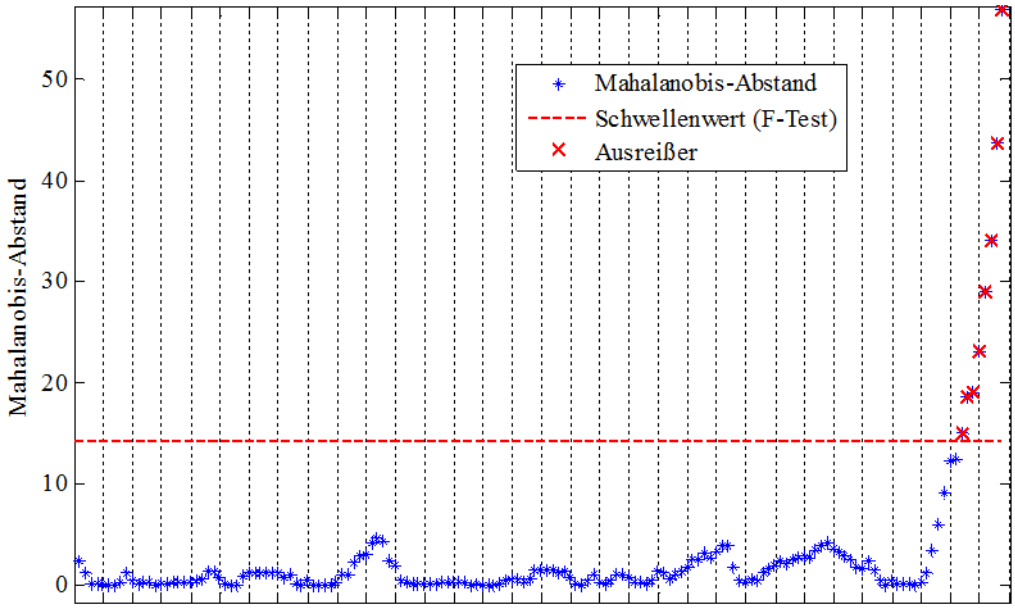
Modellgestütztes Structural Health Monitoring für Rotorblätter von Windenergieanlagen

SHM Wind



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Gemeinsamer Schlussbericht

01.10.2009 bis 31.03.2012

Projektteilnehmer und Förderkennzeichen:
FhG Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren Dresden, IZFP-D, 033 RI 0902B
FhG Institut für Silicatforschung, ISC, 033 RI 0902B
FhG Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, IWES, 033 RI 0902B
IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, IMA, 033 RI 0902E
Ingenieurgesellschaft für Zuverlässigkeit und Prozessmodellierung, IZP, 033 RI 0902D
Nordex Energy GmbH, Nordex, 033 RI 0902I
Physik Instrumente GmbH & Co. KG, PI, 01RI0902H
PI Ceramic GmbH, PIC, ist 01RI0902F
TU Dresden, Institut für Aufbau und Verbindungstechnik, TUDD, 01 RI 0902C
Teletronic Rossendorf GmbH, Teletronic, 01RI0902G
Wölfel Beratende Ingenieure GmbH + Co. KG. WBI, 01 RI0902A

Modellgestütztes Structural Health Monitoring für Rotorblätter von Windenergieanlagen
SHM Wind

Herausgegeben von Herbert Friedmann

Mit Beiträgen von:
Antoniou, Alexandros, FhG IWES;
Bietz, Thomas, IZP;
Brunner, Bernhard, FhG ISC,
Ebert, Carsten, WBI;
Frankenstein, Bernd, FhG IZFP-D;
Friedmann, Herbert, WBI;
Geyer, Bernhard, PI;
Heinrich, Kerstin, FhG ISC;
Hentzschel, Jürgen, IZP;
Hülsberg, Uwe, Teletronic;
Kraemer, Peter, WBI;
Löwe, Astrid, Nordex;
Magnus, Stefan, Nordex;
Möser-Drechsler, Uwe, IMA;
Otto, Albrecht, PIC;
Patzke, Uwe, IZP;
Rieske, Ralf, TUDD;
Scholehwar; Timo, PIC
Schubert, Lars, FhG IZFP-D;
Schulze, Eberhard, FhG IZFP-D;
Sohr, Sebastian, TUDD;
Süßmuth, Klaus, PI;
Trepte, Manuel, Teletronic;
van Wingerde, Arno, FhG IWES;

Höchberg 2012

Gemeinsamer Schlussbericht für **Modellgestütztes** S**tructural** H**ealth** M**onitoring für Rotorblätter von** Wind**energieanlagen**, **SHM Wind**

1 Aufgabenstellung: Structural Health Monitoring von Rotorblättern – Notwendigkeit und Projektziele des Verbundprojektes SHM Wind 5
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 7
3 Planung und Ablauf des Vorhabens 8
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 9
4.1 Angaben zu bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechten, die zur Durchführung des Verfahrens benutzt wurden 9
4.2 Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste 12
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 12
6 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse 13
6.1 Systementwicklung 13
6.1.1 Sensorentwicklung und Klebetechnik, PIC 13
6.1.1.1 Anforderungen an den Wandler 13
6.1.1.2 Entwicklung der DuraAct Wandler 15
6.1.1.3 Designstufe 1 – Richtungsabhängiges DuraAct-Epoxy-Array 16
6.1.1.4 Designstufe 2 – Doppellagig, Eigenschirmung 17
6.1.1.5 Designstufe 3 – Doppellagig, doppelt geschirmt 18
6.1.1.6 Designstufe 4 – Doppellagig, Eigenschirmung, kleinere Fläche 19
6.1.1.7 Designstufe 5 – Doppellagig, doppelt geschirmt, kleinere Fläche 19
6.1.1.8 Kleberauswahl und Montagetechnologie 20
6.1.1.9 Zusammenfassung 22
6.1.2 Sensortest, ISC 23
6.1.2.1 Entwicklung von geschirmten PZT-Patches für richtungssensible Sensorik 23
6.1.2.2 Sende-, Empfangscharakteristik, Frequenzspektrum 24
6.1.2.3 Untersuchung der Messwertabweichung für Dehnungen, Minimierung 24
6.1.2.4 Zuverlässigkeit, Klebung, Packaging 26
6.1.2.5 Lebensdauer, Zuverlässigkeit 27
6.1.2.6 Applikation (Klebung/Integration), Blitzschutz 30
6.1.3 Konzept des Sensornetzwerks, IZFP-D 31
6.1.3.1 Anforderungen an das Sensornetzwerk 31
6.1.3.2 Konzept und Realisierung des Sensornetzwerkes mit kupferbasierter Verbindungstechnik 34
6.1.3.3 Konzept des Sensornetzwerkes mit optischen Komponenten 36
6.1.4 Optische Energie- und Datenübertragung, TUDD 41
6.1.5 Netzwerkknoten, Teletronic 51
6.1.6 Sensorknoten, PI 57
6.1.6.1 Aufgabenbeschreibung 57
6.1.6.2 Ultraschallverfahren mit drahtgebundener Stromversorgung, Version 1 57
6.1.6.3 Ultraschallverfahren mit optischer Stromversorgung, Version 2 58
6.1.6.4 Ultraschall- plus Modalverfahren mit optischer Stromversorgung, Version 3 59
6.1.6.5 Ultraschall- plus Modalverfahren mit optischer Stromversorgung, Version 4 60
6.1.6.6 Bewertung und Ausblick 61

6.2 Versuche 62
6.2.1 Balkentests, IWES 62
6.2.1.1 Hardwareanpassung an die Rotorblatttechnologie 62
6.2.1.2 Verifizierung von SHM-Systemen an rotorblattspezifischen Referenzbauteilen 63
6.2.1.3 Balkentests 64
6.2.1.4 Schlussfolgerung 75
6.2.2 Blattversuche in Dresden, IMA 76
6.2.3 Blattversuche in Rostock, Nordex 78
6.2.3.1 Rotorblattversuch NR 37,5, SN382, Schwenkrichtung 83
6.2.3.2 Rotorblattversuch NR 37,5, SN421, Schlagrichtung 84
6.2.3.3 Rotorblattversuch NR 37,5, SN382, Schlagrichtung 85
6.2.4 Erprobung auf der drehenden Anlage in Uelitz, Nordex, IZFP, WBI 85
6.3 Verfahrensentwicklung 93
6.3.1 Ultraschallverfahren, IZFP-D 95
6.3.1.1 Allgemeine Anforderungen 95
6.3.1.2 Blattstruktur und Sensoranordnung 97
6.3.1.3 Acousto-Ultrasonics, AU 99
6.3.1.4 Akustische Emission 105
6.3.2 Modales Verfahren, WBI 120
6.3.3 Ergänzende Verfahren und Decision Support, IZP 128
6.3.3.1 Vorbemerkung 128
6.3.3.2 Datenerfassung 128
6.3.3.3 Datenarchivierung und -aufbereitung für das Decision Support System 130
6.3.3.4 Modellierung von Referenzfunktionen für das OMA-Messverfahren 133
6.3.3.5 Modellierung von Referenzfunktionen für das AU-Messverfahren 136
6.3.3.6 Schadenserkennung beim AE-Messverfahren 140
6.3.3.7 Restlebensdauerprognose im Driftmodell 142
6.3.3.8 Planung von Instandhaltungskapazitäten 145
6.4 Projektergebnisse im Überblick 147
6.4.1 Systementwicklung 147
6.4.2 Verfahrensentwicklung 148
6.4.3 Ausblick 151
6.5 Zitierte Literatur 152
6.6 Abkürzungsschlüssel 153
7 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinn des fortgeschriebenen Verwertungsplanes 156
8 Während der Durchführung von SHM Wind bekannt gewordene Fortschritte an anderer Stelle 162
9 Publikationen 162
10 Tagungen 163
11 Patente 165

1 Aufgabenstellung: Structural Health Monitoring von Rotorblättern – Notwendigkeit und Projektziele des Verbundprojektes SHM Wind

Das Projekt SHM Wind ist im Rahmen von „Forschung für die Nachhaltigkeit“, FONA, mit Blickrichtung auf die dortigen Klimaschutzziele begonnen worden. „Durch den verstärkten Einsatz von Windenergieanlagen, WEA, werden ganz entscheidend CO_2–Emissionen vermieden. Die neu aufzustellenden WEA werden in erheblichem Umfang Offshore-Anlagen sein, die nicht ohne ein umfassendes Monitoringsystem auskommen werden“, so lautete die Formulierung im Projektantrag. Dieses umfassende Monitoringsystem für Rotorblätter sollte im Rahmen des Projektes entstehen. Durch die Erdbeben- und Tsunamikatastrophe in Fukushima und die nachfolgenden politischen Entscheidungen, die mit dem Schlagwort der „Energiewende“ umschrieben werden, hat das Projektziel einen wesentlich höheren Stellenwert erhalten, denn die Windenergie wird in Zukunft eine herausragende Rolle unter den erneuerbaren Energien spielen. Allein der durch die Energiewende bedingte verstärkte Ausbau der Windenergie würde genügen, um die Notwendigkeit des Projektes zu unterstreichen.

Aber weitere Faktoren untermauern die Bedeutung von SHM Wind. So sind die Windenergieanlagen in den letzten Jahren sehr schnell „gewachsen“. Waren zu Beginn des Projekts noch Anlagen mit 1,5 MW und 37,5 m langen Rotorblättern der technologische Standard für Onshore-Anlagen, so sind die Rotorblätter für binnenländische Schwachwindgebiete heute mit 55 bis 60 m fast doppelt so lang. Das größte zurzeit lieferbare Blatt misst 83 m! Der Überwachungsbedarf für Leichtbaustrukturen dieser Größenordnung ist analog zum Längenwachstum gestiegen und bestätigt so die Dringlichkeit des Projektes.

Ein weiteres Argument für das Projekt ist die verstärkte Hinwendung zu Offshore-Anlagen, die schon im Antrag anklang, jetzt aber von der „geplanten und genehmigten Realität“ überholt wurde.

Es kann erwartet werden, dass die Anzahl der Offshore-Windenergieanlagen in den nächsten Jahren bedingt durch die Energiewende wesentlich stärker ansteigen wird, als das durch die aktuellsten Zahlen zu belegen ist. Nach Angaben von Windresearch waren zum 31.12.2010 in Europa insgesamt 3.869 MW Leistung offshore installiert, genehmigt waren zu diesem Zeitpunkt 20.049 MW und in Planung waren insgesamt 115.788 MW. Allein in Deutschland waren zu dem genannten Zeitpunkt bereits 8.885 MW genehmigt und 25.681 MW projektiert.

Das Gesamtziel von SHM Wind bestand in wissenschaftlich-technischen Untersuchungen zur dauerhaften Überwachung großer Rotorblätter von Windenergieanlagen.

Durch ein Überwachungssystem sollte den gestiegenen Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit, Lebensdauer, Wartungsarmut und sinkender Energieerzeugungskosten Rechnung getragen werden. Dies gilt umso stärker für WEA im Offshore-Bereich. Hier führen Ausfälle, periodische Inspektion der Rotorblätter und Reparaturen zu besonders großem Aufwand bzw. der Service ist in einem erheblichen Teil des Jahres wegen stürmischer See gar nicht möglich und muss sich deshalb auf ein Minimum beschränken.

Um den Forderungen nach einer hohen Verfügbarkeit von WEA gerecht zu werden, ist neben der Qualität aller WEA-Komponenten ein umfassendes Monitoring der Rotorblätter während des Betriebes der Anlagen und über den gesamten Lebensdauerzyklus notwendig. Für die Antriebskomponenten im Maschinenhaus der WEA ist das heute bereits Stand der Technik, nicht jedoch für Rotorblätter. SHM Wind sollte diese Lücke schließen.

SHM Wind setzte auf Ergebnisse eines Vorläuferprojektes CMS auf (vgl. Punkt 2). Das spiegelt sich auch in den wissenschaftlich-technischen Zielen wider, die teilweise Arbeitsziele aus CMS weiterführen. Die wesentlichen Projektziele von SHM Wind sind:

- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der bisher eingesetzten Piezofaserwandler, die auf dem sich drehenden Rotorblatt höchsten Belastungen ausgesetzt sind. Die beiden Überwachungsmethoden Akusto-Ultraschall und die modale Überwachung sind einerseits auf die Richtcharakteristik der PZT-Fasermodule angewiesen. Andererseits haben die Versuche im CMS-Projekt deutlich gezeigt, dass eine Verwendung der vorhandenen Piezofasermodule so nicht möglich ist. Es sollte versucht werden, neuartige Piezowandler zu entwickeln, die einerseits die Vorzüge der PZT-Faserwandler (an eine Richtung gebundene Dehnungsempfindlichkeit sowie die Möglichkeit, gerichtet Lambwellen zu senden und zu empfangen) besitzen, bei denen andererseits ihre konstruktiven Nachteile umgangen werden können. Geplant waren Arbeiten zu
    - Sende- und Empfangscharakteristik sowie Frequenzspektrum,
    - Kalibrierbarkeit,
    - Zuverlässigkeit bei hohen Beschleunigungen,
    - Lebensdaueranforderungen bei –35 °C < T < 70 °C und hoher Luftfeuchtigkeit.

- Hardwareanpassung an die Rotorblatttechnologie. Es sollte eine Aufbau- und Verbindungstechnologie gefunden werden, bei der die sensornahe Elektronik sicher und zuverlässig mit dem Wandler zu einem Modul „verheiratet“ werden kann (Netzwerkknoten) und eine rationelle Integration (Montage) der Module im bzw. am Rotorblatt ermöglicht wird. Die Möglichkeit zur Kalibrierung der Wandler sollte integriert werden. Die Wandler müssen eigene Intelligenz aufweisen, um z. B. die Temperaturkompensation optimal zu unterstützen.

- Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Sensoren mittels Balkenprüfung. Damit sollte die Leistungsfähigkeit der entwickelten Sensoren im kleinen Maßstab untersucht werden, bevor die Messtechnik am Rotorblatt appliziert wird. Am Balkenprüfstand ist es möglich, unterschiedliche Klimaverhältnisse und Defekte zu simulieren.

- Übernahme und Auswertung von Messdaten, die die Betriebsbedingungen charakterisieren und bisher nur zur Anlagensteuerung verwendet werden, in die Blattbewertung. Anpassung der Bewertungstechniken aus Prüfstandsversuchen und Anpassung der hierfür entwickelten Algorithmen.

- Zusammenführung der Ergebnisse aus unterschiedlichen Bewertungstechniken zu einer rotorblattspezifischen Qualitätsbewertung unter Betriebsbedingungen (einschließlich Trennung der Umwelteinflüsse von Fehlerbildern, z. B. Unterscheidung mechanischer Dehnungen von temperaturbedingten Dehnungen, rotorblattspezifische Schwellenwertbildung, etc.).

- Technische Realisierung in einem Decision Support System (DSS), das die Aussagen der unterschiedlichen Überwachungsmethoden vereinigt und eine Beurteilung des Blattzustandes vorbereitet. Dadurch wird es möglich, frühzeitig Schäden zu detektieren und zu beurteilen, sodass Korrekturmaßnahmen mit geringem Aufwand durchführbar bzw. überhaupt möglich sind und größere Folgeschäden vermieden werden. Nur durch Kombination mehrerer voneinander unabhängiger Überwachungsmethoden können Fehlalarmierungen vermieden werden. Zu diesem Zweck müssen die Auswertung von Datenbanken, systematische und methodisch fundierte Zuverlässigkeitsbetrachtungen und weitere probabilistische Aussagen mit strukturmechanischen deterministischen Ansätzen kombiniert und für die Modellbildung nutzbar gemacht werden.

- Im Rahmen der Aufstockung des Projektes sollte ein speziell an die Belange der Rotorblattüberwachung angepasstes System zur Stromversorgung über optische Fasern entwickelt werden.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Wie bereits erwähnt, ging dem SHM Wind-Projekt ein erfolgreiches Projekt CMS, Innovatives Condition Monitoring System, Förderkennzeichen 01RI05060 voraus und ein Großteil der SHM Wind Partner war auch Teilnehmer an CMS. Die in CMS erreichten Ergebnisse sind Voraussetzung für SHM Wind. Ohne die CMS-Ergebnisse wäre SHM Wind nicht möglich gewesen.

Ein Grundgedanke von SHM Wind war die methodische Weiterentwicklung des SHM-Verfahrens, die Ermittlung von Entscheidungskriterien zur Integrität des Blattes, der Entwurf von geeigneten Sensoren und Netzwerkknoten und die Übertragung der Ergebnisse von Prüfstandversuchen auf eine rotierende WEA. Dazu wurde die Durchführung von sehr vielen Versuchen auch in Windparks unabdingbar.

	Laborversuch IWES, Bremerhaven	**Pilotversuch auf WEA, Windpark Uelitz**	**Blattversuch Teststand IMA, Dresden**	**Blattversuch Teststand Nordex, Rostock**	**Systemtest auf WEA, WP Uelitz**
Versuchsziel	Sensor-, Systemtest im Labor, Klimakammer, gezielte Schäden, Grundlage für Model Update	Sensoreignung, Erfahrungsgewinn auf Anlage (Mechanik/ Messtechnik)	Basis für Systementwicklung, Ermüdung, künstliche Schädigung, Grenzwerte, Systemkalibrierung	Begleitung Ermüdungsversuch, künstliche Schädigung, Blattreparatur	Testbetrieb des Gesamtsystems auf WEA
Versuchsträger	Balken aus glasfaserverstärktem Kunststoff, GFK	Rotorblatt auf WEA	Rotorblatt auf Teststand	Rotorblatt auf Teststand	3 Rotorblätter auf WEA
Testobjekte	Neue Sensoren	Konventionelle und neue Sensoren, Netzwerkknoten	Weiterentwicklung SHM-System	Einzelsysteme Entwicklungsstand CMS, manuelle Auswertung	Gesamtsystem

Tabelle 2-1: Versuchsplanung in SHM Wind

Vor allem kam mit dem Partner Nordex ein potenzieller Endanwender zusätzlich mit in das Projekt. Dadurch erfolgte eine noch stärkere Hinwendung zu praxisrelevanten, auf den Einsatz auf eine WEA ausgerichteten Fragestellungen. Nordex stellte auch die Testobjekte in Form von mehreren, teilweise vorgeschädigten Rotorblättern NR 37,5 zur Verfügung und ermöglichte den Zugang zu drehenden Anlagen.

Das Thema Blitzgefährdung und Blitzschutz von Rotorblättern war uns zwar zu Beginn von SHM Wind bewusst, wir setzten aber voraus, dass das Problem auf der Basis vorhandener Techniken der optischen Energieübertragung lösbar sein würde. Im Verlauf des Projektes mussten wir jedoch feststellen, dass es keine praktikable Blitzschutzlösung für ein Sensornetzwerk gibt, das den gesamten Rotor überzieht.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Da in SHM Wind die gesamte Kette von der Sensorentwicklung über die Verfahrensentwicklung bis hin zum Test des Systems im Rotorblatt geplant war und die Arbeiten sehr eng verzahnt waren, wurden themenbezogene Arbeitsgruppen gebildet. Zu Projektbeginn gab es folgende Arbeitsgruppen:

- Rotorblatt: IMA, IZFP-D, Nordex, WBI
- Sensor: ISC, IZFP-D, PIC, TU-DD, WBI
- Hardware: IZFP-D, PI, Teletronic und TU-DD
- Verfahren: IZFP-D, IZP, IWES, Nordex, WBI bis Februar 2010

Nachdem sich bei der gemeinsamen Arbeit relativ schnell eigene Informationszirkel herauskristallisierten, wurde die Rotorblattgruppe mit der Verfahrensgruppe zusammengelegt.

- Verfahren/Rotorblatt: IMA, IZFP-D, IZP, IWES, Nordex, WBI, ab Februar 2010

Die Sacharbeit in den Arbeitsgruppen erforderte häufige Gruppensitzungen. Zusätzlich wurden Internetkonferenzen abgehalten. Darüber hinaus gab es natürlich die üblichen Plenumssitzungen, an denen alle Partner teilnahmen. Es wurden insgesamt ca. 20 Projektsitzungen mit allen Partnern abgehalten. Bei Berücksichtigung aller Arbeitsgruppensitzungen und der bilateralen Treffen gab es mehr als 60 Meetings. Damit war die Kommunikationsfrequenz in SHM Wind sehr hoch.

Durch die aus technischer Sicht notwendige sehr hohe Versuchsdichte in SHM Wind kam es zu deutlich spürbaren Engpässen bezüglich des Messequipments. Aus diesem Grund war manchmal ein serielles Abarbeiten von Versuchen notwendig, da die benötigten Geräte nicht für parallel ablaufende Versuche reichten. Das war einer der Gründe, weshalb eine Projektverlängerung beantragt werden musste. Weitere Verzögerungen gab es beim Rotorblatttest bei der IMA in Dresden, wo die verfügbare Kraft des Aktuators nicht ausreichte, um trotz großer aerodynamischer Dämpfung die gewünschte Amplitude bei den Schwingversuchen zu erreichen. Deshalb musste auch ein Rotorblatt zur Fortsetzung des Ermüdungsversuchs zum Versuchsstand von Nordex nach Rostock transportiert werden, wo mit dem dortigen Unwuchterreger größere Amplituden erreicht werden konnten.

Wie eingangs bereits erwähnt, wurde die Blitzschutzthematik bei der Antragstellung unterschätzt und wir mussten erkennen, dass es keine technisch praktikable Möglichkeit gibt, ein Sensornetzwerk, das das ganze Rotorblatt abdeckt, auf einer Anlage blitzgeschützt zu installieren. Das führte schließlich zu der Entwicklung einer optischen Daten- und Energieübertragung und zu einer Aufstockung für die TU Dresden.

Im Verlauf des Projektes stellte sich auch heraus, dass die ursprünglich für alle drei Messmethoden Acoustic Emission, AE, Acousto-Ultrasonics, AU und Operational Modal Analysis, OMA, gewünschte piezofaserbasierte Sensorik und Aktuatorik für die hochpräzise, für OMA notwendige Schwingungs- und vor allem Dehnungsmessung nicht geeignet ist, weil nur eine Genauigkeit $\approx \pm 10\,\%$ zu erreichen ist, jedoch eine Abweichung deutlich $< \pm 1\,\%$ gefordert wurde. Deshalb musste für die OMA-Messungen eine andere Technologie bezüglich der Netzwerkknoten und vor allem bezüglich der Sensoren gefunden werden. Die OMA wird nun mit herkömmlichen sehr teuren Beschleunigungssensoren betrieben.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angaben zu bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechten, die zur Durchführung des Verfahrens benutzt wurden

Die folgenden kursiv dargestellten Ausführungen geben den Stand zu Projektbeginn wieder und sind der Einfachheit halber aus dem Förderantrag zitiert:

Bereits durchgeführte (Forschungs-)Arbeiten auf dem Gebiet
In dem bisher durchgeführten und vom BMBF geförderten Vorhaben „Condition Monitoring Systems (CMS)“ (Förderkennzeichen 01 RI 05060) wurde ein Zustandsüberwachungssystem zur Früherkennung von Schäden an sicherheitsrelevanten Bauteilen entwickelt und an Labordemonstratoren in 3 Anwendungsbereichen erprobt:

(1) an einem faserverstärkten Bauteil aus der Luftfahrt (EADS/Airbus),
(2) an Rohrleitungsteilen aus einem Kohlekraftwerk (RWE) und aus einer Chemieanlage (TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland),
(3) an Teilen eines Rotorblatts einer Windenergieanlage (WEA).

Der nächste Schritt sind erste Feldtests an realen Bauteilen (in Planung bzw. Vorbereitung).

Zu Anwendung (1) wird Airbus den Feldtest ohne Fördermittel durchführen. Zu Anwendung (2) sind Instrumentierungen an den o.g. Anlagen im Aufbau, die Messungen werden im verlängerten Verbundvorhaben durchgeführt. Zu Anwendung (3) wird im Resonanzbetrieb ein dynamischer Test eines Rotorblatts in einem Rotorblattprüfstand beim Verbundpartner IMA durchgeführt. Zur Schadenserkennung kommen unterschiedliche Methoden zum Einsatz. Durch gestufte Erhöhungen der Schwingamplitude und durch Anwendung vergleichender Prüfverfahren sollen Grenzwerte für die Unterscheidung Rauschen - Nutzsignal definiert werden. Es sollen durch die Verwendung aller verwendeten Prüfverfahren möglichst Merkmale für unterschiedliche Schäden ermittelt werden. Außerdem sollen Erfahrungen über Schadensfortschrittsgeschwindigkeiten gesammelt werden. Damit sollen auch besonders gefährdete Strukturbereiche ermittelt werden. Der Betreiber kann den Betrieb des Teststandes am Zustand des Rotorblattes orientieren, d. h. er kann die Versuche je nach zu erwartendem Schadensfortschritt variieren, da die verwendeten Messverfahren Rückschlüsse auf Strukturänderungen liefern - und das bereits vor dem Auftreten sichtbarer Schäden. Ebenfalls können bereits während des Testbetriebes schadhafte Blattsegmente (z. B. fehlerhafte Klebung) identifiziert und gegebenenfalls repariert werden. [1] [2] [3] [4] [5]

Eine Verifikation der Ergebnisse kann am Versuchsstand mit hochauflösenden konventionellen Ultraschalluntersuchungen vorgenommen werden. Diese Untersuchungen gehören nicht zum Funktionsumfang des CMS-Projektes, an solchen Vergleichsmessungen sind aber Anwender

[1] M. Lehmann, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF), Darmstadt, K.-H. Haase, HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, **Zuverlässigkeit von Sensoren für die Zustandsüberwachung von Faserverbundwerkstoffen,** GESA Expertenforum Experimentelle Strukturanalyse für die Zustandsüberwachung 2007

[2] B. Köhler, F. Schubert, B. Frankenstein, **„Numerical and experimental investigation of Lamb wave excitation, propagation, and detection for structural health monitoring”**, 2nd European Workshop on Structural Health Monitoring, Munich, Germany, July 7-9, 2004.

[3] L. Schubert, M. Barth, T. Klesse, B. Köhler, B. Frankenstein, **„Guided elastic waves and their impact interaction in CFRP structures characterized by 3D laser scanning vibrometry”**, 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 9 - 13 March 2008, San Diego, California

[4] L. Schubert, M. Küttner, B. Frankenstein, D. Hentschel, **“Structural Health Monitoring of a rotor blade during statical load test”**, 18th International Workshop on Database and Expert Systems Applications, 3-7 September 2007, Regensburg / Deutschland

[5] B. Frankenstein, D. Hentschel, F. Schubert, L. Schubert, “**Condition monitoring of windmill rotor blades”**, 4th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2-4 July 2008, Kraków/Poland

solcher Verfahren interessiert. Sie sind auch interessiert an dem gegenseitigen Abgleich der Ergebnisse, da auf einer Windenergieanlage solche Prüfungen nicht ohne Kran o. ä. durchgeführt werden können.
Messungen an einem in Betrieb befindlichen Rotorblatt sind zur Qualifizierung erforderlich und erfordern die Durchführung eines Demovorhabens. Eine große Anzahl von Untersuchungen ist nur auf einer in Betrieb befindlichen Anlage möglich:

- *die Dynamik eines Rotorblatts ist durch ständige Lastumlagerung und die Änderung der Geometrie im Gefolge der Rotation völlig anders als beim Test am Boden,*
- *Fliehkräfte beeinflussen die Dehnungsmessungen,*
- *die externen Lasten (Wind, Niederschlag, Eisbildung) stören bzw. beeinflussen die Messungen erheblich und stellen erhöhte Anforderungen an die Lebensdauer der Elektronik,*
- *elektrische Leistung muss auf das rotierende System übertragen werden, Daten müssen aus dem Maschinenhaus in das Blatt und zurück übertragen werden.*

Bisher existiert kein vergleichbares Messsystem. Alle Anwender befürworten die Strategie zur Schaffung eines Monitoring-Systems. Durch den Einsatz des Systems könnten Anlagen länger und sicherer betrieben werden. Beanspruchte Bauteile brauchten nicht nach festen Zeiten „auf Verdacht" ausgetauscht zu werden, sondern erst beim Anzeichen von Schädigungen, mit entsprechenden Material- und Kosteneinsparungen und unter Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit. Dies ist besonders bei Offshore-Windparks von erheblicher Bedeutung.

Konkurrierende Entwicklungsansätze, Wettbewerbssituation

*Bekannt ist das **IGUS-Verfahren** (sog. BLADEcontrol®: Resonanz-Überwachung der Rotorblätter). Dieses zertifizierte System basiert lediglich auf Messdaten eines Sensors (Eigenfrequenzen, Dämpfung) pro Blatt, die mit Hilfe von Erfahrungswerten interpretiert werden. Ein wichtiger Nachteil liegt darin, dass es nicht ortsaufgelöst messen kann. Es stellt eine Insellösung dar.*

***FBG-Systeme** (Fa. Insens) messen nur die Dehnungen im Blatt. Die exakte Erfassung ist aber lediglich in der Nähe der Sensoren (Sensorflächen ca. 1 cm^2) möglich. Dadurch sind die Messergebnisse lokal eingeschränkt und zudem temperaturabhängig. Es ist bisher noch kein solches System auf einer Anlage installiert.*

*Das optische Blade Monitoring-System **DELAS 100**[6] von Windcomp misst die Auslenkung der Rotoren durch die auftreffende Windlast. Die auf dem Maschinenhaus angebrachten laseroptischen Sensoren zeichnen den Spurverlauf jedes Blattes zueinander auf und ermitteln ein lastabhängiges Biegemuster des Rotors. Materialschäden durch Überlast oder Steifigkeitsverluste der Struktur machen sich durch Abweichungen von der normalen Auslenkung bemerkbar. Durch die Platzierung des Sensors außerhalb des Rotors wird auch mit diesem Verfahren nur eine globale Fehlererkennung angeboten. Zudem beruht sie ausschließlich auf Vergleichswerten.*

[6] http://www.windcomp.com/Windcomp.de/Blade_Monitoring.html

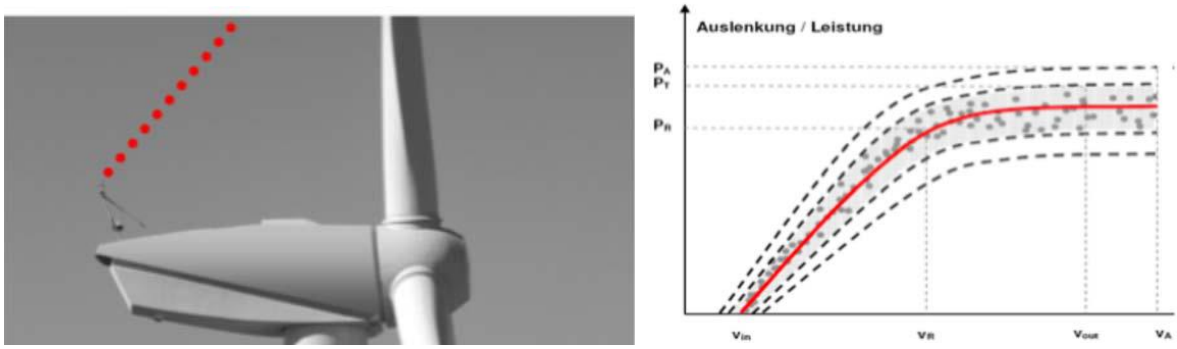


Bild 1: Blade Monitoring-System DELAS 100, Sensorplatzierung, Auslenkung vs. Leistung

Aufgabe dieses Systems ist nicht die vollständige Blattüberwachung; vielmehr soll ein Touchieren des Blattes am Turm verhindert werden.
Am Markt fehlt ein Überwachungssystem, das sowohl globale als auch ortsaufgelöste Informationen über den strukturellen Zustand von GFK-/CFK-Rotorblättern liefert.

*Ein weiteres sehr aufwändiges System namens **RIWEA**[7] vollführt die Inspektion der Rotorblätter von innen und außen mit Hilfe eines Roboters. Ausgestattet mit komplexer Thermografie- und Ultraschalltechnologie ist diese Variante aufgrund der schwierigen Wetterbedingungen vor allem bei Offshore-Verhältnissen extremen Beanspruchungen ausgesetzt. Es entstehen somit weitere potenzielle Fehlerquellen, die eine zusätzliche Wartung und Instandhaltung dieses Systems erfordern. Die Überprüfung ist während des Betriebes nicht möglich und somit kann das System eine kontinuierliche Überprüfung nicht gewährleisten. Dieser Nachteil kann bei der hohen Volllaststunden-Auslastung im Offshore-Bereich sehr entscheidend sein.*

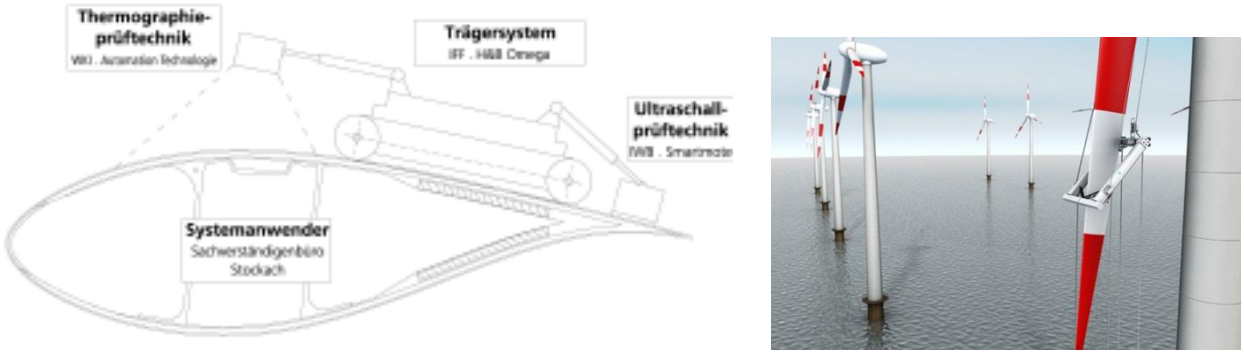


Bild 2: Robotergestützte Inspektion der Rotorblätter mit dem System RIWEA

(Ende des Zitats aus dem Projektantrag)

[7] http://www.iff.fraunhofer.de/de/iffdbde/Produkt_detail.php?ProduktId=75”

4.2 Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Zum SHM-Verfahren wurden im Zuge von mehreren Patentanmeldungen (gemeinsames Patent IZFP-D, Wölfel, Patent Wölfel mit Bezug zu OMA) Patentrecherchen durchgeführt.
Die Literaturrecherchen erfolgten größtenteils im Internet und mit Unterstützung einschlägiger Fachbibliotheken. Darüber hinaus sind im Projekt SHM Wind einige Dissertationen entstanden oder noch in Arbeit (vgl. Literaturverzeichnis):

- Ebert, Carsten: Systemidentifikation zur Modellierung mechanischer Strukturen, in Druck
- Schubert, Lars: Zustandsüberwachung an Faserverbundwerkstoffen mit geführten Wellen
- Sohr, Sebastian: Fasergekoppelte SMD-Packagingtechnologie auf Waferlevel für opto-/ elektrische Wandlerbauelemente (vorläufiges Thema)

Peter Kraemer hat an der Uni Siegen über das einschlägige Thema „Schadensdiagnoseverfahren für die Zustandsüberwachung von Offshore-Windenergieanlagen“ promoviert und arbeitet seit 2011 bei Wölfel im Projekt SHM Wind.

Für diese Dissertationen wurden ebenfalls umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt. Damit liegt für das Gesamtprojekt ein sehr guter Überblick zum Stand von Wissenschaft und Technik vor. Er ist vornehmlich in den genannten Dissertationen dokumentiert.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Konsortium war die für das Projekt notwendige Expertise vorhanden. Deshalb war eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen anfangs nicht notwendig. Mit der Projektverlängerung kam mit der Entwicklung einer optischen Daten- und Energieübertragung ein völlig neuer Aspekt ins Spiel. Ursprünglich sollte diese Aufgabe mit vorhandenen Technologien gelöst werden. Es zeigte sich jedoch, dass dafür Neuentwicklungen notwendig waren. Aus diesem Grund wurde mit dem Fraunhofer Institut für Solarenergie in Freiburg zusammengearbeitet.

6 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

In SHM Wind waren 3 große thematische Blöcke zu bearbeiten. Im ersten mussten die für das SHM System notwendigen Sensoren, Aktoren und das Netzwerk inklusive der dafür benötigten Software entwickelt werden. Diese Komponenten mussten im zweiten Block auf ihre Funktionsfähigkeit getestet werden. Gleichzeitig lieferten die Tests in Form der Messsignale den „Rohstoff“ für das nachfolgende dritte übergeordnete Paket in Form der Verfahrensentwicklung. Dabei sollten letztendlich Auswerteroutinen entstehen, die die Vielzahl der Messsignale auf die Aussage eines ‚Damage Indicators‘ reduzieren, der anzeigt, ob ein gefahrloser Betrieb der Rotorblätter möglich ist (Betriebszustand grün), ob sich ein struktureller Blattschaden entwickelt (Betriebszustand gelb, lastreduzierter Betrieb empfohlen, Kontrollen notwendig), oder ob die Anlage angehalten und repariert werden muss (Betriebszustand rot). Die Aufgaben aus diesen drei thematischen Blöcken wurden auf 8 Arbeitspakete verteilt.

Das Kapitel 6 stützt sich im Wesentlichen auf die fachliche Zuarbeit aller Projektpartner. Eine redaktionelle Überarbeitung wurde auf die Umgruppierung einzelner Textbausteine, eine vorsichtige begriffliche Angleichung und auf das Tilgen von Überschneidungen beschränkt. Der direkte Bezug zur Gliederung in Arbeitspakete von SHM Wind wurde in diesem öffentlichen Abschlussbericht zur Verbesserung der Lesbarkeit aufgebrochen.

6.1 Systementwicklung

6.1.1 Sensorentwicklung und Klebetechnik, PIC

6.1.1.1 Anforderungen an den Wandler

Die Aufgabe bestand darin, Piezowandler mit verbesserter Leistungsfähigkeit gegenüber den bisher eingesetzten Piezofaserwandlern zu entwickeln. Die Wandler werden auf den sich drehenden Rotorblättern höchsten Belastungen ausgesetzt. Die Überwachungsmethoden Acousto-Ultrasonics (AU), modale Überwachung bzw. Operational Modal Analysis (OMA) und Event-Detection (ED bzw. Acoustic Emission, AE) sind einerseits auf die Richt-Charakteristik der PZT-Fasermodule angewiesen. Andererseits haben die Versuche deutlich gezeigt, dass die im Vorgängerprojekt CMS verwendeten Piezofasermodule den Anforderungen vor Ort auf Dauer nicht gewachsen sind. Es sollten neuartige Piezowandler entwickelt werden, die einerseits die Vorzüge der PZT-Faserwandler (an eine Richtung gebundene Dehnungsempfindlichkeit sowie die Möglichkeit, gerichtet Lambwellen zu senden und zu empfangen) besitzen, bei denen andererseits ihre konstruktiven Nachteile umgangen werden können. Hierzu gehören unter anderem die günstigere Herstellung der PZT Halbzeuge (Platten statt Fasern), die bessere Ausnutzung des PZT Volumens bei der Polarisation und die Nutzung von Flächen- statt Interdigitalelektroden.

Insbesondere sollte der Wandler robust und zuverlässig bei hohen Beschleunigungen und bei Temperaturen von –35 °C bis 70 °C und hoher Luftfeuchtigkeit einsetzbar sein. Die spezifisch geforderten Eigenschaften wurden hierbei durch die angewandten Messmethoden bestimmt.

Von den Projektpartnern wurde eine Reihe von Anforderungen an den zu entwickelnden Sensor gestellt. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Messprinzipien waren diese Anforderungen teilweise widersprüchlich oder schwer miteinander zu vereinbaren. Einige dieser Anforderungen wurden während der Laufzeit obsolet (sie sind in Tabelle 6.1.1-1 durchgestrichen).

	Anforderung	**Messmethode**
1	Sensorisch und aktorisch einsetzbar	AU, OMA, AE
2	Empfindlichkeit in einem großen Frequenzbereich (~~0.1 Hz – 20 Hz und~~ 0.1 – 1 MHz)	AU, ~~OMA~~
~~3~~	~~Gerichtete Ultraschall Abstrahlung~~	~~AU~~
~~4~~	~~Möglichkeit zur Dehnungsmessung~~	~~OMA~~
5	Geringer Messenergieaufwand	AU, OMA, AE
6	Maximale Ansteuerspannung 200 V	AU
7	Temperaturbeständig im Bereich –35 °C … 70 °C	AU, OMA, AE
8	On-line und kontinuierlich einsetzbar	AU, OMA, AE
~~9~~	~~Geringe elektrische Kapazität~~	~~AU, AE~~
10	Omnidirektionale Ultraschallabstrahlung	AU
11	Großes Signal-Rausch-Verhältnis	AU, AE
12	Integrierbar in GFK- oder CFK–Bauteile	---
13	Elektrisch isoliert	---
14	Einhaltung der EMV Richtlinien für Windenergieanlagen	---
15	Passiviert gegen Luftfeuchtigkeit und schwache Säuren und Laugen bei der Verarbeitung von Epoxy-Matrixharzen	---
16	Kostengünstig (10 – 100 Euro)	---
17	Flexibel montierbar (bis 20 mm Krümmungsradius)	---
18	Möglichst geringe Dicke (<1 mm)	---
19	Robust handhabbar / montierbar	---

Tabelle 6.1.1-1: Anforderungen und zugehörige Messmethoden. Die durchgestrichenen Anforderungen wurden während der Projektlaufzeit obsolet.

Es wird angestrebt, dass die Wandler beim Produktionsprozess der Rotorblätter direkt einlaminiert werden. Da dies innerhalb des Zeitraums des Projekts nicht machbar war, musste eine entsprechende Montagetechnik entwickelt werden, um die Wandler in bereits fertigen Rotorblättern zu befestigen. Hierzu gehörten die Auswahl eines geeigneten Klebstoffs sowie die Entwicklung einer Technik zur Montage und Härtung.

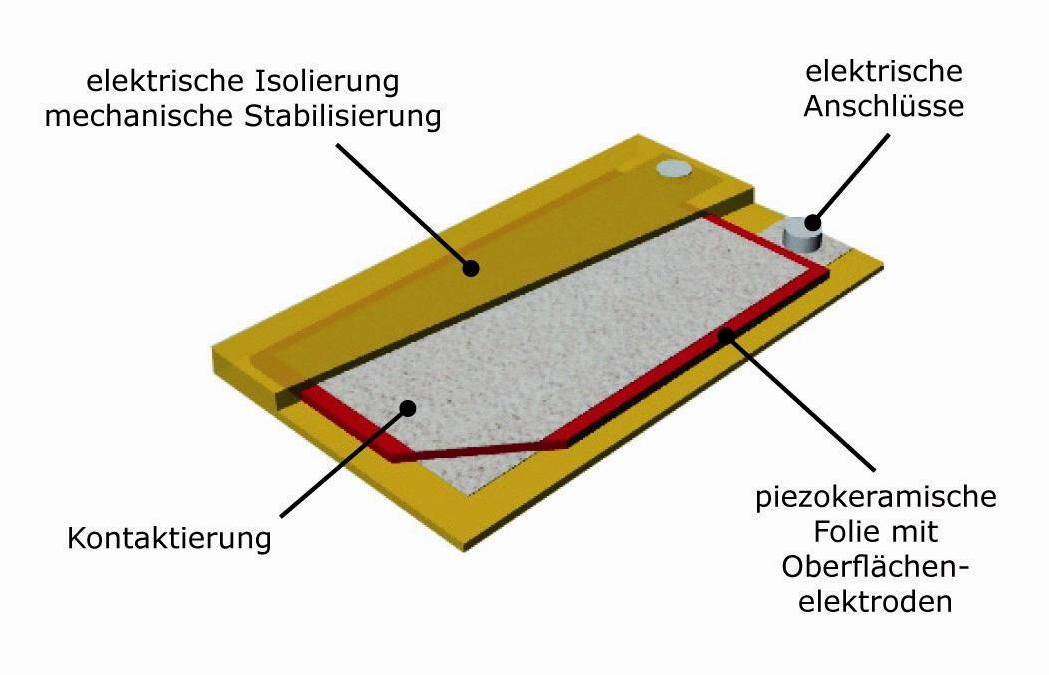


Abbildung 6.1.1-1: Schematischer Aufbau eines DuraAct Wandlers

Die Firma PI Ceramic entwickelte spezielle DuraAct Wandler, die die Voraussetzungen für die erfolgreiche Gestaltung eines Überwachungssystems für WEA-Rotorblätter erfüllen. Anzumerken ist, dass es grundsätzlich zwei Möglichkeiten gab, die notwendigen Vorgaben zu erfüllen. Einerseits wurden vorhandene Wandler-Designs nach dem vorhandenen Stand der Technik angepasst, andererseits wurden komplett neue Wandler und die Techniken zu deren Herstellung entwickelt.

Die piezokeramischen Halbzeuge sowie das Design des Wandlers wurden von PI Ceramic entwickelt. Die Entwicklung der Prozesse für die Endfertigung (Assemblierung, Positionierung, Vakuum-Laminierprozess) erfolgte extern bei der Firma Invent GmbH, Braunschweig. Diese Prozesse ändern sich mit jeder Designänderung des Wandlers und müssen dementsprechend individuell angepasst werden.

Es wurden anfangs insgesamt 250 DuraAct Wandler für das Projekt eingeplant. Die Zeitspanne von Design-Freeze bis zur Lieferung der fertigen DuraActs betrug ca. 10 Wochen für jedes neu entwickelte Design.

Die Messtechnik zur Qualitätssicherung war vorhanden und musste nur durch Adapter und Einspannungen für die jeweilige neue Bauform ergänzt werden.

6.1.1.2 Entwicklung der DuraAct Wandler

Aufgrund des Zeitdrucks durch den verspäteten Start des Projekts sowie des anfangs noch unklaren Anforderungsprofils wurde die Entwicklung des Wandlers in mehrere Design-Stufen aufgeteilt. Hierbei flossen die dem jeweiligen Stand des Projekts entsprechenden Vorgaben in das Design der nächsten Stufe ein. Einige Anforderungen wurden während der Laufzeit des Projekts obsolet. Die dazugehörigen Charakteristika wurden entsprechend aus dem nachfolgenden Design entfernt.

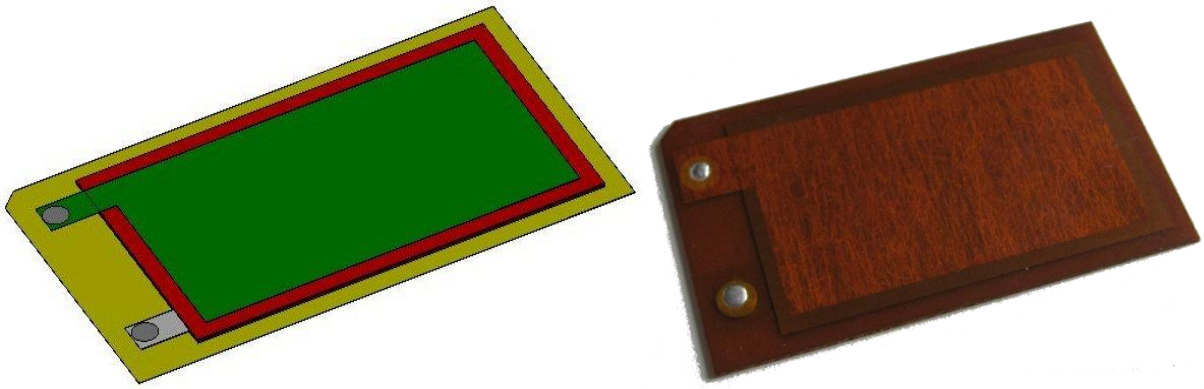


Abbildung 6.1.1-2: DuraAct P-876.A15 (Standardprodukt, PI Ceramic)

Um möglichst schnell zu ersten Ergebnissen zu kommen, wurde für die erste Bestückung auf dem Gelände der IMA in Dresden auf Standard-DuraAct zurückgegriffen (P-876.A15). Aus den erhaltenen Ergebnissen konnte das Design der nächsten Stufe festgelegt werden.

