmt die Genauigkeit, mit der die Lage des Maximums bestimmt werden kann, unmittelbar die Genauigkeit der so bestimmten Verschiebung. Im Hinblick auf eine subpixelgenaue Bestimmung der Verschiebung ist insbesondere bei hochfrequenten Bildsignalen eine Bandbegrenzung der Korrelationsfunktion erforderlich. So zeigt die Abbildung 2.22 die in der Abbildung 2.21 dargestellte Kreuzkorrelationsfunktion nach Bandbegrenzung. Aufgrund des »abgerundeten« Verlaufs der Funktion im Bereich des absoluten Maximums ist hier eine bessere Interpolation der Lage des Maximums möglich. Im Hinblick auf möglichst geringen Verarbeitungsaufwand wurde die Bandbegrenzung hier mittels des Frequenzabtastverfahrens realisiert.

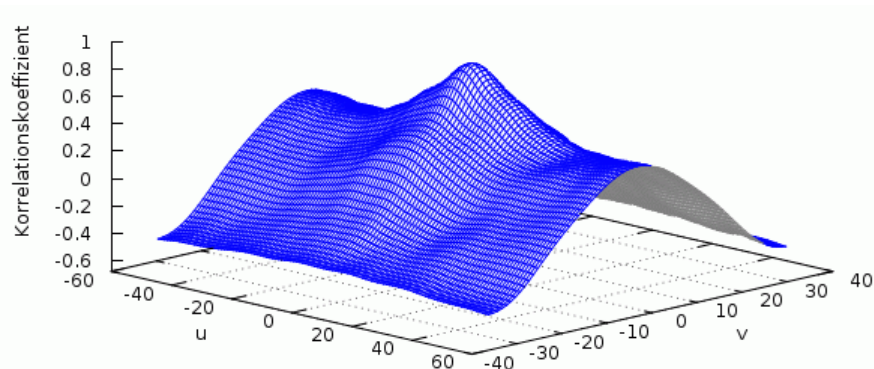


Abbildung 2.22: Kreuzkorrelationsfunktion der in der Abbildung 2.20 gezeigten Bilder nach Bandbegrenzung.

Abschließend zeigt die Abbildung 2.23 die implementierte Verarbeitungskette zur Verschiebungsbestimmung mittels schneller Korrelation.

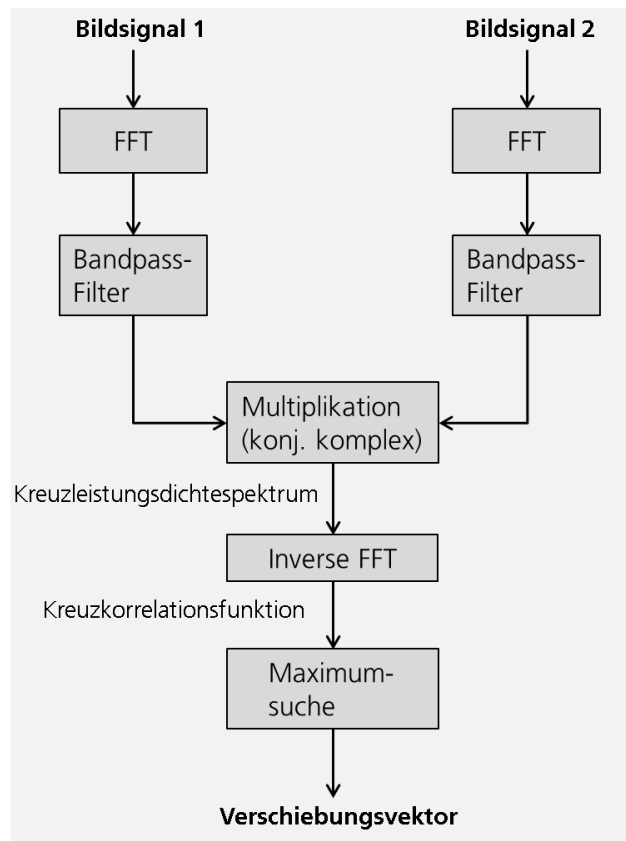


Abbildung 2.23: Verarbeitungsschritte für die Verschiebungsbestimmung mittels schneller Korrelation.

2.2.2.3 Prototypische Implementierung

Aufbauend auf den im Abschnitt 2.2.2.2 beschriebenen Konzeption und Untersuchungen wurde für die Kompensation der translatorischen Bewegungen ein Softwareprototyp erstellt. Damit können Bildfolgen automatisch verarbeitet werden, wobei jeweils ein Bild einer Bildfolge als Referenzbild dient und die Verschiebung jedes Bildes der Bildfolge bezüglich dieses Referenzbildes berechnet und kompensiert wird. Als Ergebnis wird eine stabilisierte Bildfolge erhalten. Die automatische Auswertung von Bildfolgen bietet hier aufgrund vergleichsweise geringer Rechenzeiten die Möglichkeit zur effizienten Bewegungskompensation. Vorteile der hier gewählten, auf der schnellen Korrelation basierenden Algorithmik besteht in ihrer Robustheit und dem minimalen Parametrierungsaufwand. Dies konnte anhand umfangreicher Bilddaten, aufgenommen bei unterschiedlichen Beleuchtungsrandbedingungen, verifiziert werden.

2.2.3 Arbeitspaket 2.3 »Bildverarbeitungsverfahren, Blattverfolgung«

2.2.3.1 Aufgabenstellung

Zur Nachführung eines Laser-Zielflecks auf einem sich bewegenden Rotorblatt einer Windkraftanlage muss zu jedem Zeitpunkt die Position des Rotorblatts erfasst werden. Eine Extrapolation aus der Umlauffrequenz ist nur über sehr kurze Zeiträume möglich, da sich die Umlauffrequenz je nach Windverhältnissen unvorhersehbar auch bereits

innerhalb einer Umdrehung ändern kann. Die Erfassung der Rotorblattposition erfolgt durch Aufnahme der gesamten Anlage mit einer stationären Kamera. Die Rotorblattposition sowie die Umlauffrequenz und die Lage der Rotationsebene relativ zum Kamerasystem werden mittels Bildverarbeitungs- und -auswertungsmethoden bestimmt.

2.2.3.2 Stand der Technik

Zur laserbasierten Schwingungsabtastrung rotierender Strukturen wie beispielsweise Turbinenschaufeln werden, wie der aktuelle Veröffentlichungsstand zeigt, generell so genannte »on-axis«-Messanordnungen eingesetzt, bei denen die optische Achse des Messsystems in Richtung der Drehachse des rotierenden Objekts orientiert ist. Beispielhaft zeigt die Abbildung 2.24 eine solche Anordnung. Hierbei erfolgt die rotationssynchrone Ablenkung des Laserstrahls durch einen kleinen, mit dem Messobjekt mechanisch verbundenen Spiegel, der unter einem Winkel von 45° zur Drehachse auf der Drehachse angebracht ist. Die weitere Ablenkung des Strahls auf das rotierende Objekt erfolgt über einen feststehenden, konischen Spiegel. Somit bleibt der vom Laserstrahl abgetastete Punkt bezüglich des rotierenden Objekts immer an derselben Stelle.

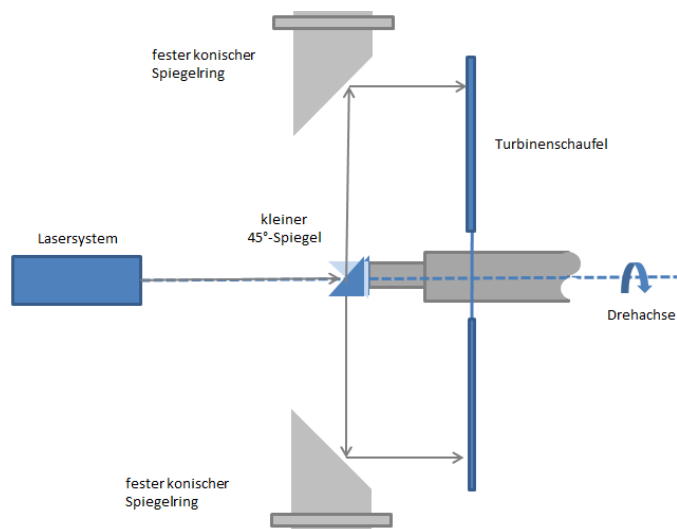


Abbildung 2.24: »On axis«-Messanordnung zur laserbasierten Schwingungsmessung an rotierende Strukturen mit mechanisch gekoppeltem, mitrotierendem Spiegel.