6.1.1.3 Designstufe 1 – Richtungsabhängiges DuraAct-Epoxy-Array

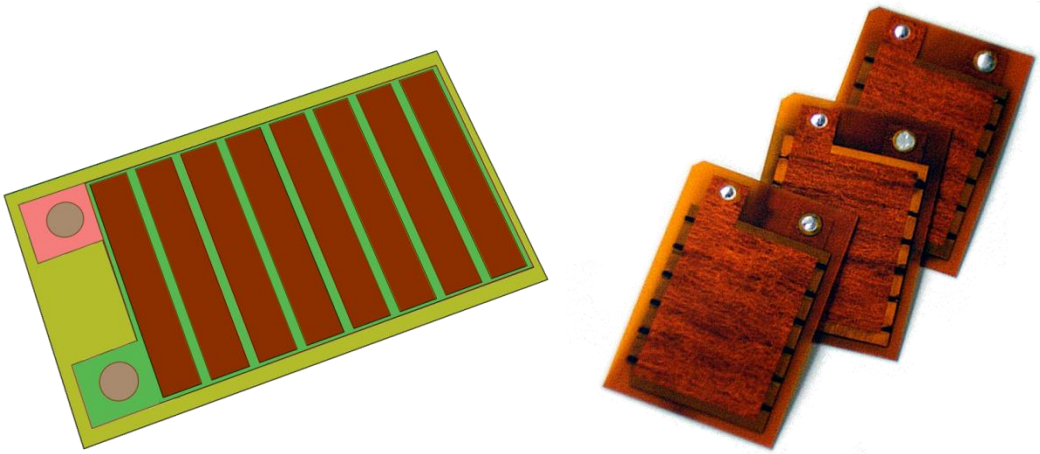


Abbildung 6.1.1-3: Designstufe 1 (DuraAct Array, keine Typenbezeichnung, einlagiges Array, 8x PIC255 Keramik 30x5x0,2 mm mit 1 mm Abstand)

Parallel zur Bestückung des ersten Rotorblatts wurden die DuraAct der Designstufe 1 entwickelt und gefertigt. Als Basismaterial wurde PIC 255 (ein „weiches“ PZT) gewählt. Hierbei wurde ein Block mit Einzelplatten so mit Epoxidharz vergossen, dass daraus fertige PZT-Array-Platten getrennt werden konnten. Die resultierenden Halbzeugplatten waren PZT-Epoxy-Arrays mit 7 parallel geschalteten PZT Streifen (30 x 5 x 0,2 mm). Elektrodierung erfolgte nachträglich durch Sputtern einer Cu-Ni-Elektrode.

Vorteile:

- Richtungsabhängige Abstrahlung / Empfindlichkeit
- Geringe Kapazität (~46 nF)
- Dünn (0,4 mm)

Nachteile:

- Aufwändige Herstellung des Halbzeugs
- Schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis im Sensorbetrieb

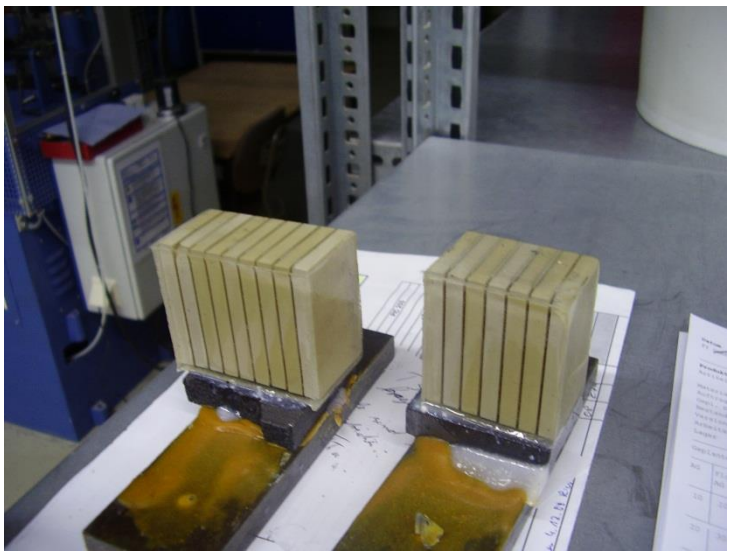


Abbildung 6.1.1-4: Halbzeugblöcke für DuraAct Arrays

Ziel dieses Designs war es insbesondere, die Ultraschallabstrahlung in Abhängigkeit von der Richtung zu beeinflussen. Theoretisch sollte die Abstrahlung in Längsrichtung deutlich höher sein, als in Querrichtung. Bei Untersuchungen am FhG ISC und IZFP-D hatte sich dies nicht bestätigt. Die Unterschiede in Längs- und Quer-Abstrahlung und Sensitivität waren für die Anwendung nicht ausreichend.

Auch die Tests als richtungsabhängiger Dehnungssensor waren nicht erfolgreich. Dies lag allerdings daran, dass Piezokeramik als Dehnungssensor generell für die im Rotorblatt auftretenden, hohen Dehnungen nicht geeignet war. Das Design wurde entsprechend verworfen.

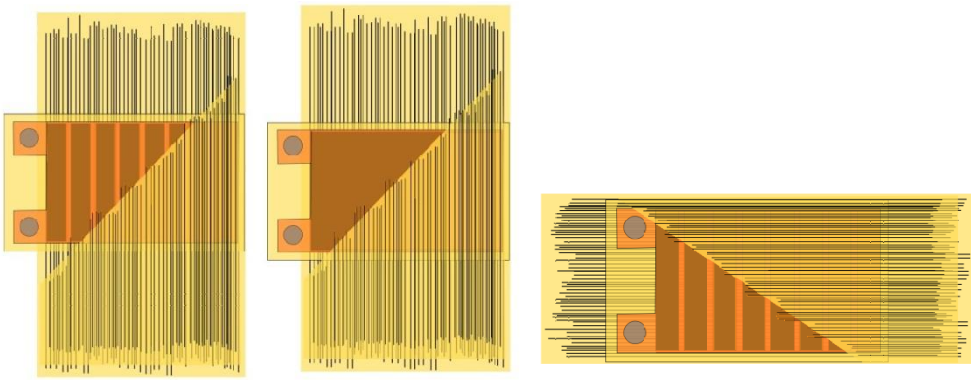


Abbildung 6.1.1-5: DuraAct Konzepte zur Fokussierung der Ultraschallabstrahlung mit unidirektionalen Glasfasermatten

Es wurden noch weitere Konzepte zur Verstärkung der Richtungsabhängigkeit der Ultraschallabstrahlung erstellt. Bei einem späteren Treffen wurden die Anforderungspunkte 3 und 4 aus Tabelle 6.1.1-1 gestrichen. Dadurch wurden diese Konzepte obsolet und verworfen.

6.1.1.4 Designstufe 2 – Doppellagig, Eigenschirmung

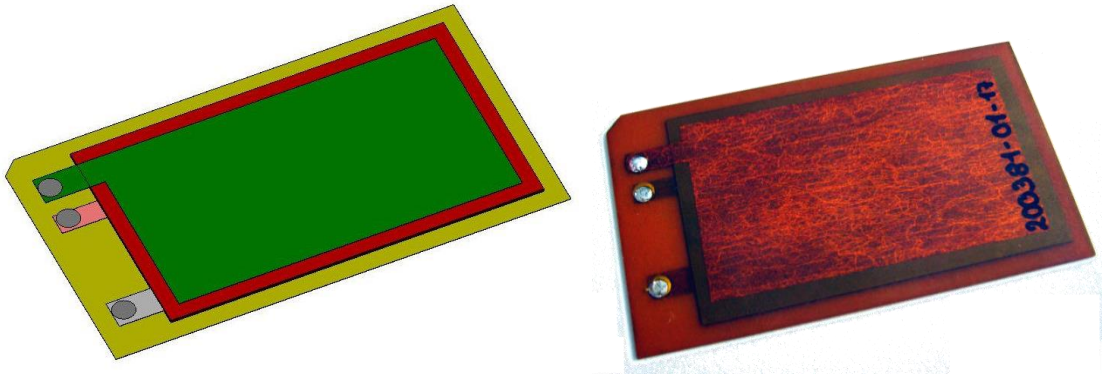


Abbildung 6.1.1-6: Designstufe 2 (P-876K021, doppellagig, 2x PIC255 Keramik 30x50x0,2 mm)

In der 2. Designstufe wurde der Fokus mehr auf die Sensoreigenschaften gelegt. Insbesondere die Forderung nach einem besseren Signal-Rausch-Verhältnis wurde berücksichtigt.

Zur Unterdrückung von Störsignalen wurde ein doppellagiger DuraAct Wandler mit Mittelelektrode entworfen. Dadurch kann der sogenannte Eigenschirmungseffekt von aufeinander geklebten PZT Platten genutzt werden. Hierbei verhalten sich die beiden kurzgeschlossenen, äußeren (positiven) Elektroden wie ein Schirm gegen eingestreute elektrische Störsignale. An der gemeinsamen Mittelelektrode (negativ) kann dann das Signal abgegriffen werden.

Zusätzlich lässt sich dieser Wandler auch im Biegemodus betreiben, wodurch Biegewellen direkt eingekoppelt und aufgenommen werden können.

Das Grundkonzept der Eigenschirmung war Stand der Technik, die Geometrie und das Elektrodendesign mussten für das Projekt neu entworfen und produziert werden. Ob dieses Konzept auch für die Vorgaben zum Blitzschutz genügen würde, lässt sich nur durch zusätzliche Tests prüfen.

Vorteile:
- Sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis
- Eigenschirmung durch Außenelektroden
- Kann sowohl im Dehnungsmodus als auch als Bieger angesteuert werden

Nachteile:
- Sehr hohe Kapazität im Dehnungsmodus (~89 nF)
- Komplexer (teurer) Aufbau
- Zusätzlicher Lötkontakt - mögliche Schwachstelle bei zyklischer Belastung

6.1.1.5 Designstufe 3 – Doppellagig, doppelt geschirmt

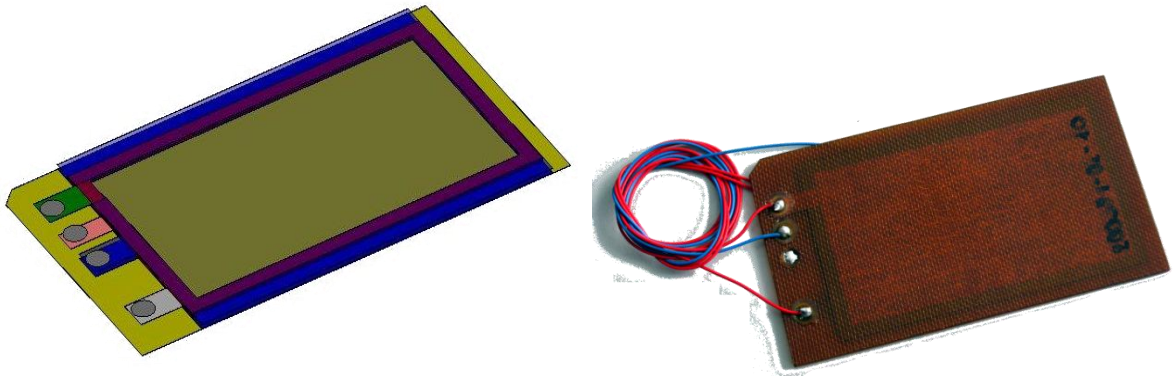


Abbildung 6.1.1-7: Designstufe 3 (000029964, Doppellagig, doppelt geschirmt, PIC255 Keramik 30 x 50 x 0,2 mm)

Aufgrund der unklaren Frage, ob die Eigenschirmung doppellagiger PZT Platten für den Blitzschutz genügt, wurde das Design entsprechend noch einmal abgeändert. In die Außenschicht des DuraActs wurde beidseitig noch ein Kupfergewebe einlaminiert und ein Erdungskontakt eingefügt. Dabei wurde ein in der Luftfahrt für den Blitzschutz zugelassenes Kupfergewebe verwendet.

Das Kupfergewebe hatte nur einen geringen Einfluss auf das Sende- und Empfangsverhalten der Wandler.

Vorteile:
- Sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis
- Eigenschirmung durch Außenelektroden
- Zusätzliche Schirmung durch Kupfergewebe
- Kann sowohl im Dehnungsmodus als auch als Bieger angesteuert werden
- Erfüllt Blitzschutz- / EMV-Vorgaben

Nachteile:
- Sehr hohe Kapazität im Dehnungsmodus (~89 nF)
- Sehr komplexer (teurer) Aufbau
- 2 zusätzliche Lötkontakte - mögliche Schwachstelle bei zyklischer Belastung

6.1.1.6 Designstufe 4 – Doppellagig, Eigenschirmung, kleinere Fläche

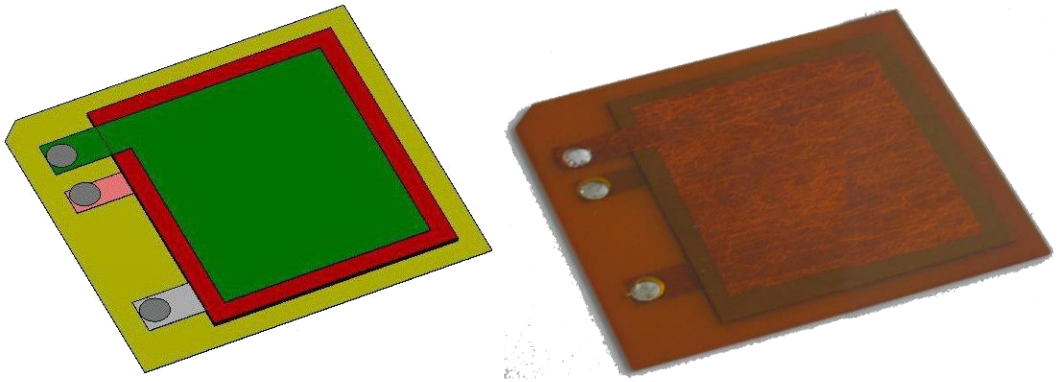


Abbildung 6.1.1-8: Designstufe 4 (P-876K018, doppellagig, doppelt gelegte Sammelelektroden, 2 x PIC255 Keramik 30 x 30 x 0,2 mm)

Nach Ausfällen der einlaminierten Sammelelektroden bei Untersuchungen am FhG ISC wurden in Designstufe 4 doppellagige Sammelelektroden eingeführt. Zusätzlich wurde die Gesamtfläche verringert, da es Probleme mit dem bis dahin verwendeten Spannungsverstärker bei hohen Kapazitäten gab.

Um auch noch eine möglichst homogene omnidirektionale Abstrahlung zu gewährleisen, wurde ein quadratisches Design gewählt. Hierbei handelt es sich um das Design, das bei der finalen Bestückung der Versuchsanlage verwendet wurde.

Vorteile:
- Sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis
- Eigenschirmung durch Außenelektroden
- Kann sowohl im Dehnungsmodus als auch als Bieger angesteuert werden
- Geringere Kapazität (~44 nF)
- Nahezu omnidirektionale Abstrahlung
- Bessere Lebensdauer der Sammelelektroden

Nachteile:
- Komplexer (teurer) Aufbau
- Zusätzlicher Lötkontakt - mögliche Schwachstelle bei zyklischer Belastung

6.1.1.7 Designstufe 5 – Doppellagig, doppelt geschirmt, kleinere Fläche

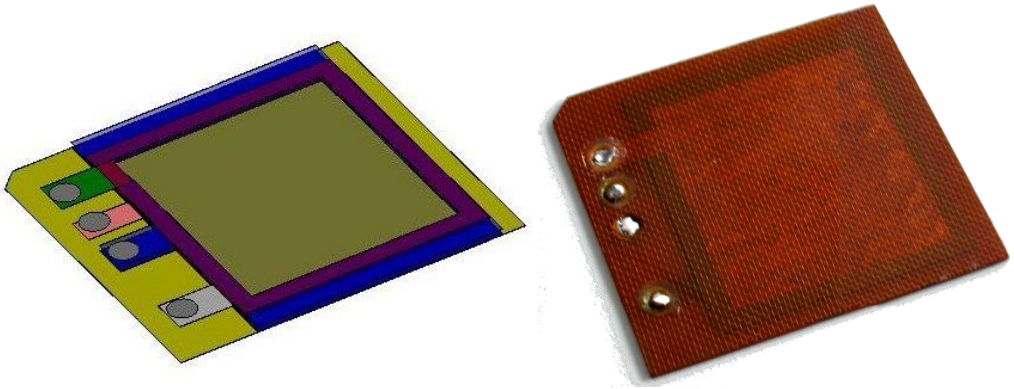


Abbildung 6.1.1-9: Designstufe 5 (nur Muster, doppellagig, doppelt gelegte Sammelelektroden, 2 x PIC255 Keramik 30 x 30 x 0,2 mm)

Aus Zeit- und Budgetgründen konnten von diesem Design nur einige Muster für Lebensdauertests hergestellt werden. Analog zur größeren Variante wurde noch eine zusätzliche Schirmung aus Kupfergewebe in die Außenschicht integriert und ein Erdkontakt hinzugefügt.

Aufgrund der inzwischen geänderten Vorverstärkerelektronik war die Anforderung 9 aus Tabelle 6.1.1-1 (geringe Kapazität) zu diesem Zeitpunkt obsolet.

Vorteile:
- Sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis
- Eigenschirmung durch Außenelektroden
- Zusätzliche Schirmung durch Kupfergewebe
- Kann sowohl im Dehnungsmodus als auch als Bieger angesteuert werden
- Nahezu omnidirektionale Abstrahlung
- Bessere Lebensdauer der Sammelelektroden
- Erfüllt Blitzschutz- / EMV-Vorgaben

Nachteile:
- Sehr komplexer (teurer) Aufbau
- 2 zusätzliche Lötkontakte - mögliche Schwachstelle bei zyklischer Belastung

6.1.1.8 Kleberauswahl und Montagetechnologie

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns konnte eine Bestückung eines Rotorblatts während der Herstellung nicht gewährleistet werden. Vielmehr war vorgesehen, SHM Wind zunächst als System für die Nachrüstung vorhandener Blätter zu entwickeln. Deshalb mussten ein Klebstoff und eine Klebetechnologie zur Integration in vorhandene Rotorblätter gefunden werden. Die Anforderungen an die Eigenschaften des Klebstoffs werden hierbei von den angewandten Messmethoden sowie den Montagebedingungen vorgegeben. Zusätzlich muss noch berücksichtigt werden, dass die WEA frei stehen und somit dem Wetter in der jeweiligen Region ausgesetzt sind.

	Anforderung	**Grund**
1	Resistent gegen Spritzwasser	Lebensdauer
2	Stabil im Temperaturbereich -40 … 70 °C	Lebensdauer
3	Glasübergangstemperatur >=75 °C	Messung
4	Handhabbare Konsistenz	Montage
5	Aushärtung bei Raumtemperatur möglich	Montage
6	Mechanische Eigenschaften analog dem Matrixwerkstoff	Messung
7	Gute Klebeeigenschaften auf DuraAct und Matrixwerkstoff	Montage

Tabelle 6.1.1-2: Anforderungen an den Klebstoff

Zu Projektbeginn wurden am FhG IZFP-D Versuche zur Klebung mit verschiedenen einfachen Klebstoffen durchgeführt. Dabei wurden Acrylate, Heißkleberfolien und Silikone getestet. Keiner dieser Klebstoffe erfüllte die Vorgaben in zufriedenstellender Weise. Insbesondere die Vorgabe einer Glasübergangstemperatur ist kritisch. Es kommt zu erheblichen Verfälschungen der Messergebnisse aufgrund der sich ändernden mechanischen Eigenschaften, wenn diese Temperatur bei der Messung überschritten wird. Zudem handelt es sich um einen Temperaturbereich, nicht um eine Sprungtemperatur. Problematisch ist außerdem, dass viele Klebstoffhersteller diese Daten nicht herausgeben.

Als beste Kandidaten wurden bei PI Ceramic die Gruppe der 2-Komponenten-Epoxidharze eingestuft. Parallel zu den Versuchen am Fraunhofer ISC wurden bei PI Ceramic Klebeversuche mit drei Epoxidharzen durchgeführt. Dabei stellte sich recht eindeutig der Delo Automix 1895 als beste Alternative heraus.

Variante 1: Delo Automix 1895 (keramisch gefüllt)

Vorteile:
- Gut handhabbar
- Härtet schon bei Raumtemperatur aus
- Ähnliche mechanische Eigenschaften, wie der Matrixwerkstoff
- Gute Klebeeigenschaften auf DuraAct und Matrixwerkstoff

Nachteile:
- Glasübergangstemperatur bei ca. 75 °C

Variante 2: TML EB-2 (ungefüllt)

Vorteile:
- Gute Klebeeigenschaften auf DuraAct und Matrixwerkstoff
- Glasübergangstemperatur bei > 80 °C

Nachteile:
- Zu dünnflüssig -> Extrem schlecht handhabbar

Variante 3: Airstone 770E-778H (Matrixwerkstoff)

Vorteile:
- Mechanische Eigenschaften identisch mit dem Matrixwerkstoff
- Gute Klebeeigenschaften auf DuraAct und Matrixwerkstoff
- Glasübergangstemperatur identisch mit dem Matrixwerkstoff

Nachteile:
- Sehr viskos -> schlecht handhabbar
- Lange Aushärtezeit bei hohen Temperaturen (>60 °C) notwendig

Als Hauptproblem stellte sich die Verarbeitbarkeit bei der Verklebung heraus. Die Wandler mussten im fertigen Rotorblatt sowohl senkrecht als auch über Kopf auf sehr engem Raum befestigt werden. Dies war letztendlich nur mit dem Delo Automix 1895 machbar.

Zur Montage musste der Untergrund zunächst abgeschliffen und mit Isopropanol gereinigt werden. Es wurden Versuche zum Beschleunigen des Härtungsprozesses durch Bügeln und mit einer Heißluftpistole durchgeführt. Beide Möglichkeiten wurden verworfen. Beim Bügeln kam es zum Ausgasen beim Klebstoff. Das Arbeiten mit der Heißluftpistole in einem Raum < 1 m³ war aus Arbeitsschutzgründen auf Dauer nicht zumutbar.

Die geklebten Wandler wurden bis zur Aushärtung mit Duct-Tape (Klebeband) befestigt. Nach zwischenzeitlichen Versuchen mit Montagespangen und Heißkleber wurde die Klebeband-Lösung beibehalten.

6.1.1.9 Zusammenfassung

Während der Laufzeit des Projekts wurden insgesamt 300 DuraAct Wandler in 5 verschiedenen Designs an die Projektpartner geliefert. Ursprünglich waren lediglich 250 Stück eingeplant, die Geschäftsführung von PI Ceramic hat sich allerdings bereit erklärt, im Interesse eines erfolgreichen Projektabschlusses die benötigten restlichen 50 Stück auf eigene Kosten herzustellen und zu liefern.

Die Pilotanlage in Uelitz wurde mit Wandlern der Designstufe 4 bestückt. Wandler mit dem endgültigen Design (Stufe 5 mit doppelter Schirmung) wurden als Muster hergestellt, kamen aus Zeit- und Kostengründen aber nicht mehr zum Einsatz.

Versuchsaufbau	**Geliefert / Bestückt**
IMA Dresden Blatt 1	28
IMA Dresden Blatt 2	---
Nordex Rostock Einzelblatt	54
Uelitz Blatt 1	8
Uelitz, vollständige Pilotanlage	24
FhG ISC Lebensdauerversuche	38
FhG IZFP-D Dresden Laborversuche + Ersatzteile	109
Zur Verfügung	39
Gesamt	**300**

Tabelle 6.1.1-3: Gelieferte DuraAct Wandler

Zur Montage der Wandler wurde das 2-Komponenten-Epoxidharz Delo Automix 1895 verwendet. Trotz der etwas zu geringen Glasübergangstemperatur war dies der am besten geeignete zur Verfügung stehende Klebstoff. Wünschenswert wäre hier, einen Klebstoff mit der Glasübergangstemperatur des Klebers TML EB-2 mit der Verarbeitbarkeit des Delo Automix 1895 zu vereinen.

Zur vorläufigen Fixierung wurde Duct-Tape verwendet. Eine bessere Lösung wäre eine Vorrichtung zum lokalen Anhärten des Epoxidharzes. Der Aufwand und die Machbarkeit einer solchen Vorrichtung lassen sich jedoch ohne weitere Untersuchungen derzeit nicht abschätzen.

6.1.2 Sensortest, ISC

6.1.2.1 Entwicklung von geschirmten PZT-Patches für richtungssensible Sensorik

Zusammen mit dem Projektpartner PI Ceramic wurden Modifikationen am Aufbau und an der geometrischen Form der Piezopatches durchgeführt, um sie speziell in Windkraft-Rotorblättern zur Strukturüberwachung einsetzen zu können. Die daraus resultierenden Anforderungen an die Piezowandler zur Strukturüberwachung sind in Tabelle 6.1.1-1 zusammengefasst.
Im Laufe des Projektes ergaben sich noch weitere Anforderungen. Auf der Basis von statistischen Angaben des Projektpartners Nordex sollten die applizierten Piezowandler Wechseldehnungen von bis zu 0,2 % bei einer Zyklenzahl von 3 x 10^8 überstehen, was der mittleren Lebensdauer eines Rotorblattes entspricht. Zusätzlich sollte eine sensornahe Verstärkerelektronik direkt am Piezowandler vorgesehen werden, um Signalbeeinträchtigungen möglichst zu reduzieren. Hierzu musste die Aufbau- und Verbindungstechnik so modifiziert werden, dass die elektrische Kontaktierung zwischen Piezowandler und der Verstärkerplatine auch unter der mechanischen Wechseldehnungsbeanspruchung dauerstabil bleibt.

Ein wesentlicher Punkt ist die Applikation der Wandler im Rotorblatt. Da sowohl eine Nachrüstung bestehender Windenergieanlagen auf der Innenseite des Rotorblattes vorgesehen ist, als auch eine Erstausrüstung bei der Rotorblattherstellung, ergeben sich besondere Anforderungen an die Verklebung. In Abstimmungsgesprächen mit dem Rotorblatthersteller Nordex ergab sich eine enge Auswahl an Klebstoffen bzw. Laminierharzen, die bereits in der Rotorblattfertigung eingesetzt werden und als Klebstoffe der piezoelektrischen Wandler im ISC getestet wurden.

Eine der besten Untersuchungsmethoden bezüglich temperaturabhängigem und frequenzabhängigem viskoelastischen Verhalten von Klebstoffen ist die Dynamisch-Mechanische-Analyse (DMA). Aus den Messungen ergeben sich die mechanische Dämpfung und die Glasübergangstemperatur, bei der sich das Elastizitätsmodul stark verändert. Gemäß den oben festgelegten Anforderungen wurde im Temperaturbereich zwischen -40 und +80 °C und dem Frequenzbereich von 1 – 50 Hz gemessen. Die Proben wurden als kleine Stäbchen der Klebstoffe in 2-armiger Biegung belastet. Abbildung 6.1.2-1 zeigt eine DMA-Untersuchung an einem Klebstoff auf Epoxidharzbasis, der für Sensorverklebungen verwendet wird. Deutlich erkennbar ist die Erweichung ab der Glasübergangstemperatur bei 40 °C, was einem Einsatz als Sensorklebstoff bei dem geforderten Temperaturbereich entgegensteht.

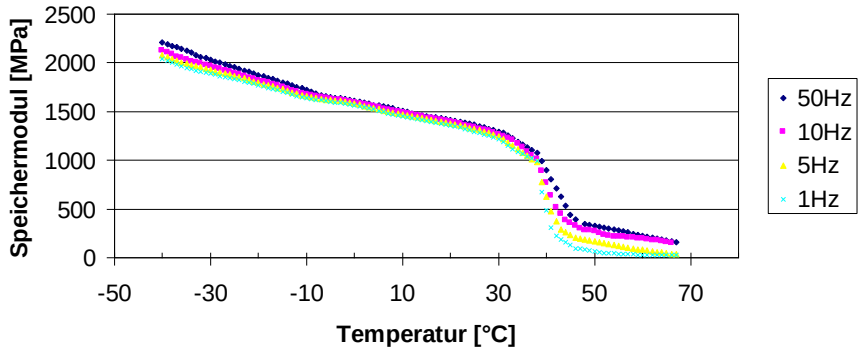


Abbildung 6.1.2-1: DMA-Messung an Klebstoff A

Als Alternative wurde ein für Luftfahrtanwendungen zertifiziertes Epoxidharz L untersucht, das auch für dünnere Verklebungen von GFK-Bauteilen verwendet werden kann. Die DMA-Untersuchung (siehe Abbildung 2) ergab eine Glasübergangstemperatur von 85 °C. Zwar ist auch dieses Harzsystem bei Raumtemperatur aushärtbar, aber die sehr geringe Viskosität erfordert einen höheren mechanischen Fixieraufwand bei der Verklebung.

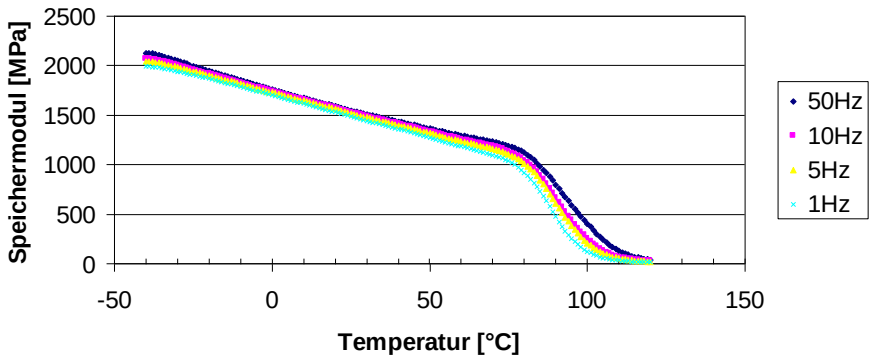


Abbildung 6.1.2- 2: DMA-Messung am Klebstoff L

Bezüglich des Blitzschutzes an den Piezowandlern wurden nach gemeinsamen Diskussionen der Projektpartner von PI Ceramic zwei Varianten neu aufgebaut, die zumindest eine hohe elektromagnetische Schirmung versprechen. Je nachdem, ob der Piezowandler später an einen Blitzableiter angeschlossen werden kann (drahtgestützte Strom- und Datenleitungen) oder bei Verwendung von glasfasergestützter Datenübertragung und Energieversorgung elektrisch isoliert im Rotorblatt verwendet wird, mussten diese zwei Designvarianten entwickelt werden.

6.1.2.2 Sende-, Empfangscharakteristik, Frequenzspektrum

Um Daten über die Hochfrequenzeigenschaften des Systems Wandler und Klebstoff am Rotorblatt zu erhalten, wurde zunächst eine Charakterisierung der Ultraschall Sende- und Empfangscharakteristik der DuraAct Wandler durchgeführt. Dazu wurde jeweils einer von zwei identischen Wandlern auf einer Glasplatte aufgepresst und bei einer Sendefrequenz von 60 kHz als Sender betrieben. In einem Radius von 300 mm wurde mit dem zweiten Wandler um den Sender herum das Empfangssignal aufgezeichnet. Es ergab sich eine geringe Winkelabhängigkeit der Schallintensität bei kleineren Abstrahlwinkeln, d. h. eine starke Abstrahlkeule mit einem Öffnungswinkel von ca. ±40 ° und eine stark abnehmende Abstrahlleistung bei größeren Winkeln.

Des Weiteren wurden die Ultraschallübertragungseigenschaften der unterschiedlichen Klebstoffe untersucht. Dazu wurden Piezoelemente auf einer Glasplatte paarweise im Abstand von 300 mm zueinander identisch verklebt und Messungen im Wechsel mittels Frequenzsweep (50-120 kHz) durchgeführt. Besonders hohe Schallübertragungsamplituden im gesamten Frequenzbereich ergaben sich bei den Epoxidharzklebstoffen. Vergleichsmessungen an weichen Klebstoffen, wie z. B. auf Basis von Silikon oder Heißkleber ergaben, dass diese die Ultraschallübertragung sehr stark dämpfen.

Um nun auch das Übertragungsverhalten bei der Schwingungsmessung am Rotorblatt im niederfrequenten Bereich (0,5 – 10 Hz) zu untersuchen, wurden DuraAct Wandler auf glasfaserverstärkte Kunststoffplatten mit den unterschiedlichen Epoxidharzklebstoffen geklebt und einer erzwungenen mechanischen Biegung in einem Teststand (Beschreibung hierzu siehe im folgenden Kapitel) ausgesetzt. Die Anregungsfrequenz lag im Bereich 0,5 – 12 Hz. Die Messungen wurden bei Raumtemperatur und 60 % rel. Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Die Ausgangsladung der DuraAct Wandler wurde mit einem Ladungsverstärker gemessen. Es zeigte sich, dass alle Ladungs-Dehnungsmessungen frequenzunabhängig sind. Allerdings ergeben die unterschiedlichen Klebstoffe auch unterschiedlich hohe Ladungsausbeuten. Prinzipiell sind alle untersuchten Epoxidharzklebstoffe zur Applikation der DuraAct Wandler auf dem Rotorblatt bezüglich ihres Frequenzspektrums geeignet.

6.1.2.3 Untersuchung der Messwertabweichung für Dehnungen, Minimierung

Ziel ist die Untersuchung der Messwertabweichungen für Dehnungen und deren Minimierung an den entwickelten piezoelektrischen Wandlern für die niederfrequente (0,1 – 50 Hz) Schwingungsmessung am Rotorblatt. Für diese Tests wurde ein Laborteststand (Abbildung 6.1.2-3) aufgebaut, der die mechanischen Dehnungen auf GFK-Trägerplatten überträgt, auf denen die DuraAct Wand-

ler aufgeklebt werden. Der Teststand wird in einer Klimakammer betrieben, in der vorgegebene Temperatur- und Feuchtigkeitswerte exakt eingestellt werden können. Dieser Teststand wurde auch für die Dauerversuche ausgelegt. Damit bestand die Möglichkeit, eine eventuelle Frequenzabhängigkeit der Ladungsausbeute, die Temperaturabhängigkeit der Piezosensoren sowie den Einfluss verschiedener Klebstoffe auf die Messsignale zu untersuchen.

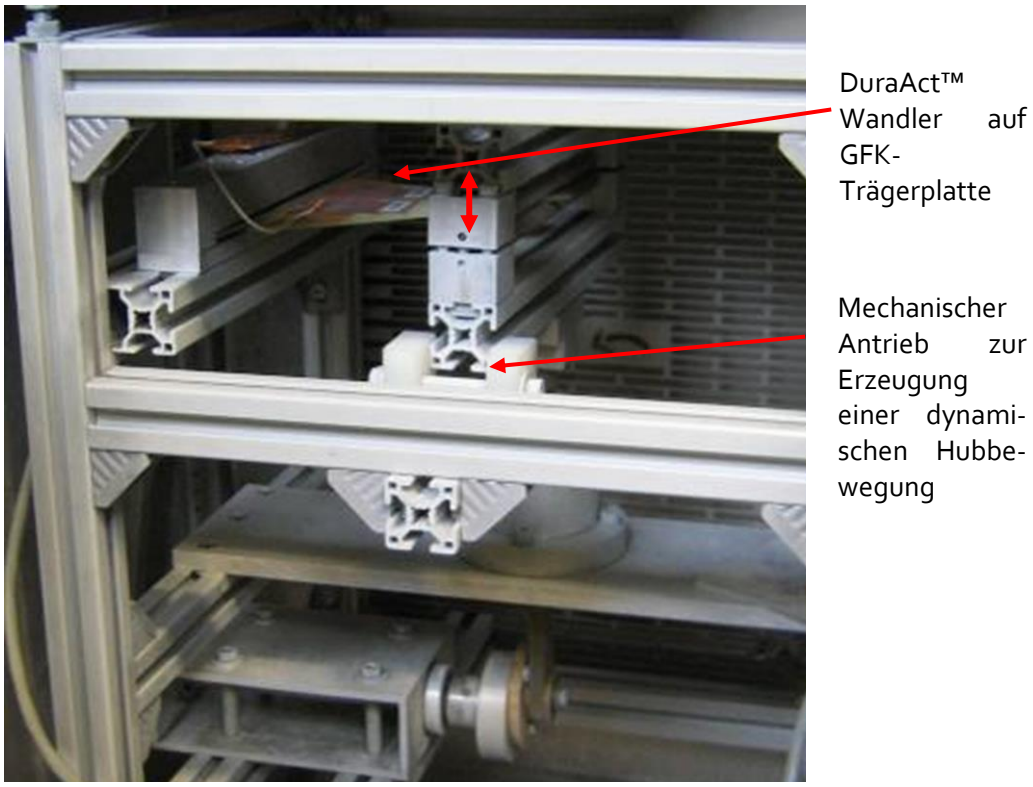


Abbildung 6.1.2-3: Messaufbau zur Reproduzierbarkeit der DuraAct Wandlersignale

Abbildung 6.1.2-4 zeigt die Messergebnisse zur Reproduzierbarkeit der Dehnungssignale an DuraAct Wandlern, die mit dem Klebstoff A aufgeklebt wurden. Die dehnungsabhängige Ladung wurde bei einer Dehnung von ± 0,1 %, im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis zu 80 °C, einer relativen Feuchte von 99 % und bei einer Anregungsfrequenz von 1 Hz gemessen. Im Rahmen der Messgenauigkeit von 1 % liegen bei gleichen Klimabedingungen die Ladungswerte übereinander. Größere Abweichungen der Messsignale ergaben sich erst, wenn die Messtemperatur in den Bereich des Glasüberganges des Klebstoffes kommt, der etwa bei 80 – 90 °C liegt. Messungen im negativen Temperaturbereich bis zu -30 °C führten zu keinen Messwertabweichungen. Somit wurde nachgewiesen, dass höhere Temperaturen einen deutlichen Einfluss auf die Messsignale bewirken, was bei der Anwendung im Rotorblatt durch unabhängige Temperaturmessung und „Nachkalibrieren“ der Messsignale in der sensornahen Elektronik berücksichtigt werden muss.

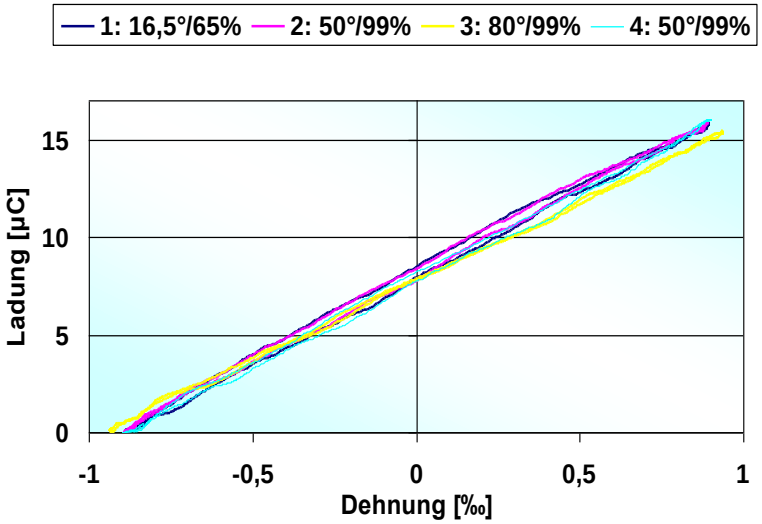


Abbildung 6.1.2-4: Messergebnisse der Signalreproduzierbarkeit des DuraAct Wandlers, mit Klebstoff A aufgeklebt, bei Temperaturen über 16 °C

6.1.2.4 Zuverlässigkeit, Klebung, Packaging

Ziel des Arbeitspaketes ist der Nachweis der Zuverlässigkeit von Klebung und Aufbau der piezoelektrischen Wandler gemäß den Betriebsanforderungen eines Windkraft-Rotorblattes.

Um eine überschaubare Prüfdauer von wenigen Monaten pro Versuch zu erreichen, wurde festgelegt, dass der Nachweis der Zuverlässigkeit der piezoelektrischen Wandler nur in Kombination mit den gleichzeitigen Tests der Klebung sinnvoll ist. Für die Versuchsdurchführung wurde ein Laborteststand aufgebaut, der die mechanischen Dehnungen auf Glasfaserplatten überträgt, auf denen mehrere DuraAct Wandler aufgeklebt werden können, um gleichzeitig mehrere Proben testen zu können. Als Klebstoffe haben sich gemäß den Voruntersuchungen (thermische Stabilität -40 °C bis 80 °C, Verarbeitbarkeit, Klebschichtdicke) nur noch zwei Klebstoffe als geeignet herausgestellt.

Je zwei DuraAct Wandler vom Typ A12 wurden pro Klebstofftyp auf dreieckige GFK-Trägerplatten geklebt. Für eine hohe Reproduzierbarkeit der Klebung sind eine exakte Härtungsprozedur durchzuführen und die vorgegebenen Klebevorschriften (Oberflächenvorbehandlung, Fixierung) genau einzuhalten. Dehnmessstreifen als Referenzsensoren wurden direkt neben den DuraAct Wandlern mit denselben Klebern aufgeklebt. Zwei dieser dreieckigen Glasfaserplatten wurden in einer Halterung des Teststandes befestigt und durch einen Pleuelantrieb in Schwingung versetzt. Durch Zusatzgewichte an den Plattenspitzen konnte die Resonanzfrequenz auf ca. 20–22 Hz eingestellt werden, womit eine hohe Zykliergeschwindigkeit möglich wurde.

Der ganze Teststand kann in einer Klimakammer eingesetzt werden, in der die vorgegebenen Temperatur- und Feuchtigkeitswerte exakt eingestellt werden können. Damit ist es möglich, den Einfluss von Temperatur und Feuchte auf die Klebstoffe gleichzeitig mit den Piezowandlern und auch in Kombination mit der sensornahen Elektronik zu untersuchen.

6.1.2.5 Lebensdauer, Zuverlässigkeit

In gemeinsamer Diskussion mit den Projektpartnern wurde das Testprogramm zur Zyklierung der Piezosensoren auf Basis der DuraAct Module des Projektpartners PI Ceramic festgelegt. Dabei sollten die DuraAct Wandler im Temperaturbereich von -30 °C bis 80 °C bei gleichzeitig sehr hoher Luftfeuchtigkeit hohen Wechseldehnungen von ± 0,1 % widerstehen.

Um eine überschaubare Prüfdauer von wenigen Monaten zu erreichen, wurden die Dauerversuche mit einer Zyklierfrequenz von ca. 20 Hz durchgeführt. Die Ladungsausbeute der piezoelektrischen Wandler wurde kontinuierlich während der Versuche aufgezeichnet.

Für die Versuchsdurchführung wurde der Laborteststand (Abbildung 6.1.2- 5) umgebaut. Die Drehbewegung eines Elektromotors, der außerhalb der Klimakammer installiert ist, wird über ein Getriebe auf einen Pleuelantrieb transferiert. Dieser Hubantrieb, dessen Amplitude mechanisch von 2 mm bis zu 40 mm verstellt werden kann, wird auf die Einspannung von zwei Glasfaserplatten (GFK-Platten) übertragen, auf denen jeweils zwei DuraAct Wandler aufgeklebt sind. Somit lassen sich bis zu vier unterschiedliche Probenaufbauten während einer Dauerzyklierung testen. Die Anregungsfrequenz wird dabei so gewählt, dass die Probenplatten in ihrer ersten Resonanz (ca. 20 Hz) schwingen.

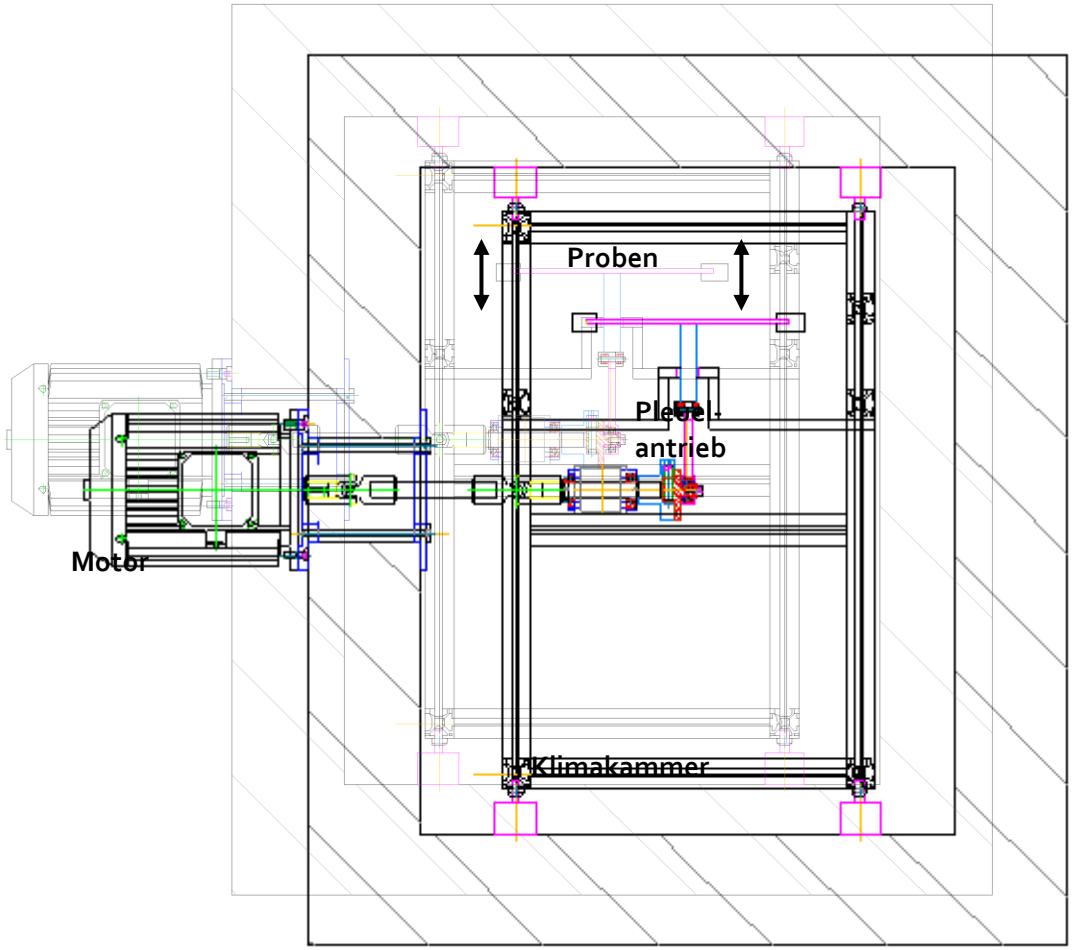


Abbildung 6.1.2-5: Resonanzprüfstand für die Lebensdaueruntersuchungen

Der ganze Teststand kann in einer Klimakammer eingesetzt werden (Abbildung 6.1.2-6), in dem sich die vorgegebenen Temperatur- und Feuchtigkeitswerte exakt einstellen lassen. Damit wird es möglich, die Frequenzabhängigkeit der Ladungsausbeute, die Temperaturabhängigkeit der Piezosensoren sowie den Einfluss verschiedener Klebstoffe zu untersuchen.

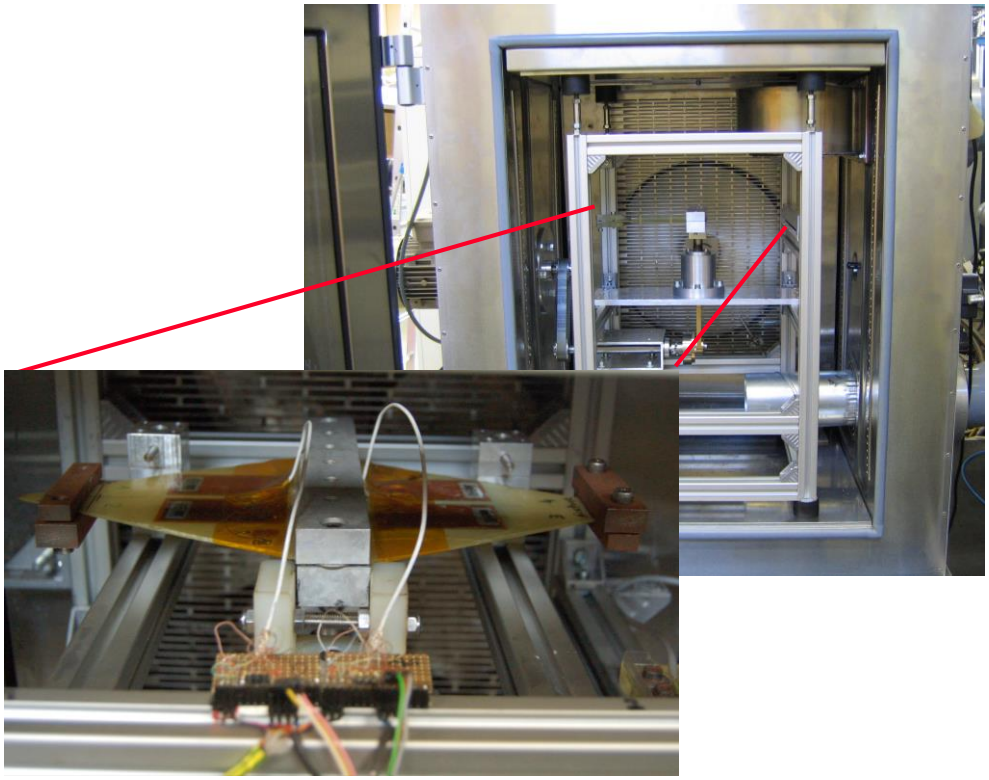


Abbildung 6.1.2-6: Teststand am ISC zum Nachweis der Lebensdauer der piezoelektrischen Wandler

Abbildung 6.1.2-7 zeigt ein detailreiches Zwischenergebnis an DuraAct Wandlern, die mit den epoxidharzbasierten Klebstoffen A (gelbe Farbe) bzw. L (violette Farbe) auf die GFK-Trägerplatten aufgeklebt wurden. Die Ladungserzeugung der piezoelektrischen Wandler folgt dabei der eingebrachten Dehnung (± 0,1 %), die durch Dehnmessstreifen als Referenz aufgezeichnet wird. Die unterschiedlich hohen Dehnungen werden von der Temperatur verursacht, die während des Versuchs geändert wurde. Dabei wurden folgende Temperatur–Feuchtepaare gemäß dem festgelegten Testprogramm eingestellt: -30 °C / 0 % rel. Feuchte, 25 °C / 60 % rel. Feuchte, 80 °C / 95 % rel. Feuchte. Besonders stark fallen die Dehnungsabnahme und damit einhergehend auch die geringere Ladungserzeugung bei der Temperatur von 80 °C auf. Ursache hierfür ist das „Erweichen“ der Klebstoffe, deren Glasübergangstemperatur Tg auch im Bereich von 80 °C liegt.

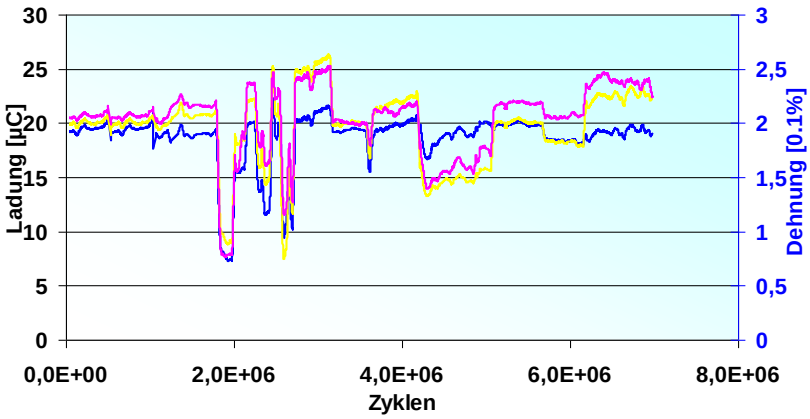


Abbildung 6.1.2-7: Zwischenergebnis des Dauerversuchs an piezoelektrischen Wandlern

Bei den ersten Versuchen gab es Teilablösungen der Klebungen, die durch eine genauere Einhaltung der Klebevorschriften in den folgenden Versuchen deutlich reduziert wurden. In Dauerversuchen an Proben, die mit der Vorverstärkerelektronik ausgestattet waren, wurde die Zuverlässigkeit des gesamten Moduls nachgewiesen. Abbildung 6.1.2- 8 zeigt diesen Aufbau mit der sehr umfangreichen Verkabelung, die der Aufzeichnung der unterschiedlichen Signale aus den Proben dient.

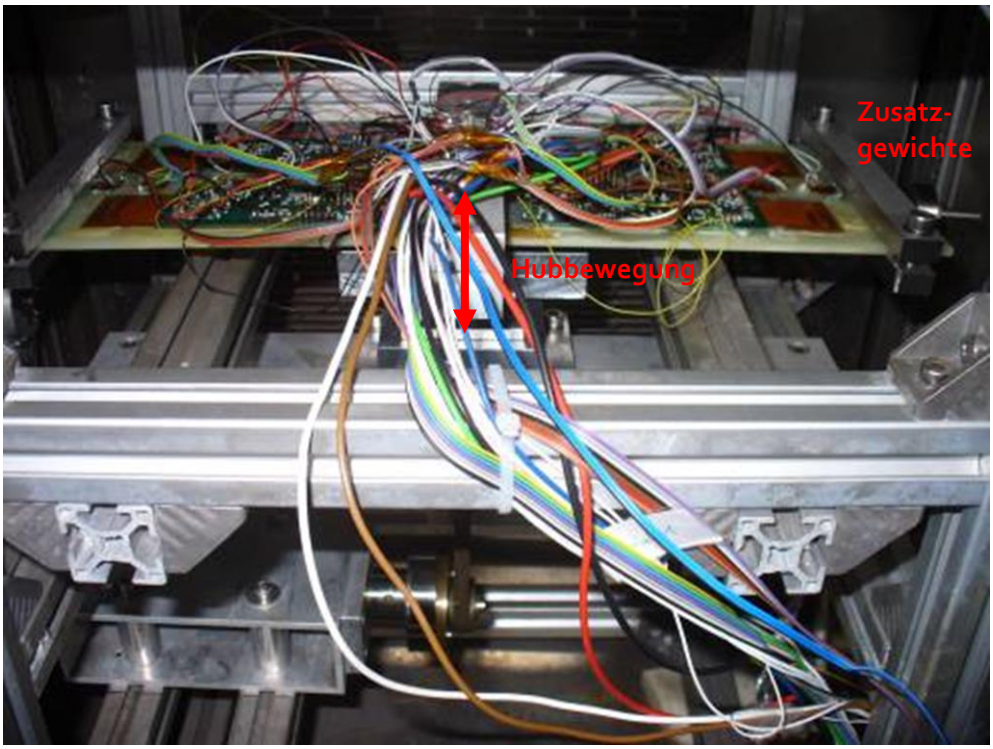


Abbildung 6.1.2-8: Dauertest an den DuraAct Wandlern inklusive Vorverstärkerplatine

Zeitgleich mit den mechanischen Belastungstests wurde ein Auslagerungstest an vier DuraAct Ultraschallwandlern auf einer großen (ca. 500 x 500 mm²) GFK–Platte über 6 Monate im Klimaschrank durchgeführt. Damit sollte das Alterungsverhalten unter extremen Klimabedingungen überprüft werden. Eine gleichzeitige mechanische Belastung ist wegen der Größe der GFK-Platte nicht möglich. Zur Prüfung des Ultraschallübertragungsverhaltens sind wegen der Schalllaufzeit aber diese Plattengrößen erforderlich.

Abbildung 6.1.2-9 zeigt das Ergebnis der Ultraschallübertragung zwischen zwei DuraAct Wandlern mit einem Abstand von 500 mm auf dieser GFK–Platte, bei einer Ansteuerung von 60 kHz und einer Sendespannung von 8 V_{pp}. Die Messungen erfolgten nach einer Klimaauslagerung von 46 Tage bei RT / 40 % r.F., 14 Tage bei 80 °C / 99 % r.F., 12 Tage bei -30 °C / 0 % r.F. und Wechselfrost (d.h. 12 h – Wechsel Raumtemperatur ↔ -30 °C, 30 Tage lang). Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Ultraschall-Signalamplituden wegen der Alterung und damit Versprödung der GFK–Trägerplatte mit der Auslagerungszeit sehr geringfügig um ca. 2 % zunehmen. Eine Alterung der Wandler oder deren Verklebung an sich kann nicht festgestellt werden, was durch die wechselseitige Signalübertragung der vier Wandler auf der GFK–Platte überprüft wurde.

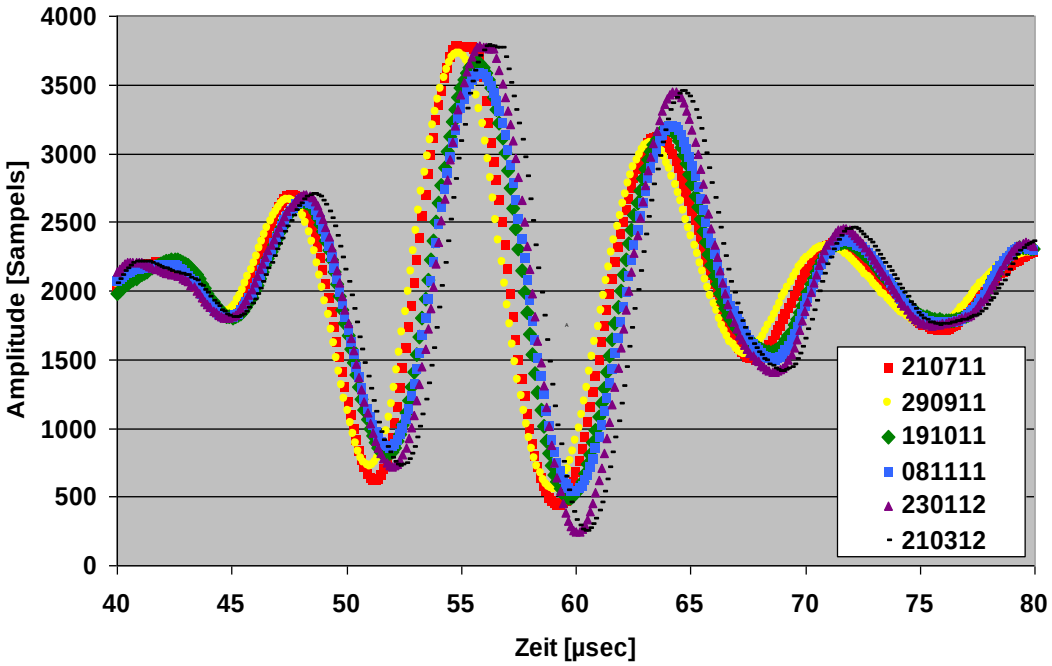


Abbildung 6.1.2-9: Ultraschallübertragungsverhalten an künstlich gealterten Wandlern

6.1.2.6 Applikation (Klebung/Integration), Blitzschutz

Ziel des Arbeitspaketes war die Applikation erster Wandlersysteme auf Versuchsbalken zur Hardwareanpassung an die Rotorblatttechnologie und die Implementierung von Blitzschutzvorrichtungen in den Wandler.

Durch die Vermeidung elektrischer Zuleitungen zu den einzelnen Sensorstellen im Rotorblatt ist zwar ein direkter Strom- / Spannungsschlag ausgeschlossen, aber induzierte Ströme durch den Blitzableiter im Rotorblatt bei Blitzeinschlag können trotzdem zu hohen Belastungen im Sensor und der Verstärkerelektronik führen. Deshalb wurden Abschirmbleche um die sensornahe Elektronik und einlaminierte Kupfer-Abschirmvliese um den DuraAct Wandler vorgesehen.

6.1.3 Konzept des Sensornetzwerks, IZFP-D

6.1.3.1 Anforderungen an das Sensornetzwerk

Allgemeine Anforderungen

Das Konzept des Sensornetzwerkes soll eine Implementierung der gewählten Messverfahren Acoustic Emission (AE), Acousto-Ultrasonics (AU) und die Beschleunigungsmessung für die Operational Modal Analyse (OMA) gewährleisten. Notwendig sind dazu begleitende Messtechniken zur lokalen Temperaturbestimmung, um ein temperaturbedingtes Driften der Messwerte kompensieren zu können. Ziel ist es, einerseits Ermüdungstests bei den Projektpartnern IMA und Nordex mit entsprechenden Sensornetzwerken auszustatten, um eine messtechnische Begleitung zur Verfahrensentwicklung zu unterstützen, und andererseits die Entwicklung eines Sensornetzwerkes zur Installation auf rotierenden Windenergieanlagen. Letztere Anforderung wird wiederum in zwei Schritten bearbeitet. Im Schritt 1 wird eine Installation auf einer Windenergieanlage basierend auf konventionellen kupferbasierten Netzwerktechniken (Can-Bus) vorgenommen. Diese haben den Nachteil, dass unter Blitzschutzgesichtspunkten nur ein sehr begrenztes Überwachungsvolumen instrumentiert werden kann. Im zweiten Schritt werden optische Technologien zur Energieversorgung und Kommunikation genutzt, die sowohl die Blitzfestigkeit des Sensornetzwerkes gewährleisten, als auch eine hohe EMV-Störunterdrückung sichern.

Anforderungen aus akustischer Sicht

Die physikalischen Anforderungen an das Sensornetzwerk sowie messtechnische Ergebnisse sind im Kap 6.3.1. „Ultraschallverfahren“ dargestellt, daraus sind die notwendigen Frequenzen zur Signalverarbeitung im Sensornetzwerk zu entnehmen. Seitens dieses Netzwerkes sind die notwendigen Synchronisationsmechanismen für akustische Laufzeitmessungen mit einem Sync.-Jitter <= 1µs zu realisieren. Weiterhin sind die Datentransferraten der AE Messungen für bis zu 64 Messstellen zu gewährleisten. Dies wird in nachfolgenden Abschnitten bezogen auf die einzelnen Technologien (Cu-basiert bzw. optisch) dargestellt.

Um erste Eindrücke über notwendige Aufwendungen zur Rotorblattüberwachung mit akustischen Verfahren zu gewinnen, wurden verschiedene Versuche an einem Experimentalblatt im Labor durchgeführt. Diese dienten insbesondere dazu, die frequenzabhängige Dämpfung in Rotorblatt-Laminaten prinzipiell zu detektieren, um einen Anhaltspunkt für die maximal möglichen Sensorabstände zu gewinnen und die Eignung verschiedener PZT-basierter Wandler für die gewünschte Applikation zu untersuchen. Dazu wurden die aktorischen und sensorischen Eigenschaften verschiedener bei Projektpartnern zur Verfügung stehender Sensortypen an einem Rotorblattsegment im Technikum des IZFP-D getestet. Abbildung 6.1.3-1 zeigt die Versuchsanordnung, die verwendeten Aktoren und Sensoren sind in Tabelle 6.1.3-1 aufgeführt. Es wurden sowohl AU- als auch AE-Messungen durchgeführt.

Begonnen wurde mit AU-Messungen, bei denen zur Anregung der Wandler eine Sendeleistung von 1 Watt festgelegt wurde. Um diese Leistung in die Struktur einzutragen, wurden gleichartige Sendesignale mit einem aktorspezifischen Strom-Spannungsverlauf verwendet. Von allen Sensoren erreichte der DuraAct Wandler vom Typ P-876.A15 die höchste Maximalamplitude. Es ist demnach davon auszugehen, dass dieser Wandler die elektrische Energie am effektivsten in mechanische Energie umwandeln und diese auch in die Struktur einbringen kann.

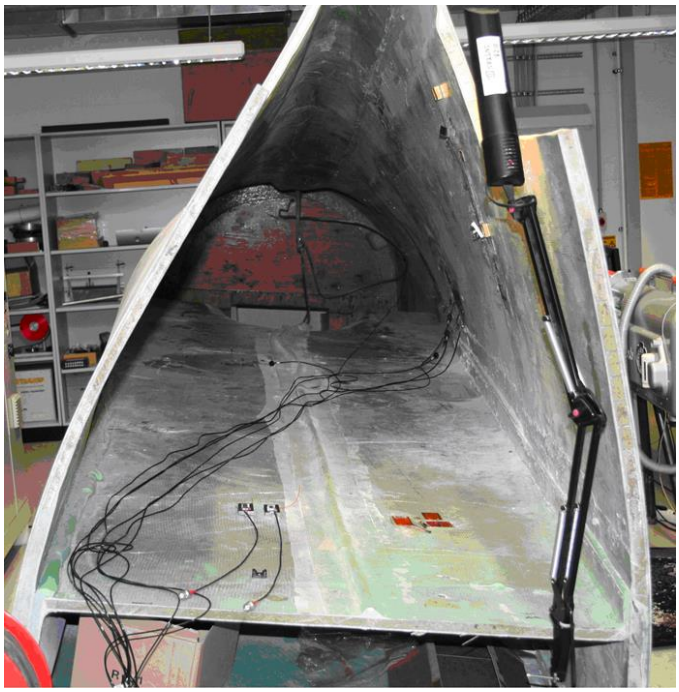


Abbildung 6.1.3-1: Versuchsanordnung zum Aktor-/Sensortest im Technikum des IZFP-D, Rotorblatt-segment mit Blickrichtung auf die Nabe

Aktoren				
Name	Nominal-stellweg [µm]@ 100V	Elektrische Kapazität [µF]	Resonanz-frequenz [kHz]	Bemerkung
P-888.90 (A1)	32	13	40	
P-887.90 (A2)	32	6,4	40	
P-876.A15 (A3)		0,045		
PL112.10 (A5)	80	2x1,1	>1000	Biegewandler
Sensoren				
Name	Kontraktion/ Spannung [µm/m / V]	Elektrische Kapazität [nF]		Bemerkung
DuraAct P-876.A12	1,3	90		
DuraAct P-876.A15	0,64	45		
Piezoscheibe Groß (S3)		7,8		Ø ca. 1,5 cm
Piezoscheibe Klein (S4)		2,8		Ø ca. 1 cm
Faserwandler (S11)		0,5		inkl. Vorverstär-ker
Faserwandler (S12)		0,65		ohne Vorver-stärker

Tabelle 6.1.3-1: Daten der beim Eignungstest verwendeten Aktoren und Sensoren

Bei den AE-Messungen wurde mit Hsu-Nielsen Quelle gearbeitet, und auch hier zeigte sich, dass die DuraAct Wandler sehr empfindlich sind und elektromagnetische Störungen, die insbesondere von den getesteten Faserwandlern detektiert wurden, gut unterdrücken.

Aufgrund der beschriebenen guten Eignung des DuraAct Wandlers P-876.A15 als Aktor, der relativ hohen Sensitivität und guten Störfestigkeit wurde dieser Wandlertyp ausgewählt, um beim Projektpartner PI, nach Schaltungsvorgaben des IZFP-D für entsprechende Vorverstärker ein komplettes Aktor-/Sensorelement zu fertigen.

Anforderungen aus Zuverlässigkeitsgesichtspunkten

Für die Zuverlässigkeit des zu konzipierenden Sensornetzwerkes gelten folgende wesentlichen Parameter:

1. Minimierung der Sensorzahl: diese Zahl ist durch die akustischen Verhältnisse bestimmt und damit sind bei gegebenen Dämpfungen (siehe 6.3.1.) und realisierbaren Empfindlichkeiten (siehe vorstehenden Abschnitt) Maximalentfernungen zwischen den Wandlern zwischen 3 bis 5 m möglich. Damit ist abhängig vom gewünschten Überwachungsvolumen die Anzahl der Wandler festgelegt.
2. Klebe- und Abdecktechnologie: die Klebetechnologie und zugehörige Zuverlässigkeitskennwerte wurden vom Projektpartner Fraunhofer ISC getrennt untersucht und in Abschnitt 6.1.2 beschrieben. Aus Gründen des zeitlichen Ablaufes und praktischen Gesichtspunkten wurden für die Rotorblatttests einfachere Technologien zur Wandlerbefestigung entwickelt, die bei der Installation der Sensoren am Rotorblatt in Rostock getestet wurden. Ziel war es, verschiedene Kleb- und Abdeckverfahren praktisch zu untersuchen, um eine Instrumentierung von Rotorblättern nach der Fertigung (Reparaturinstrumentierung) zu ermöglichen und praktische Versuche durchführen zu können. Abbildung 6.1.3-2 verdeutlicht die Notwendigkeit, entsprechend sorgfältig ausgewählte Technologien für eine Langzeitinstrumentierung zu nutzen. Die Arbeiten zeigen, dass vor allem bei zukünftigen neuen Wandlergenerationen mit Faser-Technologie zur optischen Kommunikation und Energieversorgung entsprechende Tests im Vorfeld einer Applikation erfolgen müssen.
3. Blitzschutz: Statistische Erhebungen zeigen, dass im Mittel in Deutschland zwei bis vier Blitzeinschläge pro Rotorblatt während der Lebenszeit einer Windenergieanlage auftreten. Daraus resultiert die Notwendigkeit, Konzepte für Sensornetzwerke in Rotorblättern zu entwickeln, die Blitzfestigkeit garantieren. Für ein beschränktes Überwachungsvolumen ist das mit kupferbasierten Lösungen möglich und wurde so für die Testanlage in Uelitz realisiert. Für vollständige Instrumentierungen wurde das Konzept einer optischen Energie- und Datenübertragung entwickelt, welches unter 6.1.3.3. dargestellt ist.

Abbildung 6.1.3-2: Korrosion an der Sensorelektronik infolge ungeeigneter Abdeckmaßnahmen des Sensors im Außenbereich

6.1.3.2 Konzept und Realisierung des Sensornetzwerkes mit kupferbasierter Verbindungstechnik

Da zu Projektbeginn nur konventionelle, d. h. auf CAN-Bus aufbauende Netzwerkknoten zur Verfügung standen, basieren alle Tests zur Verfahrensentwicklung im Projekt auf diesen Hardwarekomponenten. Tabelle 6.1.3-2 gibt einen Überblick über die Versuchsstände und Versuchsziele.

Versuch	Ort	Ziel
1	Uelitz, drehende WKA	Installation eines Testsystems auf einem drehenden Rotorblatt
2	Dresden, Teststand	Dynamischer Belastungsversuch eines Rotorblattes am Teststand der IMA
3	Rostock, Teststand	Dynamischer Belastungsversuch eines Rotorblattes am Teststand von Nordex
4	Bremerhaven, Teststände	Dynamischer Belastungsversuch von Balkenstrukturen an den Testständen von IWES

Tabelle 6.1.3-2: Geplante Versuche

Für alle in Tabelle 6.1.3-2 aufgeführten Versuche wurde ein Messwerterfassungssystem benötigt. Je nach Umfang und Art der Tests kann sich dieses in Einzelheiten unterscheiden. In den ersten drei Monaten der Projektlaufzeit wurden seitens IZFP-D konzeptionelle Arbeiten zur Struktur des Messwerterfassungssystems durchgeführt.

An einer Versuchsanlage in Uelitz wurde die Übertragungstechnik für mehrere Varianten des Messwerterfassungssystems praktisch erprobt. Tabelle 6.1.3-3 gibt einen Überblick über erprobte Datenübertragungskonfigurationen. Dabei wurde vor allem die Übertragung der Daten aus dem Rotorblatt in die Gondel variiert.

Aus den Erprobungsergebnissen entstanden mehrere Systemkonzepte. Das letztendlich favorisierte Systemkonzept geht von der Übertragung der Daten aus dem Rotorblatt mittels WLan oder PowerLan an die im Turmfuß befindliche Rechentechnik aus. Dies hat die folgenden Vorteile

gegenüber den anderen ebenfalls diskutierten Varianten:

- kein Stopp der Anlage notwendig, wenn das System umkonfiguriert oder geändert werden muss,
- Techniker können ohne spezielle Schulung das System neu starten oder Messdaten holen,
- kein Rechensystem im Rotorblatt notwendig, dadurch geringere Anforderungen an Rechentechnik.

Übertragungsart	via	Medium					via	
Kabelgebunden	CAN	Schleifring	Rotorblatt	->	Gondel	->	LWL	Turmfuß
	PowerLan	Schleifring	Rotorblatt	->	Gondel	->	LWL	Turmfuß
Kabellos	WLAN	Funk	Rotorblatt	->	Gondel	->	LWL	Turmfuß
	CAN	Funk	Rotorblatt	->	Gondel	->	LWL	Turmfuß
	WLAN	Funk	Rotorblatt	->	Turmfuß			

Tabelle 6.1.3-3: Durch Testaufbauten erprobte Übertragungsszenarien

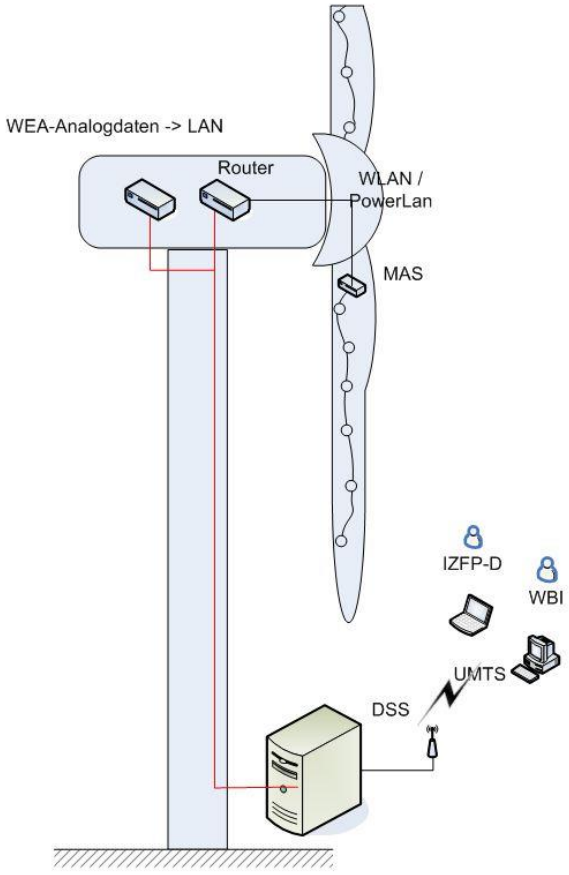


Abbildung 6.1.3-3: Messwerterfassungssystem SHM Wind

Abbildung 6.1.3-3 zeigt eine Übersicht des Systemkonzeptes. Die Aufnahme der Sensordaten für die hoch- und niederfrequente Messtechnik erfolgt im Rotorblatt. Die Datenübertragung in die Gondel erfolgt entweder drahtgebunden über das vorhandene Stromnetz (PowerLan) oder alternativ drahtlos mittels Funk (WLan). In der Gondel wird das erhaltene Signal mittels geeigneter

Schnittstelle auf optischen Standard umgesetzt und in den Turmfuß übertragen. Im Turmfuß befindet sich die Rechentechnik (DSS). Über UMTS-Fernverbindung ist der Zugriff von IZFP-D bzw. WBI auf das System gewährleistet. Für die Kenntnis des Windanlagenzustandes müssen die Anlagendaten der Windenergieanlage erfasst werden. Eine Übersicht über existierende Daten (Windrichtung, Windstärke, Pitchwinkel, elektrische Leistung) wurde von Nordex zur Verfügung gestellt. Diese Daten werden um weitere ergänzt (Temperatur, Niederschlag, Ausrichtung des Rotorblattes) und ebenfalls in den Turmfuß übertragen.

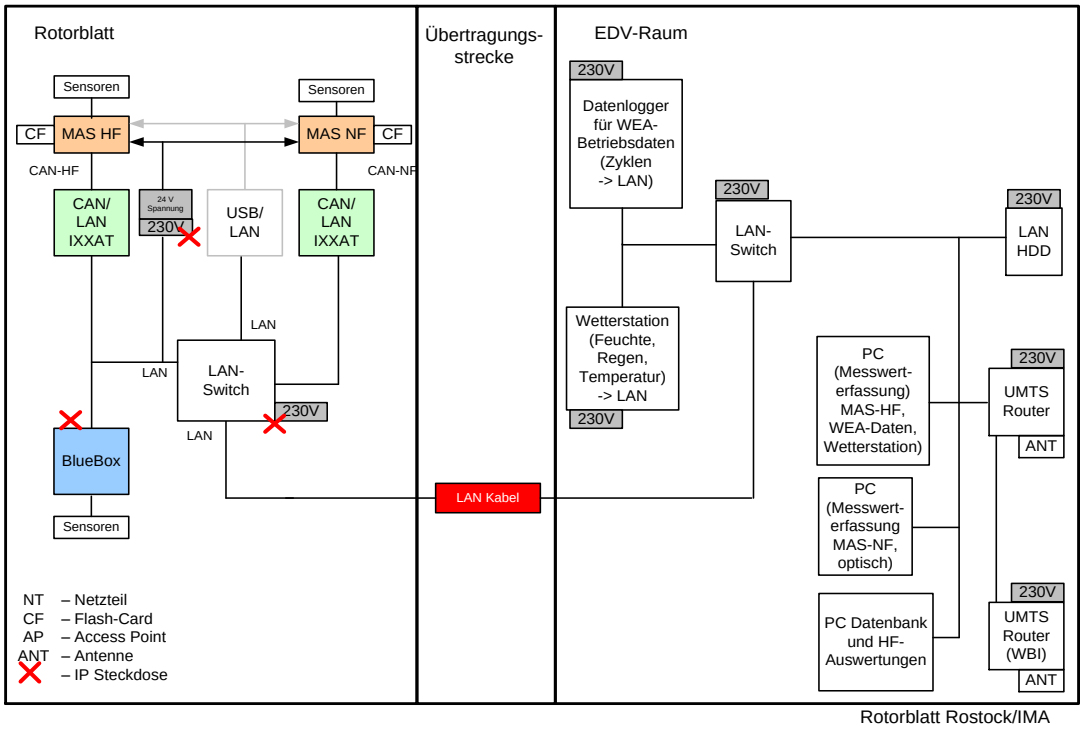


Abbildung 6.1.3-4: Blockschaltbild Messwerterfassungssystem

Für die Versuche an den Teststänsden am Boden (Tabelle 6.1.3-2, lfd. Nr. 2-4) reduziert sich das dargestellte Systemkonzept um den Punkt der Datenübertragung aus einem rotierenden System. Abbildung 6.1.3-4 stellt das Blockschaltbild des Messwerterfassungssystems für die Teststände in Dresden bzw. in Rostock dar.

6.1.3.3 Konzept des Sensornetzwerkes mit optischen Komponenten

Es wird ein Systemkonzept verwendet, welches aus Gründen des Blitzschutzes auf einer rein faseroptischen Verbindungstechnik zwischen den einzelnen Sensorknoten und der zentralen Energieversorgungs- und Kommunikationseinheit basiert. Um eine preiswerte vielkanalige Lösung anbieten zu können, wurde im Projekt auf 12-Kanal-Übertragungstechnik der Fa. emcore zurückgegriffen. Diese Komponenten bieten neben dem Vorteil der Vielkanaligkeit auch einen hohen Integrationsgrad der optoelektronischen Wandlung (Detektordiode, Verstärker, Komparator; Treiber sind im Stecker integriert). Abbildung 6.1.3-5 zeigt die eingesetzten Komponenten.

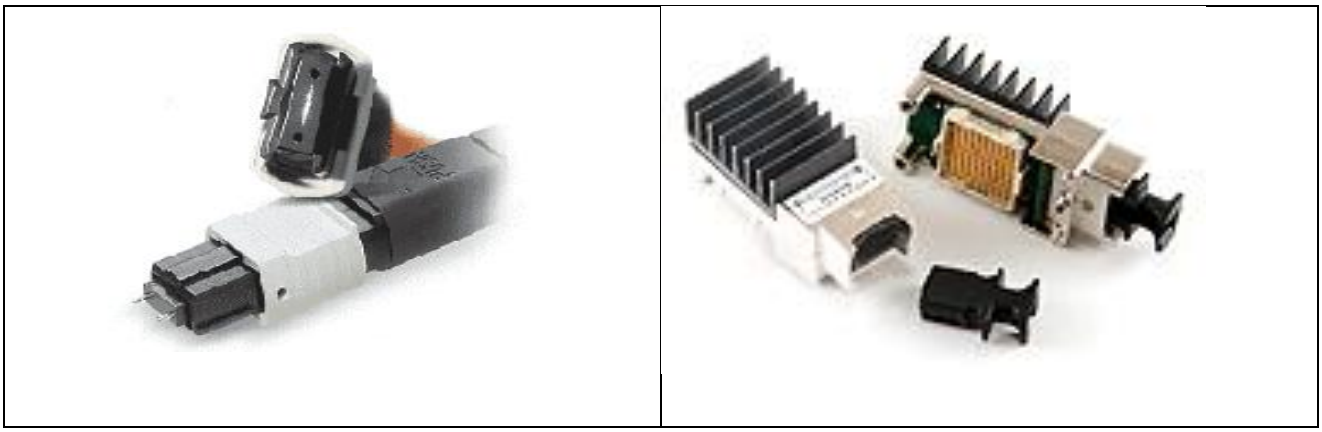


Abbildung 6.1.3-5:. Optische 12-Kanal-Empfänger der Fa. emcore

Damit ergibt sich ein auf einer 12-Kanal-Struktur basiertes Systemkonzept, wie in Abbildung 6.1.3-6 dargestellt. Die einzelnen Systemkomponenten sind:

Sensorknoten, die von DuraAct Wandlern piezoelektrisch detektierte Ultraschallsignale elektrisch aufbereiten, digitalisieren und über ein PLD in ein spezielles Datenformat (Manchester Codierung) wandeln. Mittels spezieller Photoelemente erfolgt die Energieversorgung der sensornahen Elektronik und Kommunikationstechnik. Ein Low-Power-VCSEL dient zur Übertragung der Sensordaten. Eine schematische Darstellung findet sich im Abschnitt Sensorknoten, eine ausführliche Darstellung der Details ist in 6.1.6. zu finden.

12-Kanal-Laserbox zur Energieversorgung mit Power Lasern ist im Abschnitt Energieversorgung Laserschutz und Augensicherheit beschrieben.

12-Kanal-Sensordatenempfänger, der die 12-Kanal-Empfänger von emcore nutzt, um die optischen Signale in elektrische Daten zu konvertieren und die nachfolgende Signalverarbeitung basierend auf einer kombinierten FPGA-DSP-Technologie zu realisieren. Details dieser Einheit sind in Abschnitt 6.1.5. dargestellt.

Optische Verteilerbox für die Signalverteilung zu den einzelnen Sensorknoten ist ebenfalls im Abschnitt Energieversorgung Laserschutz und Augensicherheit beschrieben und in den Abbildungen 6.1.3-7 schematisch bzw. Abbildung 6.1.3-8 als Foto dargestellt.

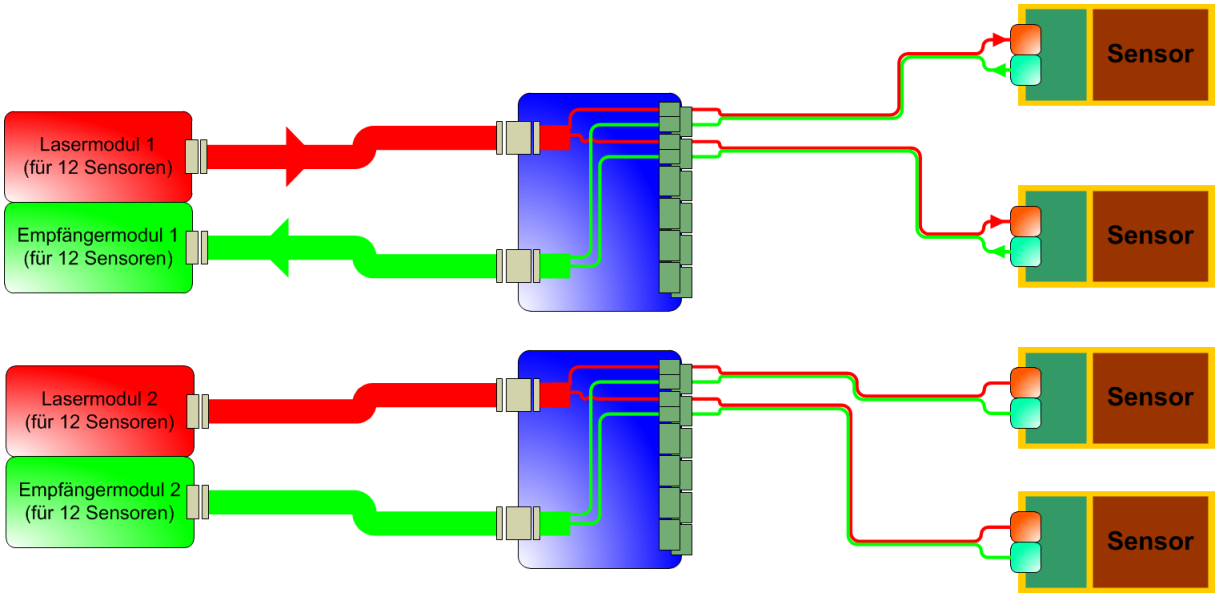


Abbildung 6.1.3-6: Systemkonzept zur optischen Energie- und Datenübertragung

Energieversorgung, Laserschutz und Augensicherheit

Um insgesamt 12 Sensorknoten mit ausreichender optischer Energie zu versorgen, werden 6 Leistungs-Laserdioden verwendet. Dabei wird das emittierte Licht einer Laserdiode über einen speziellen optischen Verzweiger (Y-Koppler) in zwei getrennte Lichtleitfasern verteilt. Dadurch können zwei Sensorknoten mit Energie versorgt werden. Bei den verwendeten Laserdioden für die Energieversorgung handelt es sich um leistungsstarke Kantenemitter mit einer Emissionswellenlänge bei 830 nm und einer optischen Ausgangsleistung von mindestens 500 mW. In der Summe werden daher ca. 3000 mW in ein zwölfadriges Lichtleiterkabel eingekoppelt. Bei einer solch hohen optischen Ausgangsleistung muss das gesamte Lasermodul, bestehend aus den 6 Laserdioden, sicherheitstechnisch in die Laserklasse 4 und damit in die höchste Laserklasse eingruppiert werden. Neben der hohen Laserleistung ist zusätzlich die Emissionswellenlänge im nahen Infrarot-Bereich ein Sicherheitsrisiko, die unsichtbar für das menschliche Auge ist. Beide Punkte fordern eine spezielle Anpassung der optischen Übertragungsstrecke, um vor allem das menschliche Auge vor der sehr gefährlichen Laserstrahlung zu schützen.

Für diesen Zweck wurde die optische Verteilerbox so entwickelt, dass eine augensichere Aufteilung der 12 Energieleitungen zu den entsprechenden Sensorknoten gewährleistet ist. Abbildung 6.1.3-7 zeigt den schematischen Aufbau und Abbildung 6.1.3-8 ein Foto der Verteilerbox. Die Energiezuleitung und die Sensordatenleitung sind aus sicherheitstechnischen Gründen über auszugsichere Steckverbinder mit der Verteilerbox verbunden und werden im Inneren auf die entsprechenden Aus- und Eingangsbuchsen verteilt. Die Aus- und Eingangsbuchsen sind spezielle faseroptische Steckerkupplungen des Typs E2000, die für einen sicheren Laserbetrieb entwickelt wurden. Im Gegenzug sind die Sensorleitungen fest an die einzelnen Sensoren angeschlossen. Die E2000 Kupplungen an der optischen Verteilerbox und Stecker besitzen einen Verschlussmechanismus, der automatisch ein Austreten von gefährlicher Laserstrahlung verhindert, auch wenn die Sensorknoten nicht mit der Verteilerbox verbunden sind.

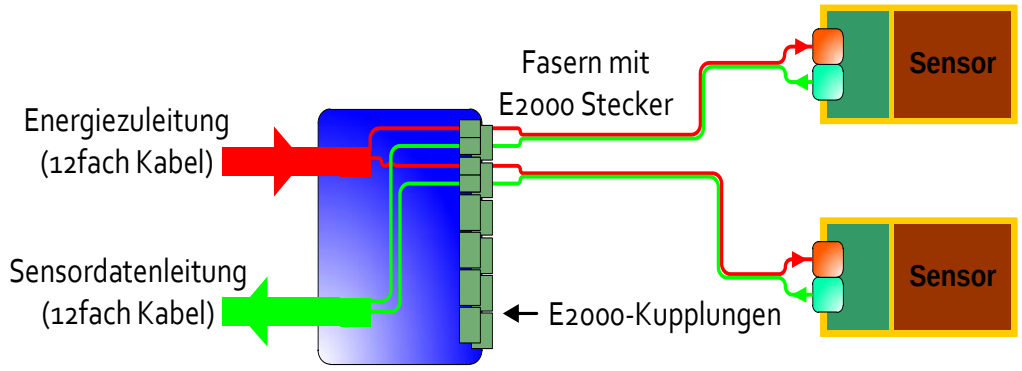


Abbildung 6.1.3-7: Schematische Darstellung der Verteilerbox

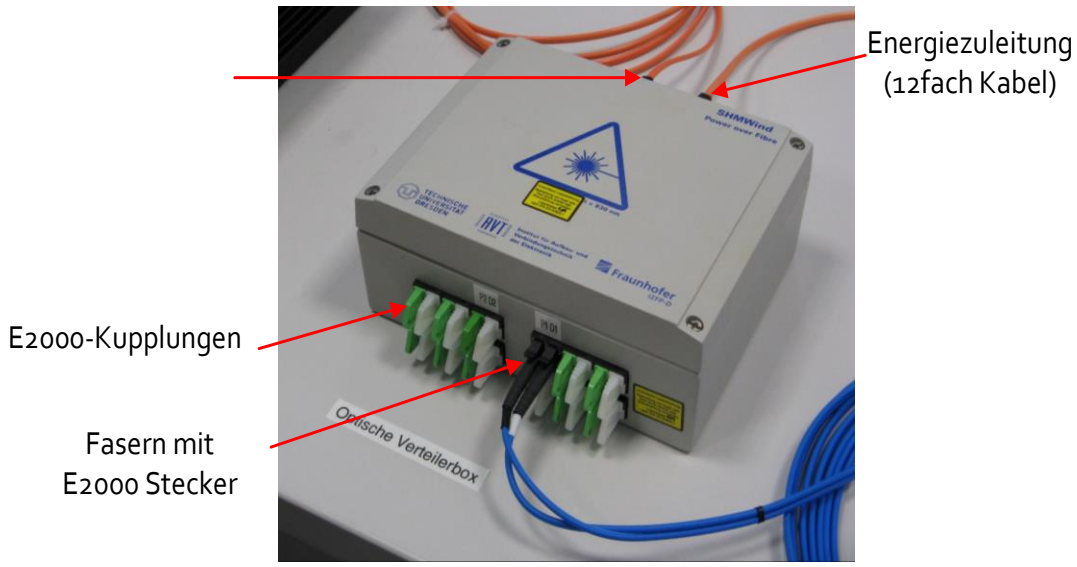


Abbildung 6.1.3-8: Verteilerbox

Sensorknoten

Im Projekt wurden spezielle „low-power“ VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser) für die optische Datenübertragung in geeignete Gehäuse integriert. Das Gehäuse soll die empfindliche Lichtquelle vor einer möglichen Verschmutzung schützen. Außerdem wird ein Stück Lichtleitfaser mit dem Gehäuse und der Lichtquelle direkt verbunden. Mit diesem sogenannten Pigtail ist es später möglich, den Sensorknoten mit der Verteilerbox über eine thermische Spleißverbindung zu verbinden. Eine solche Spleißverbindung hat den Vorteil, dass die Koppeldämpfung minimal ist und damit mehr Licht für die Daten- und Energieübertragung zur Verfügung steht. Im Folgenden ist ein vereinfachtes Blockschaltbild des Sensorknotens dargestellt, bei dem nur die Messfunktion berücksichtigt ist. Der Analogteil dient der Erfassung und Aufbereitung des Sensorsignals, ADC und CPLD digitalisieren das Signal und wandeln es in ein Manchester II kodiertes Digitalsignal um.

Anhand der Spezifikationen des optischen Senders war es hier möglich, ohne jegliche zusätzliche Treiberschaltung den Sender direkt an den Ausgang des CPLD zu schalten. Wesentlich war eine Optimierung des Energieverbrauchs der einzelnen Komponenten des Sensorknotens, um den geforderten Summenenergieverbrauch von ca. 40 mW realisieren zu können (Details siehe 6.1.6.).

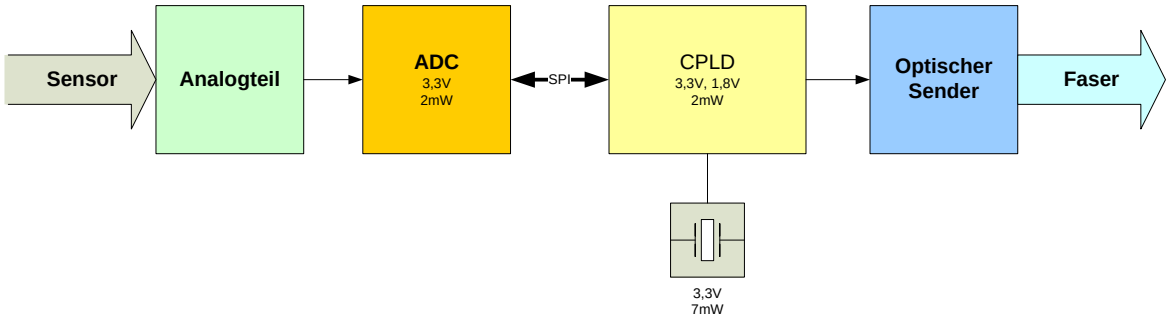


Abbildung 6.1.3-9: Vereinfachtes Blockschaltbild des Sensorknotens

Die Gesamtanordnung ist beispielhaft anhand eines Demonstrators in Abbildung 6.1.3-10 dargestellt. Die Schleppkante eines Rotorblattsegmentes wurde zu Demonstrationszwecken mit vier Sensorknoten bestückt, die optisch kommunizieren und mit Energie versorgt werden. Die Verteilerbox liefert die Signale über die beschriebenen 12-Kanal-Steckverbinder an die Netzwerkeinheit. In diese sind der Netzwerkknoten und die optische Stromversorgung in einem kompakten Gehäuse zusammengefasst.

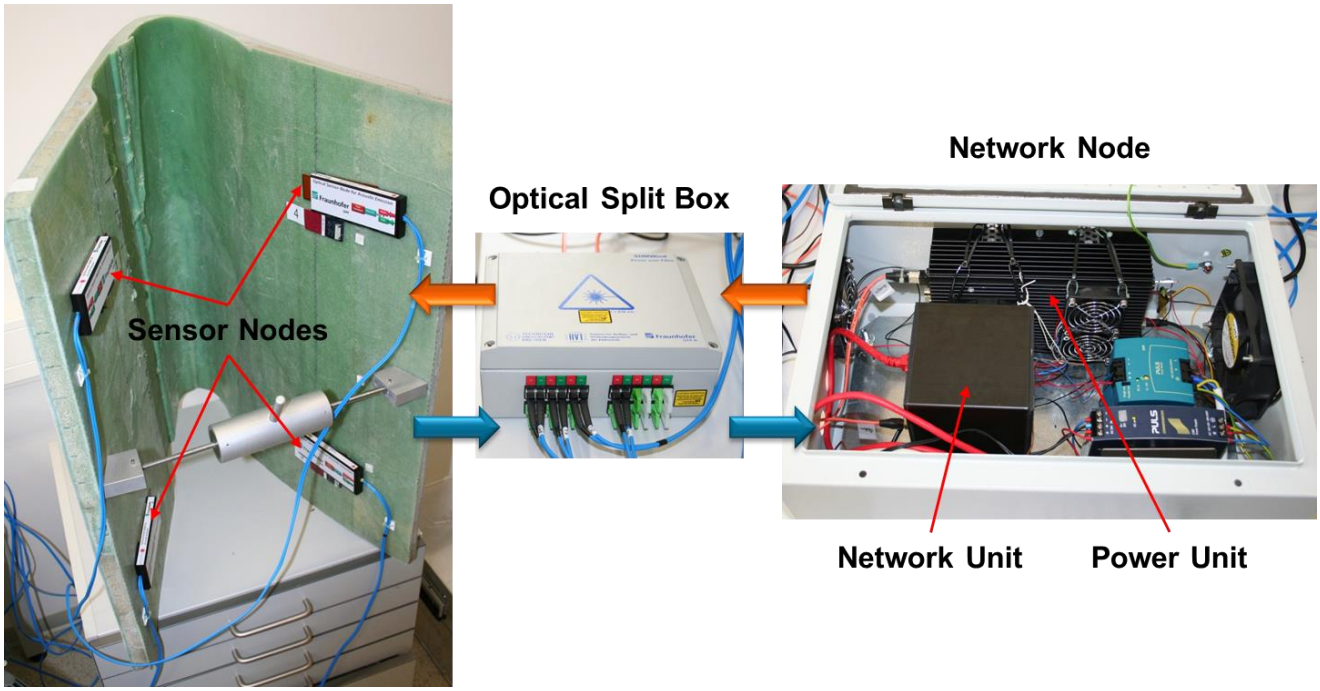


Abbildung 6.1.3-10: Systemdemonstrator

Die Netzwerkeinheit beinhaltet den DSP zur Aufbereitung der Sensordaten. Mit Hilfe der entwickelten Messsoftware ist es möglich, verschiedene Messmodi, wie z.B. die freie und getriggerte Messung, durchzuführen und zu speichern. Darüber hinaus wurde eine Routine in den Netzwerkknoten implementiert, mit der es möglich ist, die vom Sensorknoten übertragenen NF-Signale (niederfrequente Schwingungssignale eines MEMS) aus dem Gesamtdatenstrom zu separieren.

6.1.4 Optische Energie- und Datenübertragung, TUDD

Aufgrund der hohen Blitzschlagwahrscheinlichkeit insbesondere bei Rotorblättern ist die Versorgung und Kommunikation der einzelnen Sensoren des Netzwerkes über herkömmliche Kupferdrahtverbindungen ein Risiko für Sensorik und Rotorblatt. Ziel des Teilvorhabens Optische Energieversorgung war daher eine Machbarkeitsuntersuchung und die Konzeption einer optischen Energieversorgung, die im Gegensatz zu Ansätzen wie Energy Harvesting in der Lage ist, ausreichend Energie auch für aktive Messverfahren zur Verfügung zu stellen. Zum Abschluss sollten die Ergebnisse in einen Demonstrator umgesetzt werden.

Begonnen wurde mit einer Marktanalyse verfügbarer optischer und elektro-optischer Komponenten. Die wesentlichen Systemkomponenten sind die optische Quelle (i.d.R. ein Laser) mit dazugehöriger Ansteuer- und Kühlelektronik, der optische Übertragungskanal (Lichtwellenleiter) sowie der optische Empfänger (Photodiode).

	Kantenlaser	Vertikallaser (VCSEL)	Leuchtdiode (LED)
Effizienz	++	+	+
Kontinuierliche Ausgangsleistung (cw-Betrieb)	++	o	o
Modulationsgeschwindigkeit	+	++	-
Strahlprofil	+	++	-
Chip-Kosten	o	+	++
Packaging-Kosten	-	++	++
Spektrale Stabilität	o	++	-

Tabelle 6.1.4-1: Vergleich der verschiedenen Laserarten/LED

Als optische Quelle kommen neben LEDs kantenemittierende bzw. oberflächenemittierende Laser (VCSEL) in Frage. Deren Eigenschaften sind in Tabelle 6.1.4-1 dargestellt. Bei den Lichtwellenleitern stehen prinzipiell Polymer-basierende Fasern (POF) und Glasfasern (GOF) zur Verfügung. Für POF sprechen die geringen Kosten sowie die einfachere Handhabung. Aufgrund der deutlich geringeren Dämpfung, der höheren Leistungsverträglichkeit und des geringen Energiebudgets fiel die Wahl jedoch auf die Glasfaser. Diese Entscheidung zieht die Eingrenzung der optischen Quelle auf Laser nach sich. Dabei haben Laser im nahen Infrarot-Bereich (ca. 800 – 900 nm) einen Kostenvorteil. Neben den kommerziellen, fasergekoppelten Kantenemittern wurden insbesondere aufgrund seiner hohen Zuverlässigkeit auch VCSEL betrachtet. Der selbst entwickelte Aufbau zur Kopplung eines VCSELs an ein Faserbündel ist in Abbildung 6.1.4-1 dargestellt.

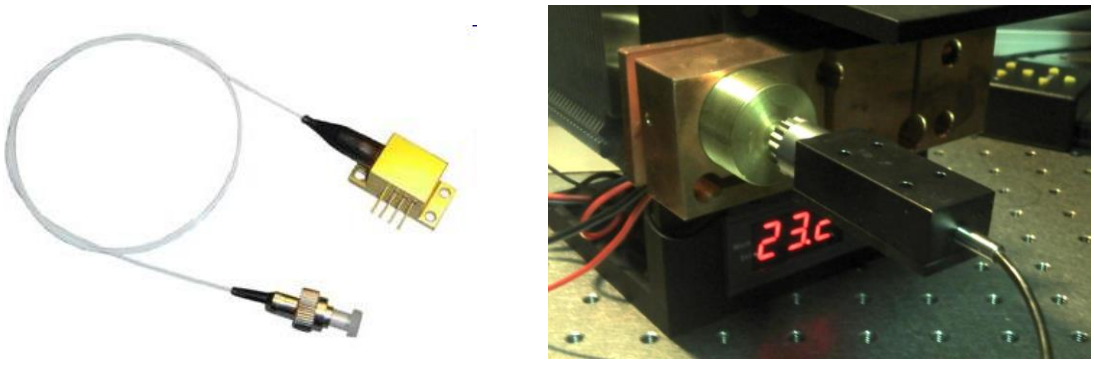


Abbildung 6.1.4-1: Kommerzieller fasergekoppelter 1W-Laser von JDSU (830 nm, Kantenemitter) und selbst entwickelter Aufbau zur Kopplung eines Faserbündels an ein zuverlässiges Hochleistungs-VCSEL

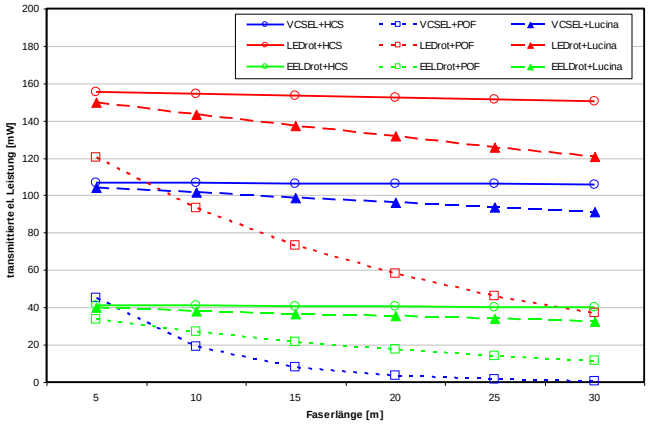


Abbildung 6.1.4-2: Dämpfung des Lichtwellenleiters in Abhängigkeit der Faserlänge für Kombinationen verschiedener Faserarten und optischer Quellen

Am entfernten galvanisch entkoppelten Sensor muss das durch die Glasfaser übertragene Licht wieder opto-elektrisch gewandelt werden. Als mögliche Wandler gibt es ein breites Spektrum von kostengünstigen Photodioden über großflächige Solarzellen bis zu speziellen Hochleistungslaserkonvertern. Mit den Rechercheergebnissen wurden verschiedene Aufbauvarianten erstellt (u.a. Abbildung 6.1.4-2) und nach Leistung und wirtschaftlichen Merkmalen bewertet. Dabei wurden auch verschiedene Konzepte für die Topologie des Energieversorgungssystems erstellt und bei der Auswahl berücksichtigt.