Bei der in der Abbildung 2.25 dargestellten Messanordnung erfolgt demgegenüber die Nachführung des Laserstrahls mittels des Signals eines Drehgebers, der fest mit dem rotierenden Messobjekt verbunden ist. Beispielsweise wird von der Firma Polytec ein Lasermesssystem angeboten, das ein scannendes Laservibrometer mit einem so genannten Derotator kombiniert [Polytec 2010]. Beim Derotator wird die Drehzahl der optischen Komponente (Dove-Prisma) mittels Regelung kontinuierlich an die Drehzahl des Messobjekts angepasst.

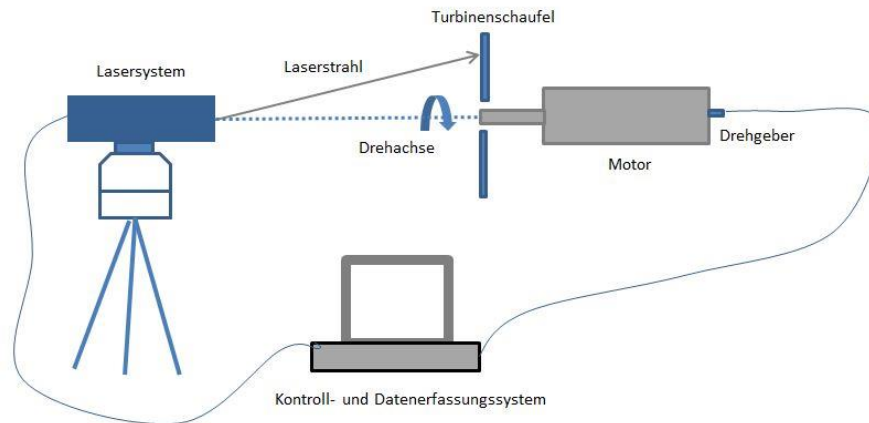


Abbildung 2.25: »On-axis«-Messanordnung zur laserbasierten Schwingungsmessung an rotierenden Strukturen; Strahlnachführung mittels Drehgeber.

Eine »on-axis«-Messanordnung in der gezeigten Art ist für den Rotor einer Windkraftanlage grundsätzlich nicht einsetzbar, da sich das Messsystem am Boden und nicht in Höhe der Rotorachse befindet. Des Weiteren wäre es zum einen nicht praktikabel, für die Messung einen Spiegel an der Nabe anzubringen, und würde zum anderen auch kein Drehgebersignal am Messort zur Verfügung stehen.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden folgende Veröffentlichungen betrachtet:

[Polytec 2010] Polytec GmbH: Optische Messsysteme: Flächenhafte Schwingungsmessung an rotierenden Bauteilen, Applikationsschrift VIB-G-12, April 2010

[Castellini and Santolini 1996] P. Castellini, C. Santolini: Vibration measurements on blades of naval propeller rotating in water, Proc. 2nd Int. Conf. of Vibration Measurement by Laser Techniques (Ancona, Italy) SPIE 2368 pp 92–9, 1996

[Fioretti et al. 2010] A. Fioretti, D. Di Maio, D. J. Ewins, P. Castellini, E. P. Tomasini: Deflection shape reconstructions of a rotating five-blade helicopter rotor from SLDV measurements, Proc. 9th Int. Conf. on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques & Short Course (Ancona, Italy) pp 17–28, 2010

[Stanbridge et al. 2002] A. B. Stanbridge, I. A. Sever, D. J. Ewins: Vibration measurements in a rotating blisk test rig using an LDV, 5th Int. Con. on Vib. Measurements by Laser Techniques, Ancona, 18-21 June 2002.

2.2.3.3 Verfahren

Grundlage der hier betrachteten Bildauswertungsverfahren sind Bildfolgen, die mit einer Kamera mit hoher Empfindlichkeit im LWIR-Band aufgezeichnet wurden. Der erste Verfahrensschritt der Bildverarbeitung besteht darin, das Kamerabild auf Artefakte (z. B. »tote Pixel«) hin zu untersuchen und diese zu bereinigen. Dieser Verarbeitungsschritt wird im vorliegenden Fall von der Kamerasoftware unterstützt, die die »toten Pixel« mit dem maximalen Grauwert markiert. Damit lassen sich diese Pixel in einfacher Weise im Bild bestimmen und lassen sich zugeordnete Grauwerte durch Interpolation der Grauwerte der Nachbarpixel korrigieren.

Die nächsten Verarbeitungsschritte sind an die Aufgabenstellung angepasst und haben zum Ziel, die momentane Rotorposition sowie weitere Parameter zur Beschreibung der Dynamik des Rotors aus Einzelbildern einer Bildfolge zu bestimmen. Zur Messung der momentanen Rotorblattposition wird die Detektion der Rotorblattspitzen herangezogen. Zusammen mit der Bestimmung des Drehpunktes, genauer des Durchstoßpunktes der Drehachse durch die Ebene, in der sich die Rotorblattspitzen bewegen, ergibt sich die Position des Rotorblatts und daraus rechnerisch auch die Position jedes Punktes auf dem Rotorblatt, der durch den Laser-Zielfleck anvisiert und in der Bewegung verfolgt werden soll. Der Drehpunkt kann nicht unmittelbar durch Bildverarbeitungsmethoden gefunden werden, da er sich durch keine bildliche Struktur auszeichnet. Er kann jedoch durch die Verfolgung der Rotorblattspitzen über einen vollen Umlauf hinweg rechnerisch bestimmt werden. Bei dieser Prozedur werden des Weiteren alle relevanten Parameter zur Beschreibung der Dynamik des Rotors – die relative Lage der Rotorebene zur Kamera und die momentane Umlauffrequenz der Rotorblätter – bestimmt. Diese Parameter dienen dazu, die Position des im Laser-Zielfleck zu haltenden Punktes auf dem Rotorblatt um die Totzeit des Nachführungssystems zu präzisieren und damit ein Nachlaufen des Laserflecks zu vermeiden.

2.2.3.4 Detektion der Rotorblattspitzen

Im Weiteren wird auf die entwickelten Bildverarbeitungsverfahren zur Detektion der Rotorblattspitzen in Einzelbildern einer Bildfolge eingegangen. Das Grundkonzept dabei ist, zunächst die ellipsenförmige Bewegungslinie der Blattspitzen zu bestimmen und dann die Positionen der Blattspitzen durch Analyse der Umgebung dieser Bewegungslinie zu bestimmen.

Zur Gewinnung der ellipsenförmigen Bewegungslinie erfolgt im ersten Schritt eine Überlagerung von etwa 250 bis 350 Einzelbildern einer Bildfolge. Die Abbildung 2.26 zeigt beispielhaft das Ergebnis dieser sogenannten Bildstapelung in der Form einer im Grauwertbild hell erscheinenden ellipsenförmigen Fläche, die die Bewegungsebene der Rotorblattspitzen repräsentiert. In weiteren Schritten werden hieraus ein Gradientenbild sowie nach »Non-Maximum-Suppression« und Binarisierung ein Binärbild gewonnen, in dem die Bewegungslinie als dünne ellipsenförmige Linie erscheint. Die Abbildung 2.27 zeigt links das Gradientenbild sowie rechts das Binärbild, hier zur besseren Erkennbarkeit invertiert dargestellt. Anhand dieser Bewegungslinie wird dann die Ellipsenfunktion mittels »Least-Squares«-Schätzung bestimmt. Die Abbildung 2.28 zeigt diese Ellipse eingeblendet in ein Einzelbild der Bildfolge.

Entlang der Ellipse erfolgt dann die Suche nach Bildmustern, die die Rotorblattspitzen repräsentieren. Für die Suche wird das Differenzbild aus dem aktuellen Bild und einem früheren Bild verwendet. Im Differenzbild können die Rotorblattspitzen dann anhand der zweiten Ableitung der Grauwertfunktion erkannt werden. Die Abbildung 2.29 zeigt beispielhaft die auf diese Weise identifizierten Blattspitzen.

Die für jedes Bild der Bildfolge bestimmten Positionen der Blattspitzen bieten dann die Grundlage für die Ermittlung weiterer Parameter zur Beschreibung der Dynamik des Rotors.

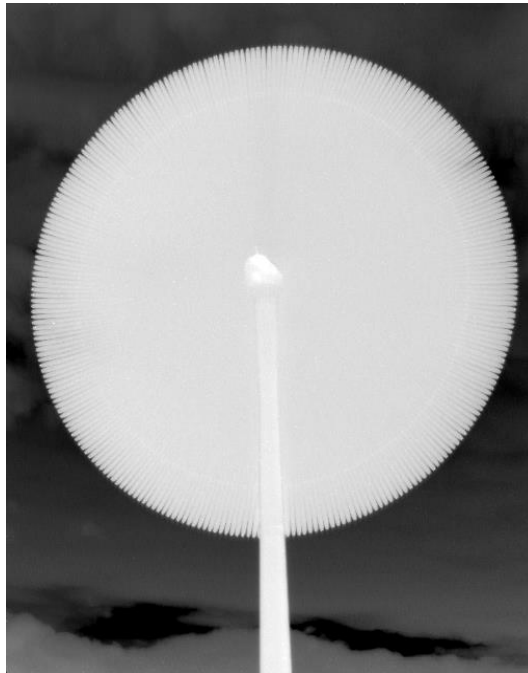


Abbildung 2.26: Durch Bildstapelung von ca. 250 Einzelbildern gewonnenes Summenbild (LWIR-Band).

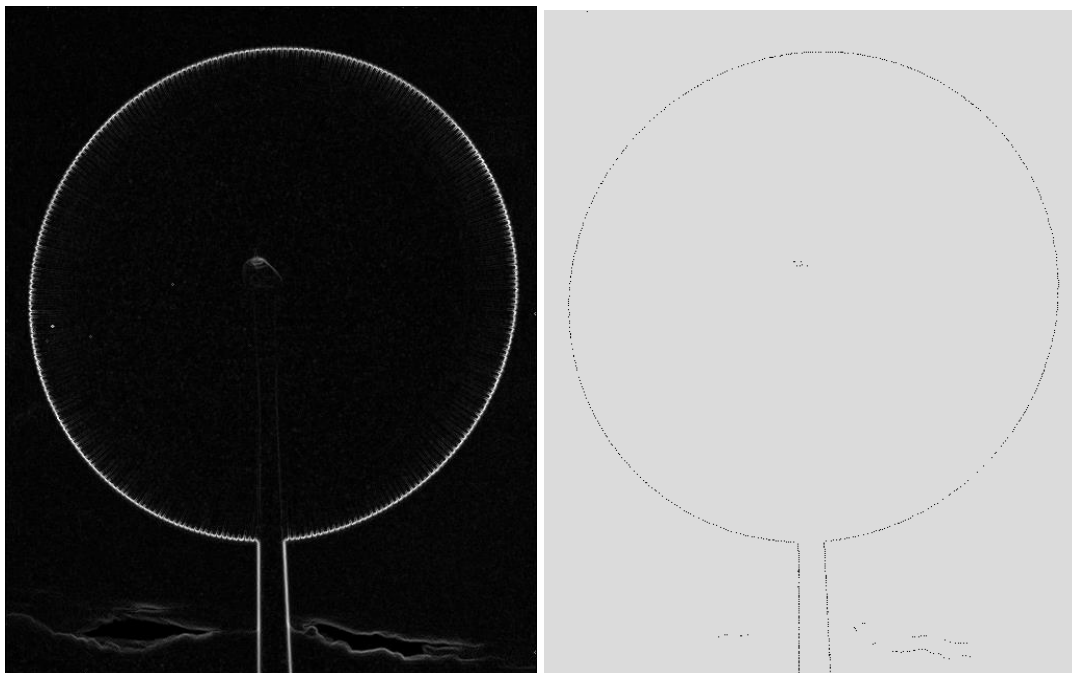


Abbildung 2.27: links: Gradientenbild, berechnet aus dem in Abbildung 2.26 gezeigten Summenbild, rechts: Gradientenbild nach »Non-Maximum-Suppression« und Binarisierung (invertierte Darstellung).

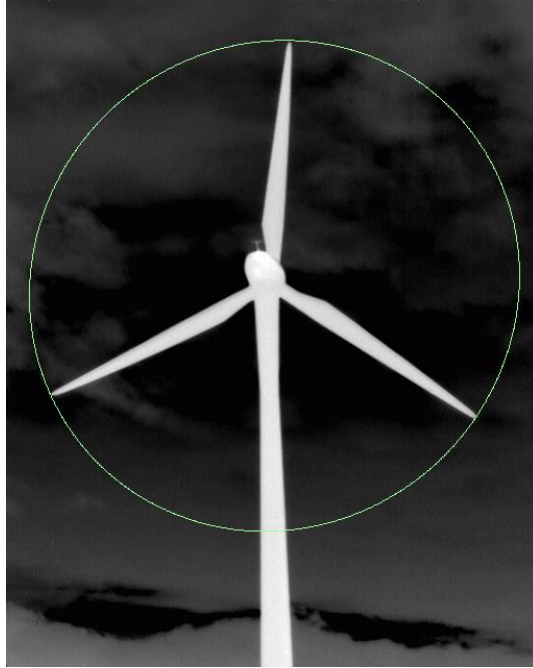


Abbildung 2.28: Durch Kleinste-Quadrate-Anpassung gefundene Ellipsenfunktion für die Positionen der umlaufenden Rotorblattspitzen eingeblendet in ein Einzelbild.

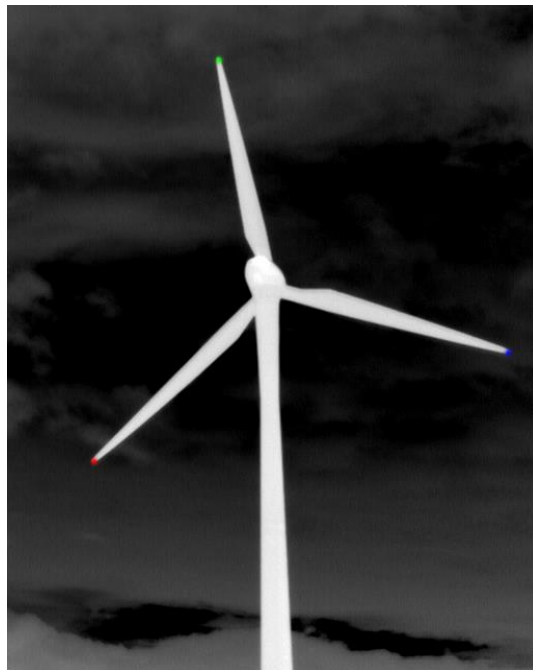


Abbildung 2.29: Erkannte Rotorblattspitzen, farbig gekennzeichnet (rot, grün, blau).

2.2.3.5 Schätzung von Modellparametern bei Bildsignalen im LWIR-Band

Aufbauend auf der initialen Schätzung der Modellparameter für die Rotorbewegung und die Abbildung in das Gesichtsfeld der stationären Kamera, wie im Abschnitt 2.2.3.4 beschrieben, wurde an einer längeren Bildsequenz die fortlaufende Schätzung dieser Parameter getestet.

Zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Rotors und der Abbildungsgeometrie werden folgende Parameter geschätzt:

- Rotationsgeschwindigkeit der Rotorblätter,
- Phasenlage der Rotorblätter,
- Azimutwinkel,
- Elevationswinkel,
- x- und y-Koordinate des Drehzentrums im Bild,
- Große Halbachse der abgebildeten Ellipse (in Pixel),
- Brennweite.

Der Azimutwinkel beschreibt die Drehung der Anlage um deren Hochachse. Der Elevationswinkel repräsentiert den Winkel zwischen dem Sichtstrahl von der Kamera zur Anlage und der Horizontalebene.

Es wurde eine Sequenz von ca. 15 min Länge (21.400 Bilder) aufgenommen und prozessiert. Es hat sich gezeigt, dass stabile Parameter nach jeweils einer vollen Rotorumdrehung geschätzt werden können. Obwohl schon nach einer Drittel-Drehung des Rotors im Prinzip genug Daten für eine Schätzung vorliegen, da die drei Rotorblätter zusammen dann die gesamte Ellipsenfläche überstrichen haben, hat sich gezeigt, dass aufgrund einer nicht abschließend geklärten Asymmetrie zwischen den einzelnen Rotorblättern eine so frühe Schätzung zu Schwankungen in den Parametern führt.

Die nach jeweils einer vollen Rotorumdrehung neu geschätzten - und bisher noch ungefilterten - Parameter sind beispielhaft in Abbildung 2.30 wiedergegeben. Da nach jeder Umdrehung nur bezüglich der neu dazugekommenen Daten die Parameter geschätzt werden, zeigen die einzelnen Datenpunkte in Abbildung 2.30 unabhängige Schätzungen. An der geringen Schwankung der Datenwerte lässt sich die hohe Güte der Parameterschätzung für jeden einzelnen Parameter ablesen.