Um ausgewählte optische Komponenten elektrisch/optisch zu charakterisieren, wurde ein eigener Messplatz entwickelt und aufgebaut. Dieser besteht u.a. aus einem Laserdiodentreiber zur Versorgung von Hochleistungshalbleiterquellen, einem Temperaturcontroller zum thermischen Management der elektro-optischen Komponente sowie einem XYZ-Tisch mit Ansteuerelektronik zur dreidimensionalen Positionierung der optischen Komponenten. Der entstandene Aufbau ist in Abbildung 6.1.4-3 dargestellt.

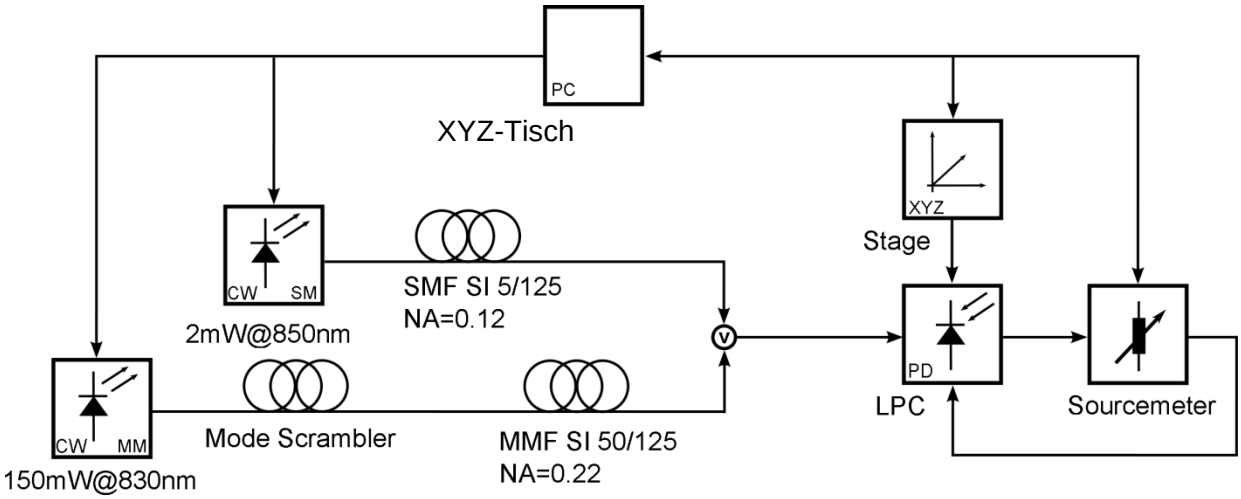


Abbildung 6.1.4-3: Messaufbau zur Charakterisierung von optischen Komponenten

Im Verlaufe des Projektes wurde eine Vielzahl von optischen Komponenten charakterisiert. Auf der Suche nach einem geeigneten opto-elektrischen Wandler wurden verschiedene großflächige Solarmodule, ausgewählte Si- und III-V-Halbleiter-Photodioden sowie spezielle Laser Power Converter vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme getestet. Aufgenommen wird die nichtlineare Strom-Spannungs-Kennlinie im Raum, und daraus der optimale Ausleuchtungsabstand, der elektrische Arbeitspunkt, d.h. der Punkt mit der größten elektrischen Leistung, sowie der Koppelwirkungsgrad bestimmt. Ziel ist eine Leistungsübertragung von wenigstens 40 mW für den Sensor mit angemessenem Aufwand zu erreichen.

Vielversprechende Konverter wurden mit der Si-Photodiode s5971 von Hamamatsu und später mit den Laser Power Convertern gefunden (Abbildung 6.1.4-5). Abbildung 6.1.4-4 zeigt ebenfalls betrachtete Lösungen für Punkt-zu-Punkt- und Busverbindungen. Letztere hatten für das Vorhaben jedoch keine Relevanz.

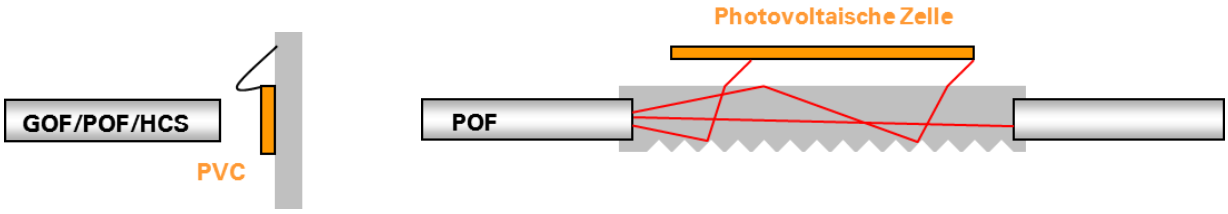


Abbildung 6.1.4-4: Koppelprinzip Stirnflächenkopplung und indirekte diffuse Kopplung für Ausleuchtung großflächiger Solarzellen

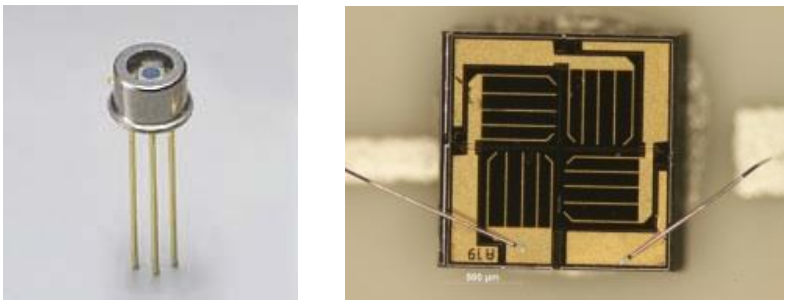


Abbildung 6.1.4-5: Opto-elektrische Wandler Si-Photodiode s5971 von Hamamatsu (links) und Laser Power Converter 4V von Fraunhofer ISE (rechts)

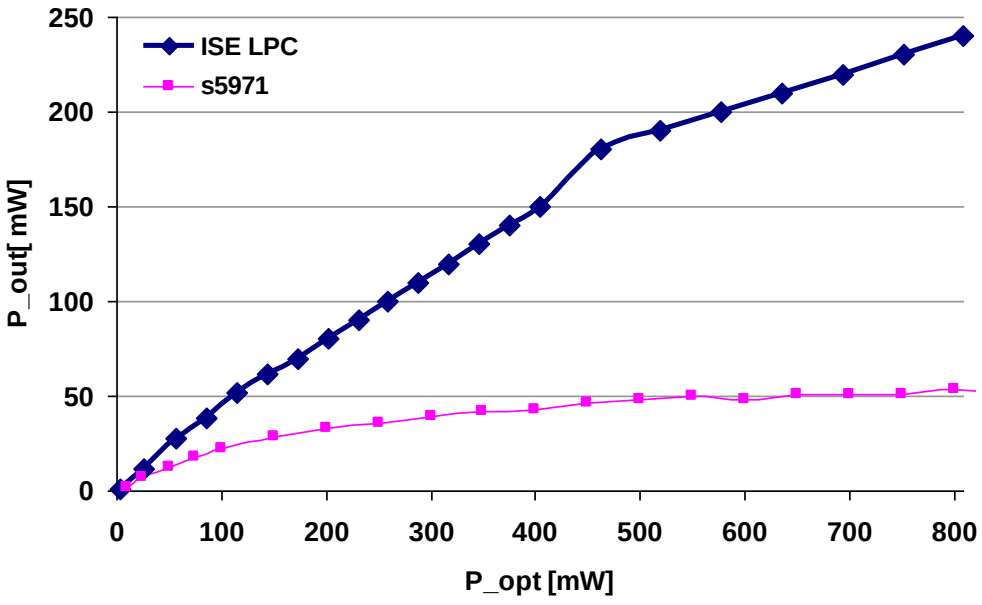


Abbildung 6.1.4-6: Charakterisierung der Hamamatsu s5971 und des Fraunhofer ISE Laser Power Converters im direkten Vergleich: elektrische Ausgangsleistung in Abhängigkeit der optischen Eingangsleistung

Wie in Abbildung 6.1.4-6 zu sehen, können beide Konverter prinzipiell 40 mW umwandeln. Die Laser Power Converter weisen allerdings eine deutlich höherer Effizienz auf. Zudem liefern sie im Arbeitspunkt eine Spannung von etwa 4 V, die deutlich näher an der Sensorspannung von 5 V liegt und sich daher effizienter nutzen lässt. Dies wird durch eine Serienschaltung von 4 Zellen direkt auf dem Chip sowie die Verwendung von GaAs erreicht. Damit kann auch die nötige nachgeschaltete Schaltung zur Spannungsverstärkung auf 5 V deutlich effizienter arbeiten. Die s5971 liefert hingegen eine Arbeitspunktspannung von nur Si-typischen 0,5 V und macht die Reihenschaltung von wenigstens zwei Photodioden und anschließender Aufwärtswandlung erforderlich. Nach ersten Mustern mit den preiswerteren, aber kommerziell verfügbaren Si-Photodioden wurde der Laser Power Converter für die Umsetzung im Demonstrator ausgewählt.

Mit dem Messplatz können nicht nur optische Empfänger, sondern auch optische Quellen charakterisiert werden. Für den Rückkanal konnte ein geeigneter energieeffizienter VCSEL (Abbildung 6.1.4-7) von Philips Technologie GmbH Ulm Photonics gefunden werden. Mit einer mittleren Leistungsaufnahme von ca. 500 µW konnte der Leistungsverbrauch zu dem zuvor eingesetzten Standard-VCSEL (10 mW) drastisch reduziert werden. Die mittlere optische Ausgangsleistung kann auch bei der direkten Faserkopplung mit UV-härtendem Klebstoff beibehalten werden (Abbildung 6.1.4-8).

Chip Temperature = 25℃, unless otherwise stated.

PARAMETER	SYMBOL	UNITS	MIN	TYP	MAX
Emission wavelength	λ_R	nm	840	850	860
Threshold current	I_{th}	mA		0.35	
Slope Efficiency	η_s	W/A		0.5	
Power disspation	P_{diss}	mW			3.0
Differential series resistance	R_{S_25}	Ω			200
Relative intensity noise	RIN	dB/Hz			-120
Beam divergence	θ	°			30
Spectral bandwidth	$\Delta\lambda_1$	nm			1.00

Abbildung 6.1.4-7: Low power VCSEL für Daten-Rückübertragung von Philips Technologies Ulm Photonics (850 nm)

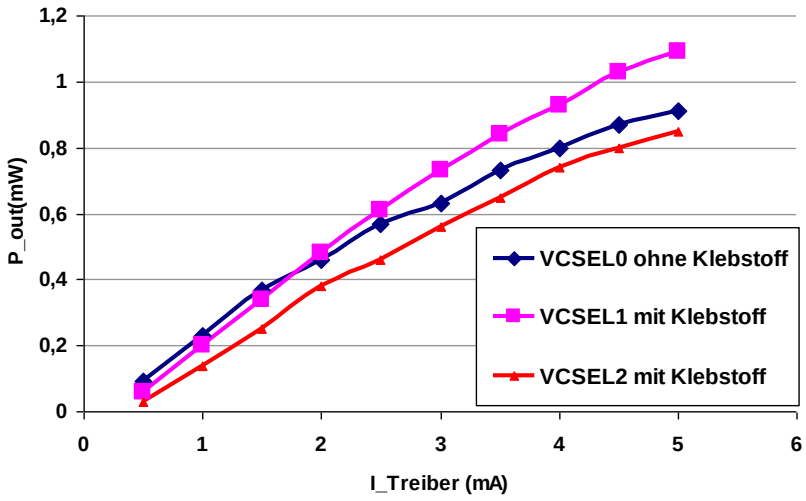


Abbildung 6.1.4-8 Leistungskennlinie des energieeffizienten VCSEL (Daten-Rückkanal) von Philips Technologie Ulm Photonics

Aufgrund der Komplexität des Systems wurde das finale Konzept in 3 Stufen umgesetzt. In der ersten Stufe wurde zunächst eine optische Energieversorgung für einen Sensor aufgebaut und erprobt. Schwerpunkt war hier das Sammeln von Erfahrungen mit den optischen Komponenten. Aspekte wie Datenkommunikation und thermische Auslegung wurden nur untergeordnet betrachtet. Die zwei aufgebauten Demonstratoren dienten den Projektpartnern Fraunhofer IZFP-D und Physik Instrumente zudem bei der Entwicklung der Sensorschaltung. In Abbildung 6.1.4-11 ist der Demonstrator dargestellt. Die Lichterzeugung übernimmt ein fasergekoppelter 1W-Laser von der Firma JDSU (Kantenemitter), gesteuert durch einen Konstantstrom-Treiber. Um die nötige Leistung von 40 mW zu übertragen, wurden zwei Hamamatsu s5971 Si-Photodioden eingesetzt (Abbildung 6.1.4-9). Dazu wurde das Licht mit Hilfe eines 50/50-Kopplers aufgeteilt und mit zwei parallelen Glasfasern übertragen. Da die Sensorschaltung mit 5 V arbeitet und die Arbeitsspannung der Photodioden 0,5 V beträgt, wurde beim Partner PI eine Aufwärtswandler-Schaltung (Booster) entwickelt. Aufgrund des großen Spannungshubs beträgt der Wirkungsgrad jedoch lediglich ca. 40 %. Die Lösung hat somit keine Leistungsreserven.

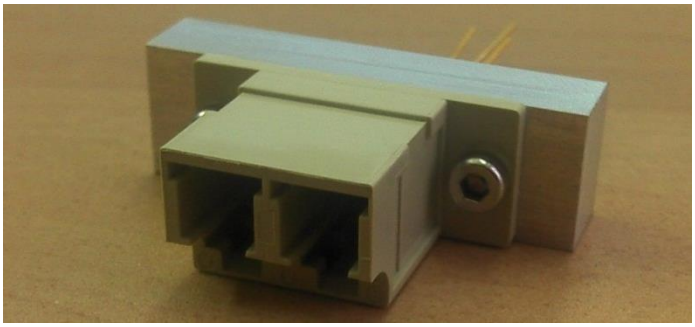


Abbildung 6.1.4-9: Empfänger mit zwei Hamamatsu s5971 mit Duplex LC-Stecker Anschluss

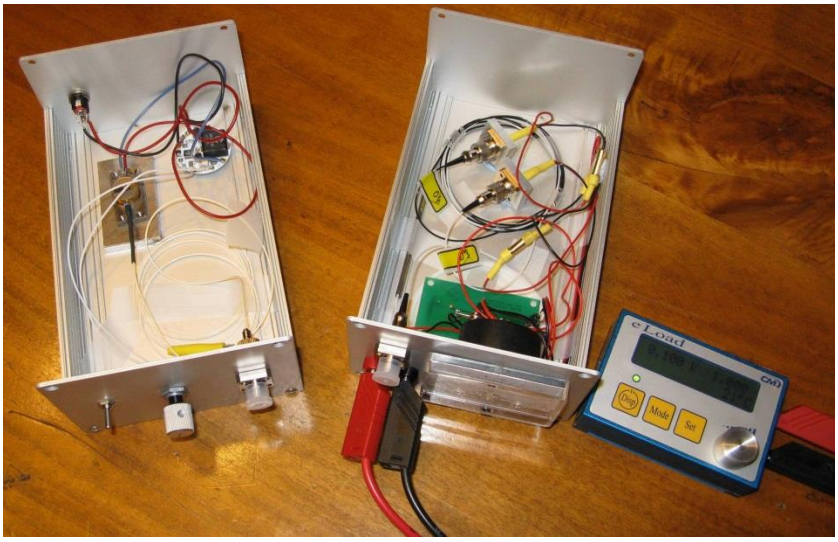


Abbildung 6.1.4-10: 1-Kanal Funktionsmuster (Sender mit fasergekoppeltem Laser und regelbarer Konstantstrom-Quelle links, Empfänger mit Faserkoppler, Aufwärtswandlung (Booster) und elektronischer Last rechts)

Bei der zweiten Stufe wurden die bereits gewonnen Erfahrungen berücksichtigt. Der Schwerpunkt wurde hier zu dem eigentlichen Netzwerk verschoben. Es wurden insgesamt zwei 12-Kanal-Versorgungseinheiten aufgebaut. Für die 12 Kanäle wurden aus Verlustleistungs- und Kostengründen 6 fasergekoppelte Laser (JDSU 830nm) in Verbindung mit 6 optischen 50/50-Kopplern (Y-Weiche) verwendet. Da die Laser einen zulässigen Temperaturbereich von 10 bis 30 °C aufweisen und eine Verlustleistung von ca. 12 W abgeben, wurde eine aktive Kühlung mit Peltierelementen erforderlich. Ein einfacher Peltiercontroller mit Zwei-Quadratenregelung für Heizen und Kühlen übernimmt die Steuerung. Um die Wärmeabgabe des Gehäuses zu verbessern, wurde zudem ein Kühlkörper mit einem Lüfter verbaut. Somit konnte die Gesamtverlustleistung von ca. 40 Watt im

Laborbetrieb ausreichend abgeführt werden. Um eine erste Datenkommunikation zu ermöglichen, wurde ein Lasertreiber mit PWM-Modulations-Eingang ausgewählt. Die 12 Kanäle wurden über ein 12-kanaliges Mehrfaserkabel (MPO-System) in Verbindung mit einem Break-out-Kabel zu den Sensoren verteilt. Somit wurde ein kompakter und gut handhabbarer Kabelbaum erreicht. Bei den sensorseitigen Empfängern erfolgte der Umstieg von Hamamatsu Si-Photodioden auf die Laser Power Converter (Fraunhofer ISE). Die optische Sendeleistung konnte bei gleicher elektrischer Ausgangsleistung um Faktor 4 gesenkt werden, zudem sind erhebliche Leistungsreserven vorhanden. Ebenso wurde statt dem Standard-Daten-VCSEL ein spezielles Low-Power VCSEL von Philips Technologie GmbH Ulm Photonics eingesetzt. Auch hier konnte eine deutliche Leistungseinsparung von Faktor 20 erreicht werden. Da diese beiden Chips nur als Nackt-Varianten verfügbar waren, musste eine einfache Packaging-Lösung entwickelt werden. Dazu wurde der Chip auf eine Keramik geklebt und mit einem Drahtbond elektrisch kontaktiert. Anschließend wurde die Glasfaser durch das 3D-Positioniersystem des Charakterisierungsmessplatzes bei aktivem Laser in das Maximum der Koppelstelle gefahren. Mit speziellem UV-härtendem, optisch angepasstem Klebstoff wurde diese Stirnflächenkopplung fixiert. Für mechanische Stabilität wurde die Koppelstelle in einem Kunststoffgehäuse verklebt. Die Prozessschritte zur adhäsiven Faserkopplung sind in Abbildung 6.1.4-11 visualisiert, während Abbildung 6.1.4-12 das prototypische optische Sende-Empfangs-Modul mit Duplex-Faserankopplung sowie den vollständig aufgebauten optisch versorgten SHM Wind-Sensorknoten zeigt.

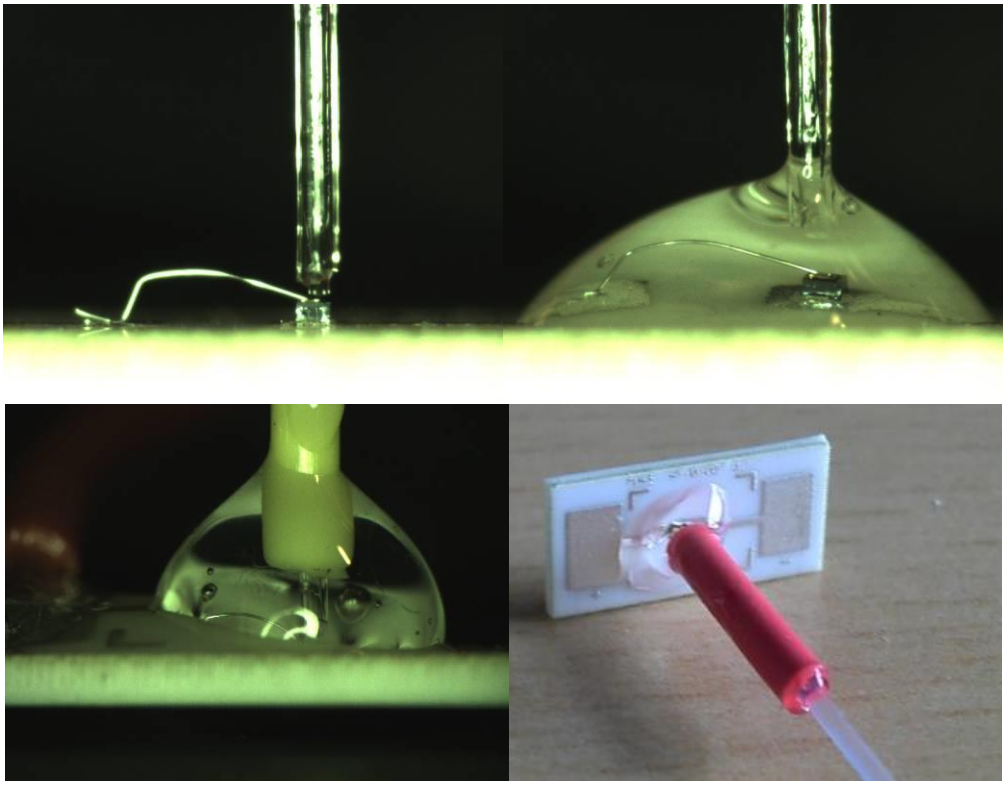


Abbildung 6.1.4-11: Packaging-Lösung für Daten-VCSEL (v.o. links nach u. rechts): Daten-VCSEL gebondet und Glasfaser ausgerichtet, Klebstoffzugabe und Aushärtung mit Schutzschlauch, fertiges Package; analog Package-Fertigung für Laser Power Converter

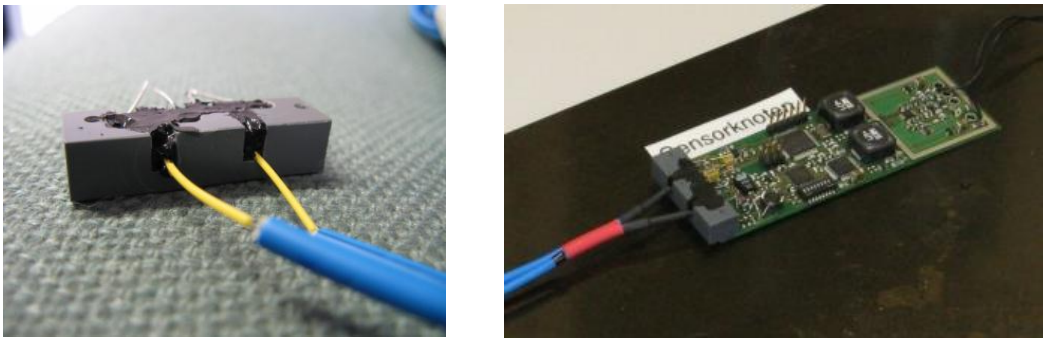


Abbildung 6.1.4-12: Optisches Sensormodul mit Empfänger (Laser Power Converter) und Daten-VCSEL (links), kompletter SHM Wind-Sensor (rechts)

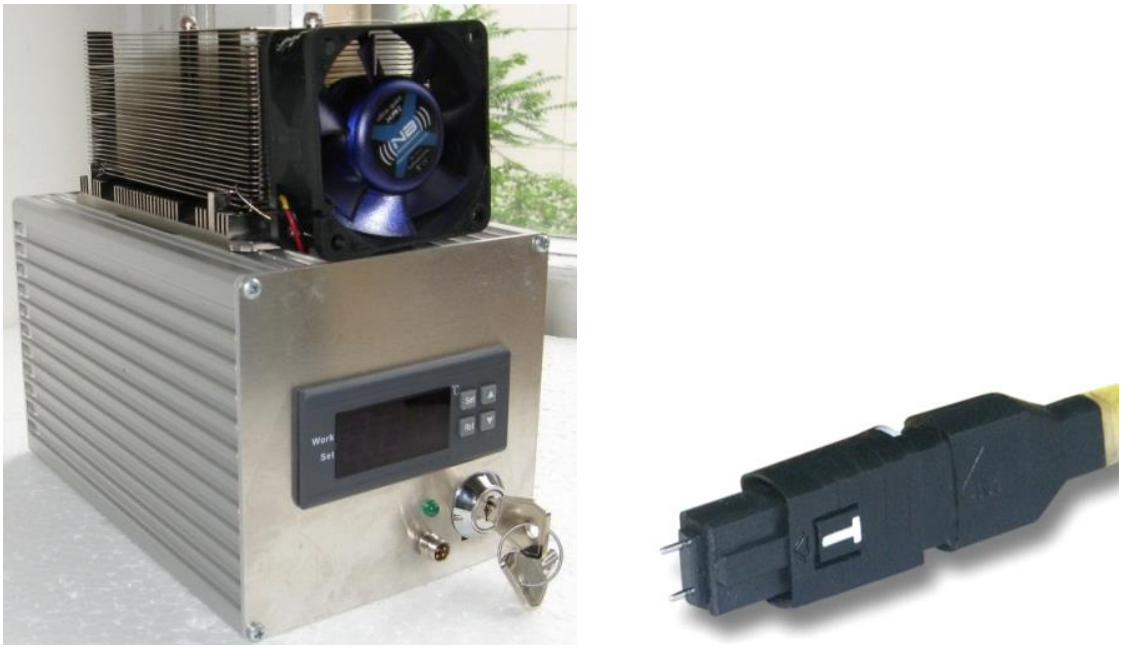


Abbildung 6.1.4-13: Optische 12-Kanal Versorgungseinheit und optischer 12-Kanal MPO-Stecker

Die erste Generation einer 12-kanaligen optischen Versorgungseinheit ist in Abbildung 6.1.4-13 dargestellt. Die integrierte 6-fach Laserbank ist aktiv temperiert und benötigt einen externen Kühlkörper mit Zwangskonvektion.

Um den Verkabelungsaufwand zu verringern, wurden zwei zwischengeschaltete optische Verteiler konzipiert. Jede dieser Verteilerboxen mit zentraler Anbringung im Flügel ist durch zwei optische Mehrfaserkabel mit der optischen Versorgungseinheit und dem Netzwerkknoten verbunden. Die Verteilerbox ordnet sternförmig jedem Sensor Versorgungs- und Datenfaser zu. Aus Laserschutzgründen wurden die optischen Sensorausgänge mit speziellen optischen E2000-Steckersystemen ausgeführt. Es ist damit möglich, Sensoren im laufenden Betrieb ohne Gefahr hinzuzufügen oder zu entfernen. Diese optische Verteilerbox und die Faserstecker mit passivem Laserschutz sind in Abbildung 6.1.4-14 dargestellt.

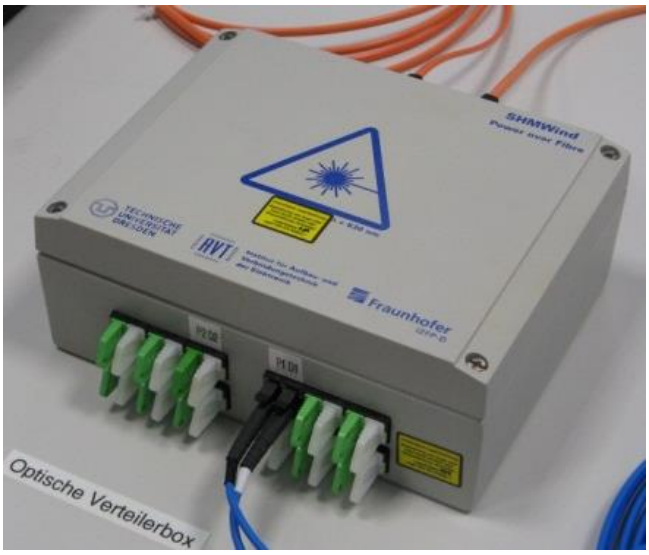


Abbildung 6.1.4-14: Optische Verteilerbox und optischer E2000-Stecker mit automatischer Glasfaserverschlusskappe

Im September 2011 konnte ein komplettes SHM-System mit einem Sensor erfolgreich vorgeführt werden (Abbildung 6.1.4-15). Die Versorgung und Kommunikation wurde optisch realisiert. Die Projektpartner hatten erstmalig die Möglichkeit, Sensoren im Netzwerk zu testen.

Abbildung 6.1.4-15: Komplette SHM-Systemdemonstration mit optischen Energie- und Datenversorgung am 02.09.2011 am IZFP-D

Für den finalen 24-Kanal-Demonstrator wurden die zwei 12-Kanal-Versorgungseinheiten für den Testbetrieb im Flügel umgebaut. Der größere Temperaturbereich außerhalb des Laborbetriebes machte ein neues Wärmeableitgehäuse nötig (siehe Abbildung 6.1.4-16). Die Wärmeabgabe wird zudem von einem 120 mm IP55 Industrielüfter sowie leistungsstärkeren Peltierelementen unterstützt. Außerdem wurde eine aktive Laserschutzschaltung integriert, um die Laser im unzulässigen Temperaturbereich zu sperren und damit einen Ausfall zu verhindern. Für die Kommunikation wurde ein RS232-Eingang zur Verfügung gestellt. Aufgrund der Laserschutzproblematik wurden an den Verteilerboxen die Eingangsstecker durch eine fixe Verbindung ersetzt.

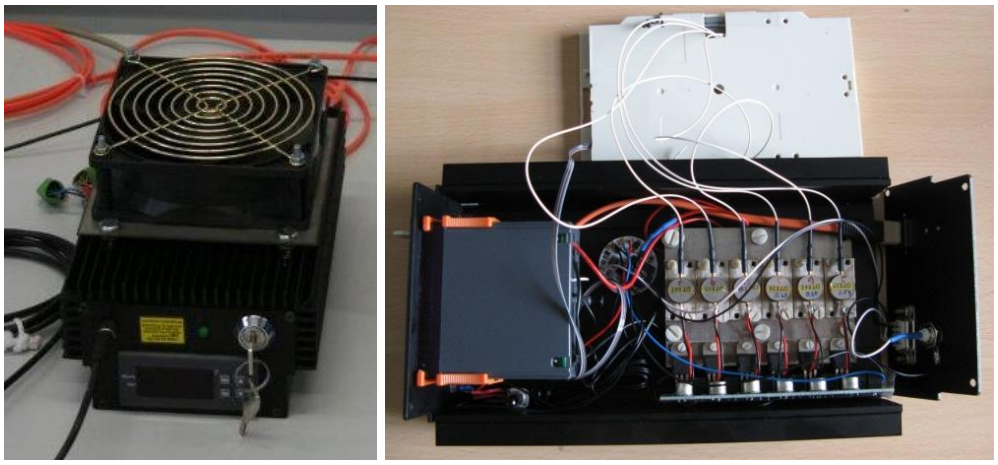


Abbildung 6.1.4-16: Finale optische 12-Kanal-Versorgungseinheit

Die innerhalb der Bearbeitungszeit erarbeiteten Generationen der optischen Energie- und Datenübertragung für die SHM Wind-Sensoren sind mit ihren wichtigsten Merkmalen in Tabelle 6.1.4-2 zusammengefasst und gegenübergestellt.

	Erstes Funktionsmuster (2010, 1x PI, 1x IZFP-D)	**Ein-Flügel-Prototyp (Juni 2011, 1x PI, 1x IZFP-D)**	**Vollversion (März 2012, IZFP-D)**
Kanäle	1	12	24 (2x12)
Laser	JDSU 1W 830nm (fasergekoppelt)	6x JDSU 1W 830nm (fasergekoppelt)	12x JDSU 1W 830nm (fasergekoppelt)
Lasertreiber	Taskled H6CC LED-Treiber	Taskled H6CC LED-Treiber	Taskled H6CC LED-Treiber
Faser	MM Faser Standard 62.5/125	MM Faser Standard 62.5/125	MM Faser Standard 62.5/125
Empfänger	2x Hamamatsu Si PIN Diode s5971	5x Laser Power Converters ISE	24x Laser Power Converters ISE
Booster	LTC3525	LTC3525	LTC3525
Verteilerbox	---	MPO ➔ E2000	MPO ➔ E2000
Status	**Erprobt**	**Erprobt**	**Erprobt**

Tabelle 6.1.4-2: Übersicht aufgebaute Demonstratoren im Detail

Wie zuvor erwähnt, sind die Laser Power Converter des Fraunhofer ISE nur eingeschränkt als ungehäuste Nacktchip-Labormuster erhältlich. Innerhalb des Projektes wurde deshalb eine einfache Packaging-Variante entwickelt. Diese erfüllt allenfalls Bedingungen für den zeitbegrenzten Laborbetrieb. Sie genügt jedoch nicht den Ansprüchen an ein System mit einer geplanten Lebensdauer von 20 Jahren. Aus diesem Grund wurde noch im Projekt mit der Entwicklung einer geeigneten Packaging-Lösung begonnen (im Rahmen einer Verlängerung/Aufstockung).

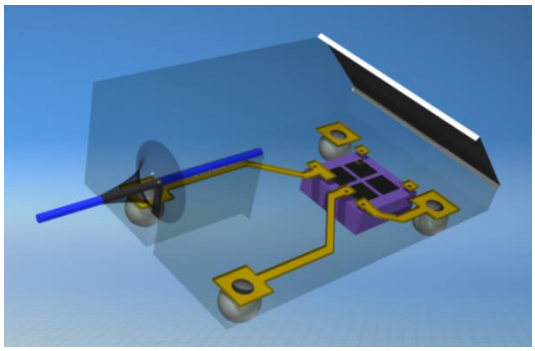


Abbildung 6.1.4-17: Package-Konzept für fasergekoppelte quasi-hermetisches SMD-Bauelemente in Waferlevel-Fertigung

Das Konzept ist in Abbildung 6.1.4-17 dargestellt. Die Aufbau- und Verbindungstechnik sieht vor, einen Wafer sowohl als elektrisches Substrat als auch für die optische Kontaktierung mit direkter Faserkopplung zu nutzen. Durch die Arbeit im Wafer-Verbund besteht bei späterer Skalierung zur Kommerzialisierung der entscheidende Vorteil. Im Gegensatz zu konventionellen hermetischen optischen Gehäusen muss keine Kavität abgedichtet werden. Das quasihermetische Package kann direkt auf ein Substrat aufgelötet und bei Bedarf noch verkapselt werden, um vollständige Hermetizität zu erreichen. Für die Umsetzung wurden zunächst mögliche Fertigungstechnologien evaluiert und optische Simulationen für die Dimensionierung durchgeführt. Für die Waferbearbeitung wurden verschiedene Strukturierungsverfahren untersucht und in Auftrag gegeben. Die erhaltenen Proben sind in Abbildung 6.1.4-18 dargestellt. Erfolgreich konnten ebenfalls die notwendigen elektrischen Leiterbahnen in Dünnschichttechnik auf Glas aufgebracht werden.

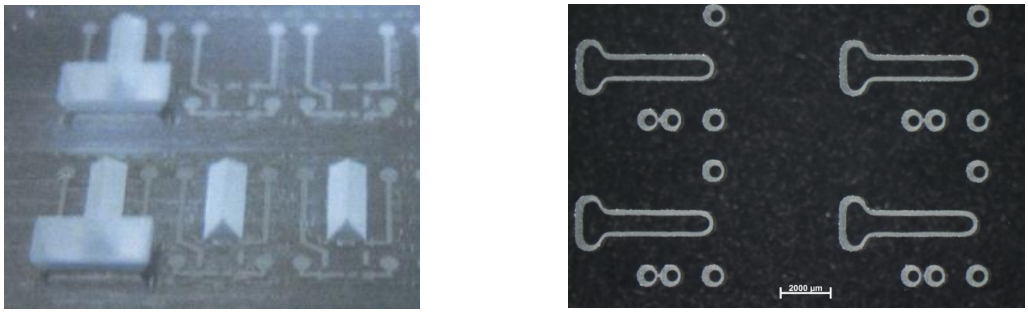


Abbildung 6.1.4-18: Glasstrukturierung durch Laser (links, inkl. Leitbild) und durch Sandstrahlen (rechts)

Aufgrund von Fertigungsschwierigkeiten seitens des Fraunhofer ISE konnte der geplante Wafer mit den Laser Power Convertern nicht innerhalb der Projektlaufzeit beschafft werden. Darauf aufbauende Package-Umsetzungsversuche und anschließende Alterungsuntersuchen konnten daher nicht durchgeführt werden.

6.1.5 Netzwerkknoten, Teletronic

In SHM Wind wurde ein Messtechnikkonzept (Abbildung 6.1.5-1) erstellt, das aus bis zu 24 Sensoren inklusive sensornaher Elektronik (Sensorknoten), einer optischen Übertragungsstrecke für Daten und Energie zwischen den Sensoren und der in der Blattwurzel angeordneten Zentralelektronik (Netzwerkknoten) besteht. Von diesem Netzwerkknoten werden die Daten per Power-LAN vom rotierenden in den stehenden Teil der Anlage und von dort per LWL-Kabel zu einem Auswerte-PC im Turmfuß übertragen. In der Nabe sind weiterhin 2 PCs zur Datensicherung und als Server für den Netzwerkknoten vorgesehen.

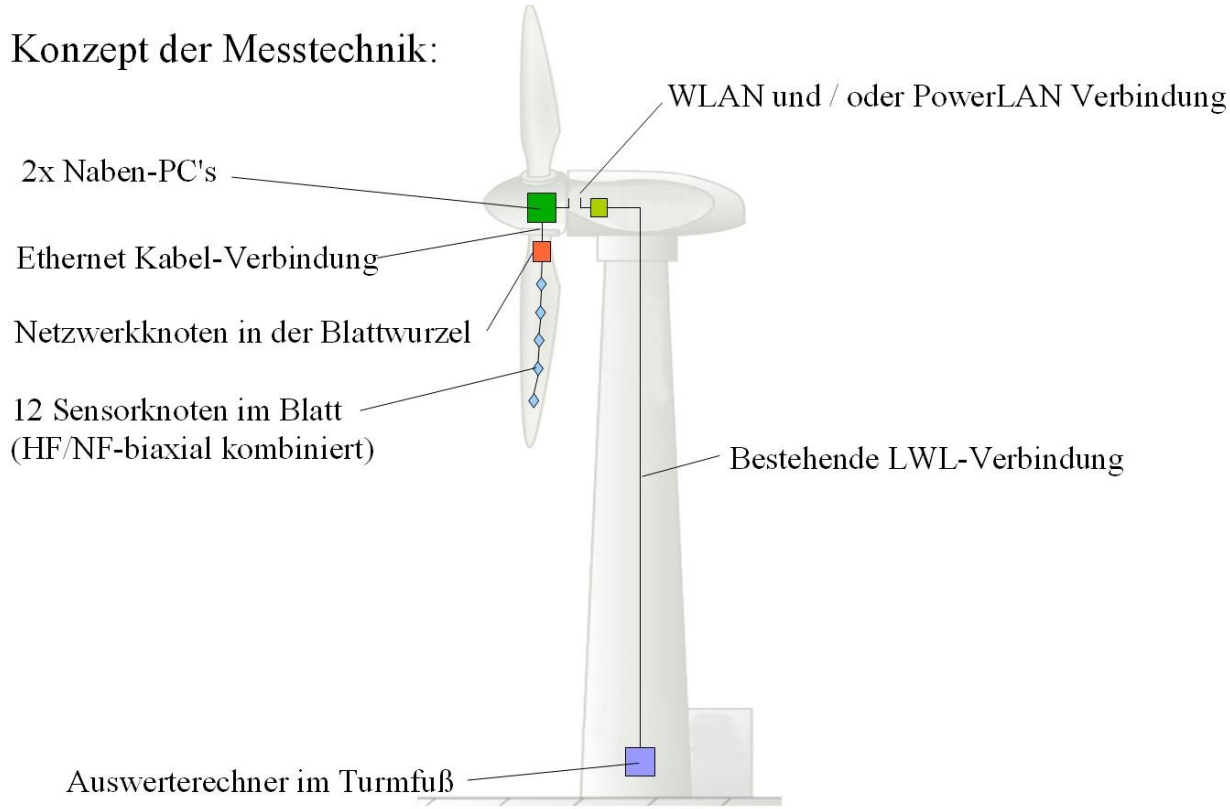


Abbildung 6.1.5-1: Konzept der Messtechnik

Zur Realisierung dieses Messkonzeptes wurde unter den Projektpartnern folgende Arbeitsteilung vereinbart:

- Der Piezosensor des Sensorknotens wird von PIC gefertigt.
- Die sensornahe Elektronik des Sensorknotens wird von PI hergestellt.
- Die optische Energieversorgung und Datenübertragung wird von der TU Dresden entwickelt. Von der TU Dresden entwickelte Schaltungsteile werden in die sensornahe Elektronik des Sensorknotens und in Form eines Lasermoduls in den Netzwerkknoten integriert.
- Die Datenverarbeitung im Netzwerkknoten wird von Teletronic als Datenerfassungsmodul realisiert.

Dem Arbeitsplan folgend hat Teletronic die Hardware- und Softwareentwicklung für Netzwerkknoten inklusive Tests übernommen.

Konzept der Datenerfassung

- Ein Konzept für das Datenerfassungsmodul des Netzwerkknotens wurde erarbeitet (Abbildung 6.1.5-2). Dieses sieht folgenden Aufbau vor:
    - Aufbau als Master-Slave-Baugruppe mit der Funktionsaufteilung:
        - Optischer Datenempfang und evtl. Datenvorverarbeitung: Slave-Karte
        - Datenverarbeitung, Steuerung und Datenübertragung zur nachfolgenden Komponente: Master-Karte
    - Realisierung als FPGA-Dualcore CPU (DSP / ARM) Lösung
    - Datenvorverarbeitung im FPGA
    - Datenverarbeitung im DSP-Core
    - Datenübertragung im ARM-Core
    - Verwendung eines eigenen Kommunikationsprotokolls
    - Implementierung einer DLL-Schnittstelle zur Datenverarbeitungsapplikation

- Folgende weitere Spezifikationen des Netzwerkknotens wurden mit den Projektpartnern IZFP-D und TU Dresden erstellt:
    - Schnittstelle zwischen Empfangs-Modul und Laser-Modul
    - Schnittstelle zwischen DSP und FPGA
    - Belegung Backplane-Steckverbinder
    - Konzept der On-Board-Programmierung der FPGA-Komponenten
    - Test-Konzept (Boundary-Scan)

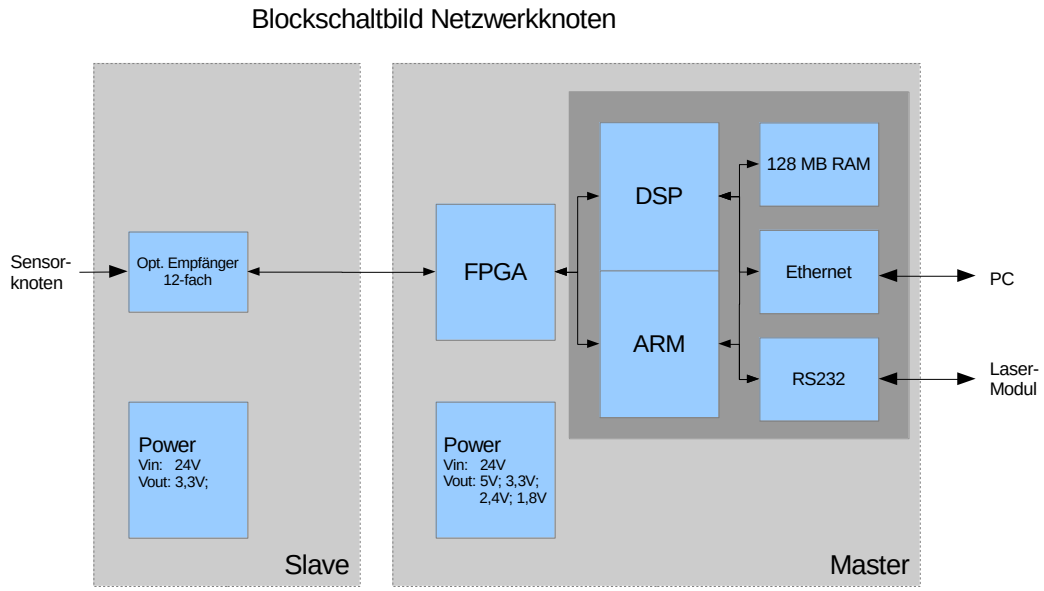


Abbildung 6.1.5-2: Blockschaltbild des Netzwerkknoten-Datenerfassungsmoduls

Im Rahmen der Realisierung eines kompletten Netzwerkknoten-Datenerfassungsmoduls wurden Schaltungsentwicklung, Layoutentwicklung und Gehäuseentwicklung durchgeführt. Dabei kamen modernste Technologien, wie 8-Lagen-Leiterplatten und IC-BGA-Gehäuse zum Einsatz.

Es wurden drei Netzwerkknoten-Masterboards der Revision 1.00 und fünf Netzwerkknoten-Masterboards der Revision 1.01 (Abbildung 6.1.5-3) gefertigt und in Betrieb genommen. In der Revision 1.01 wurde neben der Optimierung des Layouts auch eine zweite RS232 Schnittstelle für Debugging Zwecke sowie ein Kartenslot zur Aufnahme einer SD-Karte, von der das System

gebootet werden kann, integriert. Anschließend erfolgte die Weiterentwicklung des Netzwerkknoten Masterboards zur Revision 1.02 und die Vorbereitung dessen Fertigung. Dabei wird die Karte für den ständigen Einsatz auf einer Windenergieanlage optimiert, indem zum Beispiel eine spezielle Fixierung des Prozessorboards vorgesehen wird.

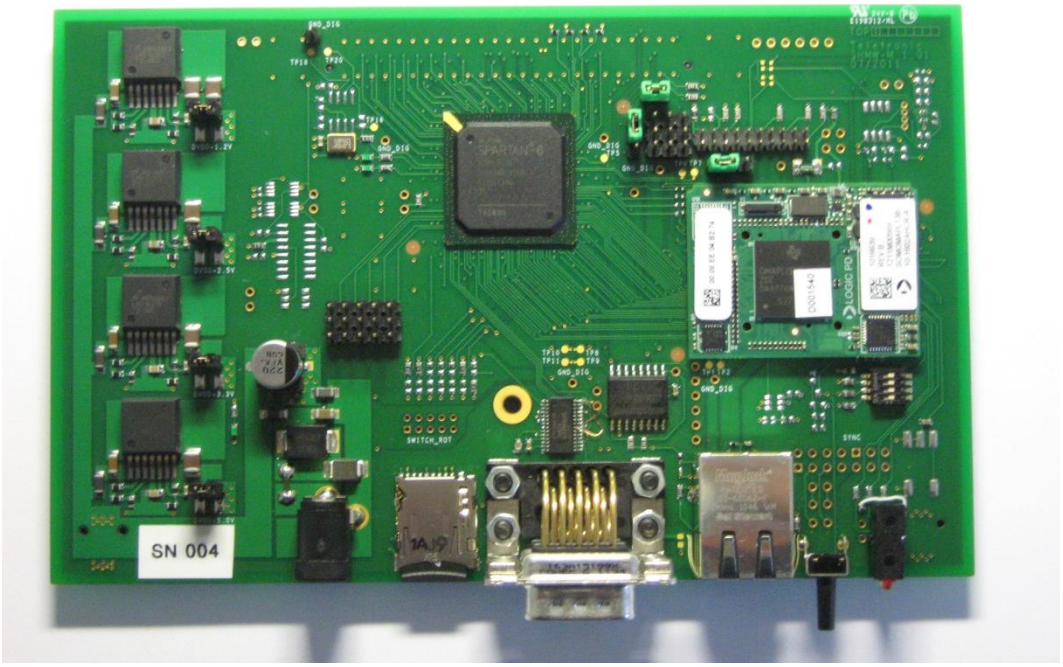


Abbildung 6.1.5-3: Netzwerkknoten Masterboard Rev. 1.01

Insgesamt wurden vier Exemplare der passiven Variante des Netzwerkknoten-Slaveboards Revision 1.00 gefertigt (Abbildung 6.1.5-4).

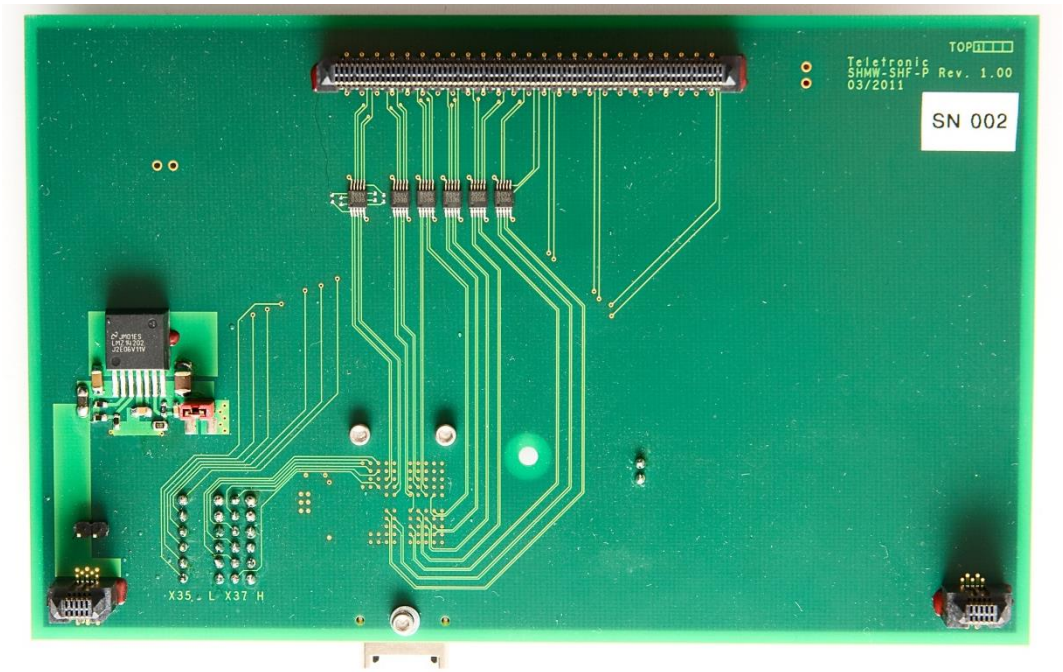


Abbildung 6.1.5-4: Netzwerkknoten Slaveboard Rev. 1.00

Die Entwicklung von DSP/ARM-Firmware, FPGA-Firmware und Software für die Netzwerkknoten (von mehreren Entwicklern verschiedener Projektpartner an verschieden Standorten) sowie der Einsatz von Netzwerkknoten für Testmessungen und Messungen erfordert es, den Netzwerkknoten-Prototypen nicht nur als Unikat, sondern in mehrfacher Ausführung zur Verfügung zu stellen.

Das gilt implizit für die notwendigen Revisionen der Netzwerkknoten-Elektronik. Die hierbei entstandenen zusätzlichen Kosten wurden vollständig durch Teletronic übernommen.

Es sind vier 12-Kanal-Netzwerkknoten (Abbildung 6.1.5-5), bestehend aus einem Masterboard der neuesten Revision und einem passiven Slaveboard verfügbar. Zwei dieser 12-Kanal-Netzwerkknoten sind beim Projektpartner IZFP-D im Einsatz.