Besonders beachtenswert in Abbildung 2.30 ist, dass die Güte der Modellparameter ausreicht, um die mehrfach auftretende Azimutdrehung des Rotors sicher aufzulösen. Dabei kann aus den Daten eine Drehrate von ca. 1° pro Rotorumlauf abgeleitet werden, die mit den konstruktiven Anlagendaten übereinstimmt. Die Elevation bleibt über den gesamten Zeitraum wie erwartet konstant, da sich die Kamera relativ zur Anlage nicht bewegte. Parallel zur Azimutdrehung verlagert sich auch der Drehmittelpunkt im Bild in horizontaler Richtung (x-Komponente des Drehmittelpunkts). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Drehmittelpunkt, der den Durchstoßpunkt der Rotationsachse der Rotorblätter durch die Ebene, in der sich die Blattspitzen bewegen, darstellt, sich nicht

genau auf der Azimutachse (Hochachse) der Anlage befindet. Dadurch wandert dieser Punkt bei einer Drehung des Rotors um die Hochachse leicht in horizontaler Richtung. Dies kann, wie Abbildung 2.30 zeigt, mit Subpixelgenauigkeit aufgelöst werden. Alle anderen Parameter zeigen im Wesentlichen das erwartete lineare Verhalten.

Die Abbildung 2.31 zeigt für alle Parameteranpassungen die absolute Abweichung zwischen Modell und Messung. Wie die Abbildung verdeutlicht, wird im Mittel eine Abweichung von ca. $\frac{1}{2}$ Pixel erreicht. Der Maximalwert der Abweichung liegt bei 1 Pixel. Dies entspricht der Erwartung, da die Position der Flügelspitzen nur auf 1 Pixel genau bestimmt werden kann.

Wie schon erwähnt wurden für diese Untersuchung die Parameter jeweils an nur eine Umdrehung des Rotors angepasst und nicht weiter gefiltert. Es ist zu erwarten, dass die Genauigkeit verbessert werden kann, wenn der Parameteranpassung längere Zeiträume zugrunde gelegt werden bzw. die Ergebnisse gefiltert werden.

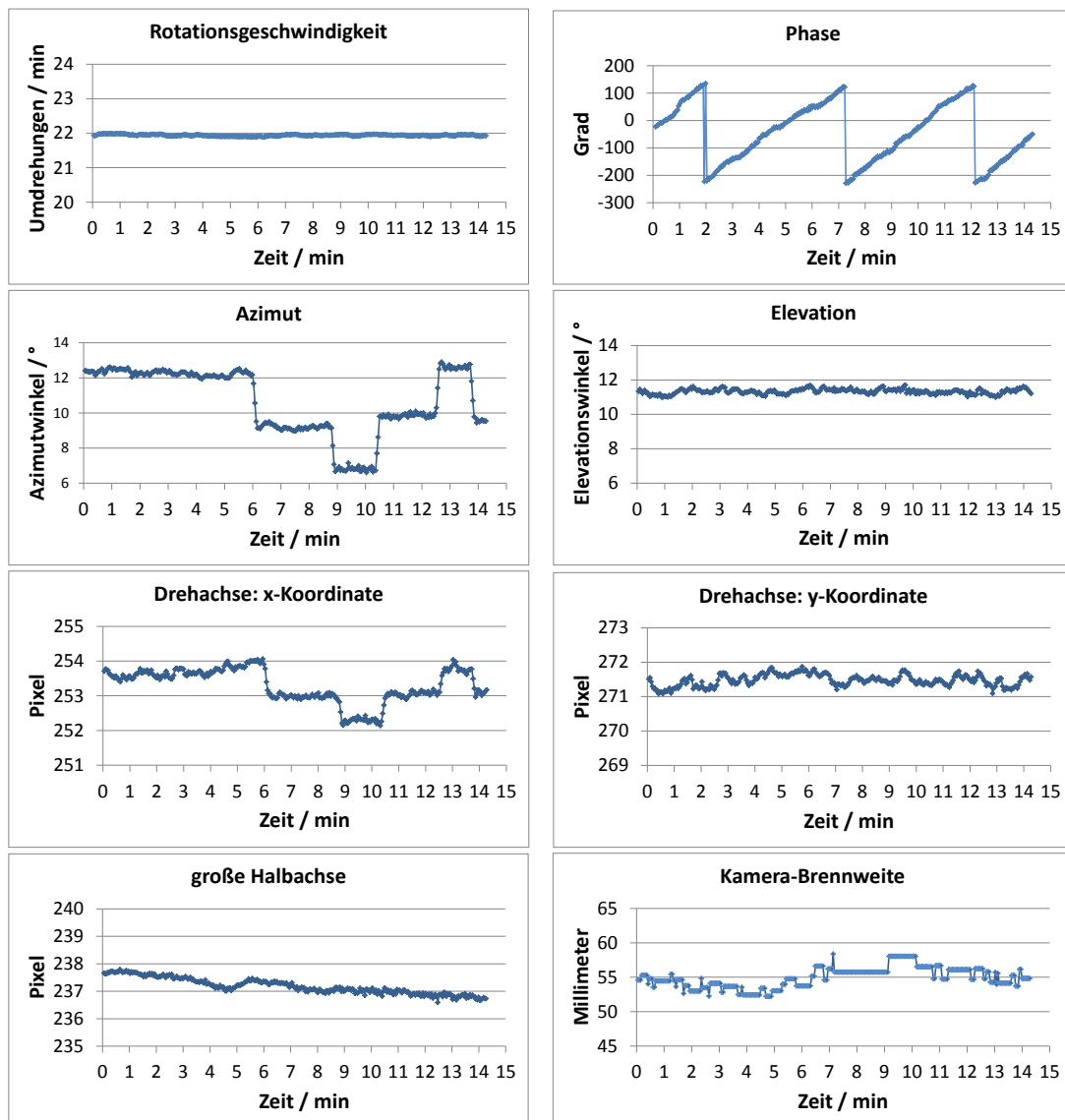


Abbildung 2.30: Parameter für die Modellierung der Rotorbewegung, geschätzt nach jedem vollen Umlauf, für eine Sequenz von ca. 15 min Länge.

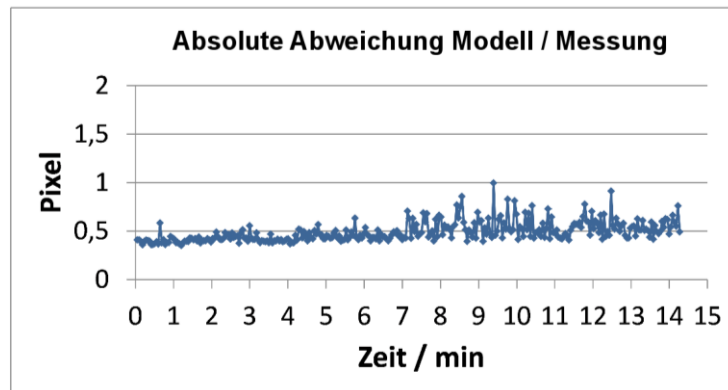


Abbildung 2.31: Absolute Abweichung zwischen Modell und Messung für jede Parameterschätzung.

2.2.3.6 Schätzung von Modellparametern bei Bildsignalen im SWIR-Band

Bei der Regelung zur Nachführung des Vibrometer-Lasers auf eine feste Position auf dem rotierenden Rotorblatt muss die Ablage der Ist-Position von der Soll-Position bestimmt werden. Die Soll-Position wird durch die Beobachtung der Blattspitzen und Erstellen eines dynamischen Bewegungsmodells, wie bereits beschrieben, vorgegeben. Das Konzept zur Messung der Ist-Position sah zunächst einen Pilotlaser im LWIR-Band vor, der so justiert ist, dass er denselben Punkt auf dem Rotorblatt wie der Vibrometer-Laser beleuchtet. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass bei der Bilderfassung im LWIR-Band ein hoher positiver Kontrast zwischen Rotorblatt und Hintergrund besteht und dadurch die Blattspitzen im Bild zuverlässig detektiert und verfolgt werden können.

Allerdings wurde bei Messungen festgestellt, dass der LWIR-Pilotlaser je nach Winkelstellung des Rotorblatts eine sehr schwache bzw. eine sehr starke Reflexion hervorruft. Dies würde bei jedem Rotorumlauf zu einem Verschwinden bzw. Übersteuern des Abbildes des Pilotlasers im Kamerabild führen. Daher wurde untersucht, ob die Blattspitzen auch im SWIR-Band sicher detektiert und verfolgt werden können. Die Verwendung des SWIR-Bands hat zum einen den Vorteil, dass der Laserpunkt des Vibrometers hier direkt beobachtet werden kann und kein separater Pilotlaser benötigt wird. Zum anderen kommt es beim Vibrometer-Laser nicht zu der im LWIR-Band beobachteten starken Intensitätsschwankung der Reflexion während eines Rotorumlaufs.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden Bilddaten an der bisher betrachteten Anlage mit einer SWIR-Kamera aufgenommen. Diese Kamera besitzt eine höhere Bildauflösung (1280 x 1024) als die bisher genutzte LWIR-Kamera (640 x 512). Es wurden 6 Messungen mit je 1000 Bildern bei einer Framerate von 30 Hz aufgenommen, wobei verschiedene Kameraparameter variiert wurden. Die Abbildung 2.32 zeigt jeweils das erste Bild aus den 6 Messungen. Im Gegensatz zu den bisherigen Aufnahmen im LWIR erscheinen die Anlagen hier generell dunkler als der Hintergrund.



Abbildung 2.32: Beispielbilder aus 6 Messungen mit der hochauflösenden SWIR-Kamera bei unterschiedlichen Kameraparametereinstellungen.

Aufgrund der vorherrschenden Windrichtung und des Aufstellungsortes der Kamera konnte die Anlage nur von hinten aufgenommen werden. Dadurch dreht sich der Rotor in der Bildfolge im Gegenuhrzeigersinn. Da für die Bildauswertung zur Blattverfolgung und für die Modellerstellung die Drehrichtung im Uhrzeigersinn vorausgesetzt wird, wurden der Einfachheit halber die Bilder vor der Verarbeitung an der vertikalen Mittelachse gespiegelt. Dass in den Bildfolgen die Blattspitzen hinter dem Turm statt vor dem Turm vorbeilaufen, hat auf die Auswertung keinen Einfluss. In beiden Fällen erfolgt aufgrund des zu geringen Kontrasts zwischen Turm und Blatt im Bereich des Turms keine Detektion der Blattspitzen.

Das bestehende Programm zur Detektion und Verfolgung der Blattspitzen und zur Generierung des Rotormodells wurde an diese neue Situation mit negativem Bildkontrast zwischen Anlage und Hintergrund angepasst. Danach wurden die Modellparameter nach

jeweils einem Umlauf des Rotors unabhängig voneinander bestimmt. Die Abbildung 2.33 zeigt das Ergebnis dieser Parameterbestimmung. In der Abbildung 2.34 ist die Abweichung zwischen Modell und Messung in der Form des RMS-Werts (root mean square) dargestellt.

Bei dem Modellparameter Rotationsgeschwindigkeit fällt auf, dass im Verlauf immer wieder einzelne Spitzen nach oben auftreten. Diese konnten darauf zurückgeführt werden, dass bei der Aufzeichnung von Zeit zu Zeit ein einzelnes Bild verloren ging. Da dies von der Software zur Modellanpassung nicht erwartet und berücksichtigt wird, führt das zu einer scheinbar größeren Rotationsgeschwindigkeit und einer deutlich schlechteren Übereinstimmung zwischen Modell und Messung. Diese Verschlechterung der Modellanpassung an die Messwerte ist auch in der Abbildung 2.34 an den Spitzen im Verlauf des RMS-Werts zu sehen. Die anderen Modellparameter sind davon kaum betroffen. Das Problem wurde in der Zwischenzeit durch die Entwicklung einer eigenen Aufzeichnungssoftware behoben.

Berücksichtigt man nur die Ergebnisse, die bei einem Rotorumlauf ohne Bildverlust erhalten werden, so lassen sich eine sehr geringe Schwankung der Einzelanpassungen und damit eine hohe Güte der Parameterschätzung feststellen. Dies entspricht den Ergebnissen, die bei der Verwendung der LWIR-Kamera erzielt wurden.

Der RMS-Wert (siehe Abbildung 2.34) liegt jedoch mit ca. 1-1,5 Pixel im Falle der SWIR-Kamera um Faktor 2-3 höher als der entsprechende Wert bei Aufnahmen mit der LWIR-Kamera (siehe Abbildung 2.31). Dies könnte durch eine stärkere Verzeichnung des Kameraobjektivs durch die geringere Brennweite bei der SWIR-Kamera - 35 mm statt 50 mm bei der LWIR-Kamera - verursacht sein. Diesem Einfluss kann in einfacher Weise durch eine Messung der Objektivverzeichnung und dementsprechender Entzerrung des Digitalbildes entgegnet werden.

Insgesamt liefern die bisherigen Auswertungen ein zufriedenstellendes Ergebnis und es ist davon auszugehen, dass mit der SWIR-Kamera zumindest die gleiche Güte in der Modellparameteranpassung wie mit der LWIR-Kamera erreicht werden kann, auch aufgrund der höheren Auflösung der SWIR-Kamera. Die Ergebnisse sprechen also dafür, dass ein Umstieg der Bildauswertung vom LWIR-Band ins SWIR-Band möglich und sinnvoll ist.

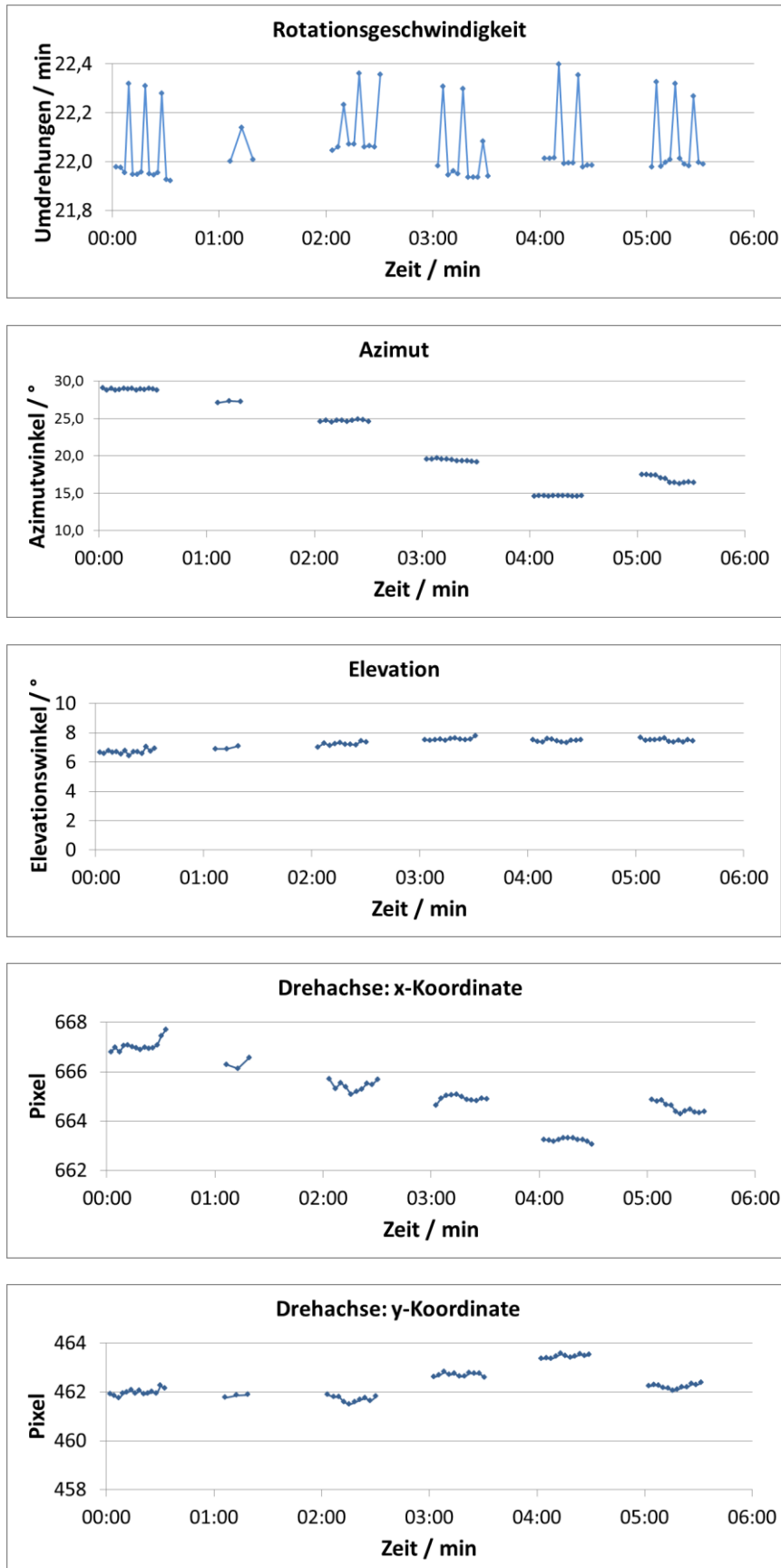


Abbildung 2.33: Parameter für die Modellierung der Rotorbewegung, geschätzt nach jedem vollen Umlauf, für die betrachteten sechs Messungen.