Abbildung 6.1.5-5: Datenerfassungsmodul in entsprechendem Gehäuse und mit zugehörigem Netzteil

Die folgende Abbildung 6.1.5-6 zeigt eine Übersicht der zur Datenaufzeichnung nötigen Softwarekomponenten des Messsystems und die entsprechende Zuständigkeit. Das Konzept der Datenaufzeichnungssoftware sieht eine Vorverarbeitung und Zwischenspeicherung der HF-Daten in einem FPGA vor, während die NF-Daten als kontinuierlicher Datenstrom vorliegen. Im DSP wird eine Datenreduktion vorgenommen und deren Ergebnis als Datenburst an den ARM-Core weitergeleitet, welcher die Daten per Ethernet und IP/TCP-Protokoll an eine DLL im Datenaufzeichnungs-PC weitersendet. Die NF-Daten werden kontinuierlich von der auf dem ARM-Core laufenden LINUX-Applikation abgeholt und ebenfalls an die DLL im Datenaufzeichnungs-PC gesendet. Eine übergeordnete Datenerfassungs-Applikation auf dem PC kann nun HF-Daten und NF-Daten über eine DLL-Schnittstelle einlesen und weiterverarbeiten.

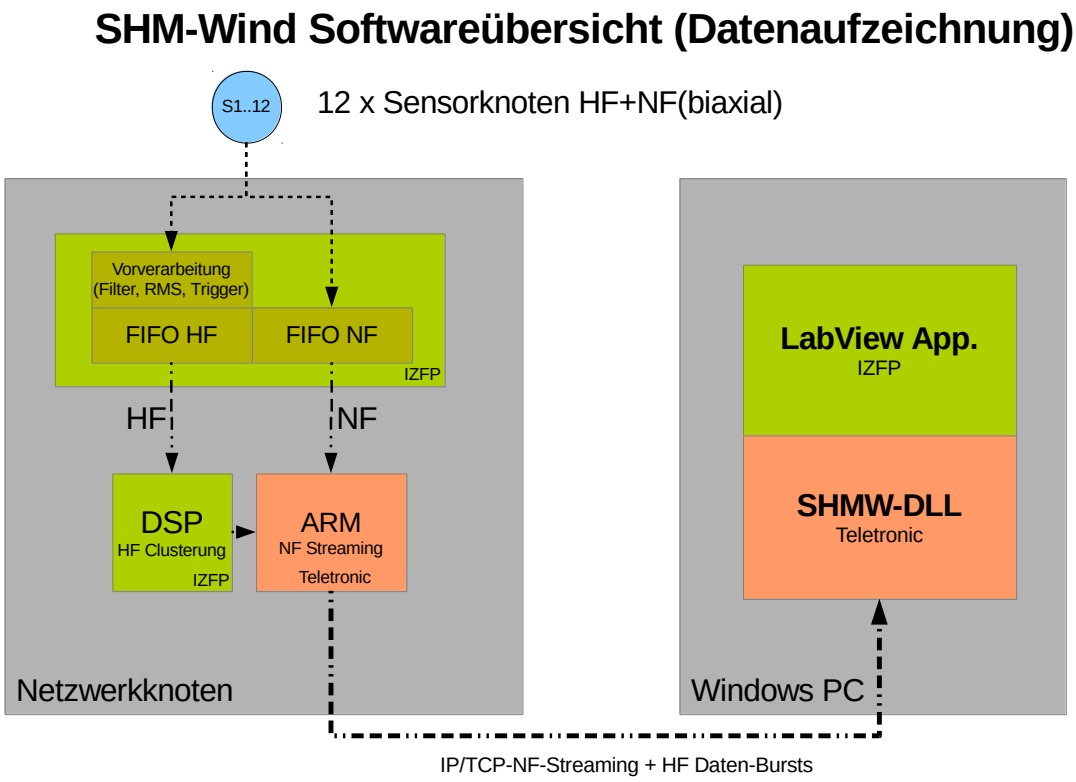


Abbildung 6.1.5-6: Konzept der Datenaufzeichnungssoftware

Folgende Softwarekomponenten wurden von Teletronic während des Projektes erstellt:

DSP-Core:

Um zügig mit der Entwicklung eines Kommunikationsprotokolls beginnen zu können, wurde zunächst eine DSP-Core basierte Firmware erstellt. Auf deren Basis konnte ein Kommunikationsprotokoll mit Low-Level Funktionsumfang (Schnittstelle Socket, Rev. 1) entwickelt und auf einem OMAP L138 Evaluation System getestet werden.

Später wurden die Routinen zur Datenverarbeitung im DSP-Core realisiert. Diese Aufgabe wurde vom Projektpartner IZFP-D in enger Zusammenarbeit mit Teletronic vorgenommen.

ARM-Core:

Um, wie im embedded Bereich üblich, Linux und dessen Kommunikationskomponenten nutzen zu können, war eine entsprechende Entwicklungsumgebung nötig. Die Inbetriebnahme dieser Entwicklungsumgebung für die ARM-Core-basierte Softwareentwicklung (Linux) stellte einen erheblichen Arbeitsaufwand dar. In diesem Zusammenhang war auch eine mehrtägige Schulung des entsprechenden Mitarbeiters nötig.

Danach konnte mit der Implementierung des Kommunikationsprotokolls Version 1.0 auf dem ARM-Core begonnen werden. Dieses Protokoll wurde schrittweise mit komplexeren Befehlen zur Version 2.0 erweitert. Es enthält die Spezifikation von Kommandos und Datenformaten auf Socket-Level sowie die Spezifikation von Funktionen und Datenformaten auf DLL-Level. Definiert wurden Kommandos bzw. Funktionen für die HF-Messkanäle und die NF-Messkanäle inklusive der Datenübertragung. Für die NF-Messkanäle wurden Socket-Kommandos und DLL-Funktionen zur Konfiguration der Parameter der NF-Kanäle, zur Datenübertragung von Messdaten sowie zum Starten und Stoppen von NF-Messungen spezifiziert und implementiert.

Das Kommunikationsprotokoll ist als Spezifikations-Dokument für die Projektpartner verfügbar.

Für die NF-Messung wurde ein Linux-Kernel-Treiber implementiert. Dieser verarbeitet die Kommandos für die NF-Messung und steuert die Hardware, um NF-Messungen zu konfigurieren, zu starten und zu stoppen und Messdaten zu übertragen.

DLL:

Zur Kommunikation der Anwendungssoftware mit dem Netzwerkknoten wurde eine DLL mit entsprechend spezifizierter Schnittstelle entwickelt. Die DLL ermöglicht die Kommunikation mit bis zu drei Netzwerkknoten und realisiert eine Messdaten-Pufferung, jeweils separat für die NF-Messkanäle und die HF-Messkanäle. Die DLL-Schnittstelle ist ebenfalls in dem oben genannten Spezifikations-Dokument für alle Projektpartner verfügbar.

Optimierung des Systems

Die Weiterentwicklung des Systems wurde über den gesamten Entwicklungszeitraum sowohl für die Hardware als auch für die Software vorangetrieben. Vor allem die entwickelten Softwarekomponenten wurden ständig bezüglich Robustheit und Fehlertoleranz optimiert. Die Optimierung der Hardware wurde mit Fertigung der Revision 1.01 realisiert. Neben der im Entwicklungsprozess üblichen Überarbeitung und Verbesserung des Layouts wurden auch Komponenten hinzugefügt, die die zukünftige Entwicklungsarbeit beschleunigen werden. So wurde eine zweite RS232 Schnittstelle für gleichzeitiges Debuggen und Steuern des Lasers vorgesehen. Weiterhin ist ein Micro-SD Kartenslot implementiert worden. Über diesen soll das System später gebootet werden.

Eine Liste mit weiteren Verbesserungen für Revision 1.02 wurde begonnen. In diese sollen alle Anforderungen aufgenommen werden, die sich während des Testbetriebes im Labor und auf einer Windenergieanlage als notwendig für ein zuverlässiges Messsystem erweisen. Als bisher wichtigster Punkt wurde die Implementierung einer speziellen Fixierung des Prozessorboards in die Liste aufgenommen.

6.1.6 Sensorknoten, PI

6.1.6.1 Aufgabenbeschreibung

Aufgabe für die Firma Physik Instrumente GmbH & Co. KG im Projekt war die Bereitstellung einer Auswerteelektronik für den favorisierten DuraAct Wandler. Diese Elektronik sollte sowohl die Acoustic Emission, AE, (HF, Frequenzbereich bis 100 kHz), die Operational Modal Analysis, OMA, (NF, bis einige 100 Hz) und über die Nutzung des Wandlers als Aktor auch die Signaturanalyse (Acousto-Ultrasonics, AU) erlauben. Wegen der bis zu 60 Meter langen Verbindungsstrecken und der Umgebungsbedingungen sollte eine digitale Datenübertragung benutzt werden, was zu der Signalaufbereitung und Diskretisierung auch eine Logik auf jedem Sensorknoten erfordert.

Während der Antragsphase wurde eine herkömmliche Verteilung der benötigten elektrischen Energie sowie die Übertragung der Sensorwerte mittels einer seriellen elektrischen Schnittstelle zum Netzwerkknoten als hinreichend vereinbart. Auf die Versorgungsleitungen sollten zudem Daten codiert werden, um einzelne Sensorknoten ansprechen zu können. Maßnahmen für den Blitzschutz sollten auf elektrischem Weg realisiert werden.

Zwei wesentliche Änderungen der Aufgabenstellung mussten während der Projektlaufzeit berücksichtigt werden, das war zum einen Anfang 2010 aufgrund der Blitzschutzrichtlinien der weitgehende Verzicht auf Kupferleitungen im Rotorblatt, zum zweiten Ende 2010 die Erkenntnis, dass der piezoelektrische Wandler für das Modalverfahren (NF-Messung) nicht geeignet ist.

6.1.6.2 Ultraschallverfahren mit drahtgebundener Stromversorgung, Version 1

Im ersten Quartal 2010 startete die Entwicklung einer Sensorknoten-Elektronik mit kupferbasierter Stromversorgung und analoger Signalübertragung (vgl. Abbildungen 6.1.6-1, 6.1.6-2). Diese sollte dazu dienen, schnellstens mit dem Vermessungs- und Qualifizierungsprogramm starten zu können. Als Einzelaufgaben sind zu nennen:

- Schaltungsentwurf
- Konzept zur Schirmung, Montage und Verbindung der Sensoren/Leiterplatte
- Freigabe der elektronischen Schaltung
- Erstellung eines Layouts und der Fertigungsunterlagen
- Fertigung der Leiterplatten
- Materialbeschaffung, Bestückung
- Inbetriebnahme und Vermessung der Baugruppen in zwei Losen
- Montage des Sensors an der Baugruppe

Von diesem Sensorknoten wurden zunächst 80 Stück an das IZFP-D geliefert. Ebenso wurden die Kupferkabel in gleicher Menge geplant, produziert und geliefert. Diese Komponenten dienten der Instrumentierung eines stationären Rotorblatts am IMA Dresden und der Versuchsanlage Uelitz.

Im dritten Quartal 2010 wurden weitere 70 Stück dieser Ausführung produziert und geliefert. Diese Komponenten dienten der Instrumentierung eines stationären Rotorblatts bei Nordex in Rostock.

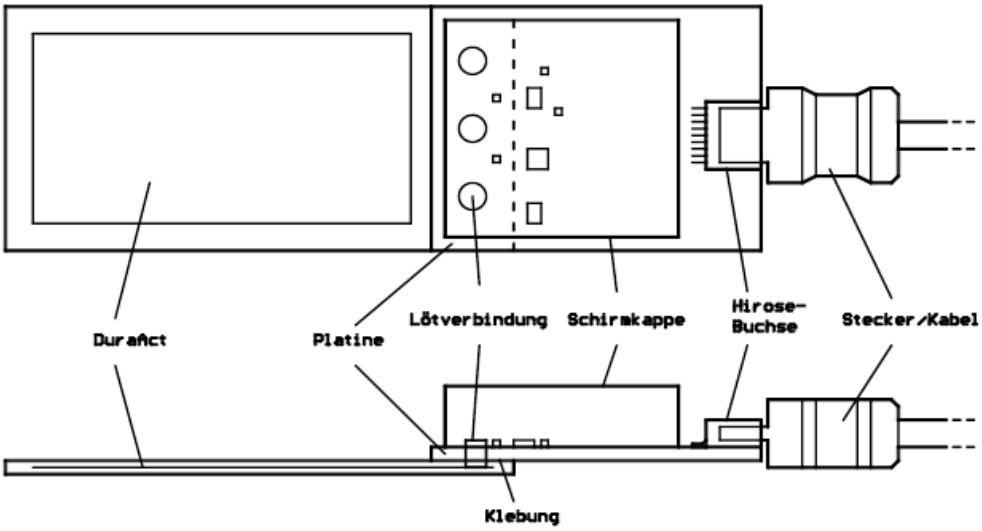


Abbildung 6.1.6-1: Skizze der analogen elektrischen Sensorknoten

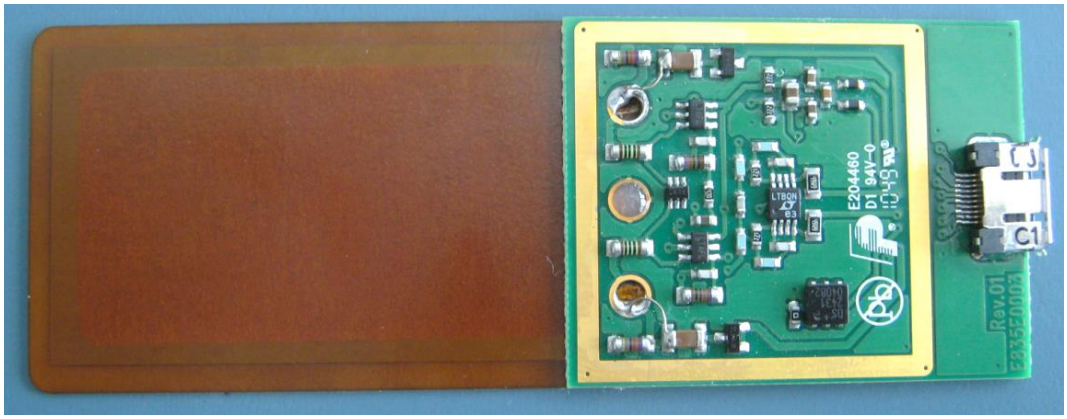


Abbildung 6.1.6-2: Realisierung des drahtgebundenen Sensorknotens

6.1.6.3 Ultraschallverfahren mit optischer Stromversorgung, Version 2

Im vierten Quartal 2010 begannen die Hauptarbeiten am ersten optischen Sensorknoten. Die technischen Anforderungen wurden wie folgt vereinbart:

a) Kontinuierliche Datenerfassung (Rate >100 kHz) bei sehr hoher Auflösung (>= 16 Bit) und niedrigstem Stromverbrauch;
b) Erzeugung der Funktion sin(x)/x mit einer Frequenz von 50 kHz zur Einkopplung definierter Wellen in die Struktur; hierzu Untersuchung mehrerer Varianten mit integrierten und diskreten DA-Wandlern sowie PWM-Umsetzern. Untersuchung verschiedener Varianten mit Analogverstärkern, geschalteten Brücken und Übertragern. Diskussion und Festlegung einer Lösung, die eine genügend hohe Einkoppelamplitude in die Struktur versprach;
c) Die zentrale Steuereinheit sollte Ereignisse auf den Sensorknoten auslösen können, wie das Auslösen definierter Anregungen, Einstellen von Parametern oder Lesen von Überwachungs- und Zustandsinformationen der Sensorknoten selbst. Notwendig hierzu war die Festlegung eines Datenprotokolls, Tests mit der Modulation der Laserquellen, die Möglichkeit der Datenrückgewinnung aus dem Licht zur optischen Stromversorgung;
d) Senden der erfassten Sensordaten über eine Glasfaser zum zentralen Netzwerkknoten. Hierzu war die Schnittstelle zwischen den beiden Einheiten festzulegen;
e) Senden von Zustandsdaten an den Netzwerkknoten;

f) Stromversorgung für jede der vorgenannten Funktionen mittels Glasfaser. Die Herausforderung bestand darin, aus der zunächst sehr niedrigen Quellspannung die für die einzelnen Bauteile notwendigen Betriebsspannungen effektiv zu gewinnen. Hierbei Augenmerk auf möglichst wenige verschiedene und niedrige Versorgungsspannungen. Zudem der Versuch, einzelne Komponenten oder Funktionsblöcke nur bedarfsabhängig zu versorgen und damit die mittlere Leistung zu reduzieren. Verbunden damit die Aufgabe, für leistungsintensive Funktionen Energie anzusammeln, die dann für eine kurze Zeit nutzbar ist, ohne wiederum die mittlere Leistung deutlich zu erhöhen. In dieser Phase wurden von der TU Dresden handelsübliche Photodioden vorgesehen;
g) Die zuvor beschriebenen Einzelanforderungen beeinflussen sich gegenseitig. Ziel war ein hinsichtlich der Funktion, aber auch Bauform, Montage, Zuverlässigkeit, Fertigbarkeit und Kosten optimiertes Produkt. Im Hinblick auf den Projektfortschritt waren hierbei Kompromisse notwendig, die in vielen Arbeitssitzungen herbeigeführt werden konnten. Schließlich lag eine Gesamtschaltung vor, die produziert werden konnte und vor allem der Überprüfung aller Kriterien diente. Diese Funktionsmuster sollten auch erstmals die technische Machbarkeit des Gesamtkonzeptes aufzeigen.

Zwei Muster wurden nach Inbetriebnahme und ausführlichen Tests sowie Optimierung an Projektpartner für deren weitere Arbeiten übergeben. Dabei zeigte sich, dass die Photodioden aufgrund ihrer Kennlinien nicht genügend Strom im Arbeitspunkt der Elektronik lieferten.

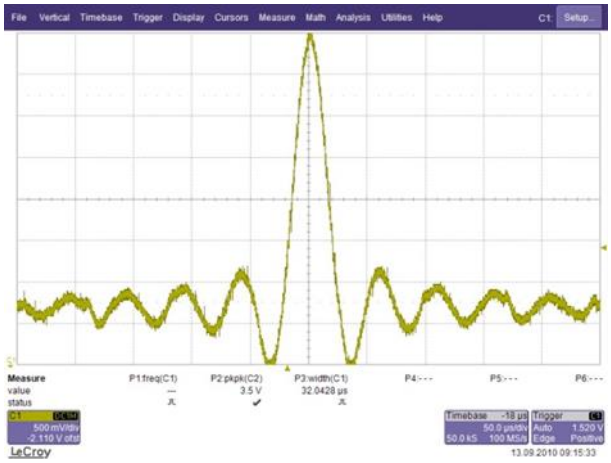


Abbildung 6.1.6-3: Beispiel für die Anregungsfunktion

6.1.6.4 Ultraschall- plus Modalverfahren mit optischer Stromversorgung, Version 3

Ursprünglich sollten die DuraAct Wandler auch für das Modalverfahren benutzt werden. Bei der Qualifizierung stellte sich heraus, dass diese Wandler über den Zeitraum von 20 Jahren keine ausreichende Stabilität der Messungen garantieren würden. Somit wurden andere Sensortypen für diese Aufgabe gesucht.

Untersucht wurden sowohl hochauflösende Piezo-Beschleunigungssensoren in Kombination mit Ladungsverstärkern sowie MEMS, die in vielen Massengütern wie Smartphones und Spielen benutzt werden, mit wahlweise analogen oder digitalen Schnittstellen. Nach der grundsätzlichen Einigung auf verwendete Sensoren und die zu erreichenden Parameter wie Auflösung und Abtastfrequenz wurden verschiedene Schaltungskonzepte diskutiert. Der jeweils gesamte Bauteilaufwand und auch Programmieraufwand fand ebenso Berücksichtigung. Schließlich wurde jeweils eine analoge und digitale Lösung weiterverfolgt und den Projektpartnern zur Freigabe vorgelegt.

Ebenso verbesserungsbedürftig waren die Wandler für die optische Stromversorgung. Aufgrund vieler Gespräche und Voruntersuchungen kamen nun spezielle hocheffiziente Solarzellen vom Fraunhofer ISE zum Einsatz. Auch deren Charakteristik musste wieder mit einer eigenen Schaltung eingearbeitet werden.

Von dieser Variante des Sensorknotens wurden im zweiten Quartal 2011 zehn Stück gefertigt und 8 davon an die Projektpartner verteilt (vgl. dazu Abbildung 6.1.6-4):

- ein Stück an Teletronic zur Nutzung als Datensender und –empfänger,
- zwei Stück an das IZFP-D,
- ein Stück an WBI für Arbeiten mit dem NF-Teil und
- vier Stück an das ISC zur Durchführung der Zuverlässigkeitsuntersuchungen.

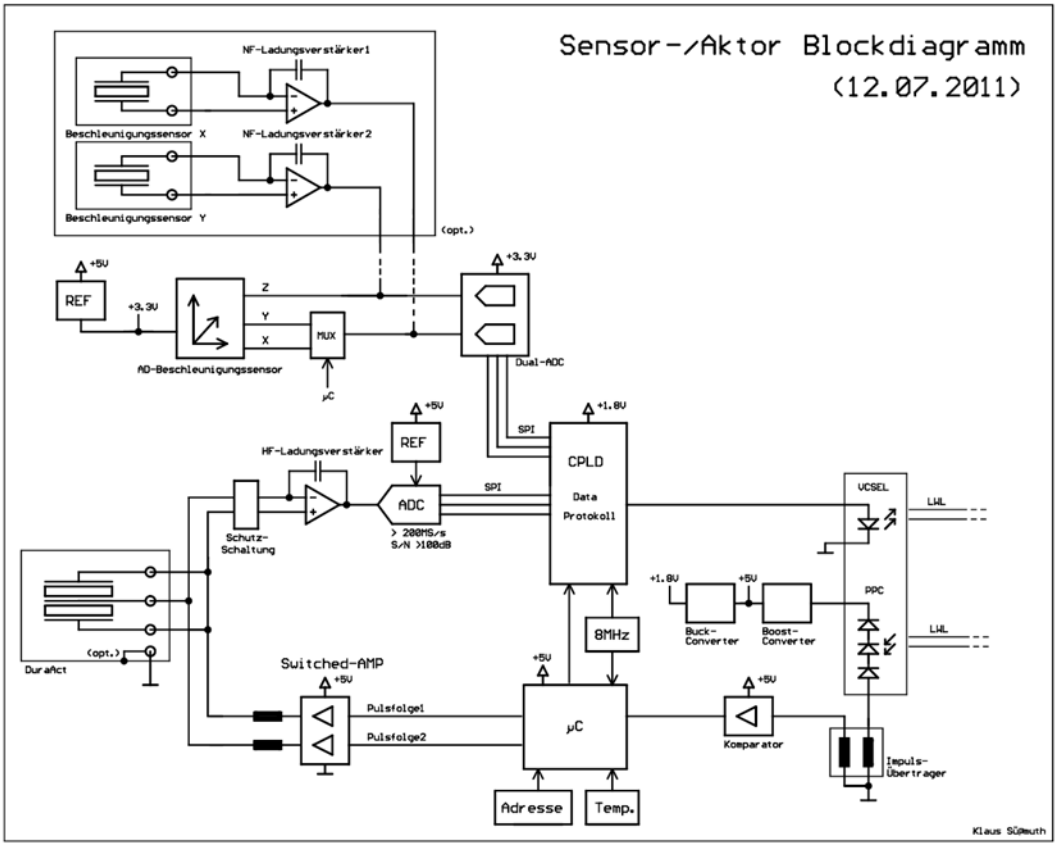


Abbildung 6.1.6-4: Blockdiagramm des vollständigen Sensorknotens

6.1.6.5 Ultraschall- plus Modalverfahren mit optischer Stromversorgung, Version 4

Im vierten Quartal 2011 lagen die Erkenntnisse der Projektpartner mit der dritten Sensorlösung vor, zugleich sollte noch in der Projektlaufzeit eine Instrumentierung mit möglichst 12 Sensoren in realer Umgebung erfolgen. Daher wurde nochmals eine Überarbeitung und anschließende Produktion vereinbart.

Die technischen Änderungen waren:

- Bessere mechanische Halterung der Lichtwellenleiter
- Optimierung in der Stromversorgung
- Überarbeitung der NF-Sensorik
- Schaltungsänderung beim Ladungsverstärker
- Allgemeine Optimierung

Letztlich wurden im ersten Quartal 2012 weitere zwölf Stück an das IZFP-D geliefert.

Für die NF-Beschleunigungssensoren gab es eine weitere Speziallösung. Da nicht alle Sensorknoten mit der NF-Messung ausgestattet werden sollten und die notwendigen Bauteile Platz benötigen und Kosten verursachen, wurde eine kleine Zusatzplatine vereinbart. Von diesen Zusatzplatinen E835B2005 gingen ebenfalls im vierten Quartal 2011 vier Stück an den Projektpartner Wölfel zur weiteren Qualifizierung (vgl. Abbildung 6.1.6-5).

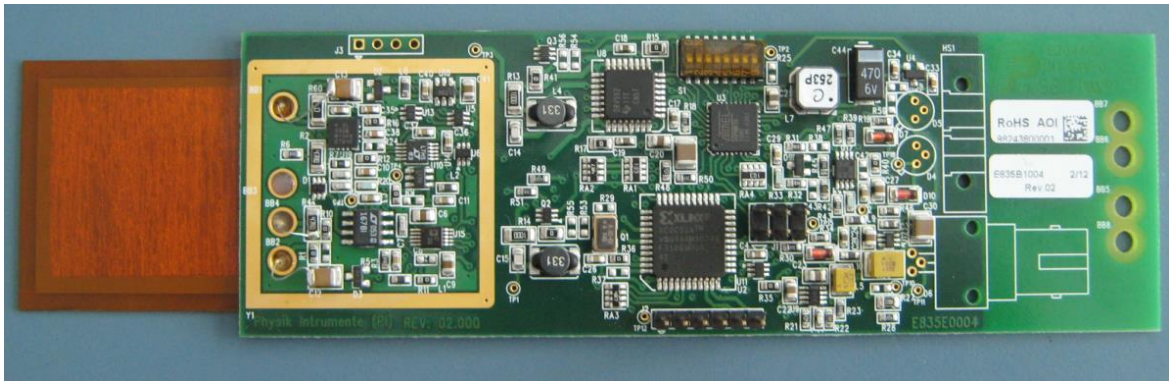


Abbildung 6.1.6-5: Realisierung des vollständigen Sensorknotens

6.1.6.6 Bewertung und Ausblick

Vor allem die beschriebenen Änderungen hatten großen Einfluss auf das Ergebnis, einmal durch viel höheren Entwicklungsaufwand im Bereich der Stromversorgung, hier insbesondere zur Senkung der benötigten Leistung und der Toleranz gegenüber der niedrigeren Spannung. Im Fall der NF-Sensorik hat sich der Schaltungsaufwand enorm erhöht, da nun mehrere verschiedene Sensoren vorgesehen sind. Beide Maßnahmen führen zu höheren Kosten.

Der Entwicklungsstand zum Projektende aus der Sicht von PI:

- Eine mögliche technische Lösung der Aufgabe liegt vor.
- Für die optischen Komponenten hat PI keine zuverlässige Lieferkette.
- Als Konsequenz aus den beschriebenen Iterationsstufen und der erst vier Monate vor Projektende verabschiedeten Lösung konnten keine weiterführenden Maßnahmen zur Erhöhung der Produktqualität mehr unternommen werden. Insbesondere die Tauglichkeit bei den harten Einsatzbedingungen auf einer WEA und die Zuverlässigkeit insgesamt konnten noch nicht ausreichend untersucht werden.
- Bedingt durch die technischen Spezifikationen liegen die Bauteilpreise sehr hoch; ein vollständiger Sensorknoten müsste derzeit 700.- € Verkaufspreis haben bei Abnahme von 100 Stück. Diese Kalkulation ergibt sich aus Anzahl, Kosten und Verfügbarkeit der Bauteile, der benötigten Arbeitszeit sowie den branchenüblichen Gemeinkostenaufschlägen auf die Produktionskosten.
- In dieser Stückzahl wäre auch die Produktion möglich, sofern die Beistellung der optischen Komponenten gelöst wird. Höhere Stückzahlen jedoch erfordern eine Weiterentwicklung mit dem Ziel der Vereinfachung. Diese Arbeit kann von PI übernommen werden, wenn die Wirtschaftlichkeit positiv bewertet wird. Aktuell besteht weder konkreter Bedarf noch eine Aussicht darauf, daher ruhen alle Aktivitäten.
- Als Komponenten-Zulieferer benötigt PI eindeutige Spezifikationen für das benötigte Produkt.

6.2 Versuche

In diesem zweiten großen thematischen Block werden einerseits die übergeordneten Versuche und Prüfungen der entwickelten Messsysteme und andererseits jene Messkampagnen dargestellt, die wichtige Grundlagen für die Methodenentwicklung lieferten. Zu Letzteren gehören z. B. alle Mess- bzw. Monitoringdaten von Rotorblattversuchen und vor allem von Messungen auf drehenden WEA.

6.2.1 Balkentests, IWES

In dem Bericht werden alle in SHM Wind erzielten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse dargestellt. Ausführlich wird zu folgenden Arbeitsschritten berichtet:

- Hardwareanpassung an die Rotorblatttechnologie
- Verifizierung des SHM-Systems an rotorblattspezifischen Referenzbauteilen

6.2.1.1 Hardwareanpassung an die Rotorblatttechnologie

Im Betrieb unterliegen Rotorblätter von Windenergieanlagen komplexen Spannungsverhältnissen. Für besonders lasttragende Bereiche ist eine gute Überwachung außerordentlich wichtig. Am Fraunhofer IWES sind dazu Balken (I-beam design) entwickelt worden, an denen diese Spannungsverhältnisse abgebildet werden. Anhand dieser Balken soll die Schadensentwicklung im Material sowohl unter statischer als auch dynamischer Last nachgebildet werden. Abbildung 6.2.1-1 zeigt einen typischen Versuchsaufbau. Der Balken wird auf einer Seite durch vier Lager und zwei Bolzen befestigt und auf der anderen Seite wird der Balken ebenso durch eine Bolzenverbindung mit der Lastschere und dem Zylinder verbunden.

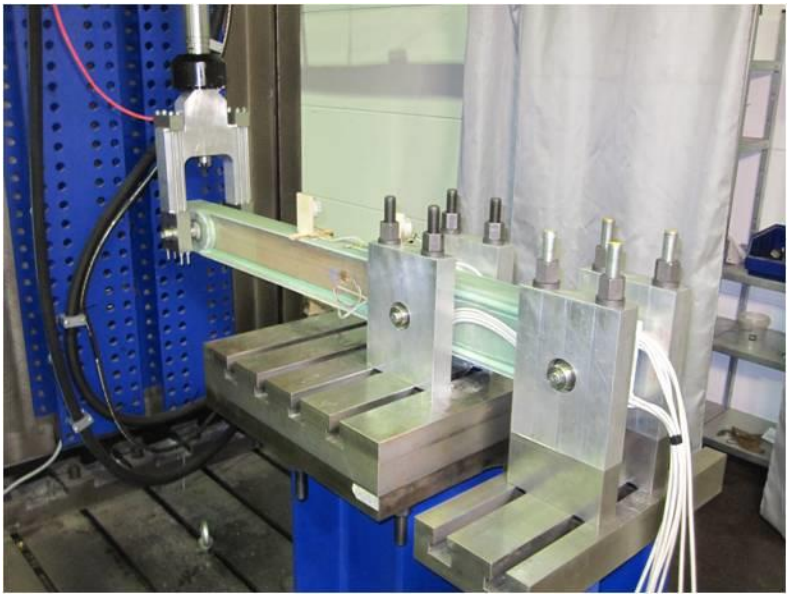


Abbildung 6.2.1.-1: Typischer Versuchsaufbau

Eine Balkenvariante ist im Rahmen des Forschungsprojektes Hook Up² Wind entwickelt worden, um die statische und dynamische Festigkeit der Klebverbindung zwischen den Gurten und dem Steg zu untersuchen (Vorpahl, Sayer, Antoniou, van Wingerde, 2011)**.**

Abbildung 6.2.1-2 zeigt die axiale Dehnungsverteilung entlang des Gurtes sowie die Schubspannung entlang der Klebenaht des Balkens (Balken zur Ermittlung der Klebnahtfestigkeit – Variante 1). Die maximale Spannung tritt im Bereich von 650 mm bis 840 mm auf (theoretische Berechnung).

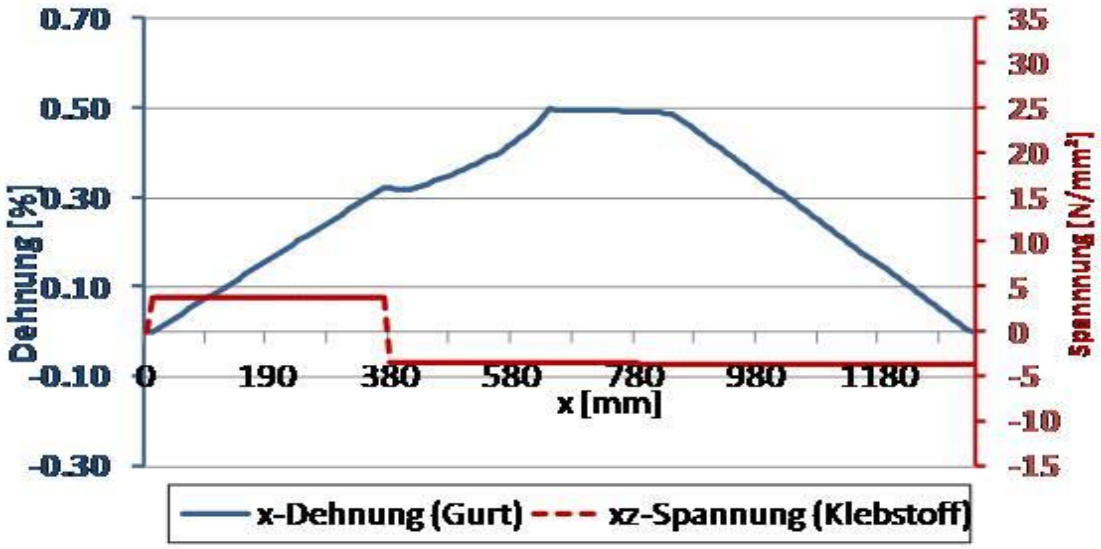


Abbildung 6.2.1-2: Spannungs- und Dehnungsverteilung bei 14,5 kN

Die Spannungsverteilung definiert die Bereiche, die von Interesse sind. Dabei wird erwartet, dass der Balken im Bereich der höchsten axialen Spannung versagt. In diesem Bereich sollten auch die Sensoren positioniert werden. Für die Sensorapplikation ist ein am Fraunhofer IWES gefertigter Balken zum Fraunhofer IZFP-D nach Dresden geschickt worden. Nach der Applikation wird der Balken im Prüfstand des Fraunhofer IWES geprüft.
Für beide Balkentypen kann im Vorfeld mit hoher Genauigkeit der Bereich bestimmt werden, in dem die Struktur versagt.

6.2.1.2 Verifizierung von SHM-Systemen an rotorblattspezifischen Referenzbauteilen

Die Prüfbalken sind entwickelt worden, um Schäden, die während des Betriebs oder bei Zertifizierungstests häufig auftreten, zu simulieren. Häufig auftretende Schadensfälle sind beispielsweise Klebnahtrisse, die erst in Erscheinung treten, sich dann ausbreiten und schließlich häufen. Eine andere häufig auftretende Schadensart ist die Ablösung des Klebers von der Laminatschicht. Es ist möglich, durch die beiden Balkenvarianten verschiedene Versagensarten zu erzeugen. In Abbildung 6.2.1-3 werden zum Beispiel vertikale Klebnahtrisse beziehungsweise das Ablösen des Klebers vom Steg dargestellt. Die Schäden treten jeweils in den vorhergesagten Bereichen auf (verglichen mit Abbildung 6.2.1-2).

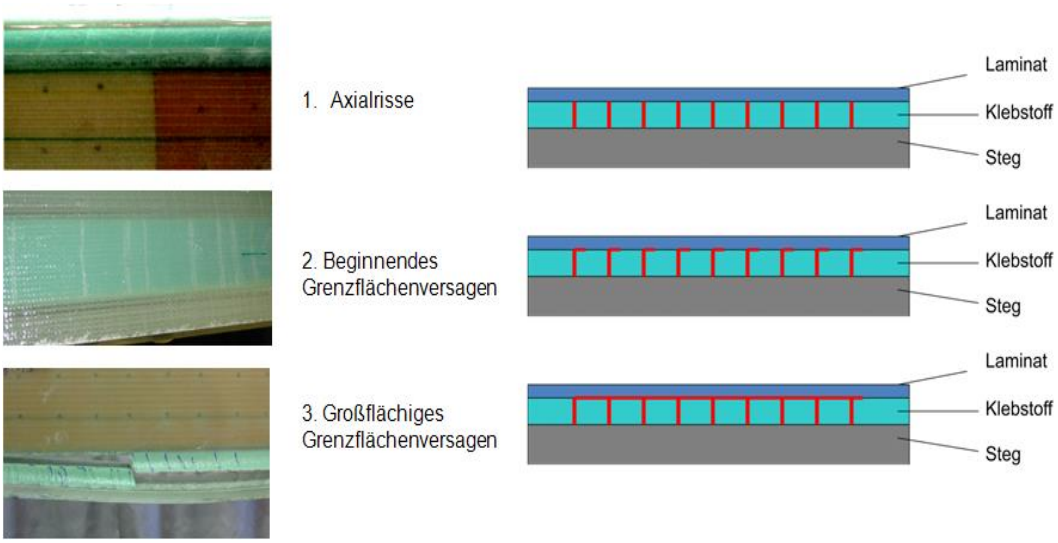


Abbildung 6.2.1-3: Unterschiedliche Versagensformen

Im nächsten Schritt kann das strukturelle Verhalten der Balken während statischer und dynamischer Versuche mittels der implementierten Sensortechnik überwacht werden.

6.2.1.3 Balkentests

Balkentest Nummer 1 - Versuchsaufbau

Der Balken wurde vom FhG IWES gefertigt und zum FhG IZFP-D und FhG ISC geschickt. Dort wurden die Emissionssensoren, Vorverstärker und Dehnungsmessstreifen, wie in Abbildung 6.2.1-4 zu sehen, auf den Holmgurten und am Schubsteg an beiden Seiten angebracht.

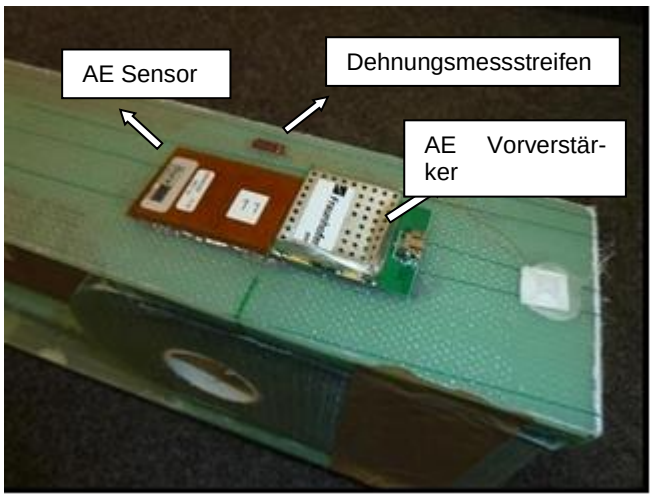


Abbildung 6.2.1-4: Anordnung Sensor und Vorverstärker

Die Sensoren wurden an den Holmgurten angebracht, ohne vorher das Abreißgewebe zu entfernen. In den folgenden Abbildungen sind die Sensorpositionen mit den jeweiligen Nummern dargestellt.

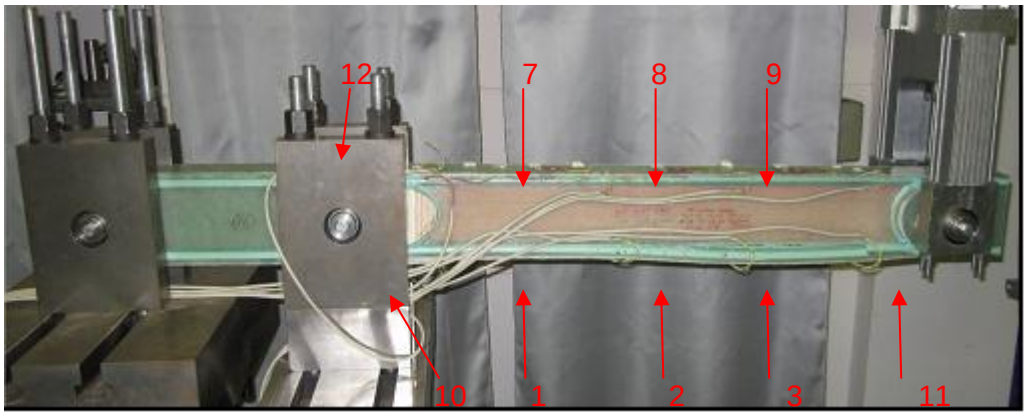


Abbildung 6.2.1-5: Sensorpositionen auf den Holmgurten

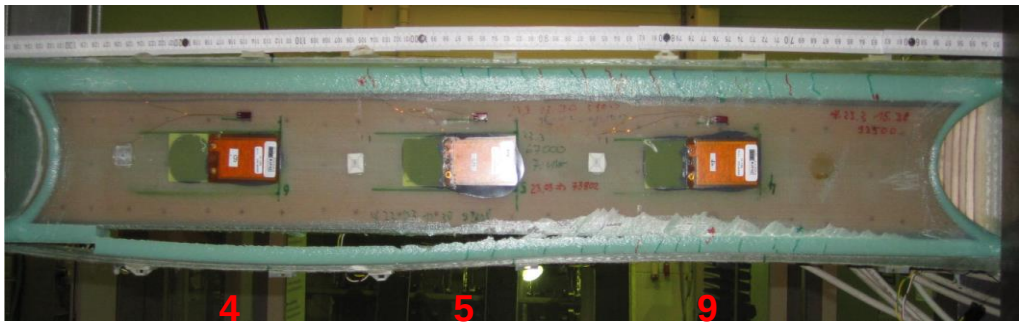


Abbildung 6.2.1-6: Sensorpositionen am Schubsteg

Der Balken wurde zum FhG IWES zurückgeschickt und dort im asymmetrischen Drei-Punkt-Biegeversuch, wie in Abbildung 6.2.1-7 zu sehen, getestet.

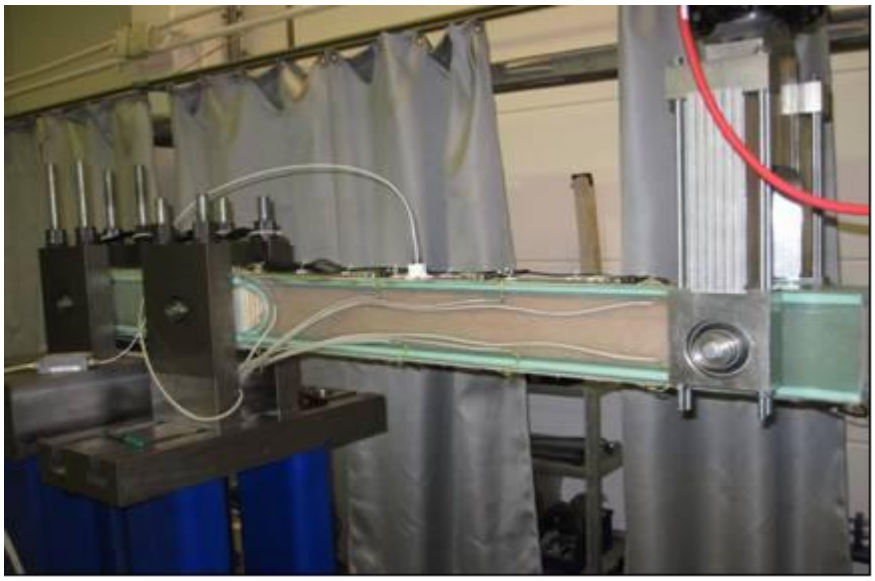


Abbildung 6.2.1-7: Asymmetrischer Drei-Punkt-Biegeversuch

Der Balken wurde sinusförmig mit einer Frequenz von 1 Hz (oszillierend um die Nulllagen) und einer Kraft von 10,8 kN belastet. Dabei betrug die Dehnung zwischen 680 mm – 880 mm, gemessen an der Oberfläche der Holmgurte, 0,36 %. Die berechnete Dehnung entlang des Prüfbalkens wird in Abbildung 6.2.1-8 dargestellt.

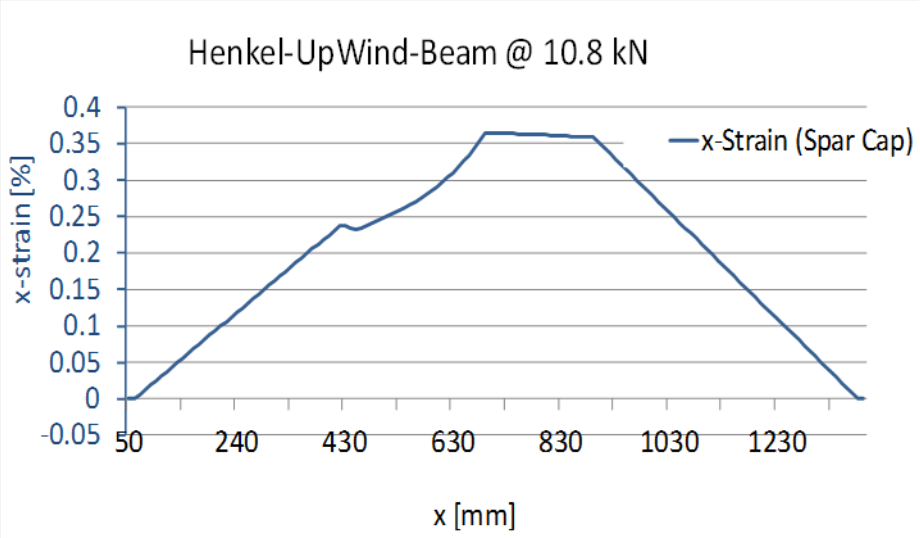


Abbildung 6.2.1-8: Dehnung in Abhängigkeit der Balkenlänge

Die Dehnungen sind im vorher genannten Bereich (680 mm – 880 mm) konstant und nehmen in Richtung der Lager und Krafteinleitung ab.

Balkentest Nummer 1 - Versuchsergebnisse

Die Querrissbildung in der Klebschicht beginnt nach ca. 10 % der Gesamtlaufzeit des Fatigue-Tests (Abbildung 6.2.1-9).

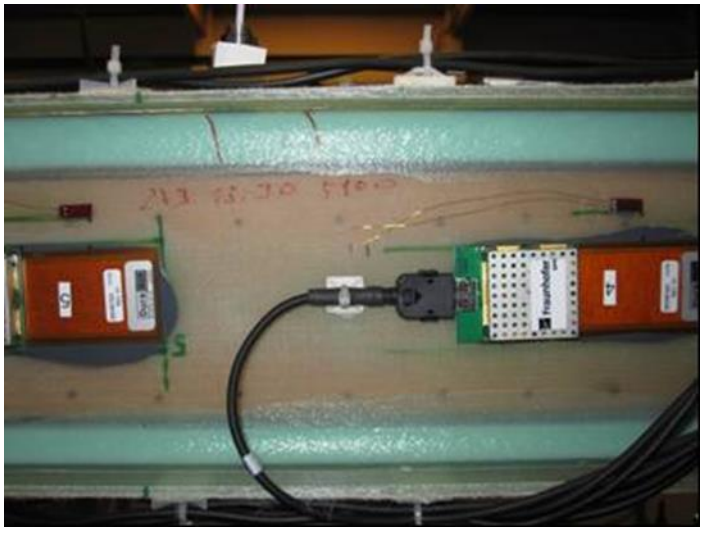


Abbildung 6.2.1-9: Quer-Anrisse

Während des Ermüdungsversuchs kann man deutlich einige Risse erkennen, die sich im Schubsteglaminat und in der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Schubsteg ausbreiten (siehe Abbildung 6.2.1-10).

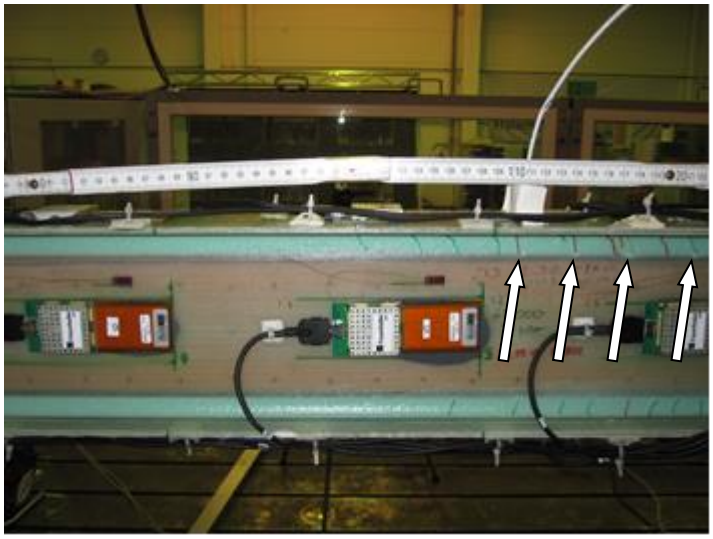


Abbildung 6.2.1-10: Rissausbreitung

Der Klebstoff versagte nach insgesamt 148000 Zyklen. Das in Abbildung 6.2.1-11 gezeigte Versagen begann im markierten Bereich der maximalen Last und breitete sich von dort nach rechts aus. Die Ablösung der unteren Klebschicht vom Steg ist rechts des höchstbelasteten Bereichs durch die ausgebeulte Form des unteren Gurtes deutlich zu erkennen.

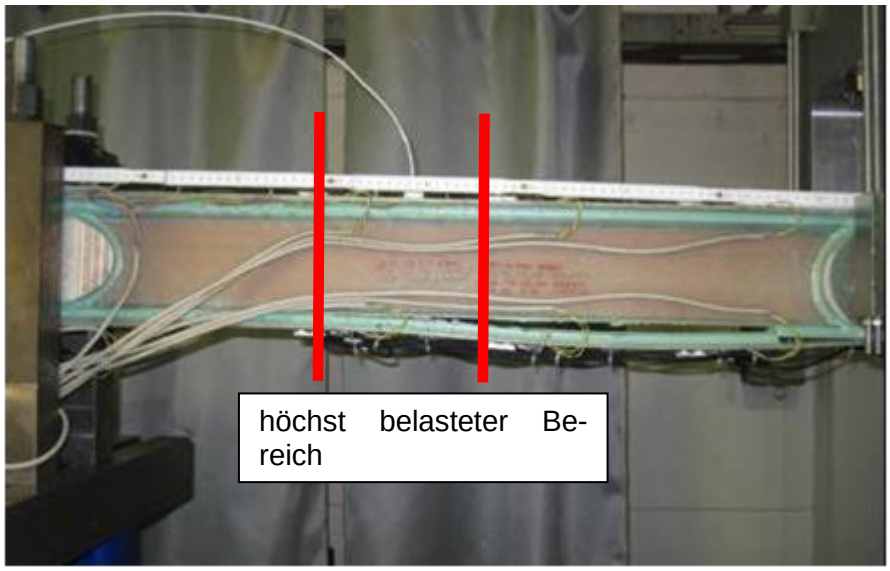


Abbildung 6.2.1-11: Balken nach dem Versagen

Während und nach dem Test wurde der Balken visuell untersucht, um den Versuch zu dokumentieren. Da alle Sensoren auf dem Abreißgewebe angebracht waren, wurden weitere Sensoren aufgeklebt, um die experimentelle äußere Kraft einzustellen. Es konnten jedoch nur einige hundert Zyklen dokumentiert werden. Danach versagten die Sensoren.

Balkentest Nummer 2 - Versuchsaufbau

In der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit ist ein zweiter, mit Emissionssensoren und Vorverstärkern bestückter Balken getestet worden (siehe Abbildung 6.2.1-12). Die Sensoren sind vorab vom FhG IZFP-D zur Verfügung gestellt und vor Ort appliziert worden.

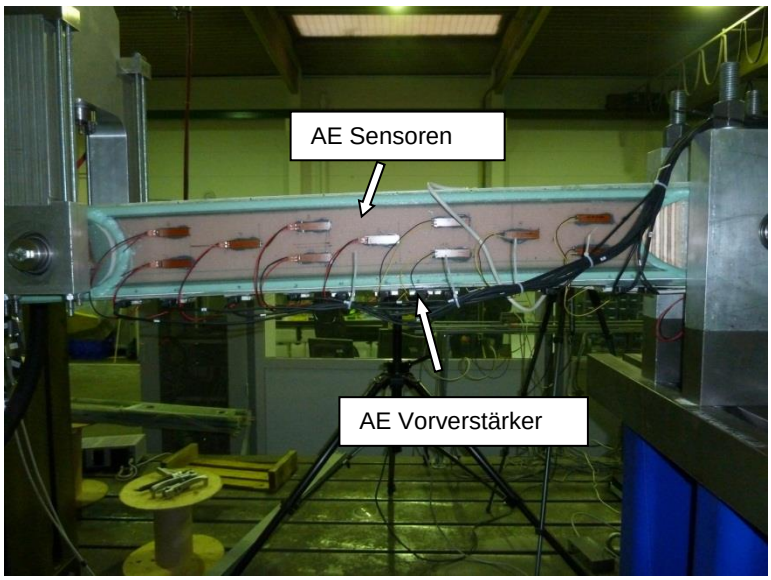


Abbildung 6.2.1-12: Testbalken mit Sensoren und Vorverstärkern

Der Balken wurde sinusförmig mit einer Last von +/-10,2 kN belastet. Dabei betrug die Dehnung zwischen 680 mm – 880 mm, gemessen an der Oberfläche der Holmgurte, 0,34 %. Ab Zyklus 307450 wurde die Last auf 10,75 kN erhöht.

Um die Beanspruchung des Balkens unter der eingeleiteten Last genauer zu analysieren, ist der Versuch zusätzlich noch mittels einer Thermografiekamera überwacht worden, siehe Abbildung 6.2.1-13.

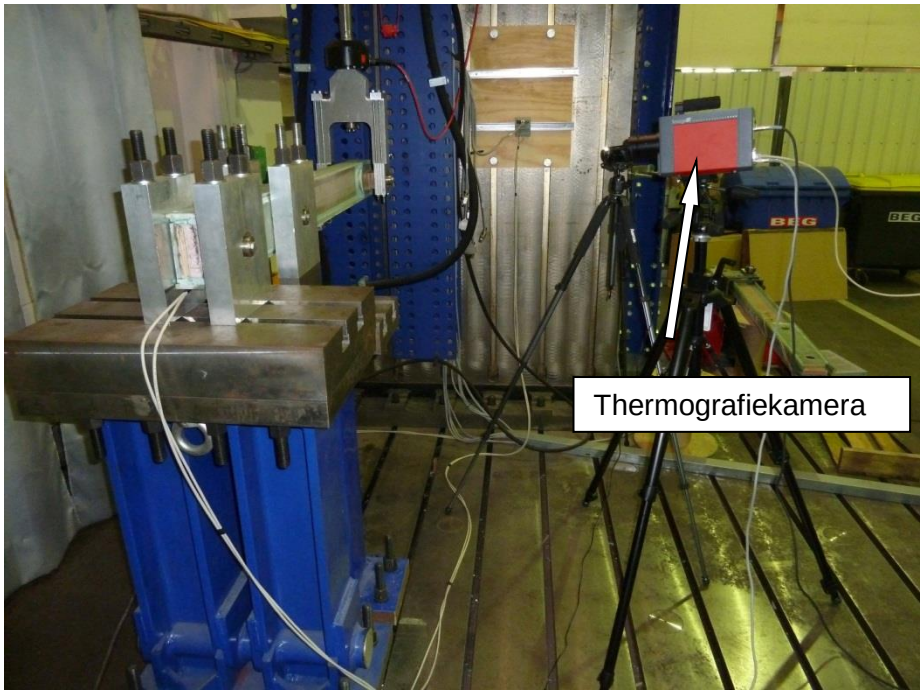


Abbildung 6.2.1-13: Testbalken mit Thermografiesystem

Balkentest Nummer 2 - Versuchsergebnisse

Wie schon beim ersten im Projekt geprüften Balken, sind die ersten Klebnahtrisse nach etwa 10 % Gesamtlaufzeit des Fatigue-Tests aufgetreten. Im Laufe der Prüfung ist die Anzahl der Risse gestiegen und es konnte beobachtet werden, dass die Risse zunächst vertikal in der Klebnaht auftreten und dann langsam horizontal zwischen Klebnaht und Steg sowie Klebnaht und Gurt wachsen. Dies ist in Abbildung 6.2.1-14 exemplarisch dargestellt.

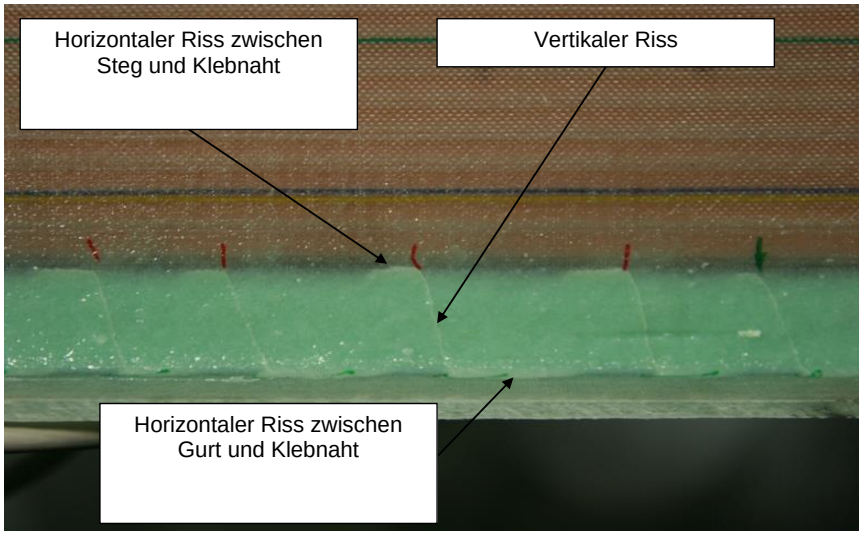


Abbildung 6.2.1-14: Vertikale und horizontale Risse in der Klebnaht

In Abbildung 6.2.1-15 ist das Thermogramm des Balkenversuchs bei 20000 Zyklen zu sehen. Der kritische Bereich setzt sich deutlich ab. Auf der Temperaturskala ist nicht die tatsächliche Temperatur aufgeführt, sondern die Temperaturdifferenz zwischen dem Versuchsbeginn und dem zwanzigtausendsten Zyklus.

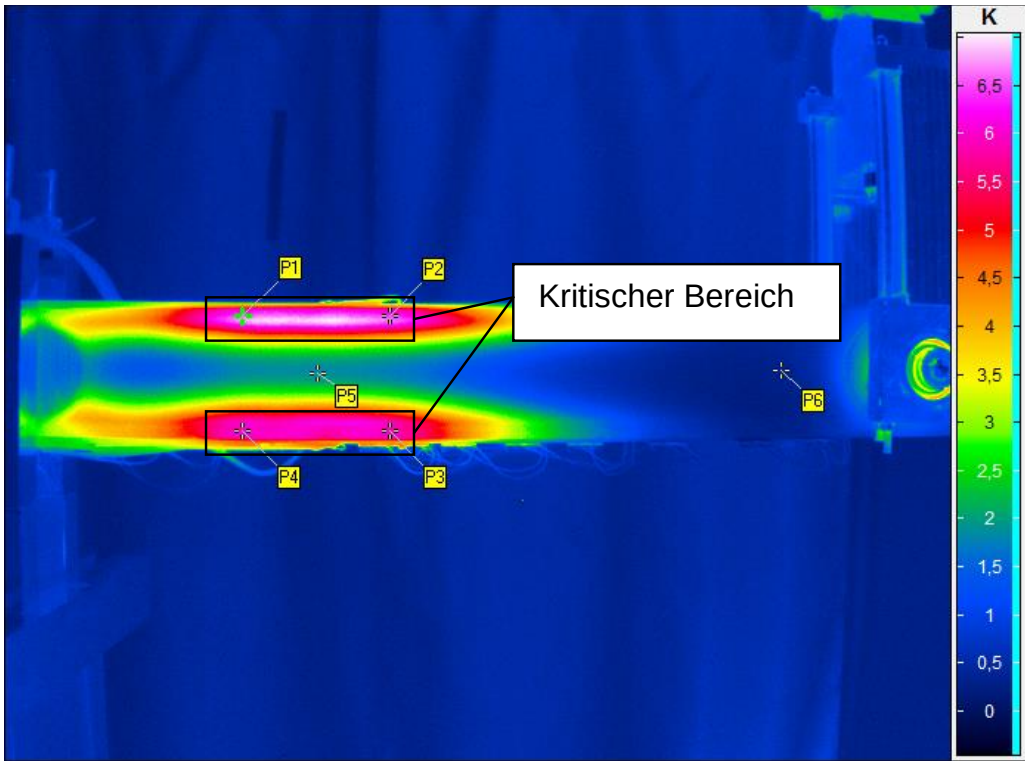


Abbildung 6.2.1-15: Thermogramm des Balkens nach etwa 20000 Zyklen

Zu diesem Zeitpunkt sind noch keine Risse in der Klebnaht zu erkennen. Je weiter der Test fortschreitet, desto mehr Risse entstehen.

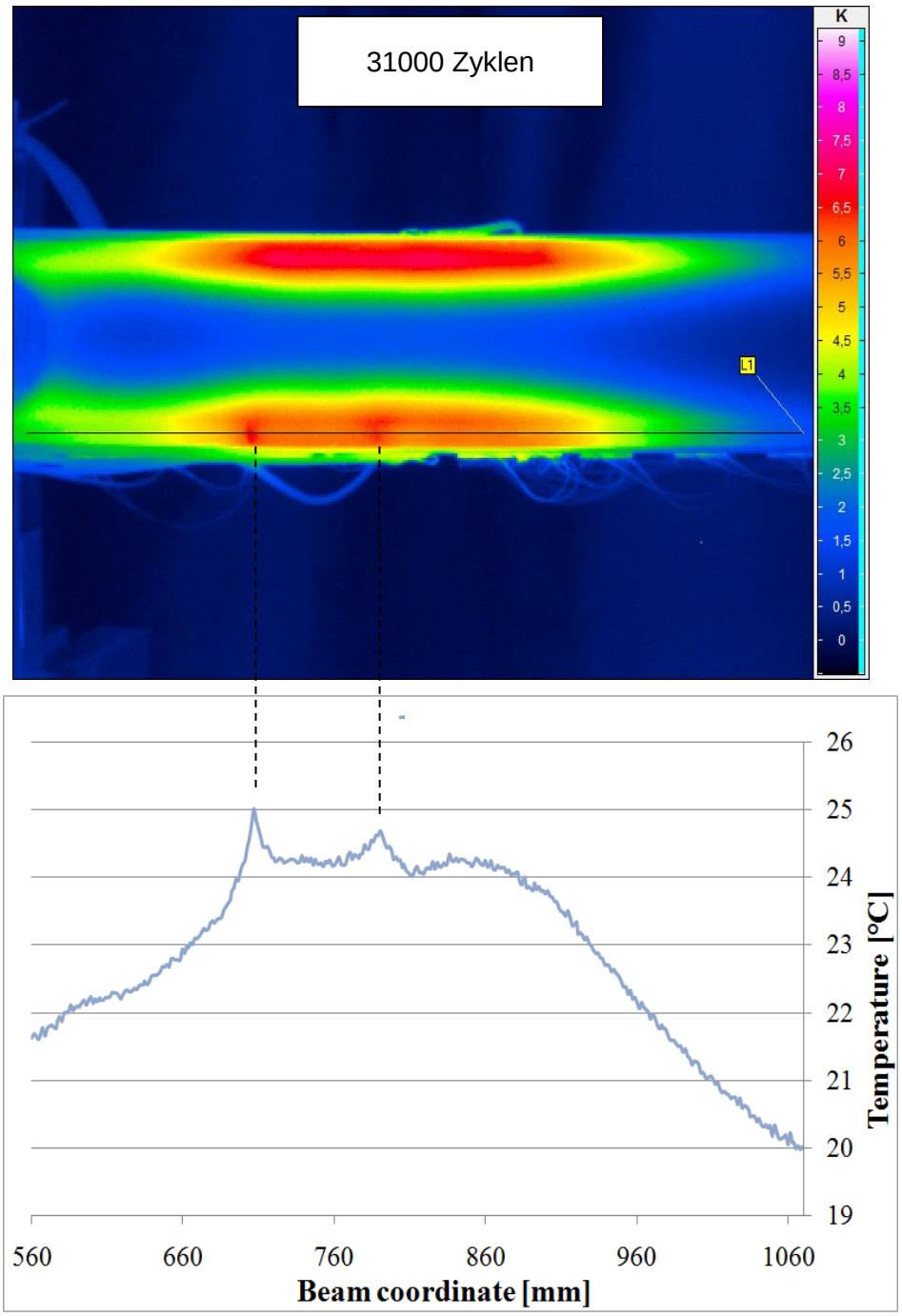


Abbildung 6.2.1-16: Thermogramm und Profildiagramm der Temperaturverteilung nach 31000 Zyklen (2 Risse)

Mit Hilfe der Thermografie wurde der Zeitpunkt (nach 31000 Lastzyklen) der Rissinitiierung festgestellt. In Abbildung 6.2.1-16 repräsentieren die Temperaturspitzen die ersten Risse im Balken.

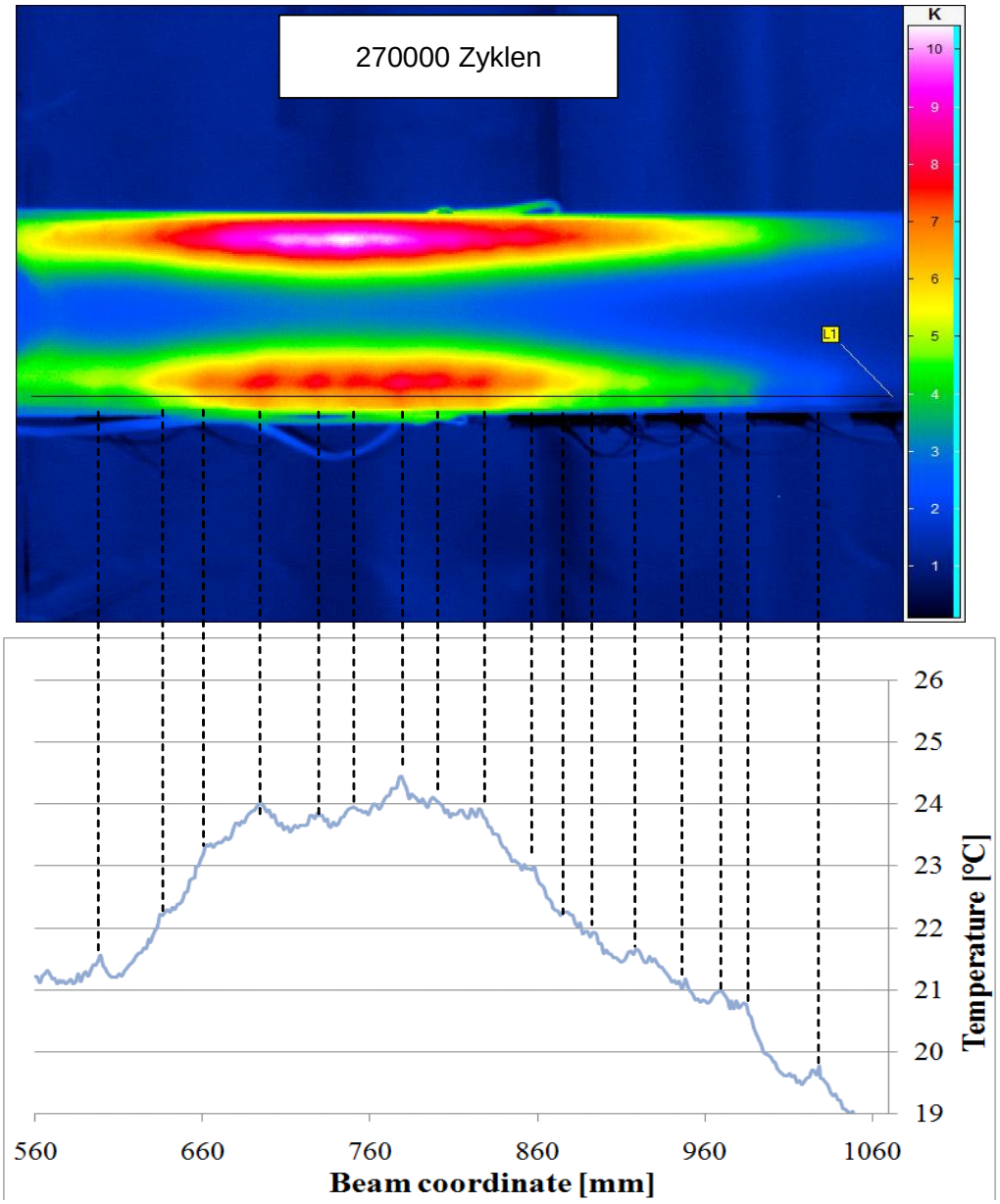


Abbildung 6.2.1-17: Thermogramm und Profildiagramm der Temperaturverteilung nach 270000 Zyklen

In Abbildung 6.2.1-17 wird die Rissausbereitung nach 270.000 Zyklen dargestellt.

In Abbildung 6.2.1-18 ist ein Foto des Balkens bei 170.000 Zyklen abgebildet, dem ein Thermogramm überlagert ist. Auf dem Balken sind die entstandenen Risse eingezeichnet und in dem Thermogramm sind die Hot-Spots, an denen die Risse durch Reibung Wärme erzeugen, deutlich zu erkennen.

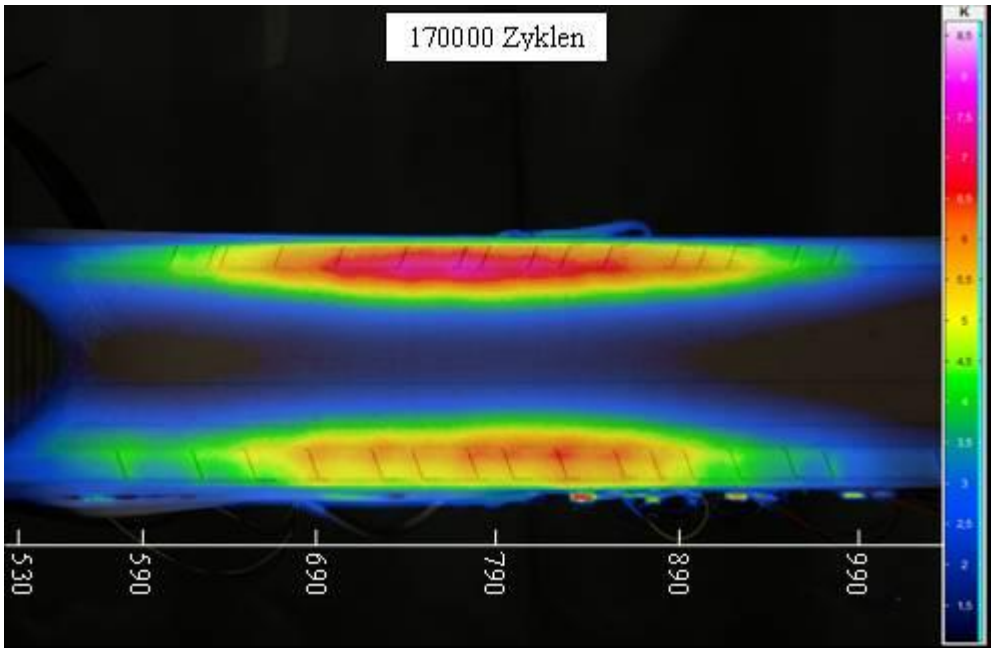


Abbildung 6.2.1-18: Temperaturverteilung im Zusammenhang mit der transversalen Rissausbreitung

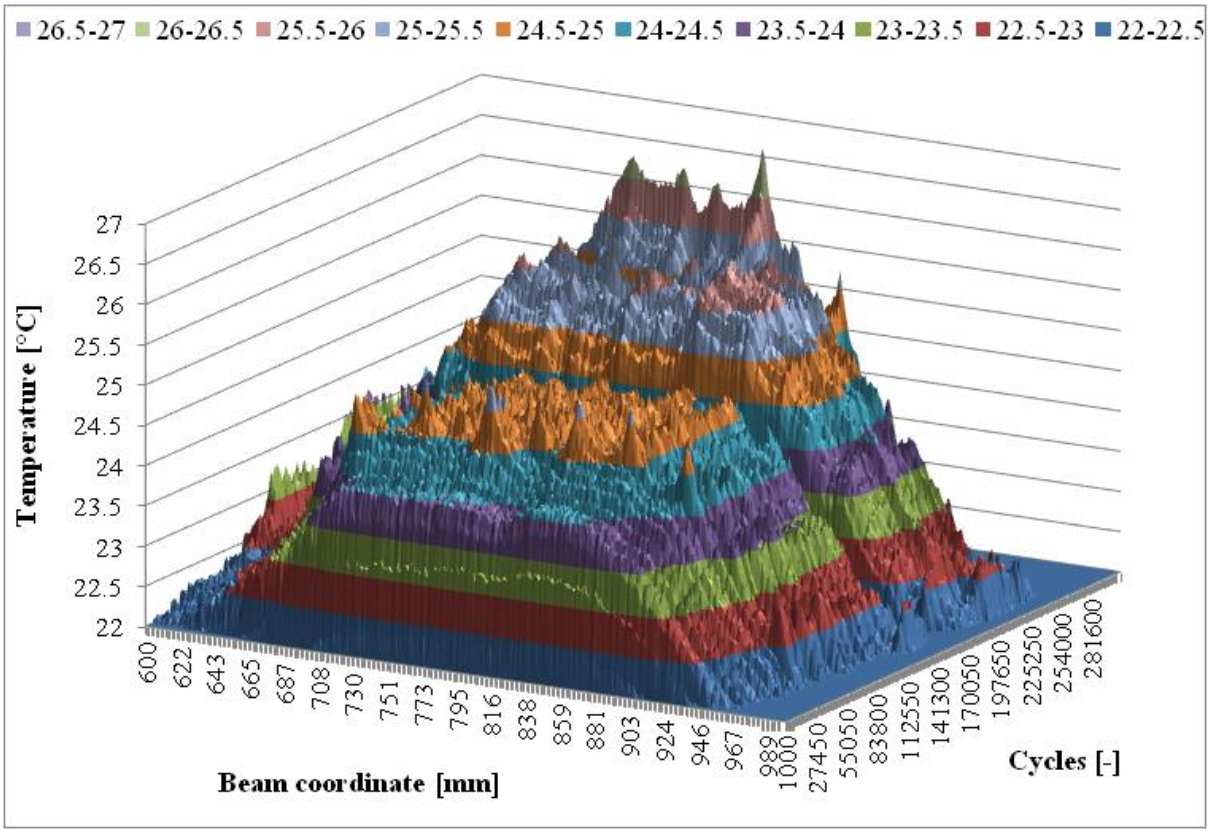


Abbildung 6.2.1-19: 3-D Diagramm über die Temperaturentwicklung während des Versuchs

In Abbildung 6.2.1-19 ist die Temperaturentwicklung gegen die Balkenkoordinaten und die Zyklenanzahl aufgetragen. Dieses Diagramm gibt einen Überblick über die Rissentwicklung während der gesamten Versuchsdauer.

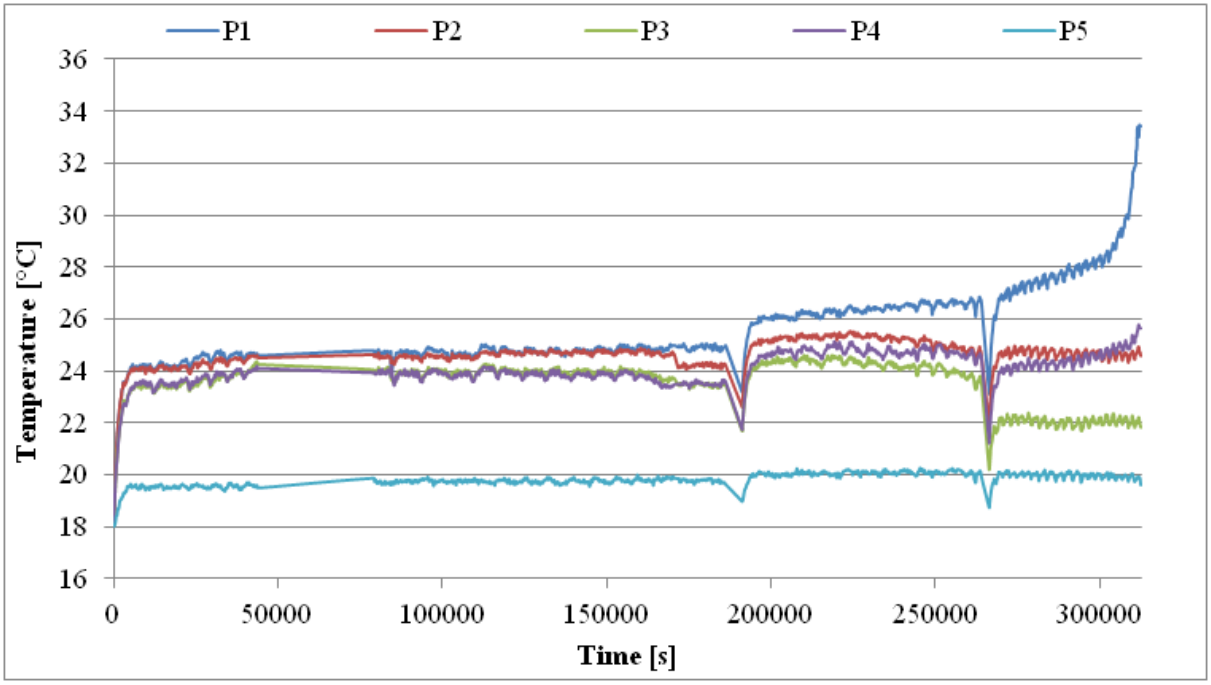


Abbildung 6.2.1-20: Temperaturentwicklung für 5 Punkte entlang des Balkens

In Abbildung 6.2.1-20 ist die Temperaturentwicklung entlang des Balkens während des Versuchs zu sehen (Punkteverteilung siehe Abbildung 6.2.1-15). Hier ist zu erkennen, dass die Temperatur der oberen Klebnaht höher ist als die der unteren. Der Mittelwert für die obere Klebnaht (P1 und P2) liegt bei 25 °C, wohingegen die mittlere Temperatur der unteren Klebnaht (P3 und P4) bei 24 °C liegt. P5 liegt in der Mitte des Steges und zeigt eine mittlere Temperatur von 19,5 °C, was auf die geringe Belastung in diesem Bereich zurückzuführen ist. Bei etwa 44.000 Zyklen hat sich der Messrechner versehentlich heruntergefahren, sodass über die Nacht keine Daten aufgezeichnet worden sind. Bei etwa 180.000 Zyklen ist die Last auf 10,75 kN erhöht worden, dies erklärt den mittleren Temperaturanstieg. Man kann deutlich erkennen, dass die Temperatur bei P1 gegen Ende stark ansteigt, dies ist bereits ein Zeichen auf das Versagen des Balkens in diesem Bereich.

Anhand von Abbildung 6.2.1-21 kann man deutlich eine Temperaturspitze im Balken am Ende des Versuchs erkennen. Des Weiteren wird das Beulen vom Gurt auch dargestellt. Der Prüfbalken hat in diesem Fall erwartungsgemäß im hochbelasteten Bereich versagt und hat eine Ermüdungslebensdauer von 312.228 Lastzyklen.

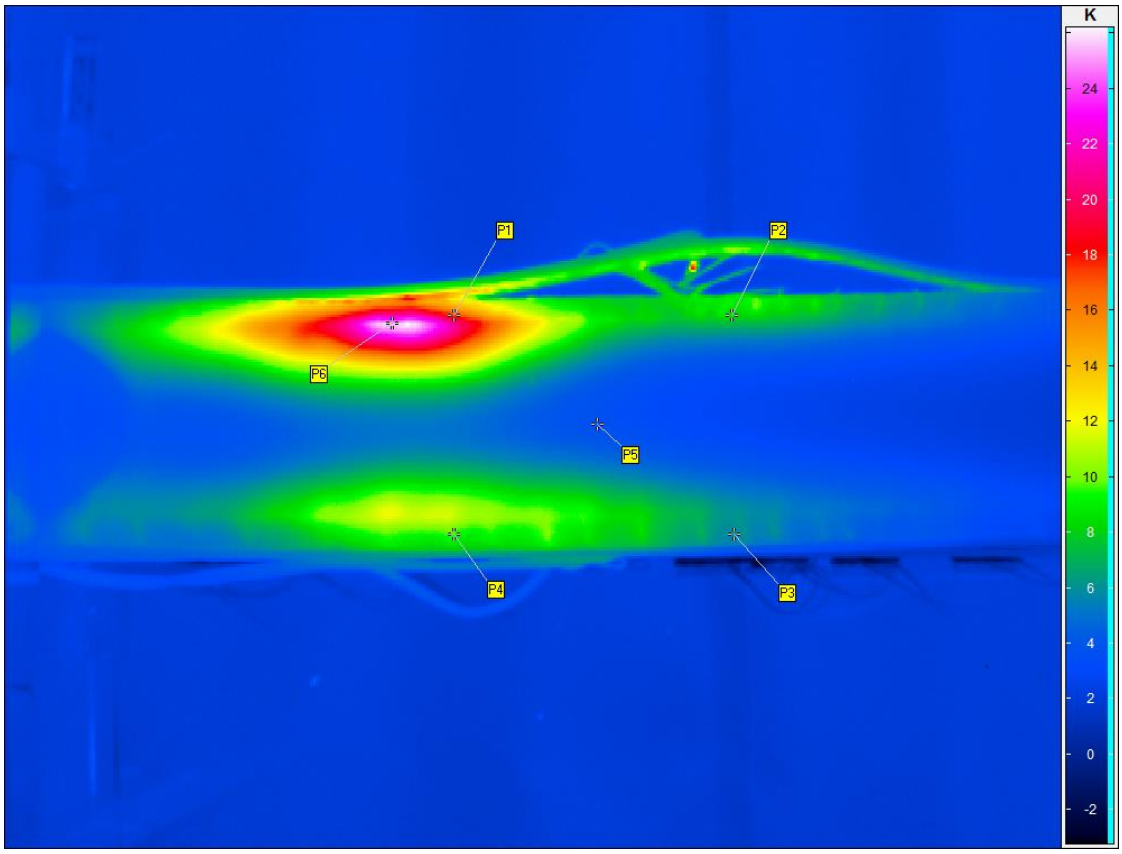


Abbildung 6.2.1-21: Versagen des Balkens nach 312228 Zyklen

6.2.1.4 Schlussfolgerung

Balkentest Nummer 1

1. Der Balken wurde erfolgreich getestet und versagte erwartungsgemäß nach 148.000 Zyklen. Der Balken wurde sinusförmig mit einer Frequenz von 1 Hz (oszillierend um die Nulllage) und einer Kraft von 10,8 kN belastet. Dabei betrug die Dehnung zwischen 680 mm – 880 mm, gemessen an der Oberfläche der Holmgurte, 0,36 %.
2. Die Dehnungsmessstreifen konnten nicht für die gesamte Versuchsdauer die Materialdehnung aufzeichnen. Nach den ersten hundert Zyklen fingen die Werte an abzuweichen. Nur die maximalen und minimalen Dehnungen konnten gemessen werden. Alternativ könnte man faseroptische Sensoren verwenden.
3. Alle Sensoren an den Holmgurten wurden auf das Abreißgewebe geklebt. Deshalb konnte keine aussagekräftige Schlussfolgerung für den Klebstoff gezogen werden.
4. Die Sensoren für Acoustic Emission, AE, funktionierten während und nach dem Versuch. Ebenso konnte kein Versagen der Klebverbindung zwischen Sensor bzw. Vorverstärker und dem Laminat festgestellt werden.

Balkentest Nummer 2

5. Der Balken wurde erfolgreich getestet und versagte im hochbelasteten Bereich erwartungsgemäß nach 312.228 Zyklen. Der Balken wurde sinusförmig mit einer Last von +/-10,2 kN belastet. Dabei betrug die Dehnung zwischen 680 mm – 880 mm, gemessen an der Oberfläche der Holmgurte, 0,34 %.
6. Mit Hilfe der Thermografiekamera wurden lokale Temperaturspitzen (Hot-Spots) im Bereich der Klebnaht festgestellt, an denen die Risse deutlich zu erkennen sind.
7. Insgesamt war ein Temperaturanstieg entlang des Balkens während des Versuchs zu erkennen, wobei der Temperaturmittelwert in der oberen Klebnaht bei 25 °C lag und in der unteren Klebnaht bei 24 °C.

Literatur

Vorpahl, F.; Sayer, F., Antoniou, A.; van Wingerde, A.: HookUp²Wind – Entwicklung neuer experimenteller und numerischer Verfahren der Komponentenentwicklung von sehr großen Windenergieanlagen, Abschlussbericht, Fraunhofer IWES, 2011

6.2.2 Blattversuche in Dresden, IMA

Mit Tests an einem Rotorblatt auf dem IMA-Prüfstand in Dresden soll die Kalibrierung der neu zu entwickelnden Piezosensoren gestützt werden. Der Rotorblatttest auf dem IMA-Prüfstand soll nach der Nordex-Spezifikation für dynamische Blatttests durchgeführt werden, um die Ergebnisse vergleichen zu können.

Die Firma Nordex verfolgt mit einem Unwuchterreger ein komplett anderes Prinzip der Lasteinleitung als die IMA Dresden mit einem Feder-Masse-System. Die Vorteile eines Feder-Masse-Systems sind vor allem die Sicherheit, da die dynamische Energie am Boden erzeugt wird und somit einfach kontrollierbar bleibt, und das neutrale Verhalten gegenüber dem Prüfling, da keine nennenswerte zusätzliche Masse durch die Krafteinleitung am Prüfling entsteht. Durch die notwendige Entkopplung des Prüflings von der Erregereinheit mittels einer Feder ist eine aufwändige Steuerung nötig.

Abbildung 6.2.2-1a: (links) Feder-Masse-System und Zusatzmassen, 6.2.2-1b: (rechts) Riss bei Schwenkversuch an Windabbruchkante, Länge ca. 50 cm

Die Masse des Unwuchterregers wird mittels einer zusätzlichen Lastschere und einer daran befestigten Masse am IMA-Prüfstand nachempfunden (vgl. dazu Abb. 6.2.2.-1a).

Der dynamische Versuch erfolgt über eine Anregung in der ersten Eigenfrequenz, um die Frequenzüberhöhung auszunutzen. Eine wichtige Größe bei diesem Prozess ist die Dämpfung des Rotorblatts. Diese Versuche sollen mit großen Amplituden durchgeführt werden, für die es noch keine praktischen Erfahrungen zu den Dämpfungswerten gab. Deshalb wurden Ausschwingversuche durchgeführt, um die Dämpfung experimentell zu bestimmen. Sowohl in Schlag- als auch in Schwenkrichtung ergeben sich über der Schwingamplitude progressive Dämpfungen. Als Richtwerte für den modalen Dämpfungsgrad im angeregten Amplitudenbereich können $\vartheta_{flapwise} \approx 0{,}015$ und $\vartheta_{edgewise} \approx 0{,}005$ abgelesen werden.

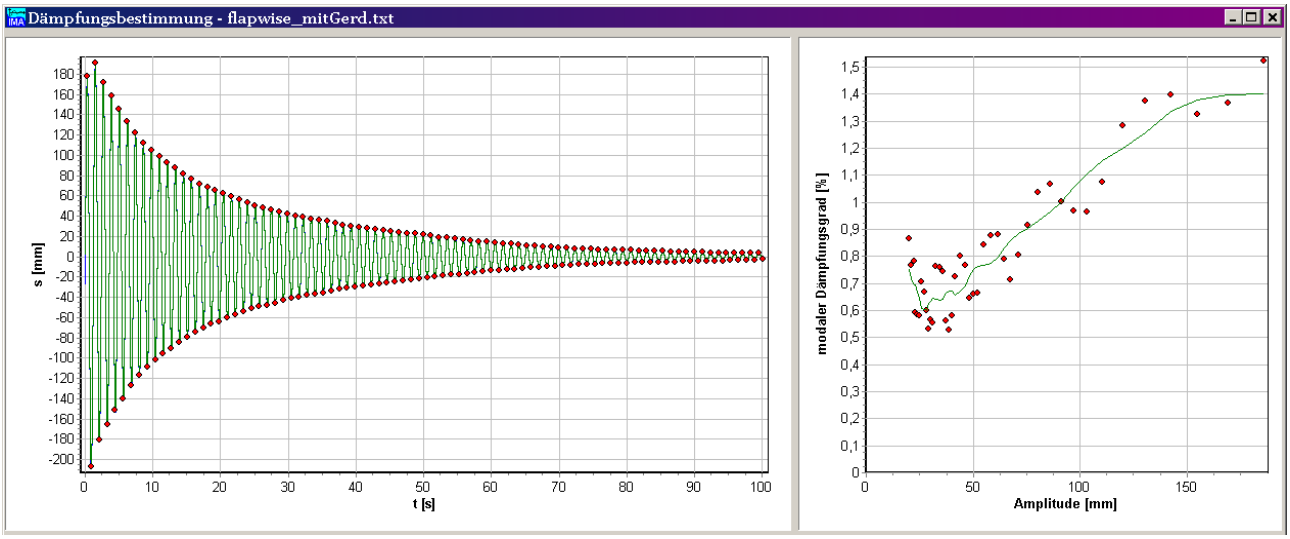


Abbildung 6.2.2-2: Ausschwingversuch in Schwenkrichtung

Bei dem Versuch in Schwenkrichtung trat nach ca. 100.000 Lastwechseln mit 50 %-Laststufe und nach ca. 100.000 Lastwechseln mit 70 %-Laststufe ein Riss an der Windabbruchkante beim Radius 8,5 m auf. Der Riss wuchs im Winkel von 45°, was der Faserrichtung des Glasfasergeleges entspricht. Der Versuch wurde kontrolliert fortgeführt, bis der Riss eine Länge von ca. 50 cm erreicht hatte. Dazu waren ca. 250.000 Lastwechsel der 90 %-Laststufe nötig (vgl. dazu Abb. 6.2.2.-1b).

Die Art und Position des Risses entsprach dem des Versuches bei Nordex. Aufgrund der Übereinstimmung bei der Kalibrierung und des Schadensbildes konnte gezeigt werden, dass die IMA Dresden mit dem Feder-Masse-System die Anforderungen der Nordex Prüfspezifikation erfüllen konnte.

Der Versuch in Schlagrichtung gestaltete sich weitaus schwieriger, da für die aerodynamische Dämpfung keine Erfahrungswerte vorlagen. Eine vereinfacht durchgeführte Kalibrierung ergab eine Sollvorgabe von 0,9 m Schwingamplitude beim Radius 27 des Rotorblattes für die 100 % Laststufe.

Die Leistungsgrenze des erregenden Feder-Masse-System bei der Prüffrequenz 0,72 Hz liegt bei ca. 3 kN. Mit dieser Erregerkraft konnte eine Laststufe von ca. 65 % erreicht werden. Es konnte nur ein langsames Fortschreiten von Schädigungssignalen beobachtet werden. Um den Zeitplan des Projektes nicht zu gefährden, ist der Versuch zu Nordex, Rostock verlegt worden.

Die Vorauslegung der Versuche bei IMA und Nordex wurde in Kooperation von Nordex und WBI durchgeführt und wird im folgenden Kapitel 6.2.3 dargestellt. Die Messergebnisse des SHM-Systems werden detailliert unter 6.3.1 und 6.3.2 dargestellt.

6.2.3 Blattversuche in Rostock, Nordex

Die Firma Nordex verfolgt mit einem Unwuchterreger ein komplett anderes Prinzip der Lasteinleitung als die IMA in Dresden. Das Hauptziel der Versuche an beiden Standorten war jedoch gleich, nämlich Schäden im Blatt hervorzurufen, die ähnlich wie im tatsächlichen Betrieb einer WEA langsam entstehen und sich dann fortpflanzen. Künstlich eingebrachte Schäden (Sägeschnitte u. ä.) führen zu anderen Schadenssignaturen. Für die Ermüdungs- bzw. Schädigungsversuche musste ein Lastkollektiv definiert werden, das einerseits möglichst ähnlich der Belastung auf der Anlage ist, aber andererseits ein zeitraffendes Testen erlaubt, um die projektierte Lebensdauer eines Blattes in der Größenordnung von 20 Jahren in wenigen Wochen nachzustellen. Ausgangspunkt waren dynamische Rotorblatttests, die bei Nordex im Rahmen der Zertifizierung durchgeführt werden. Das vorliegende einstufige Beanspruchungskollektiv (zugrundeliegende Lebensdauer 20 Jahre) wurde in ein Mehrstufenkollektiv mit einer äquivalenten Lebensdauer von 40 Jahren umgerechnet. Mit Hilfe der FEM-Simulation sollten dann die lokalen Beanspruchungen aufgezeigt und bewertet werden. Dazu wurde das Modell des Rotorblattes mit einem Modell des IMA-Teststandes verbunden (vgl. dazu Abbildung 6.2.3-1). Die abschließende Simulation wurde in folgender Konfiguration durchgeführt:

- Abbildung der Zusatzgewichte durch Punktmassen
- Berechnung der statischen Deformationen durch Eigengewicht
- Eigenfrequenzanalyse (vgl. Abbildungen 6.2.3-2, 6.2.3-5)
- Dynamische Simulation in der Nähe der Eigenfrequenzen durch modale Superposition:
    - Erregerkraft bei R = 30,5 m
    - Annahme Dämpfungsgrad D = 1 %

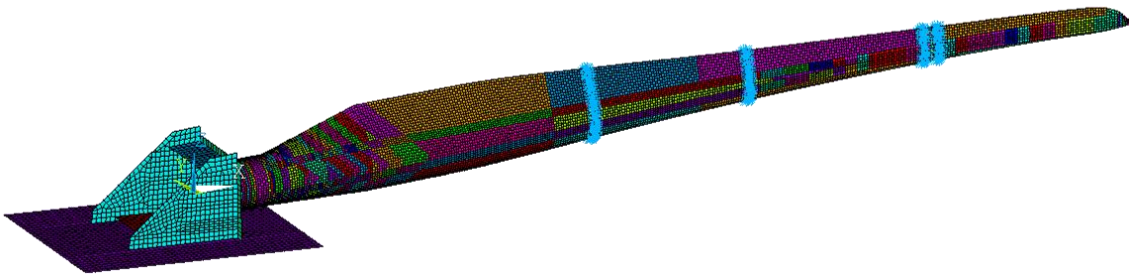


Abbildung 6.2.3-1: FEM-Modell IMA-Teststand plus Nordex-Blatt NR 37,5

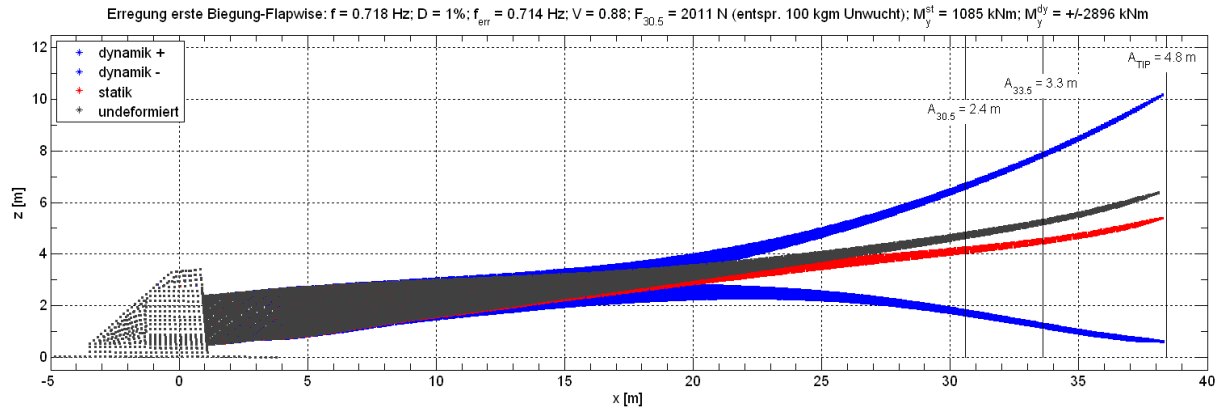


Abbildung 6.2.3-2: Erste Biegeeigenform des Blattes NR 37,5 flapwise bei f = 0,718 Hz

Aus der Simulation wurden die Anforderungen an das Erregersystem bei D = 1 % abgeleitet:

- edgewise: Kraftamplitude 1370 N, Wegamplitude 900 mm
- flapwise: Kraftamplitude 1770 N, Wegamplitude 2400 mm

Da bei großen Amplituden besonders die Dämpfung durch Luft sehr viel größer sein dürfte als es die angesetzten 1 % ausweisen, muss die Anregung entsprechend stärker dimensioniert werden.

Gegenüber den Standardtests haben sich bei den Prüfstandsversuchen im SHM-Projekt folgende Unterschiede ergeben:

- Bei den Tests in Schlagrichtung (flapwise) steigen die Momentenüberhöhungen gegenüber den Zieltestlasten (aus der Auslegung des Blattes) auf das 1,18-fache an.
- Bei den Tests in Schwenkrichtung (edgewise) steigen die Momentenüberhöhungen gegenüber den Zieltestlasten (aus der Auslegung des Blattes) auf das 1,19-fache an.
- Durch den Wöhlerexponenten steigt die Schädigung im Blatt mit der 10ten Potenz der Momentenüberhöhung. Um ein frühzeitiges Versagen des Blattes zu vermeiden, sollte die Momentenüberhöhung möglichst gering gehalten werden. Außerdem sollte der Versuch mit lediglich einer Lastschere durchgeführt werden, um lokale Versteifungseffekte zu vermeiden (vgl. Abbildung 6.2.3-4).
- Andererseits konnte durch gezielte Überhöhung in einem bestimmten Blattbereich ein Zeitraffereffekt der Rotorblattschädigung erzielt werden. In dem betroffenen Bereich altert das Blatt wesentlich schneller. Dieser Effekt sollte für jene Bereiche des Blattes genutzt werden, in denen Ondulationen vermutet werden.
- Das mehrstufige Lastkollektiv (vgl. Abbildung 6.2.3-3 und Tabelle 6.2.3-1) wurde so gewählt, dass sowohl für den edgewise- als auch für den flapwise-Test 40 Jahre Lebensdauer innerhalb von ca. 2 Monaten Versuchsdauer abgebildet werden.