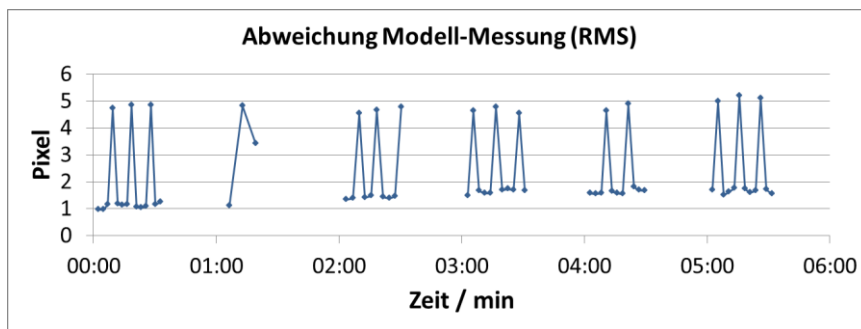


Abbildung 2.34: Abweichung (RMS-Wert) zwischen Modell und Messung für jede Parameterschätzung.

2.2.4 Arbeitspaket 2.4 »Bildverarbeitungsverfahren, Blattverfolgung, Test und Validierung«, Arbeitspaket 3.1 »Systemkonzeption«

2.2.4.1 Aufbau eines Versuchsstands für die Blattverfolgung

Zur Weiterentwicklung der Bildauswertungsverfahren hinsichtlich der Blattverfolgung in Echtzeit sowie zur Erarbeitung eines tragfähigen Systemkonzepts wurde ein Versuchsaufbau gemäß Abbildung 2.35 im Labor erstellt.

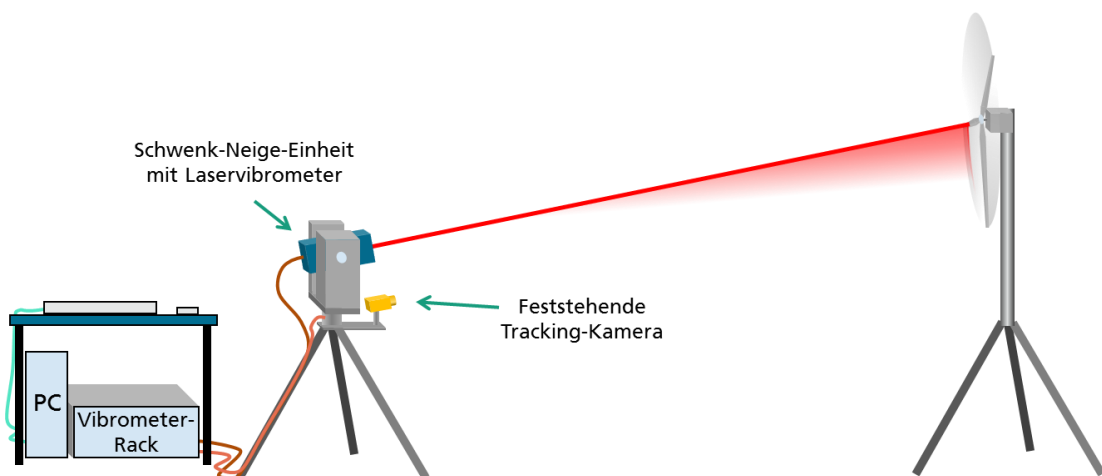


Abbildung 2.35: Schema des Versuchsaufbaus zum Test der Blattverfolgung im Labor.

Der Versuchsaufbau besteht aus folgenden Komponenten:

- WEA-Modell, bei dem der Rotor von einem Elektromotor angetrieben wird, wie in Abbildung 2.36 links dargestellt. Die Abmessungen und die Drehzahl des Modells sowie sein Abstand zum Messsystem wurden so gewählt, dass sie einen realitätsnahen Test der Blattverfolgung erlauben. So ergeben sich bei einem Rotordurchmesser des Modells von 1,2 m und einem Abstand zwischen Messsystem und Modell von 4,1 m ähnliche geometrische Verhältnisse wie bei einer WEA mit 80 m

Rotordurchmesser und einem Messabstand von 270 m. Der wesentliche Unterschied zur Messung an einer normalen Anlage besteht im Betrag der Makro-Doppler-Verschiebung, der hier wesentlich kleiner ist und deshalb gesondert betrachtet werden muss. Für die Entwicklung und den Test der Blattverfolgung in Echtzeit hat dies keine Bedeutung.

- Modifiziertes kommerzielles HeNe-Vibrometer mit einer Wellenlänge von 632 nm stellvertretend für das bisher betrachtete 1,5 μm -Laservibrometer. Das verwendete HeNe-Vibrometer hat für den Laboraufbau den Vorteil, dass trotz des geringen Abstandes zwischen Messsystem und Anlage aufgrund seiner monostatischen Bauweise keine Parallaxe zwischen Sender- und Empfängerstrahl auftritt.
- Schwenk-Neigeeinheit zur Nachführung des Vibrometerstrahls am rotierenden Blatt (siehe Abbildung 2.35 rechts).
- Feststehende optische Kamera zur Erfassung von Rotorgeometrie und -bewegung (siehe Abbildung 2.35 rechts), im Weiteren als Trackingkamera bezeichnet.

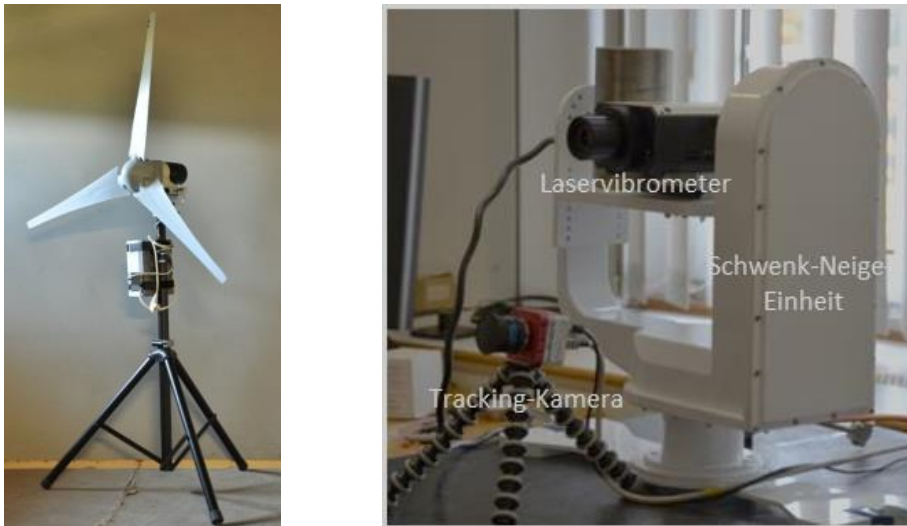


Abbildung 2.36: links: WEA-Modell mit Elektroantrieb;
rechts: Laservibrometer auf Schwenk-Neigeeinheit sowie feststehende optische Kamera (Trackingkamera).

2.2.4.2 Entwicklung eines Echtzeitverfahrens zur Blattverfolgung

Wie im Abschnitt 2.2.3.6 beschrieben, erweist sich die Verwendung einer Infrarotkamera für den SWIR-Bereich als vorteilhaft für die Blattverfolgung, da der vom Vibrometerlaser auf das Blatt projizierte Punkt von der Kamera selbst erfasst werden kann und somit der Einsatz eines separaten Lasers zur Positionsbestimmung, eines so genannten Pilotlasers, nicht erforderlich ist. Um allerdings bei der Bilderfassung im Labor ähnliche Kontrastverhältnisse zu haben wie an einer WEA unter freiem Himmel, wurde für den Laboraufbau eine optische Kamera für den sichtbaren Bereich verwendet. Die Abbildung 2.37 zeigt zum Vergleich links ein Bild der im Labor verwendeten Kamera und rechts ein Bild der im Freien eingesetzten SWIR-Kamera. Augenscheinlich liegen für beide Fälle ähnliche Kontrastverhältnisse vor. Wie bereits im letzten Abschnitt beschrieben, wurde für den

Labora Aufbau ein im sichtbaren Bereich arbeitendes Laservibrometer verwendet. Damit ist auch beim Laboraufbau der Vibrometerlaser unmittelbar im Kamerabild sichtbar. Somit entsprechen die für die Blattverfolgung relevanten Randbedingungen im Labor in guter Näherung denen an einer normalen Anlage.

Schrittweise wurden die bislang beschriebenen Bildauswertungsverfahren für die Blattverfolgung in einer Echtzeitanwendung implementiert. So zeigt die Abbildung 2.38 beispielhaft links ein durch Überlagerung von Einzelbildern errechnetes Summenbild sowie rechts das zugehörige Gradientenbild mit farbig gekennzeichneten Bewegungsmustern der Blattspitzen als Grundlage für die Ellipseninterpolation.



Abbildung 2.37: links: Aufnahme des WEA-Modells im Labor mit optischer, visueller Kamera; rechts: Aufnahme einer WEA mit der SWIR-Kamera.

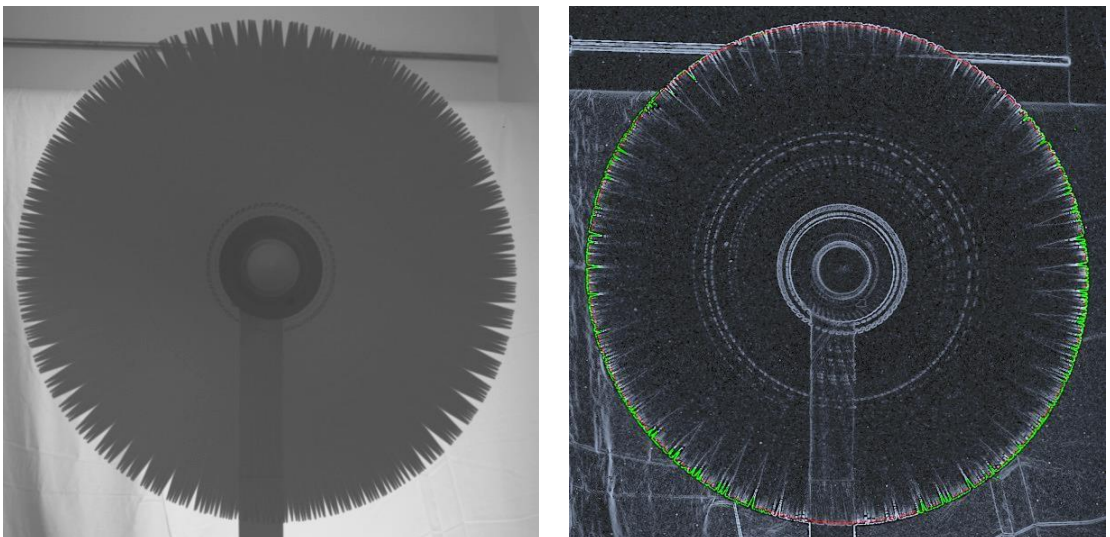


Abbildung 2.38: links: Summenbild als Überlagerung von Einzelbildern des WEA-Modells; rechts: zugehöriges Gradientenbild mit farbig gekennzeichneten Bewegungsmustern der Blattspitzen.

Die Ellipse als Bewegungslinie der Blattspitzen dient als Suchbereich für die Detektion der Blattspitzen in den Einzelbildern. Auch diese Blattspitzendetektion wurde in der Echtzeitumgebung implementiert. Die Abbildung 2.39 zeigt links ein Einzelbild aus der Videobildfolge der Trackingkamera mit detektierten Blattspitzen, die hier durch grüne Kreise markiert sind. Für die schritthaltende Auswertung werden diese Blattspitzenpositionen in der Initialisierungsphase für eine Umdrehung gespeichert und damit dann das dreidimensionale Rotormodell geschätzt. Das Rotormodell beinhaltet die Orientierung der Drehachse im Raum sowie Drehgeschwindigkeit des Rotors. Das Modell wird dann jeweils nach Auswertung jedes weiteren Bildes aktualisiert. Anhand des Modells wird die Lage des Drehmittelpunkts als Schnittpunkt der Drehachse mit der durch die Ellipse bestimmten Ebene berechnet. Die Verbindungslinien zwischen Drehmittelpunkt und Blattspitzen definieren die Winkellagen der Blätter und bilden die Grundlage für die drei rotierenden Blattkoordinatensysteme. In der Abbildung 2.39 rechts sind diese und weitere für die Blattverfolgung maßgeblichen Größen schematisch dargestellt.

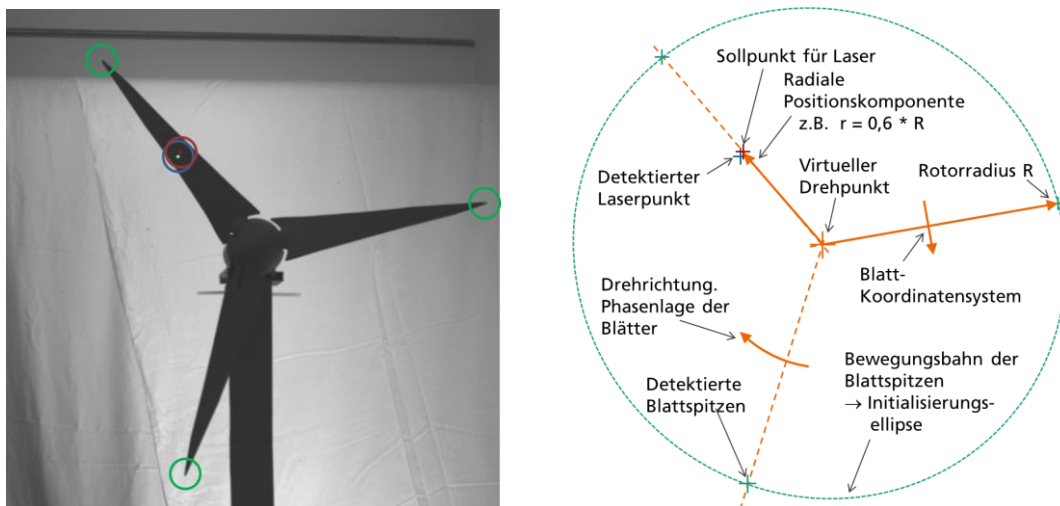


Abbildung 2.39: links: Einzelbild aus der Videobildfolge der Trackingkamera mit Ergebnissen der Echtzeitbildverarbeitung: detektierte Blattspitzen (mit grünen Kreisen markiert), Sollposition des Laserpunkts (mit blauem Kreis markiert), detektiertes Laserpunkt (mit rotem Kreis markiert); rechts: Schematische Darstellung der für die Blattverfolgung und die Laserflecksteuerung maßgeblichen Größen.

Ein weiterer wesentlicher Arbeitsschwerpunkt bestand im Aufbau und in der Inbetriebnahme der Schwenk-Neige-Einheit zur Nachführung des Laserstrahls, insbesondere in der Implementierung der Software-Schnittstelle. Mit Fertigstellung des oben beschriebenen Rotormodells konnte damit eine erste Nachführung des Laserflecks auf dem rotierenden Blatt im Labor realisiert werden. Die hierbei erreichte Genauigkeit der Positionierung des Laserflecks betrug etwa 2,5 cm, welches bezüglich des Messsystems einem Winkelbereich von ca. $0,35^\circ$ entspricht. Die Abbildung 2.39 links zeigt beispielhaft die Lage des Laserflecks (mit rotem Kreis markiert) sowie dessen Sollposition (mit blauem Kreis markiert) auf einem Blatt. Entsprechendes ist auch in der schematischen Darstellung in der Abbildung 2.39 rechts eingetragen. Bei der Messung an einer Anlage mit einem

angenommenen Messabstand von 250 m läge damit die Positioniergenauigkeit des Laserflecks bei ca. 1,5 m, welches für die Schwingungserfassung unzureichend ist.

Zur Verbesserung der Positioniergenauigkeit ist daher eine kontinuierliche Nachjustierung des Laserflecks bezüglich seiner Sollposition mittels einer Regelung erforderlich. Als Voraussetzung hierfür muss der Laserfleck von der Trackingkamera erfasst und muss seine Position bezüglich des Blattkoordinatensystems bestimmt werden. Zur Erfassung des Laserflecks wurde ein so genanntes Hot-Spot-Tracking-Verfahren in der Echtzeitanwendung implementiert. Hierbei wird im von der Trackingkamera erfassten Bild in einer Umgebung der Sollposition des Laserflecks dessen Lage schritthaltend bestimmt.

Die Abbildung 2.40 zeigt den Verlauf der horizontalen (rot) und vertikalen (blau) Abweichung zwischen Soll- und Istposition des Laserflecks über dem Drehwinkel für 10 Rotorumdrehungen. Es ist festzustellen, dass die Verläufe über die einzelnen Umdrehungen dieselbe Grundstruktur aufweisen und somit das dynamische Verhalten der Schwenk-Neigeeinheit widerspiegeln. Einzelne Ausreißer im Verlauf lassen sich auf Fehldetektionen des Laserflecks im Kamerabild zurückführen. Die Abbildung 2.41 zeigt diese Verläufe in Polardarstellung, links in der Einheit Grad und rechts in der Einheit Millimeter. Hierbei wird deutlich, dass sich der Laserfleck um einen Punkt bewegt, der einen gewissen Abstand vom Sollpunkt, hier im Koordinatenursprung liegend, hat. Dieser Offset, der im gezeigten Beispiel ca. 9 cm beträgt, lässt sich in einfacher Weise kompensieren. Zur Korrektur der dynamischen Anteile der Abweichung ist allerdings, wie bereits angedeutet, eine Regelung erforderlich. Eine solche wurde in der Echtzeitumgebung implementiert und in einem Demonstrator integriert (siehe Abschnitt 2.7).