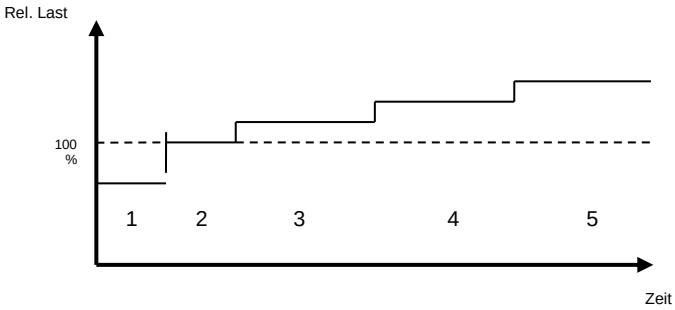


Abbildung 6.2.3-3: Geplante Laststufen für die Rotorblatttests bei der IMA und bei Nordex

Stufe	Last-niveau	Zyklen	Dauer edgewise	Dauer flapwise	Equiv. Lebens-dauer	Edgewise mit 1,19-facher Überhöhung	Flapwise mit. 1,18-facher Überhöhung
1	90 %	2,5E5	2,7 d	3,7 d	~0,3 Jahre	~2,0 Jahre	~1,8 Jahre
2	100 %	5E5	5,4 d	7,3 d	~2 Jahre	~11,4 Jahre	~10,5 Jahre
3	105 %	5E5	5,4 d	7,3 d	~3,3 Jahre	~18,6 Jahre	~17,1 Jahre
4	110 %	2E6	21,6 d	29,3 d	~20,7 Jahre	~118,2 Jahre	~108,6 Jahre
5	115 %	1E6	10,8 d	14,7 d	~16,2 Jahre	~92,2 Jahre	~84,7 Jahre
Summe		4,25E6	45,9 d	62,3 d	~42,5 Jahre	~242,4 Jahre	~222,7 Jahre

Tabelle 6.2.3-1: Laststufen und äquivalente Lebensdauer des Rotorblattes

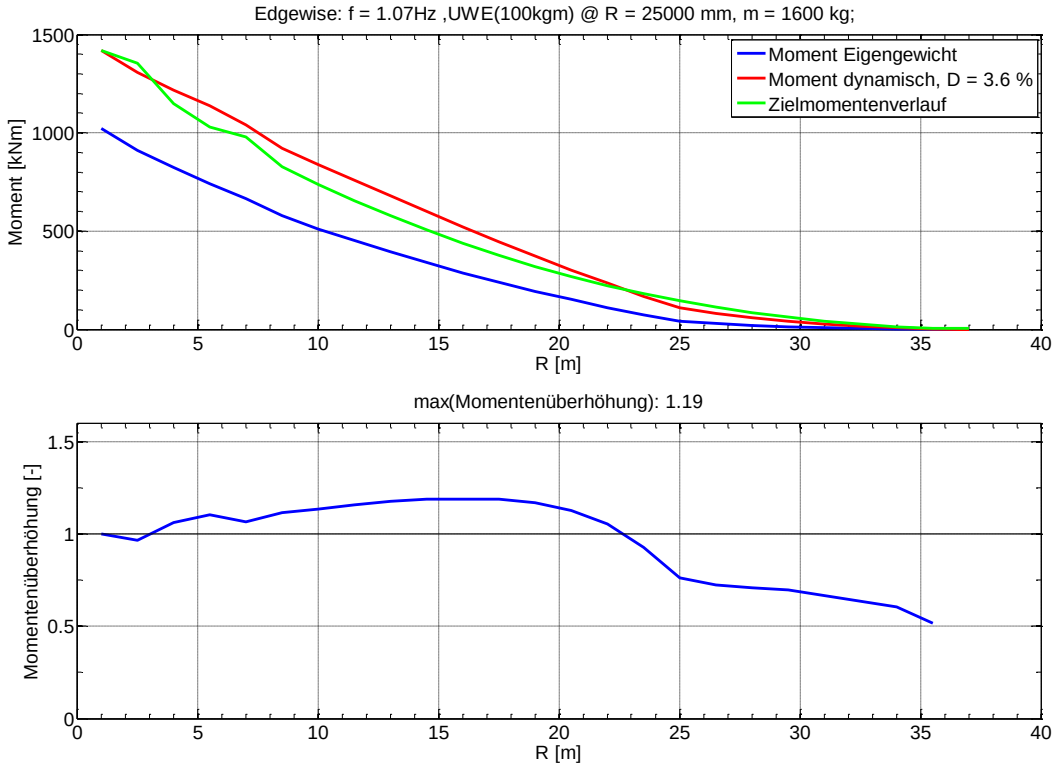


Abbildung 6.2.3-4: Simulation des Momentenverlaufs edgewise entlang der Rotorachse bei E1 = 1,07 Hz mit einer Unwuchterregung von 100 kgm bei Radius 25 m und einer zusätzlichen Masse von 1.600 kg

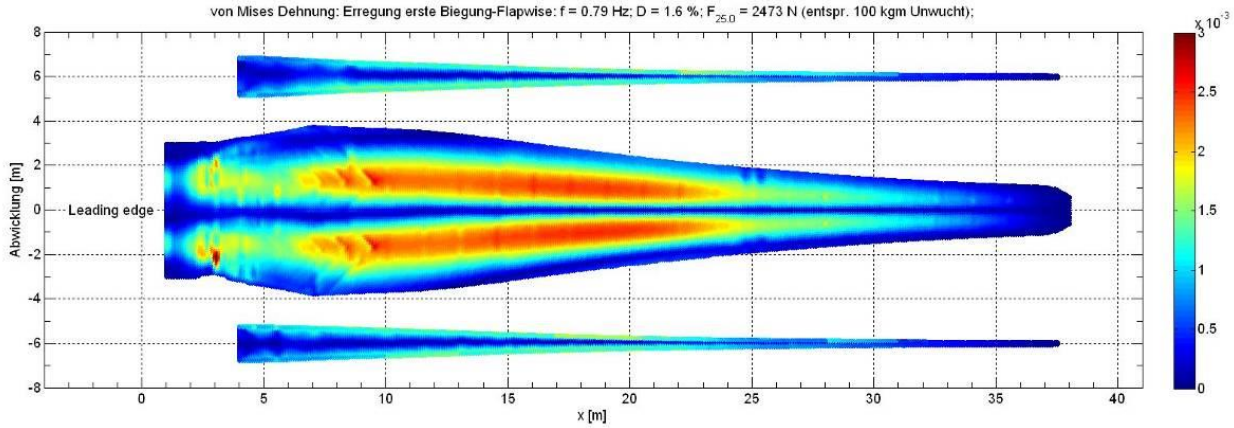


Abbildung 6.2.3-5: Simulation der von Mises-Dehnungen bei Anregung des Blattes in der ersten Biegeeigenfrequenz flapwise bei f = 0,79 Hz, D = 1,6 % und F = 2473 N

Aus der Simulation ergibt sich, dass für die Anregung der Rotorblätter folgende Kräfte notwendig sind:

Edgewise bei f = 1,07 Hz und einer Lasteinleitung bei R = 25 m
- ca. F_{dyn} = ± 5.200 N (115 kgm) bei D = 3,6 % (Laststufe 115 %)
- Weg an Lasteinleitung ± 34,5 cm (Laststufe 115 %)

Flapwise bei f = 0,79 Hz und einer Lasteinleitung bei R = 25 m
- ca. F_{dyn} = ± 2.850 N (115 kgm) bei D = 1,6 %
- Weg an Lasteinleitung ± 69 cm (Laststufe 115 %)

Nach Angaben von IWES wird die modale Dämpfung im Test flapwise bei großen Amplituden voraussichtlich bei ca. 6…9 % liegen. Deshalb wird eine Anregungskraft F_{dyn} = ± 10,7 kN…16,0 kN (430 kgm…650 kgm) bei der Laststufe 115 % benötigt.

Die Instrumentierung (Abbildungen 6.2.3-6, 6.2.3-7 a,b) für die modalen Messungen in Dresden und Rostock war sehr ähnlich.

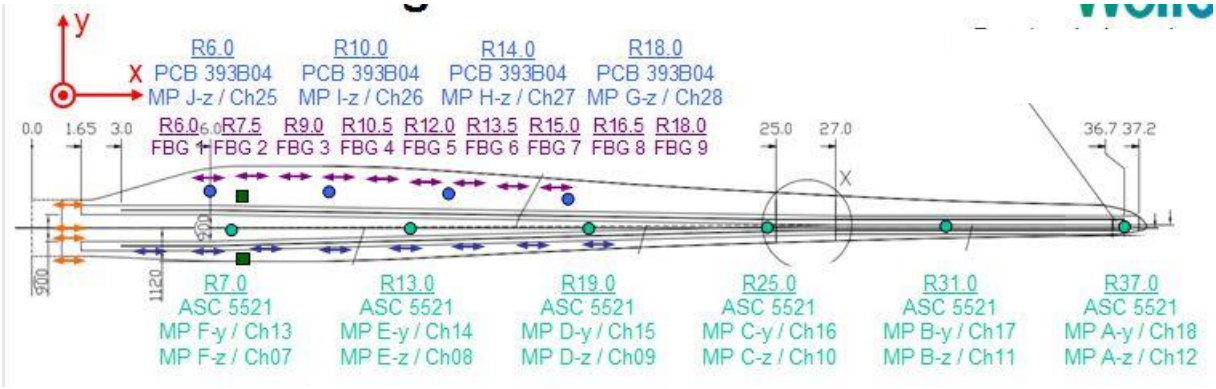


Abbildung 6.2.3-6: Instrumentierung für die modalen Messungen

		CH
●	Beschleunigung biaxial	7-18
●	Beschleunigung uniaxial	25-28
↔	DMS	19-22
↔	FBG 1 – Edgewise-Test	Blue box
↔	FBG 2 – Flapwise-Test	Blue box
■	Temperatur	23-24
	Kraft- und Weg (IMA)	1-2
	Kraft Shaker (Nordex / WBI)	6
	Status Shaker (WBI)	3
	(nicht vorhanden)	4-5

Tabelle 6.2.3-2: Legende zu Abbildung 6.2.3-6, Instrumentierung

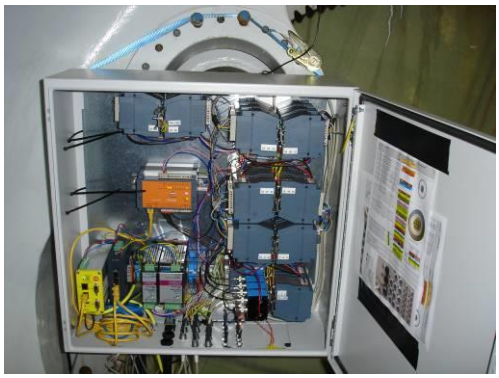


Abbildung 6.2.3-7 a (links): Rotorblattprüfstand Nordex, triaxialer Beschleunigungssensor (Fa. ASC) für modale Messungen, darunter HF-Modul von IZFP-D. Abbildung 6.2.3-7 b (rechts): Rotorblattprüfstand Nordex, Schaltschrank in der Nabe

In den geplanten Versuchsablauf integriert wurden auch Tests mit einem elektromagnetischen Shaker, mit dem gezielte Kraftanregungen (u. a. Sweeps) zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens realisiert werden können (Abbildung 6.2.3-8).

Abbildung 6.2.3-8: Elektrodynamischer Shaker BD 5 im Inneren des Rotorblattes

Im Detail wurde folgendes Versuchsprogramm durchgeführt:

- Am Tag kontinuierliche Anregung des Blattes mit Unwuchterreger mit unterschiedlichen Laststufen (vgl. Abb. 6.2.3-9)

- Täglich Sweeps mit Shaker BD 5; diese sollen nachts oder in den frühen Morgenstunden gefahren werden, wenn keine weitere Anregung wirkt.
  - 5…10 Wiederholungen → Ergebnisse mitteln
  - Übertragungsfunktion von Kraft auf jeden Struktursensor ermitteln
  - → Frequenzen, Dämpfungen, Amplitude**,** Phase → Trenddiagramm
  - Auswertung der Veränderung von Schwingungsmoden

- Täglich Rauschanregung mit BD 5
  - Auto- / Kreuzkorrelation
  - → Unterschiede zwischen Struktursensoren (ohne Anregung)
  - → Schadenserkennung basierend auf Stochastic Subspace Identification

Über die Ergebnisse der Messungen wird unter Punkt 6.3.1 und 6.3.2 eingehend berichtet.

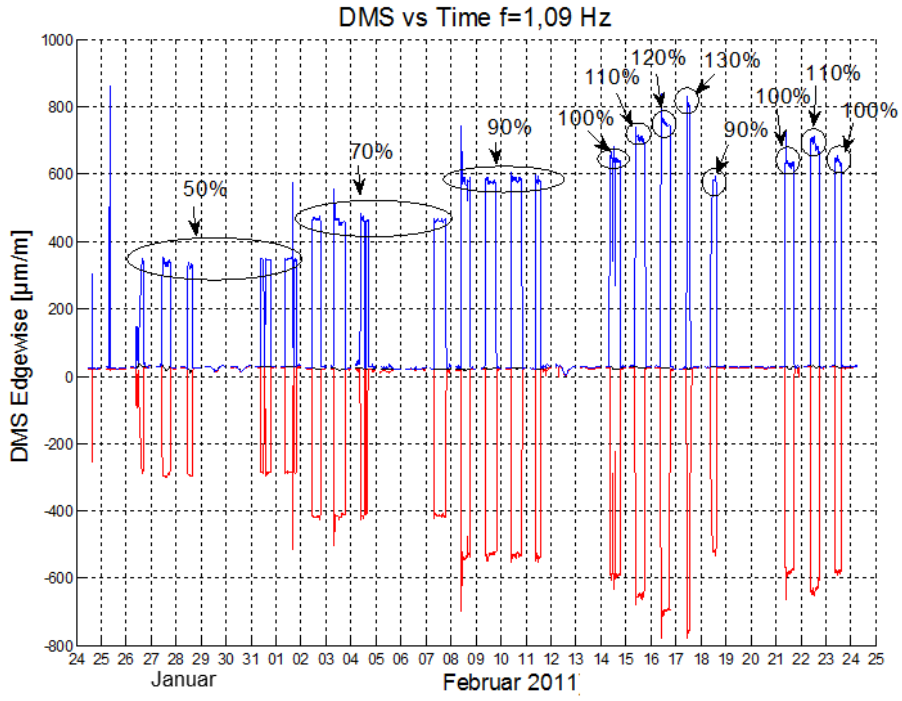


Abbildung 6.2.3-9: Diagramm der gefahrenen Laststufen

Auf dem Teststand bei Nordex wurden mehrere Blätter in verschiedenen Richtungen (Schwenk- und Schlagrichtung) getestet.

6.2.3.1 Rotorblattversuch NR 37,5, SN382, Schwenkrichtung

Das Rotorblatt NR 37,5 SN382 wurde nach fehlerhaft ausgeführter Reparatur in der Annahme zur Verfügung gestellt, dass es schneller versagt und so die Testdauer verkürzt. Es wurde mit der Hinterkante nach oben am Teststand montiert (vgl. Abbildung 6.2.3-10). Zur Anregung diente ein Unwuchterreger mit Exzentermasse, der bei R 25 m montiert wurde. Die Regelung des Unwuchterregers war über DMS realisiert, die beim Überschreiten einer bestimmten Dehnung abschalteten. Zusätzlich war der Shaker BD 5 bei R 11 m installiert.

Das Blatt wurde vom 26.01.2011 bis 23.02.2011 in Schwenkrichtung dynamisch bis zum Bruch getestet. Die Schwingweite des Blattes wurde stufenweise erhöht, bis sich ein Schaden andeutete. Dann wurde die Last wieder reduziert, um den Schaden langsam fortschreiten zu lassen (vgl. dazu Abb. 6.2.3-9 b).

Abbildung 6.2.3-10: Teststand mit Unwuchterreger

Im Verlauf des Tests wurden zeitlich verschiedene Lastenstufen gewählt. Bis zum 11.02.2011 wurden vorrangig die Laststufen 50 %, 70 % und 90 % gefahren. Anschließend erhöhte man die Laststufen bis zum 16.02.2011 auf 100 %, 110 % und 120 %. Dann wurde eine Schadenskonzentration an der Endkante im Bereich von 9,0 m – 9,5 m wahrgenommen. Darauf wurde das Blatt weiter der Laststufe 120 % ausgesetzt, welches zu einer Ausbreitung der Schadenszone in Form eines beidseitigen Risses unter 45° in Richtung Hauptgurt führte. In der weiteren Testphase oszillierte das Testblatt bis zum 23.02.2011 vorrangig in den Laststufen 90-110 %. Dadurch verlängerte sich der Strukturschaden auf ca. 40 cm. Anschließend wurde der Test beendet.

6.2.3.2 Rotorblattversuch NR 37,5, SN421, Schlagrichtung

Das NR 37,5,SN421 wurde vom 03.02. – 12.03.2012 am Rotorblatttteststand bei Nordex in Schlagrichtung dynamisch bis zum Bruch getestet (Abbildung 6.2.3-11). Dieses Rotorblatt ist ein nicht repariertes, schadhaftes Blatt, welches ein schnelles Versagen vermuten ließ. Zunächst war es am IMA Dresden in Schwenkrichtung bis zum Endkantenschaden getestet worden. Der Schaden war für den anschließenden Test in Schlagrichtung ausgebessert worden. Dieser Test war am IMA begonnen worden, das Rotorblatt konnte dort jedoch nicht ausreichend belastet werden, sodass es zu Nordex nach Rostock transportiert wurde. Dort wurde es am Teststand mit der Druckseite nach oben montiert, instrumentiert und für den Test eingerichtet. Die Schwingweite des Blattes wurde stufenweise erhöht. Die Testdurchführung erfolgte wie oben dargestellt.

Abbildung 6.2.3-11: Rotorblatt NR 37,5, SN421 in Schlagrichtung mit Unwuchterreger

Das Rotorblatt wurde in drei verschiedenen Laststufen (50 %, 70 % und 100 %) angeregt. Der Blatttest wurde bis zum Versagen auf der Saugseite durchgeführt. In Abbildung 6.2.3-12 ist der Riss und in der Fortsetzung eine Beule in der Außenschale zu erkennen.

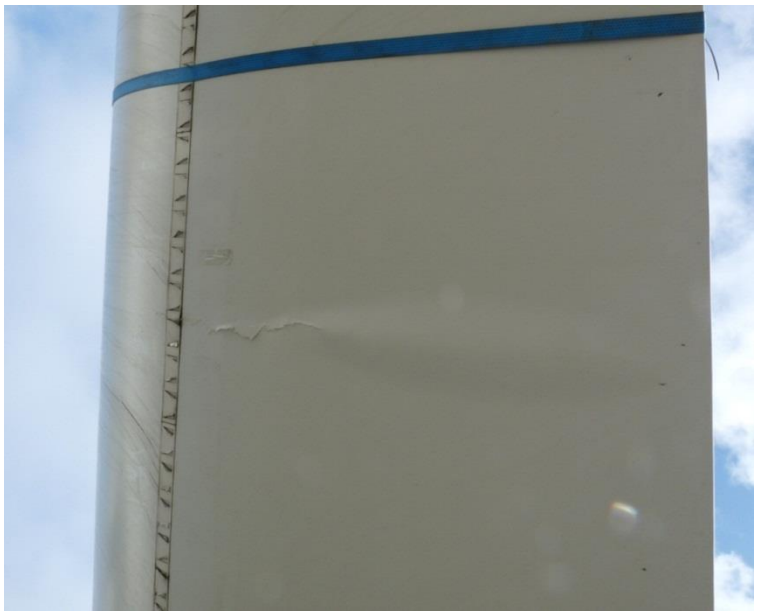


Abbildung 6.2.3-12: Äußerer Strukturschaden bei R 17,5 m

6.2.3.3 Rotorblattversuch NR 37,5, SN382, Schlagrichtung

Nachdem dieses Rotorblatt NR 37,5 SN382 bereits in Schwenkrichtung getestet wurde (vgl. dazu 6.2.3.1), ist der beschädigte Bereich repariert und das Blatt für den Test in Schlagrichtung mit der Druckseite nach oben am Teststand montiert worden. Die Sensorik war bei den Rückearbeiten z. T. beschädigt worden und musste ausgebessert werden.

Der Test ist seit dem 04.07.2012 in Betrieb. Die Schwingweite des Blattes wurde stufenweise erhöht, die Laststufen wurden von 50 % schrittweise auf 100 % gesteigert. Es fanden regelmäßig Inspektionen statt. Im Verlauf des Tests zeigen sich über das Blatt verteilt oberflächliche Gelcoat-Risse und vereinzelt kurze, diagonale Delaminationen in den Decklagen. Strukturrelevante Schäden sind jedoch bis zur Erstellung dieses Berichtes nicht zu beobachten.

Anders als im Vorwege vermutet, konnte der Test bisher nicht bis zum Versagen des Blattes durchgeführt werden. Da dieser Test sowohl zeitlich als auch hinsichtlich der Kosten bereits außerhalb des Förderrahmens liegt, aber auf eigene Kosten fortgesetzt und abgeschlossen werden soll, ist abkürzend vorgesehen, einige Gurtlagen eines Hauptgurtes anzuschleifen. So soll die Struktur gezielt möglichst realitätsnah geschwächt und das weitere Fortschreiten eines Schadens erneut überwacht werden. Eine Erhöhung der Last ist ohne größere Eingriffe, die die Kontinuität der Messreihe zerstören würden, nicht mehr möglich.

6.2.4 Erprobung auf der drehenden Anlage in Uelitz, Nordex, IZFP, WBI

Die Versuche auf der aktiven WEA Nordex N70342 vom Typ S77 im Windpark in Uelitz hatten mehrere Aufgaben:

- Die teilweise neu entwickelten unterschiedlichen Sensoren (FBG, DMS, MEMS, Piezosensoren usw.) und die Netzwerkarchitektur sollten einem Funktionstest unter den Betriebsbedingungen auf einer drehenden Anlage unterzogen werden. Getestet wurde u. a. die Tauglichkeit bei rauen Umgebungsbedingungen, das Signal-Rausch-Verhältnis, die Befestigungstechnik der Sensoren und die Zuverlässigkeit der Datenübertragung.
- Mit dem neu entwickelten Messsystem wurden die ersten Rohdaten einer drehenden Anlage gemessen. Diese ersten Monitoringdaten waren notwendig für die Weiterentwicklung der Verfahren zur Schadenserkennung.

Zunächst musste für die Instrumentierung an einem drehenden Rotorblatt ein Blitzschutzkonzept entwickelt werden. Es beinhaltet einen Sensorleitungsstrang in größtmöglicher Entfernung zum Blitzseil und entsprechende Stichleitungen zu Sensor- und Netzwerkknoten. Das Konzept wurde mit Zustimmung des Projektpartners Nordex realisiert. Abbildung 6.2.4-1 zeigt die Testinstrumentierung von akustischen Sensoren, die bis zu einer Entfernung von 5,8 m zur Blattwurzel, das heißt einem Radius von R = 6,8 m ausgeführt wurde.

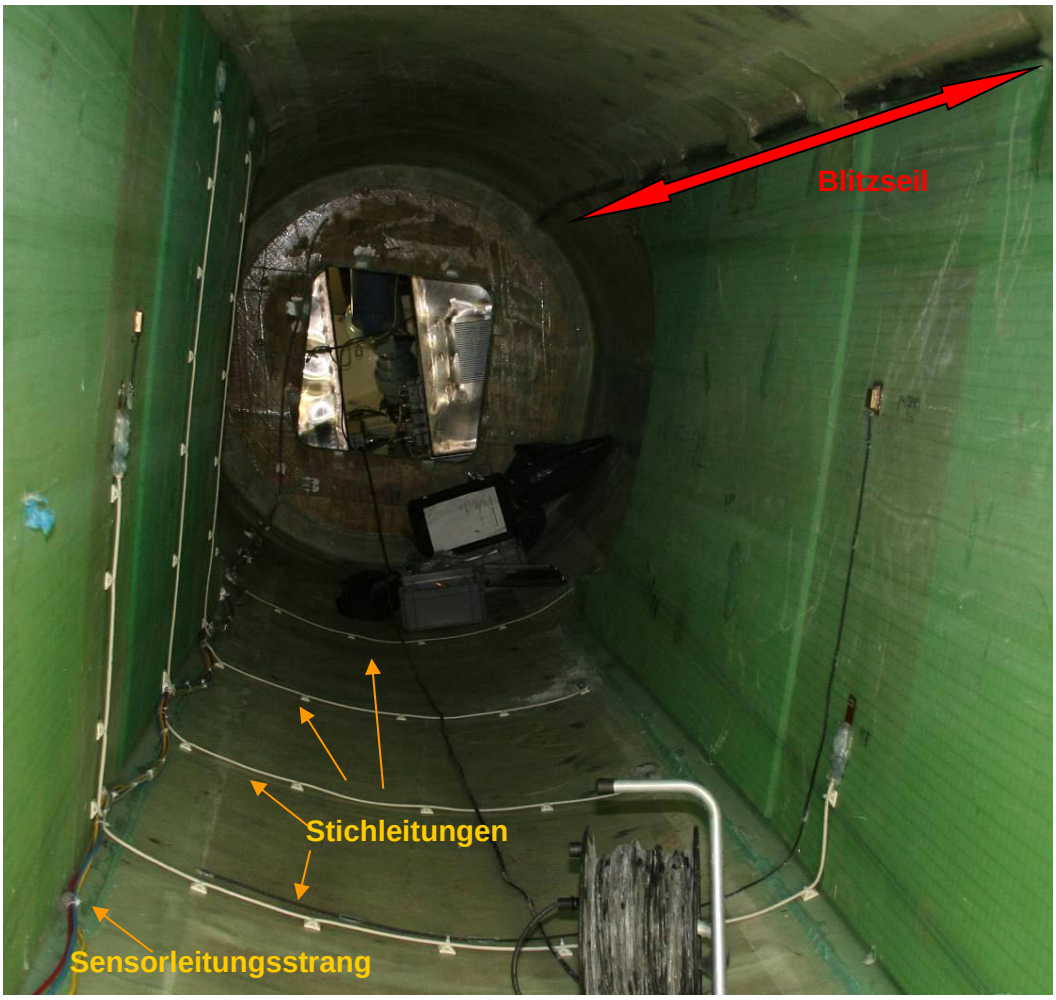


Abbildung 6.2.4-1: Blitzschutz – Leitungsführung Testinstrumentierung an einem drehenden Rotorblatt am Teststandort Uelitz

Abweichend vom ursprünglichen Systemdesign wurde auf die Erprobung von Faser-Bragg-Gittern, FBG, wesentlich größeres Gewicht gelegt, da nur mit dieser Technologie die bei Rotorblättern auftretenden großen Dehnungen > 1,5 ‰ auf Dauer zuverlässig gemessen werden können.

Auf der drehenden Anlage in Uelitz werden neben den nieder- und hochfrequenten SHM-Messgrößen bzw. den Monitoringdaten auch die Betriebsdaten (Windgeschwindigkeit vom Anemometer auf der Gondel, Windrichtung an der Gondel, elektrische Wirkleistung, Generatordrehzahl, Pitchwinkel und Gondelposition) aus der WEA-Steuerung (Top-Box) ausgekoppelt und in eine Datenbank eingepflegt. Zusätzlich wird mit 3-Komponenten-Beschleunigungssensoren die Rotorblattlage ermittelt. Einige Aspekte der Instrumentierung zeigen die Abbildungen 6.2.4-2 bis 6.2.4-6)

Abbildung 6.2.4-2: Messbox im Rotorblatt mit Sensorknoten, Stromversorgung, Signalkonditionierung, CAN-Bus und Ethernetadapter. Die Blue Box zur Erfassung der FBG-Sensorsignale vom IPHT (rechts unten) ist integriert

Abbildung 6.2.4-3: Von IZFP-D und WBI gemeinsam genutzter zentraler Rechner im Turmfuß der Anlage im Windpark Uelitz

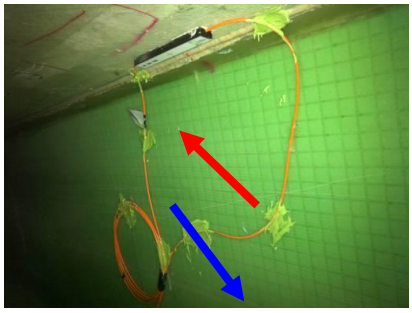


Abbildung 6.2.4-4: Pilotsystem auf WEA in Uelitz, ummantelte FBG (blauer Pfeil), der sensorisch wirksame Abschnitt ist speziell gegen mechanische Beschädigung geschützt (roter Pfeil)

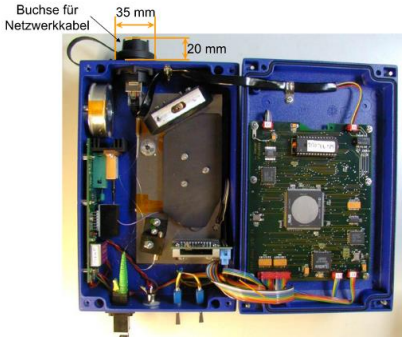


Abbildung 6.2.4-5: Blue Box, Spektrometer von IPHT zur Auswertung der FBG-Sensorik

Für das Health Monitoring sind aktuelle Betriebsdaten der Anlage von großer Bedeutung. Sie geben z. B. Auskunft über Windgeschwindigkeit und Pitchwinkel. Diese zwei Parameter beeinflussen das Schwingungsverhalten des Rotorblattes und müssen unbedingt berücksichtigt werden. Zusätzlich wird die Meteorologie (Lufttemperatur / Niederschlag / Luftfeuchte) mit eigenen Messgeräten erfasst.

Abbildung 6.2.4-6: Wetterstation auf WEA in Uelitz

Für die modalen Messungen sollten allein aus Kostengründen möglichst preiswerte MEMS eingesetzt werden. Allerdings ist bei ihnen die Empfindlichkeit und besonders der Signal-Rausch-Abstand wesentlich schlechter als bei den sehr teuren ICP-Sensoren. Deshalb mussten MEMS im Vergleich zu hochwertigen ICP-Sensoren auf ihre Verwendbarkeit für das SHM-System getestet werden. Wie Abbildung 6.2.4-7 zeigt, liefern beide Sensortypen bei relativ hohen Windgeschwindig-keiten von 14 m/sec durchaus vergleichbare Ergebnisse. Geht die Windgeschwindigkeit jedoch auf Werte von 6 bis 7 m/sec zurück, fallen die MEMS deutlich zurück (vgl. Abbildung 6.2.4-8).

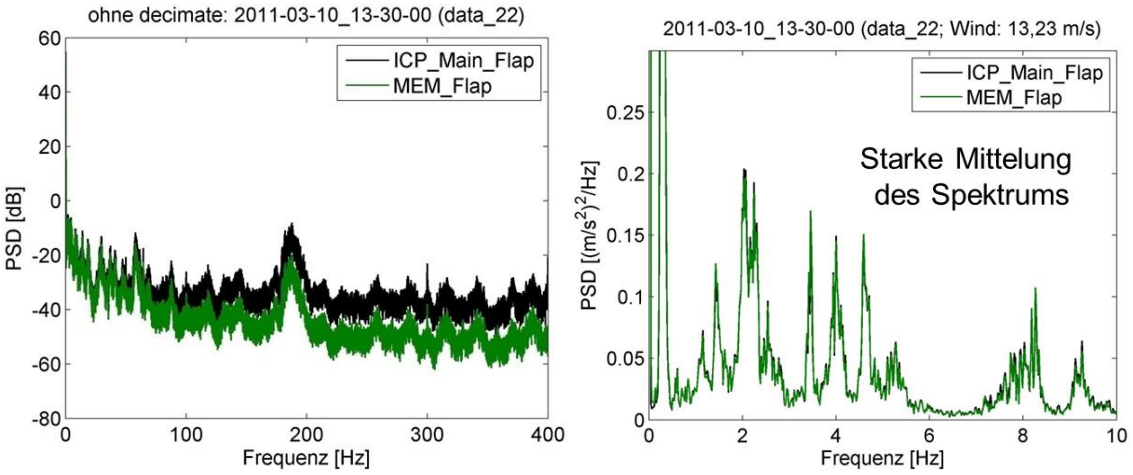


Abbildung 6.2.4-7: Frequenzspektren von IPC- und MEMS-Sensoren bei relativ hohen Windgeschwindigkeiten

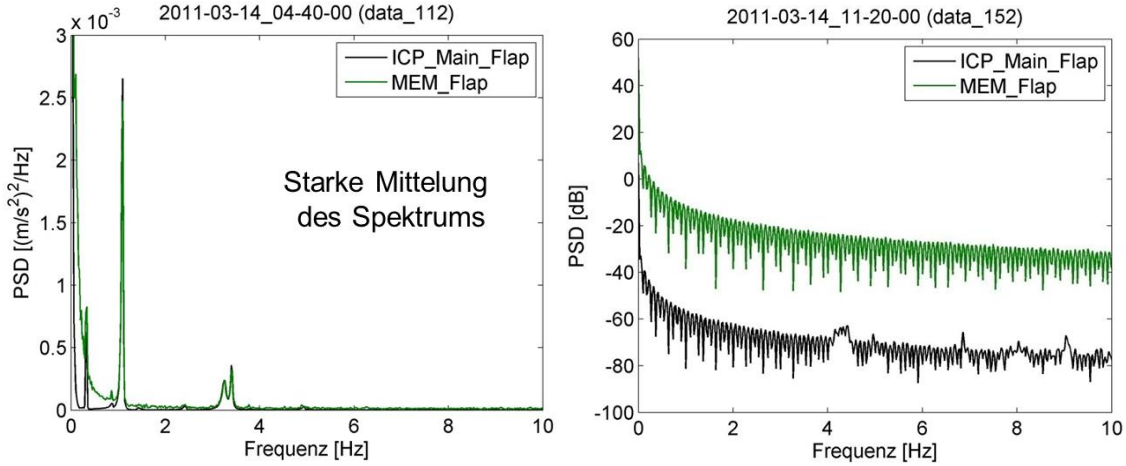


Abbildung 6.2.4-8: Frequenzspektren von ICP- und MEMS-Sensoren bei geringer Windgeschwindigkeit < 4 m/sec

Die Messungen auf der Pilotanlage in Uelitz dienten auch dazu, Basismessdaten von drehenden Anlagen zu bekommen. Nur auf der Grundlage dieser Monitoringdaten konnten die Auswerteverfahren für die 3 unterschiedlichen Messmethoden (vgl. dazu 6.3) entwickelt werden. Diese Auswerteverfahren stellen den Kern von SHM Wind dar. Für die Schwingungsmesstechnik sind vor allem die Eigenfrequenzen der WEA und besonders die der Blätter und ihre Abhängigkeit von Umweltbedingungen wie Temperatur und Windgeschwindigkeit von grundlegender Bedeutung (vgl. Abbildung 6.2.4-9). Dabei sind besonders die Windgeschwindigkeiten eine wesentliche Komponente der Lasten. Die Temperaturen wirken in Form von Wärmedehnungen auch als Last, sie beeinflussen jedoch auch in erheblichem Ausmaß die Materialdaten des Blattes, das bei Hitze weicher bzw. bei Kälte steifer wird. Dieser Effekt senkt bzw. hebt die Eigenfrequenzen.

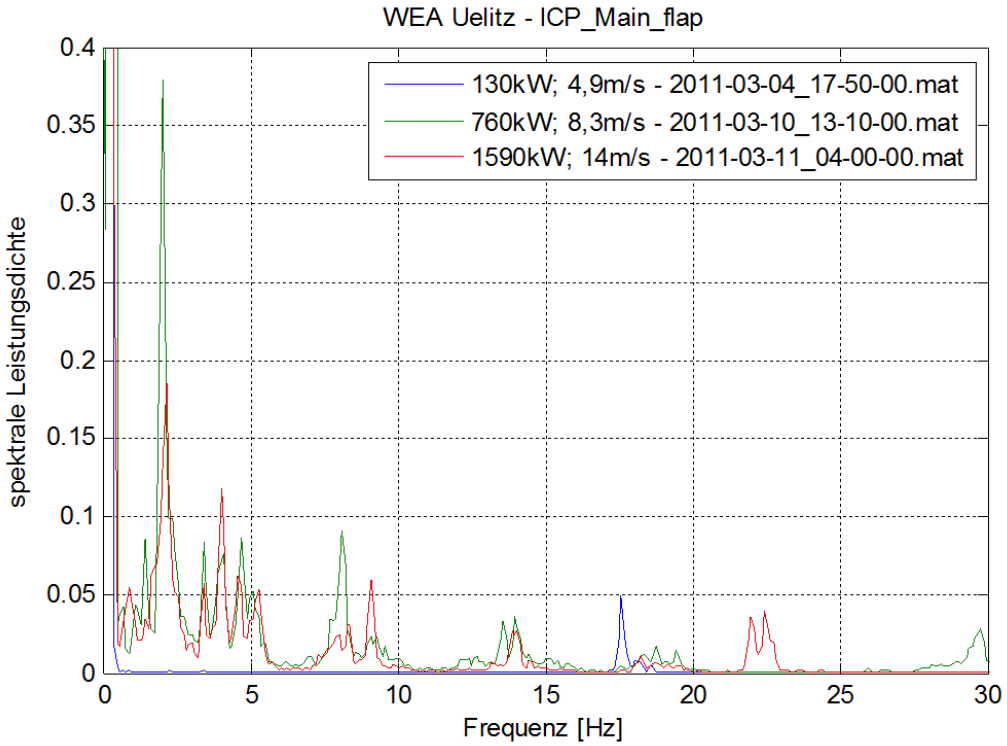


Abbildung 6.2.4-9: Eigenfrequenzen eines Rotorblattes in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Auf der WEA in Uelitz wurde aus Gründen des Blitzschutzes nur ein Pilotsystem installiert. Es verfügt nur im wurzelnahen ersten Drittel des Rotorblattes, wo ein drahtgebundener Betrieb möglich ist, über Sensoren. Damit werden unter anderem Untersuchungen zur Identifikation von Eigenfrequenzen auf der rotierenden Anlage durchgeführt.

Neben den von WBI durchgeführten Schwingungsmessungen führte IZFP-D vornehmlich Schallemissionsmessungen durch. Die Häufigkeit der Schallemissionen an einem drehenden Rotorblatt zeigt deutliche Zusammenhänge zu den Betriebsparametern Windgeschwindigkeit, elektrische Leistung und Generatordrehzahl und liefert damit Hinweise auf erhöhte mechanische Belastungen des Rotorblattes unter bestimmten Betriebsbedingungen.

Abbildung 6.2.4-10 demonstriert dies am Beispiel der Windgeschwindigkeit und Abbildung 6.2.4-11 zeigt die Summenhäufigkeit der in der Nähe der Blattwurzel auftretenden Schallemissionsereignisse. Bei diesem Ortungsplot der Schallemissionsprüfung wurde als Parameter die Häufigkeit von georteten Schallemissionsereignissen (Hits) in den ca. 10x10x10 cm³ großen Volumenelementen farbkodiert.

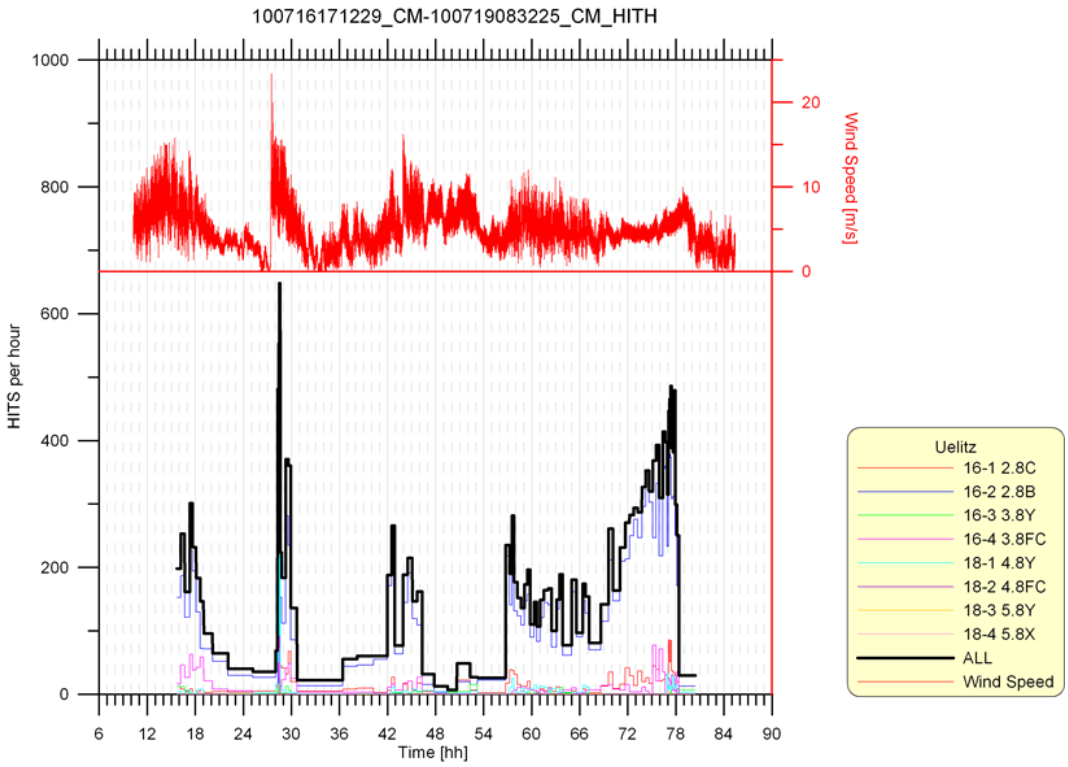


Abbildung 6.2.4-10: Windgeschwindigkeit und akustische Emissionen pro Stunde über der Zeit, drehende Anlage NR 37,5 Uelitz

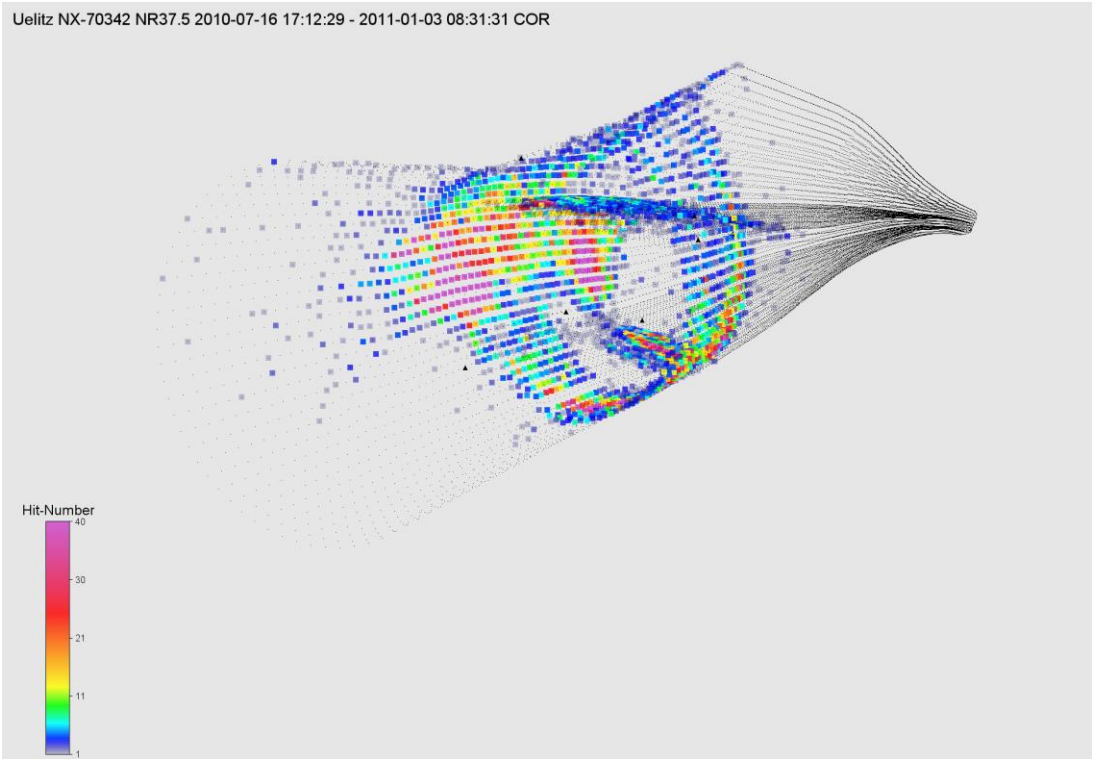


Abbildung 6.2.4-11: Ortungsplot der Schallemissionsquellen, drehendes Rotorblatt NR 37,5 auf der Anlage Uelitz, Blick auf die Druckseite, farbkodiert: Ereignisdichte

Abbildung 6.2.4-12 visualisiert den zeitlichen Verlauf der in der Nähe der Blattwurzel auftretenden Schallemissionsereignisse für einen Beobachtungszeitraum von ca. einem Jahr. Bei diesem Ortungsplot der Schallemissionsprüfung wurde als Parameter das Mittel der Zeitdifferenzen aller im spezifischen Volumenelement aufgetretenen Schallemissionen farbkodiert. Wie bereits in Abbildung 6.2.4-11 zeigt sich eine von der Schleppkante des Rotorblatts ausgehende Häufung von Schallemissionsquellen auf der Saugseite des Blattes. Langfristige Veränderungen der Lage von Schallemissionsquellen in dieser Zone deuten auf einen Schädigungsfortschritt von der Blattwurzel zur Blattspitze hin. Bei einer Inspektion des Blattes am 3.5.2012 wurde beim Blattradius R=9,5 m ein Hinterkantenanriss festgestellt. Dieser Schaden liegt zwar außerhalb des instrumentierten Bereiches, die zeitliche Verschiebung der Lage von Schallemissionsquellen deutet aber auf Spannungsumlagerungen im Blatt durch die Rissentwicklung hin.

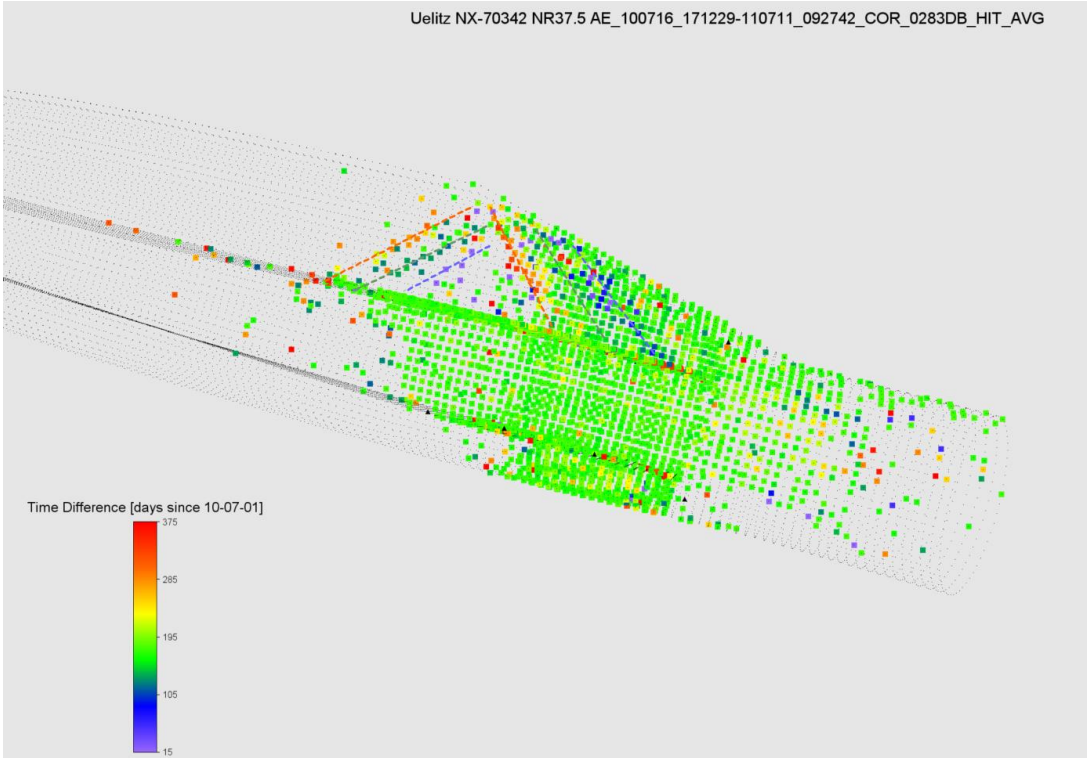


Abbildung 6.2.4-12: Ortungsplot der Schallemissionsquellen, drehendes Rotorblatt NR 37,5 auf der Anlage Uelitz, Blick auf die Saugseite, farbkodiert: Zeit seit Versuchsstart (Mittelwert der Zeitdifferenzen aller im Volumenelement aufgetretenen Schallemissionen)

Aufgrund von Hinweisen des IZFP-D aus den Schallemissionsmessdaten wurde von Nordex eine Inspektion des instrumentierten Rotorblattes an der Pilotanlage im Feld durchgeführt. Auf folgende auffällige Bereiche wurde von IZFP-D hingewiesen:

- Nasenkantensteg, Saugseite, Radius 4,1 bis 4,6 m
- Nasenkantensteg, Saugseite, Radius 5,7 bis 5,9 m
- Nasenkantensteg, Druckseite, Radius 4,1 m
- Endkantensteg, Druckseite, Radius 4,0 bis 4,7 m

Hiervon ausgehend lag das Hauptaugenmerk der Blattbesichtigung NR 37,5 im Wesentlichen auf dem Stegbeginn, aber auch auf der Hinterkante im Bereich R 8 m – 10 m.

Es wurden im Inneren des Rotorblattes visuell und durch Abklopfen die Verklebungen der Stege und der Hinterkante untersucht. Dabei wurde auf Rissbildung im Besonderen im Bereich der Hinterkante und der Gurte geachtet. Es wurden die Übergänge zu den Hauptgurten, die Positionen der Stege und die Verarbeitung der Innenklebewinkel überprüft. Eine Inspektion war nur in der Mittelkammer bis ca. R 15 m und der Hinterkantenkammer bis ca. R 12 m möglich.

An den o. g. Positionen, an denen Schallemissionen detektiert wurden, sind keine strukturrelevanten Schäden entdeckt worden. Abbildung 6.2.4-13 zeigt den Stegbeginn auf der Saugseite.

Abbildung 6.2.4-13: Stegbeginn (hinterkantenseitig) bei R 4,2 m auf der Druckseite

Aufgrund der Hinweise vom IZFP aus ihren Messergebnissen wurden zwar Schadensindikatoren in Form von hellen Stellen an den Ansätzen des HKS und des NKS gesichtet, diese erscheinen jedoch nicht strukturrelevant.

6.3 Verfahrensentwicklung

Das Kapitel Verfahrensentwicklung handelt vornehmlich von der Entwicklung jener Algorithmen, die

- die Vielzahl der Messdaten aus AE, AU und OMA, im Folgenden als Monitoringdaten bezeichnet, den unterschiedlichen Anlagenzuständen wie z. B. Pitchwinkeln, Generatorleistung oder der Drehzahl zuordnen. Letztere werden zusammenfassend als Betriebsdaten bezeichnet. Dazu gehören auch die von der WEA gemessenen Umweltdaten wie z. B. die Windgeschwindigkeit;
- die große Menge der Monitoringdaten filtern und nur die für die Weiterverarbeitung relevanten speichern;
- Veränderungen der Monitoringdaten, die ihre Ursache z. B. in Veränderungen der Betriebsführung (z. B. Verstellen des Pitchwinkels) oder von Umgebungseinflüssen (z.B. höhere Temperatur) haben, von solchen Veränderungen der Messdaten unterscheiden, die von einem sich entwickelnden Schaden (z.B. Riss einer Klebeverbindung) herrühren. Das Erkennen dieser sog. EOCs (environmental and operational conditions) und die klare Trennung von Schäden ist eine wesentliche Aufgabe des SHM-Systems;
- Rückschlüsse auf den Zustand des Rotorblattes zulassen;
- die Monitoringdaten der unterschiedlichen Verfahren zueinander in Beziehung bringen;
- zu einer begründeten Aussage über den Zustand des Rotorblatts und damit zu einer Strukturbeurteilung kommen.

Voraussetzung der Systementwicklung waren die mit Hilfe der entwickelten Systeme (Sensoren, Knoten usw.) bei den Versuchen gewonnenen Mess- bzw. Monitoringdaten.

Die Kriterien zur Strukturbeurteilung durch das SHM Wind-System hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit bzw. ihres Schädigungszustands orientieren sich an den Stufen der Schadensidentifikation nach RYTTER (1993):

Stufe 1: Schadensdetektion
Stufe 2: Schadenslokalisation
Stufe 3: Bestimmung des Schadensausmaßes
Stufe 4: Prognose der Restlebensdauer

In der Stufe 1 meldet die Schadensidentifikationsmethode, ob ein Schaden entstanden ist. Die 2. Stufe gibt Auskunft über die Position des Schadens in der Struktur. Stufe 3 ermittelt zusätzlich das Ausmaß und die Art des Schadens. Wie lange die Struktur weiter betrieben werden kann, wird von den Algorithmen der 4. Stufe bestimmt. In SHM Wind wird versucht, für Rotorblätter von WEAs die Identifikationsstufen 1 bis 3 abzudecken, Stufe 4 setzt ein Modell für die Gesamtlebensdauer eines Rotorblattes voraus und ist damit eine Aufgabe für zukünftige Forschungsprojekte. Die folgende Matrix entwickelt RYTTERs Klassifizierung weiter und überträgt sie auf SHM Wind. Das SHM-System selbst ist ein multivariates Verfahren, das sich in seiner Endausbaustufe auf drei Messverfahren stützt.

Während mit allen drei Messmethoden Schadensereignisse auf unterschiedlichen Ebenen Schäden von kleinen, lokal begrenzten bis zu globalen Ausmaßen erkannt werden können, ist die Beurteilung der Tragfähigkeit des Rotorblattes der OMA vorbehalten. Dafür werden die gemessenen Modaldaten herangezogen und ausgewertet.