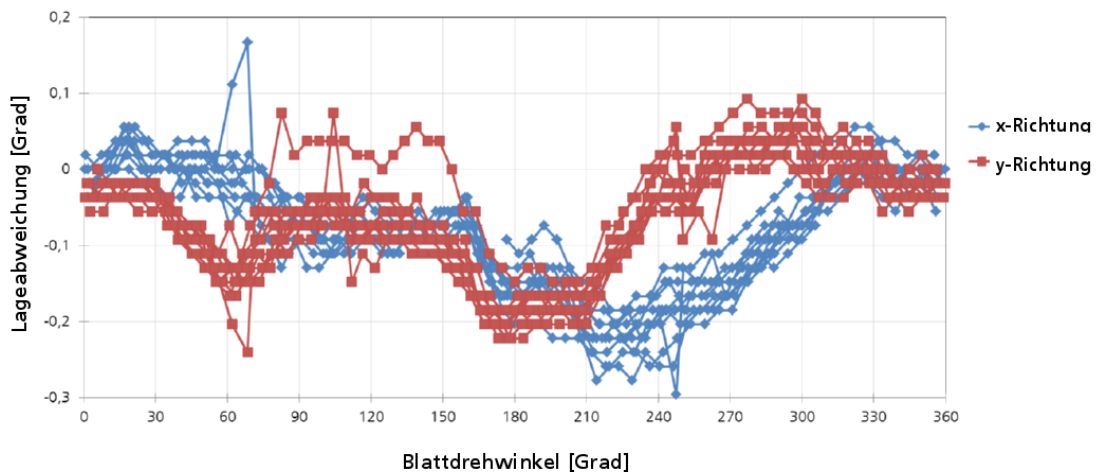


Abbildung 2.40: Verlauf der Abweichung zwischen Soll- und Istlage des Laserflecks über dem Blattdrehwinkel für 10 Rotorumdrehungen, getrennt für x- und y-Richtung; Sollradius: $r = 0,6 R$.

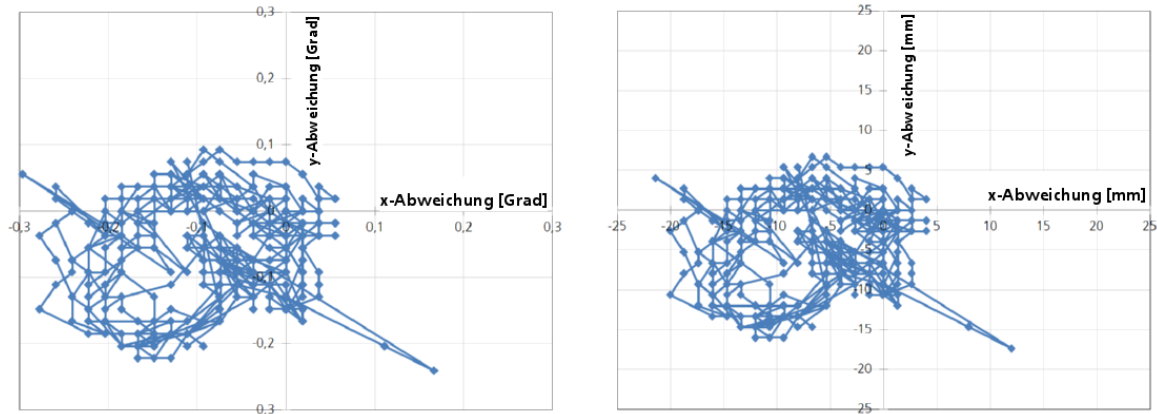


Abbildung 2.41: Lageabweichungen gemäß Abbildung 2.40 in Polardarstellung, links in Grad, rechts in Millimeter; der Ursprung (0,0) der Koordinatensysteme entspricht der Sollposition des Laserflecks.

2.3 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Entsprechend der vergleichsweise einfachen Struktur des Vorhabens unter Beteiligung keiner weiteren Kooperationspartner enthält der zahlenmäßige Nachweis vornehmlich die beiden Positionen 0837 Personalkosten und 0847 Anlagekosten als Aufwände für das im Vorhaben eingesetzte Personal bzw. die beschafften Anlagen.

2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Vorhabens wurden neue Verfahrenstechniken entwickelt, die aufgrund ihres hohen Innovationsgrades mit einem nicht unerheblichen wissenschaftlich-technischen Risiko verbunden sind. Aufgrund des erforderlichen Umfangs der im Vorhaben durchgeführten Entwicklungsarbeiten und der damit verbundenen Kosten bedeutet dies ein wirtschaftliches Risiko, welches vom Antragsteller selbst nicht getragen werden konnte. Somit bestand für das Vorhaben die unmittelbare Notwendigkeit der Zuwendung. Unter Einsatz der für das Vorhaben zur Verfügung gestellten Mittel konnte eine tragfähige Verfahrensgrundlage für die distante, laserbasierte Schwingungserfassung an Windkraftanlagen erarbeitet werden. Vor dem Hintergrund des vergleichsweise hohen Entwicklungsrisikos und der erreichten Güte der Ergebnisse ist der Umfang der eingesetzten Mittel als angemessen zu bewerten.

2.5 Voraussichtliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Vorhaben liefert die Grundlage für die zielgerichtete Entwicklung eines Lasermesssystems, das etwa in der Form eines Diagnostesters oder eines »Condition Monitoring«-Systems für die Entwicklung, Überwachung und Wartung von Windkraftanlagen vielfältig im Onshore- und Offshore-Bereich eingesetzt werden kann. Insbesondere eröffnet die Erfassung von Rotorblattschwingungen im laufenden Betrieb Einsatzmöglichkeiten in der Simulation und der Diagnose, etwa zur Validierung von in der

Konstruktion verwendeten Simulationsmodellen oder der distanten Überprüfung der Rotorblattstruktur.

2.6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach aktuellem Kenntnisstand beschränkten sich die Forschungsarbeiten an anderen Stellen bez. der distanten, laserbasierter Schwingungserfassung zum einen auf die Verwendung von Reflexionsmarkern, die an der Anlage angebracht werden müssen, und zum anderen auf die Messung an ruhenden Anlagen. Anwendungen, bei denen mittels Laservibrometrie ohne Reflexionsmarker an laufenden Anlagen, insbesondere an Rotorblättern, Schwingungen erfasst werden, sind nicht bekannt geworden.

2.7 Erfolge und geplante Veröffentlichungen

Es erfolgte eine europäische Patentanmeldung mit dem Titel »Vorrichtung und Verfahren zur Messung von Schwingungen«, Aktenzeichen 13198785.1, Anmeldetag 20.12.2013.

Des Weiteren erfolgte hinsichtlich der Vermarktung eines zukünftigen Lasermesssystems die Anmeldung der Wortmarke »VibroTrack«.

Auf der Messe CeBIT 2014 wurde auf dem Fraunhofer-Messestand ein Demonstrator für die Schwingungserfassung am drehenden Rotorblatt vorgestellt (siehe Abbildung 2.42 und Abbildung 2.43). Im Zuge der Messevorbereitung erfolgten Veröffentlichungen im Internet durch unterschiedliche Online-Informationendienste, z. B.

- <http://www.fraunhofer.de/de/veranstaltungen-messen/cebit-2014/exponate-cebit/vibrotrack.html>,
- <http://www.bine.info/themen/news/lasergestuetzte-ferndiagnose-fuer-rotorblaetter>,
- <http://www.energie-und-technik.de/erneuerbare-energien/artikel/105125>.

Für die im November 2014 in Shanghai stattfindende Fachtagung »Advanced Solid State Lasers« (ASSL) wurde ein Beitrag mit dem Titel »Laservibrometry for Wind Turbines Inspection« eingereicht

Als weitere Veröffentlichungen ist zur direkten Adressierung des WEA-Fachpublikums ein Beitrag auf der 6. VDI-Fachtagung »Schwingungen von Windkraftanlagen«, voraussichtlicher Termin im Februar 2015, geplant.



Abbildung 2.42: Fraunhofer-Messestand auf der CeBIT 2014 mit Demonstrator des »VibroTrack«-Lasermesssystems.



Abbildung 2.43: Detailansichten des in Abbildung 2.42 gezeigten Messestandes; links: Lasermesssystem mit Schwenk-Neigeeinheit und feststehender Tracking-Kamera; rechts: Rotor des WEA-Modells mit Elektroantrieb sowie mit Miniaturlautsprechern in den Blättern zur Schwingungsanregung.