Tabelle 6.3-1 stellt die unterschiedlichen Aufgaben der drei Messmethoden dar, die von der lokalen Überwachung einzelner hochbeanspruchter Teile des Rotorblattes über die Schadenslokalisierung bis hin zur Entscheidung über die globale Tragfähigkeit des Blattes reichen und sich gut ergänzen. Die Messverfahren sind:

- Messung der Betriebsschwingungen von Rotorblättern mit Hilfe der Operational Modal Analysis, OMA
- Aufzeichnung der Schallemissionen, die bei der Schadensentwicklung gemessen werden mit Hilfe der Schallemissionsanalyse bzw. der Acoustic Emission, AE
- Aktive Ultraschallüberwachung durch geführte Wellen (Lambwellen) im Zuge von Acousto-Ultrasonics, AU

	Acoustic Emission, AE	**Acousto-Ultrasonics, AU**	**Operational Modal Analysis, OMA**
Schadensdetektion	**X**	**X**	**X**
Verfahrensart	integral	diskret	integral
Schadensart	Kleine Einzelschäden im gesamten Blatt, z. B. Faserriss bzw. Riss einer Verklebung (Burst) oder Hagelschlag (Hit)	Kleine und große Schäden auf den Übertragungswegen zwischen Sender und Empfänger (Risse, Delamination, Oberflächenschaden	Alle größeren Veränderungen von Steifigkeiten, Massen und Dämpfung im gesamten Blatt
Schadenslokalisation	**X**	x	
Ausdehnung des Schadens	**X**	x	Alle Schäden > Schwellenwert, definiert durch POD
Beeinträchtigung der Tragfähigkeit			**X**
Restlebensdauer mit Bezug zur Tragfähigkeit			*x plus Lebensdauermodell plus FEM-Simulation*

Tabelle 6.3-1: Aufgabenverteilung der unterschiedlichen Messmethoden in SHM Wind.
X: Hauptaufgabe x: Zusatzaufgabe

Die Auswertealgorithmen helfen einerseits, unüberschaubare „Datengräber“ zu vermeiden, und andererseits bereiten sie die Monitoringdaten in einer Weise auf, dass Aussagen über den Blattzustand möglich werden. Erst durch die Auswertealgorithmen wird aus dem Mess- ein SHM-System!

Zunächst sollen das aktive und passive Ultraschallverfahren, also Acousto-Ultrasonics und Acoustic Emission dargestellt werden. Diese Verfahren wurden beim FhG IZFP in Dresden entwickelt.

Im darauffolgenden Kapitel wird die von Wölfel Beratende Ingenieure bearbeitete Operational Modal Analysis dargestellt.

6.3.1 Ultraschallverfahren, IZFP-D

6.3.1.1 Allgemeine Anforderungen

Zur Identifikation von lokalen Schadensbildern kommen für das SHM-System ultraschallbasierte Verfahren zum Einsatz. Grundlegend für das SHM-System ist ein Sensornetzwerk, das das ganze Rotorblatt überzieht und die Lokalisation des Schadens ermöglicht. Um Fehlalarme zu vermeiden und eine genauere Beschreibung des Schadens zu liefern, werden zwei voneinander unabhängige Messmethoden angewendet:

a. Schallemissionsanalyse oder Acoustic Emission, AE: Die meisten Schädigungsvorgänge sind mit Schallabstrahlung verbunden. Diese Schallereignisse können durch Signalverarbeitung klassifiziert werden. So können unterschiedliche Schädigungsprozesse im gesamten Rotorblatt erfasst, lokalisiert und quantifiziert werde. Voraussetzung ist der Dauereinsatz dieser Messmethode.

b. Acousto-Ultrasonics, AU: Bei diesen Messungen werden Ultraschallwellen aktiv in das Rotorblatt gesendet und Veränderungen des Übertragungsweges zwischen Sender und Empfänger detektiert. Deshalb eignet sich diese Methode besonders zur Überwachung der aerodynamischen Hülle des Blattes, auf der sich z. B. aus kleineren Schäden, in die Wasser eindringen kann, über die Zeit große Schäden entwickeln können. Eine weitere Aufgabe der aktiven Ultraschallverfahren ist die lokale Überwachung hoch belasteter Regionen im gesamten Rotorblatt.

Die Kompositmaterialien besitzen eine sehr hohe innere akustische Dämpfung. In größeren Abständen zur Signalquelle von einigen Metern ist in der Regel nur noch der amplitudenstarke asymmetrische Plattenwellen-Mode A0 zu beobachten. Abbildung 6.3.1-1 zeigt die Abhängigkeit der Gruppengeschwindigkeit und der Signalamplitude vom Sensorabstand von der Signalquelle nach Acousto-Ultrasonic-Messungen mit aktiv eingebrachtem Ultraschall auf einem Steg in Sandwichkonstruktion (GFK-Kunstharzschaum/Balsaholz-GFK). Aus dieser Darstellung resultieren folgende Anforderungen an das Ultraschall-Messsystem:

Aufgrund der hohen intrinsischen Dämpfung der Kompositwerkstoffe von bis zu 10 dB/m können mit dem großmaschigen Sensornetz nur niederfrequente Anteile der Plattenwellen detektiert werden, vorzugsweise deren amplitudenstarke A0 Komponente. Eine hohe Empfindlichkeit der Sensoren in diesem Frequenzbereich sowie eine hohe Dynamik der A-D-Wandler müssen dieser Tatsache Rechnung tragen.

Wegen der Dispersion des asymmetrischen Wellenmodes und der Geschwindigkeitsinhomogenitäten aufgrund wechselnder Materialdicke, -ausbildung und –anisotropie wird die Ortungsgenauigkeit der Schallemissionstests eingeschränkt, eine entsprechende Fehlerbewertung muss in den Ortungsalgorithmus integriert sein.

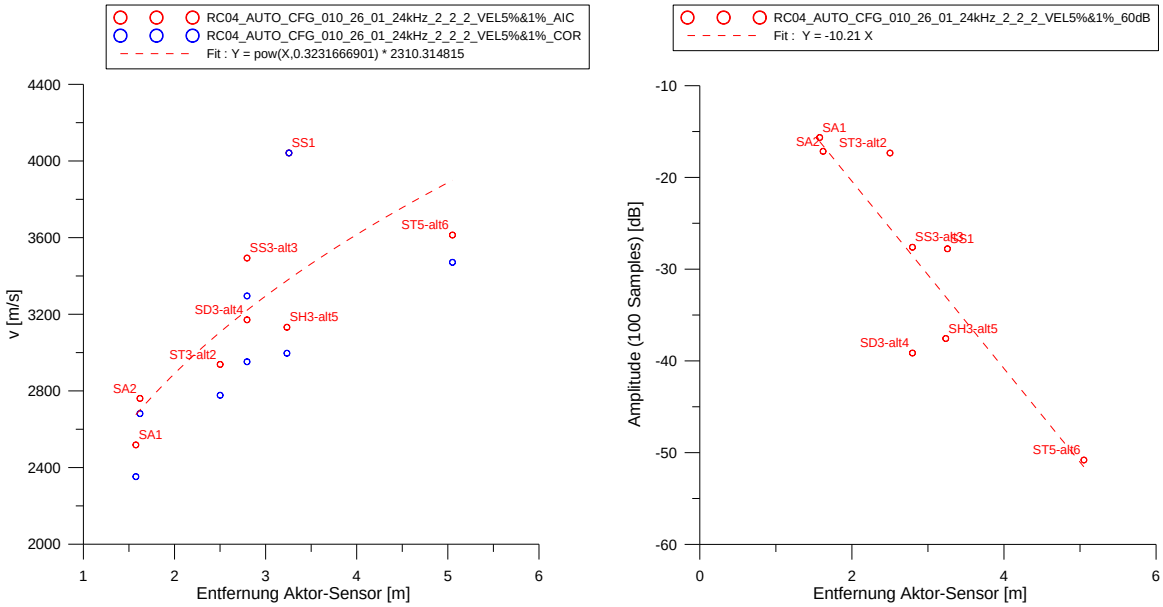


Abbildung 6.3.1-1: Abhängigkeit der Gruppengeschwindigkeit (links) und Signalamplitude (rechts) vom Sensorabstand von der Signalquelle bei aktiven Messungen mit einem Raised-Cosinus-Sendesignal (RC04) von 24 kHz Mittenfrequenz, Messungen auf einem Steg in Sandwichkonstruktion (GFK-Kunstharzschaum/Balsaholz-GFK), Geschwindigkeitsanstieg mit der Aktor-Sensor-Entfernung durch den Einfluss der Refraktion an den benachbarten GFK-Gurten, die höhere Schallgeschwindigkeiten aufweisen

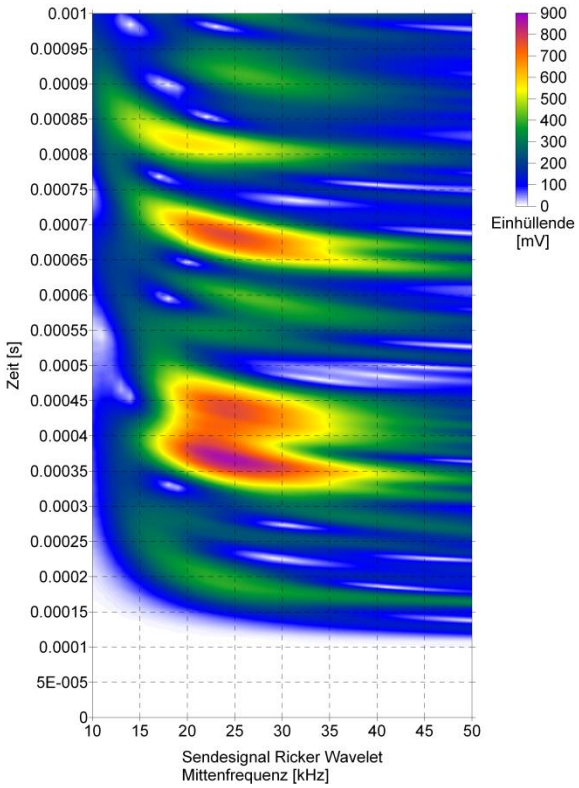


Abbildung 6.3.1-2: Amplitude des Empfangssignals des DuraAct Wandlers vom Typ P-876.A15 in Abhängigkeit von der Mittenfrequenz eines schmalbandigen Sendesignals (Ricker Wavelet) konstanter Amplitude, Messungen auf einem Steg in Sandwichkonstruktion (GFK-Kunstharzschaum / Balsaholz-GFK)

Im Rahmen von Sende-Empfangs-Messungen (AU) wurden verschiedene Piezo-Wandlertypen der Projektpartner PIC und PI getestet, um einen Sensor zu finden, der bezüglich seiner aktorischen und sensorischen Leistungsmerkmale optimal an die Kompositmaterialien angepasst ist. Von allen Sensoren erreichte der DuraAct Wandler vom Typ P-876.A15 die höchste Sendeleistung. Wie die Abbildung 6.3.1-2 zeigt, besitzt dieser Sensor im bevorzugt nutzbaren Frequenzbereich um 25 kHz auch eine gute Sensitivität, sodass er gleichzeitig für die aktiven AU-Messungen als Aktor und Sensor als auch für die Schallemissionstests (AE) genutzt werden kann.

6.3.1.2 Blattstruktur und Sensoranordnung

Im Projekt wurden dynamische Blatttests von Rotorblättern vom Typ NR 37,5 auf Testständen der IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH in Dresden und der Nordex Energy GmbH in Rostock mit AU- und AE-Tests begleitet.

Das in Abbildung 6.3.1-3 dargestellte Konzept für die Anordnung der akustischen Sensoren auf dem Versuchsblatt NR 37,5 wurde in SHM Wind erarbeitet.

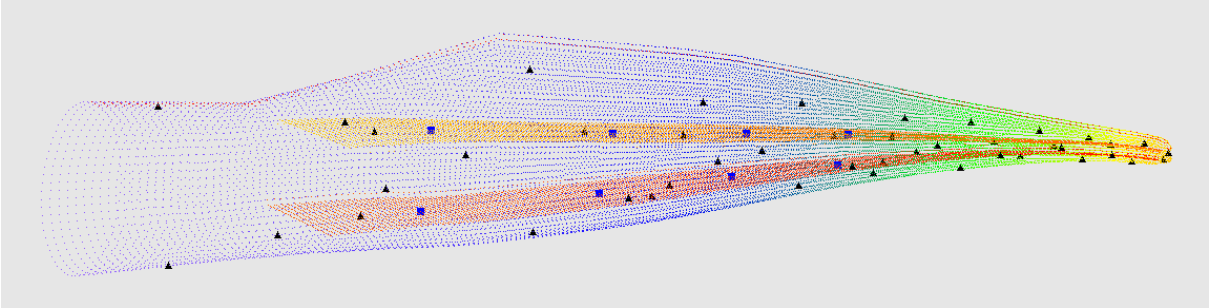


Abbildung 6.3.1-3: Anordnung von 52 akustischen Sensoren (schwarze Dreiecke und blaue Quadrate) im Rotorblatt vom Typ NR 37,5

Zur Berechnung der Quellorte der akustischen Emissionen in ebenen Koordinaten wurden die in Abbildung 6.3.1-4 dargestellten Ortungsebenen aus Abwickelungen des 3D-Modells des Rotorblatts erzeugt. Diese sind für das AE-Verfahren sowohl zur Berechnung der Quellorte der akustischen Emissionen in ebenen Koordinaten als auch zur Umsetzung der ebenen Koordinaten der Quellorte in das Raummodell notwendig. Für die Laufwege des AU-Verfahren gilt dies analog. Wie das in Abbildung 6.3.1-5 dargestellte Beispiel für die Ortungsebene 3 der Schallemissionsprüfung auf der Außenhülle des Rotorblattes zeigt, wurde mit der optimierten Sensoranordnung ein Dreiecksnetz realisiert, das eine homogenere Ortungssensitivität besitzt.

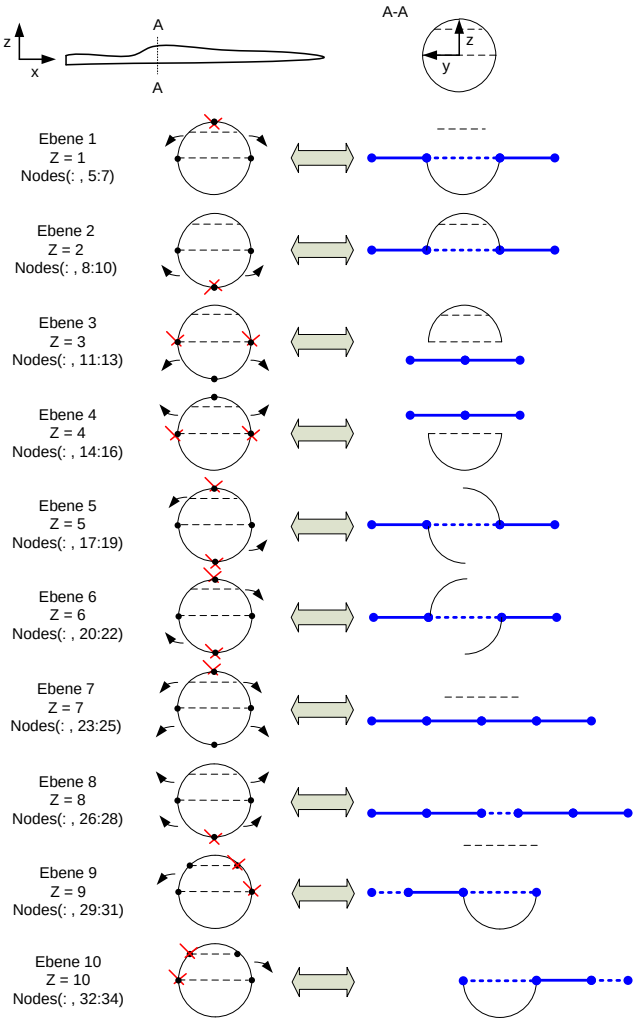


Abbildung 6.3.1-4: Ortungsebenen aus Abwickelungen des 3D-Rotorblattmodells

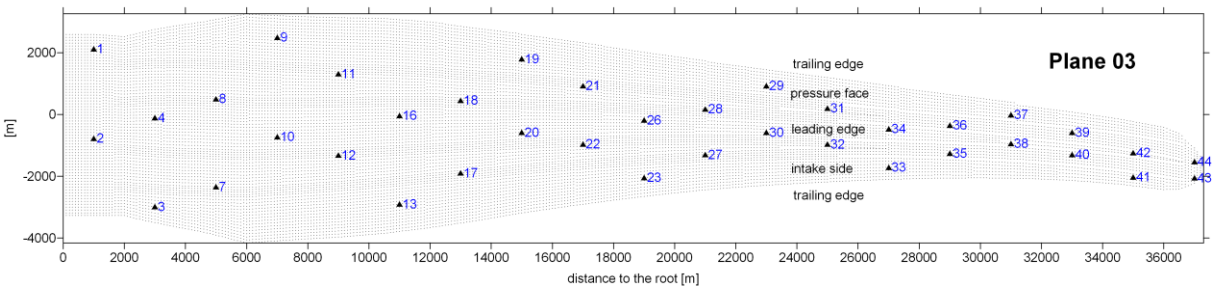
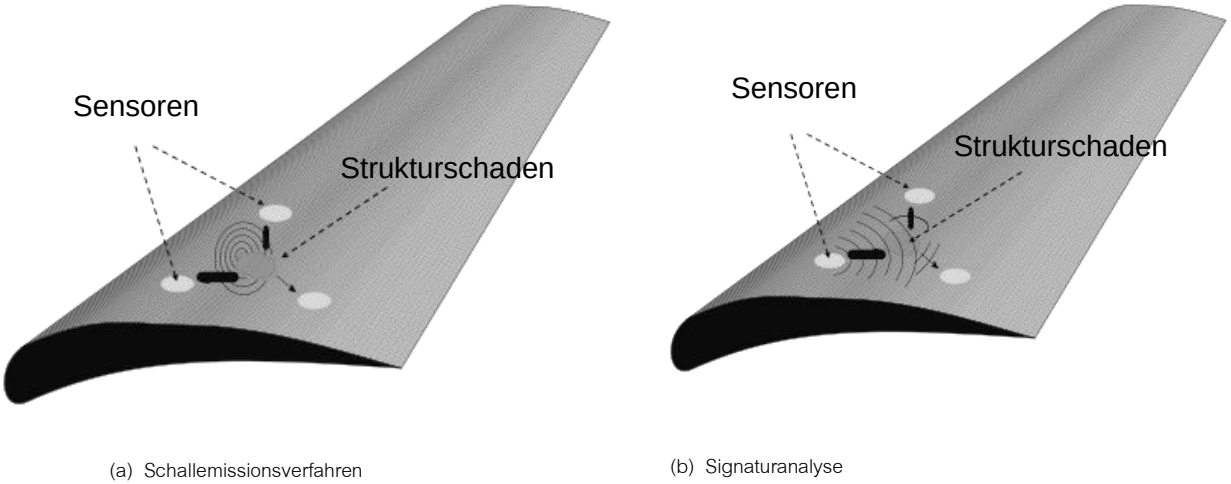


Abbildung 6.3.1-5: Anordnung der akustischen Sensoren (schwarze Dreiecke) in der Ortungsebene 3 der Schallemissionsprüfung auf der Außenhülle des Rotorblattes NR 37,5

6.3.1.3 Acousto-Ultrasonics, AU

6.3.1.3.1 Allgemeine Anforderungen und Wirkprinzip

Bei diesem Messprinzip handelt es sich um ein aktives Ultraschallverfahren, bei dem der als „gut“ eingestufte Ausgangszustand des Prüflings ermittelt und dieser anschließend nach bestimmten Belastungszyklen oder Zeitabständen mit dem jeweiligen „Ist“-Zustand verglichen wird. Dazu werden in das Überwachungsobjekt durch einen als Aktor fungierenden Ultraschallwandler spezifisch Ultraschallwellen eingebracht. Diese Wellen durchlaufen den Prüfling und interagieren, je nach Wellenlänge und Wellenmode, unterschiedlich stark mit der Fehlstelle und werden von den übrigen, als Sensoren genutzten Ultraschallwandlern empfangen. Die die Strukturzustände charakterisierenden Signale werden anschließend miteinander verglichen und Signaländerungen über Schadensindikatoren dargestellt. Dieses Verfahren wird im Folgenden als Signaturanalyseverfahren bezeichnet und ist im englischsprachigen Raum als Acousto-Ultrasonics eingeführt.



(a) Schallemissionsverfahren (b) Signaturanalyse

Abbildung 6.3.1-6: Verfahren zur Zustandsüberwachung mit geführten Wellen [Schubert, L., 2012]

Signaländerungen können sowohl infolge Schadenseintritts als auch durch Änderung der Umgebungsbedingungen auftreten. Es ist daher notwendig, alle Umgebungsbedingungen während der Tests aufzuzeichnen und die Einflüsse derselben auf die Signale zu kompensieren.
Als Schadensindikator wurden der Korrelationskoeffizient und das Hüllkurvenmaximum im Auswertebereich gewählt.

6.3.1.3.2 Zeitfenster und Signalformen

Die Bewertung der Signaländerungen erfolgt in zeitlichen Fensterabschnitten, die in Abhängigkeit von der angeregten Frequenz und der spezifischen Signalpfade festgelegt wurden. In vorhergehenden Versuchen zeigte sich, dass insbesondere die Mittenfrequenz von f=24 kHz gute Ausbreitungseigenschaften in den Kompositmaterialien besitzt. Für die Anregung wurde ein RC4-Signal (raised cosined, 4 Perioden) genutzt. Insgesamt sind 2912 theoretische Sende-Empfangs-Strecken möglich, wovon jedoch nur ca. 700 Pfade (blattabhängig) zur Auswertung genutzt wurden. Die übrigen Pfade entfielen aufgrund zu großer Sender-Empfänger-Abstände.

Abbildung 6.3.1-7 zeigt ein typisches Empfangssignal an einem Wandler. Zum Finden der Auswertebereiche wurde das Empfangssignal (blau dargestellt) gefiltert und dessen Hüllkurve (rot dargestellt) berechnet. Anschließend wurde der erste Maximalwert im Signal ermittelt, der den ersten Wellenberg kennzeichnet. Ausgehend von diesem wurden die in positiver und negativer Zeitrichtung gesehenen nächstliegenden Minima ermittelt (mit blauen vertikalen Strichen dargestellt). Dieser Bereich kennzeichnet den Durchlassbereich des Zeitfensters, in dem das Zeitsignal ungedämpft dem späteren Auswertealgorithmus zur Verfügung steht. Die roten vertikalen Linien sind die Anfangs- bzw. Endbereiche des Zeitfensters, in denen Signalanteile entsprechend einer

Hanningfenstercharakteristik gedämpft werden. Damit werden rechteckige Flanken im Signal vermieden.

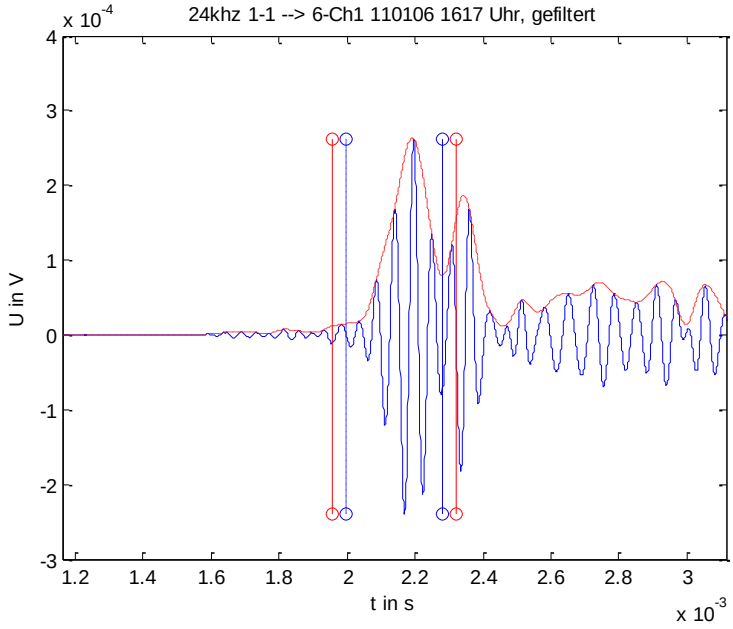


Abbildung 6.3.1-7: Empfangssignal (blau) am Wandler 6-1 nach Anregung des Wandlers 1-1 mit RC4, f = 24 kHz, Hüllkurve (rot gestrichelt) und Zeitbereiche für die Signalauswertung (vertikale Linien)

6.3.1.3.3 Temperaturkompensation

Zur Abschätzung des Einflusses der Temperatur wurden entsprechende Voruntersuchungen an einer typischen Faserverbundstruktur im Klimaschrank durchgeführt. Nachstehende Abbildung 6.3.1-8 stellt die empfangenen Zeitsignale unter Temperaturvariationen von -30 °C ≤ T ≤ 85 °C dar. Aufgrund des enormen Einflusses der Temperatur auf Laufzeit und Amplitude der Wellenpakete ist es notwendig, diesen zu kompensieren. Um diese Kompensation zu ermöglichen, wurde in Zusammenarbeit mit PI ein Mikrokontroller (auf dem Sensorknoten) spezifiziert, der einen integrierten Temperatursensor besitzt. Es werden Temperatursensoren auf jedem Sensorknoten benötigt, da die Temperatur auf jedem Sende-Empfangs-Pfad unterschiedlichen Einfluss zeigt.

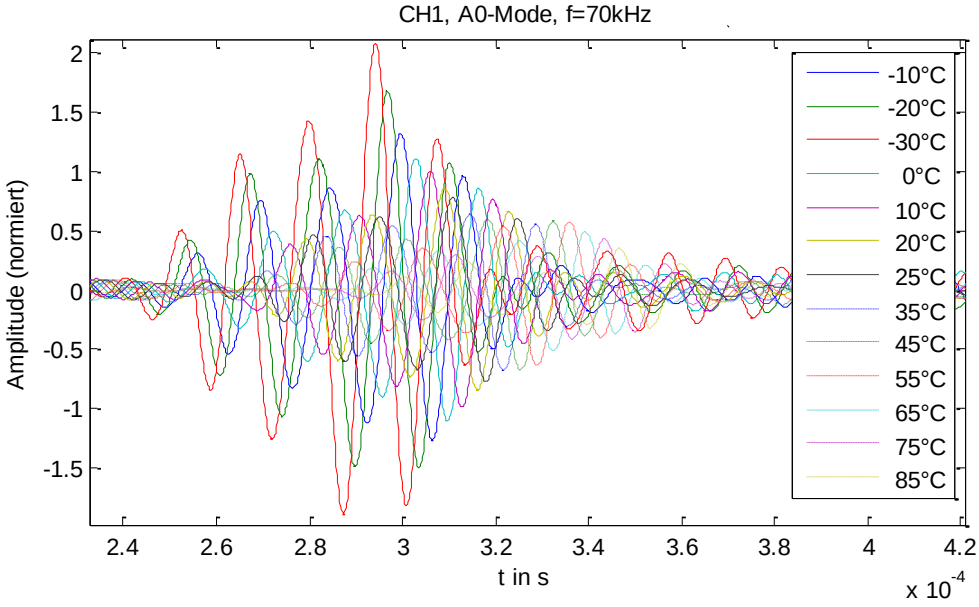


Abbildung 6.3.1-8: Variation der Zeitsignale der Acousto-Ultrasonic-Messungen für eine Faserverbundstruktur bei variierten Temperaturen

Zur Beantwortung der Frage, inwiefern für jeden Sensorknoten die Temperatur separat gemessen werden muss, wurden Daten des Vorgängerprojektes „CMS“ (die während des Blatttests beim Projektpartner IMA entstanden) analysiert.

Die nachfolgende Abbildung 6.3.1-9 zeigt im linken Teilbild für jeden Sende-Empfangs-Pfad die temperaturbedingte Zeitverschiebung der Wellenmoden. Im rechten Teilbild ist die Zeitverschiebung bei bekanntem Sender-Empfänger-Abstand als Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten c_{gr} dargestellt. Es ist in beiden Darstellungen eine große Streuung sowohl zwischen den verschiedenen Anregungsfrequenzen (24 kHz=blau, 100 kHz=rot) als auch zwischen den Ausbreitungspfaden erkennbar, die eine separate Temperaturaufnahme bedingen.

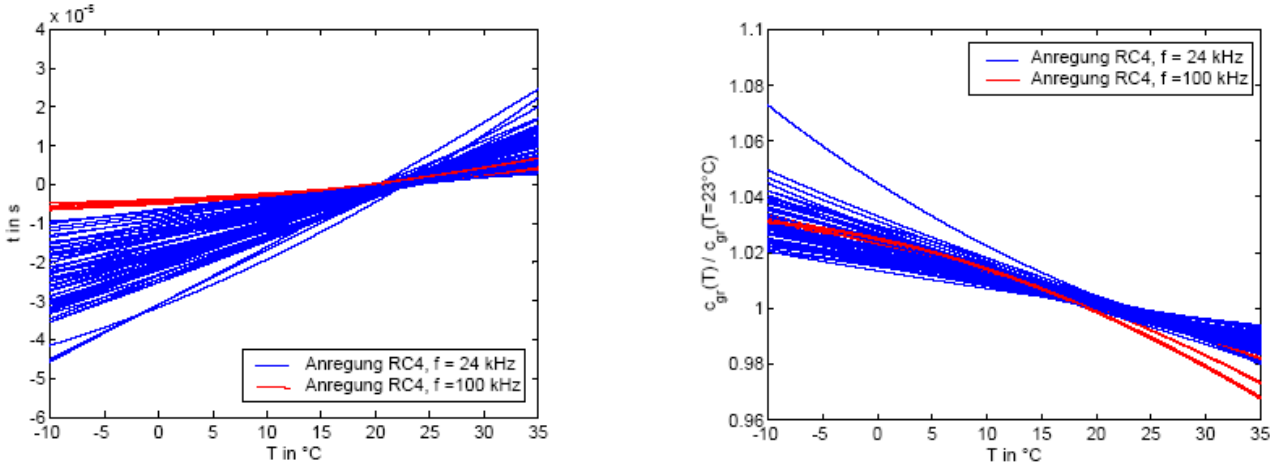


Abbildung 6.3.1-9: links: Temperaturbedingte Zeitverschiebung der Wellenmoden für jeden Sende-Empfangs-Pfad, rechts: Zeitverschiebung bei definiertem Sender-Empfänger-Abstand als Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten c_{gr}.

Nachfolgend wird das im Rahmen einer Dissertation [Schubert, L.] entwickelte Verfahren zur Kompensation der Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die Gruppengeschwindigkeit c_{gr} und die Amplitude der Hüllkurve verwendet, das dort mit dem englischen Namen „time domain based compensation technique of environmental influences“ (TDect) eingeführt wurde.

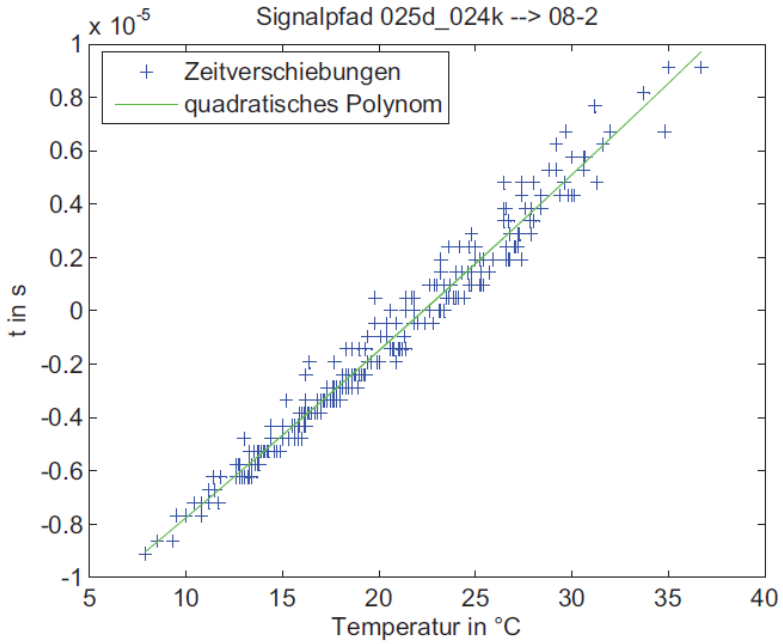


Abbildung 6.3.1-10: Typische Zeitverschiebungen eines Sende-Empfangs-Pfades eines Rotorblattsignalpfades

Zur Temperaturkompensation wurden 280 Trainingsdatensätze je Signalpfad ausgewählt. Fehlerhafte Daten wurden aussortiert. Aus diesen Trainingsdatensätzen wurde jeweils der erste einlaufende Wellenmode extrahiert.

Nach Durchführung der Temperaturkompensation entsprechend [Schubert, L., 2012] steht je Sende-Empfangs-Pfad ein Korrekturpolynom zur Verfügung. Abbildung 6.3.1-10 zeigt typische Zeitverschiebungen eines Sende-Empfangs-Pfades, wie sie infolge von Temperaturänderungen entstehen können. Wenn diese nicht kompensiert werden, können Falschanzeigen des Schadensindikators (Abbildung 6.1.3-11) die Folge sein.

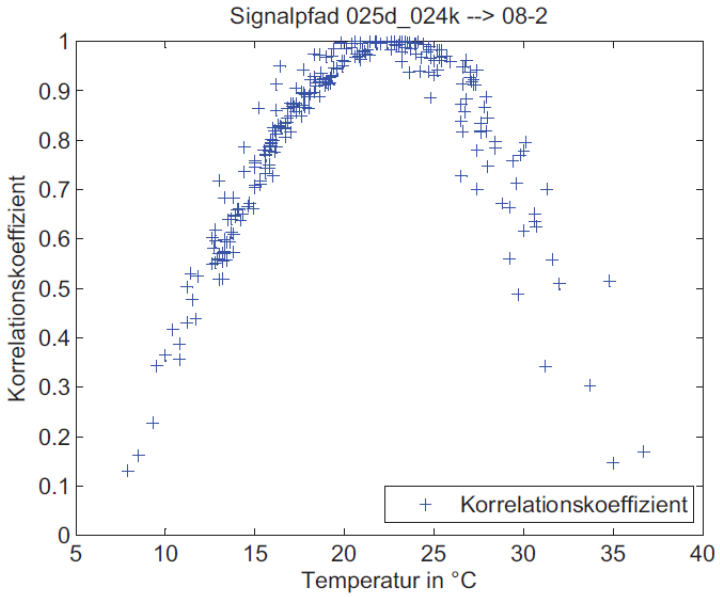


Abbildung 6.3.1-11: Einfluss der Temperatur auf den Schadensindikator

Nach erfolgter Temperaturkompensation ist der Wertebereich des Korrelationskoeffizienten fast vollständig nutzbar, vgl. Abbildung 6.1.3-12.

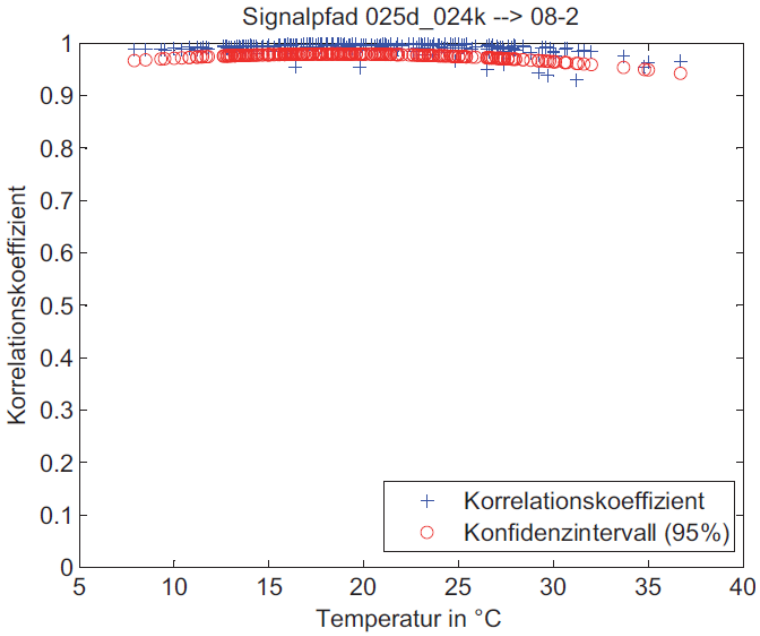


Abbildung 6.3.1-12: Korrelationskoeffizient nach Temperaturkompensation in Abhängigkeit der Temperatur

6.3.1.3.4 Ergebnisse der Ermüdungsversuche

Bei den Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Strukturermüdung eine Änderung akustischer Signaleigenschaften bewirkt. Abbildung 6.3.1-13 zeigt dies beispielhaft für einen Signalpfad.

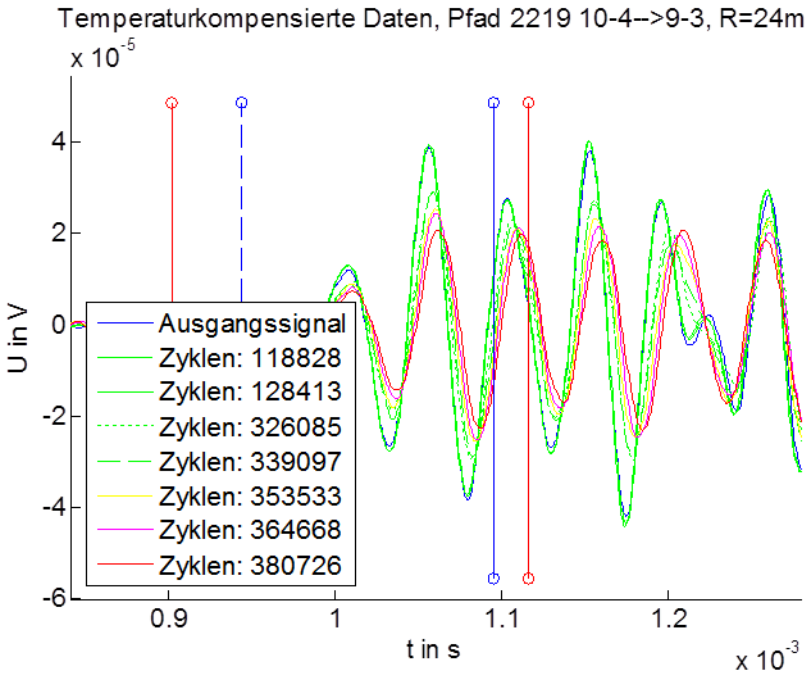


Abbildung 6.3.1-13: Auswirkung des Ermüdungsversuches auf die Signale eines Sende-Empfangs-Pfades
01-4 -> 9-3, blau – Signal im Ausgangszustand, grün – Signale geringer bis mittlerer Zyklenanzahl, gelb bis rot – Signale hoher Zyklenanzahl

Mit steigender Zyklenanzahl und damit fortschreitender Blattschädigung sinkt die Amplitude des Empfangssignals. Ebenfalls ist eine Verzögerung der Signale erkennbar. Es eignen sich damit sowohl amplituden- als auch laufzeitbasierte Schadensindikatoren. Die Zusammenschau der Zustände mehrerer Signalpfade gibt räumliche Hinweise auf geschädigte Blattbereiche, dargestellt beispielhaft an den Ergebnissen aus 2 Blattermüdungsversuchen in Abbildung 6.3.1-14 und Abbildung 6.3.1-15.

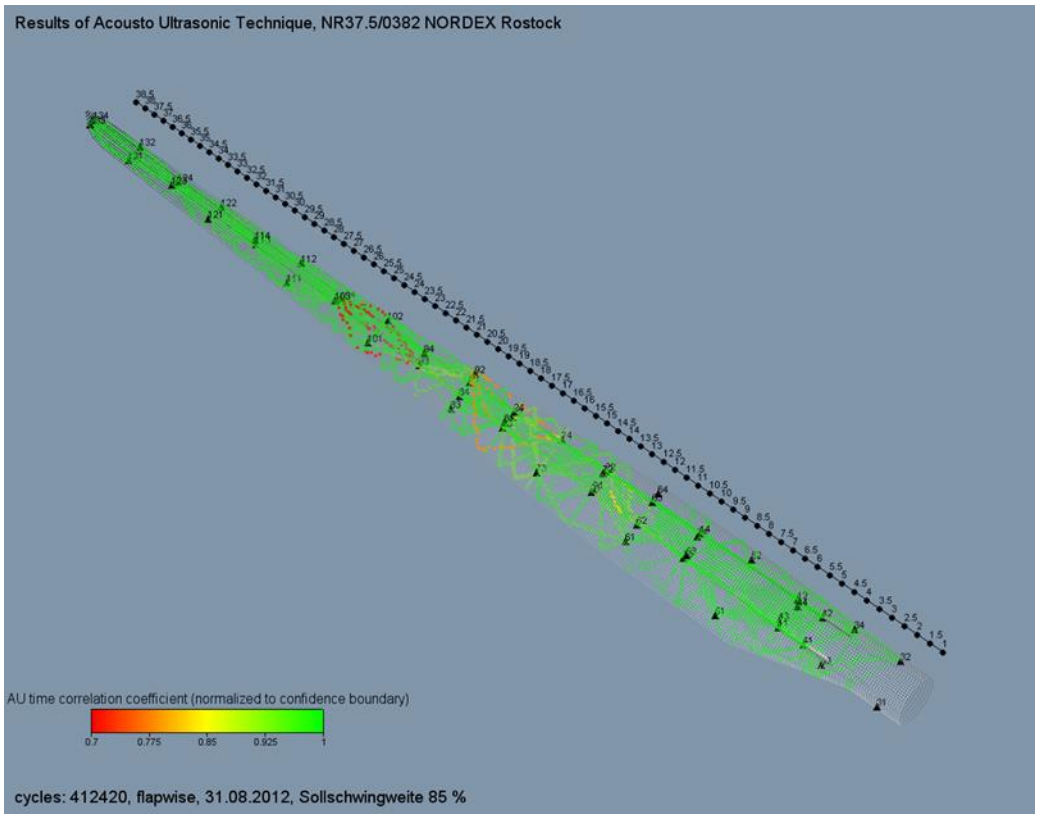


Abbildung 6.3.1-14: Ergebnisse des AU-Verfahrens, Rotorblatt NR 37,5/0382, Anregung flapwise, Saugseite, farbcodiert ist der auf die Temperaturvertrauensgrenze normierte Korrelationskoeffizient im Auswertefenster jedes Sende-Empfangs-Pfades (Pfadlänge ≤ 5 m)

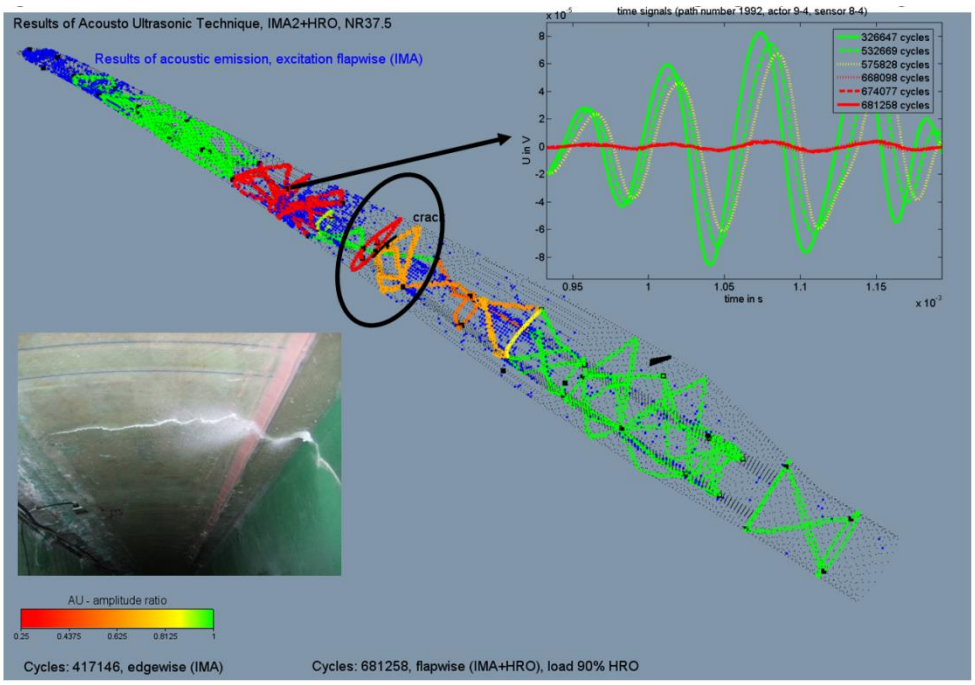


Abbildung 6.3.1-15: Ergebnisse des AU-Verfahrens, Rotorblatt NR 37,5/0421, Anregung flapwise, Saugseite, farbcodiert ist hier die Amplitude der Hüllkurve im Auswertefenster jedes Sende-Empfangs-Pfades (Pfadlänge ≤ 4 m) und überlagerte Schallemissionsereignisse (blau)

6.3.1.4 Akustische Emission

Die Schallemissionsanalyse oder Acoustic Emission (AE) wird seit Jahren erfolgreich in der Materialprüfung eingesetzt, um schnell und sicher Bereiche zu orten, die infolge einer äußeren Belastung eines Bauteils Schall emittieren, z. B. durch Risswachstum. Die Bewertung der detektierten Schallemissionen erlaubt im Nachhinein die zielgerichtete Untersuchung mit konventionellen ZfP-Verfahren. Als passives Verfahren genügen der Schallemissionsanalyse relativ wenige Sensoren, um ein großes Bauteilvolumen integral zu erfassen. Wesentlich ist das Vorhandensein einer äußeren Belastung, damit Schadensbereiche Schallemissionen emittieren. Durch Überschreiten von lokalen Festigkeitseigenschaften kommt es z. B. bei Rissbildung oder –wachstum zur Freisetzung von elastisch gespeicherter Energie (auch bei Reibung und Strukturveränderung), die u.a. in Wärme und Schall gewandelt wird. Jedes Material leitet diese Wellen mit einer materialspezifischen Geschwindigkeit weiter. Die Dämpfung dieser akustischen Wellen ist ebenfalls materialspezifisch und zudem beeinflusst von Umweltfaktoren wie Feuchtigkeit oder, bei heterogenen Materialen wie CFK-Laminaten, auch von den einzelnen Komponenten wie Epoxidharz und Kohlefaserlamelle. Der sich ausbreitende Schall wird von akustischen Sensoren aufgezeichnet. Aus der Laufzeit der Signale von den einzelnen schallemittierenden Quellen (aktive Risse, Verbundstörungen, Reibung) zu einer Vielzahl von Sensoren (mindestens drei bei ebener Ortung) kann auf die Position der aktiven Schädigung zurückgerechnet werden.

Im Verlauf von dynamischen Ermüdungstests von Rotorblättern erfolgte die Bewertung von Schallemissionsmessungen auf der Basis der Schallemissionsrate, der räumlichen Verteilung der akustischen Ereignisse und von Burstparametern wie beispielsweise von Energie und Frequenzinhalt der Burstsignale. In Abbildung 6.3.1-16 ist der prinzipiell zu erwartende Verlauf der Schallemissionsrate im Schädigungsverlauf von GFK-Materialien dargestellt. Im Unterschied zu metallischen Werkstoffen, bei deren Belastung Schallemissionen bis zum Überschreiten der vorangegangenen maximalen Belastung ausbleiben (Kaiser-Effekt nach Kaiser, J.; Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch; Dissertation, Technische Hochschule München; München 1950) treten bei Verbundwerkstoffen signifikante Schallemissionsereignisse bereits bei einer Belastung unter der vorangegangenen Maximallast auf. Dieser als Felicity-Effekt eingeführte Wirkmechanismus ist in der Hauptsache auf Reibungsvorgänge im vorgeschädigten Kompositmaterial zurückzuführen. Ein weiterer Vorteil von Faserverbundwerkstoffen ist es, dass Faserbrüche und Delaminationsprozesse sehr starke Schallemissionen erzeugen, weshalb die Schallemissionsprüfung bei Faserverbundbauteilen international auch besonders erfolgreich angewendet wird.

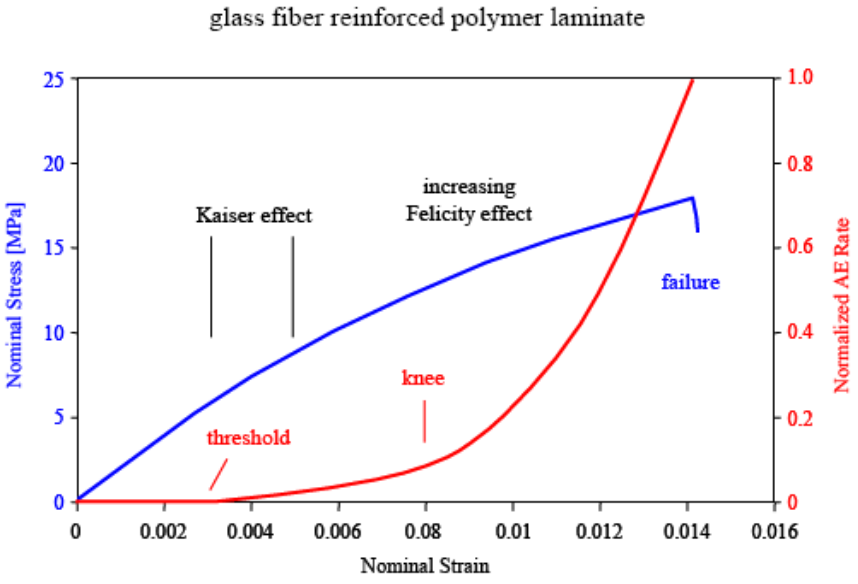


Abbildung 6.3.1-16: Prinzipieller Verlauf der Schallemissionsrate (rot) von GFK-Werkstoffen in Abhängigkeit von der Belastung, Verlauf der Nennspannung (blau), nach: Peter B. NAGY, University of Cincinnati, AEEM-727 lecture 4th part

Um die Auswertealgorithmen an die spezifischen Messbedingungen der Testphase des Schallemissionssystems anzupassen, wurden die vollständigen Signalformen auf CF-Karten gespeichert. Bereits im Rahmen der Signalvorverarbeitung erfolgt das Aussortieren elektromagnetischer Störimpulse über deren Einsatzzeiten und Auswahl der zu speichernden Kanäle in der Umgebung des Triggerkanals.

Die Off-Line-Verarbeitung umfasste in der Testphase die automatisierte Ersteinsatzbestimmung der Burst-Signale nach zwei Verfahren. Das ist zum einen das Akaike Informationskriterium (engl. Akaike's Information Criterion, AIC) – ein statischer Parameter, der die Grenze zweier Grundgesamtheiten aus der Signalstreuung bestimmt, und zum anderen die Korrelation von Signalfenstern. Die Lage des Signalfensters, das für beide Berechnungen notwendig ist, wird mit einer Effektivwertschwelle bestimmt, die sich automatisch an das Signallevel des Messkanals anpasst. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes hat sich eine Filterung der Messsignale vor der Ersteinsatzbestimmung der Bursts bewährt. Da schmalbandige niederfrequente Bursts zu bewerten sind, hat sich eine dynamische obere Bandbegrenzungsfrequenz, abhängig von der Mittenfrequenz des Nutzsignals bewährt. Die Tiefpassfilterung des AIC-Wertes beseitigt Nebenminima und erhöht so die Genauigkeit der Ersteinsatzbestimmung, insbesondere bei niederfrequenten Bursts. Die Einsatzzeiten beider Methoden der Ersteinsatzbestimmung werden nacheinander dem Ortungsalgorithmus übergeben. Vom Triggerkanal wurden nach einer Bandfilterung mit festen Grenzen von 1 bis 50 kHz folgende AE-Parameter gebildet:

- Burstdauer in Mikrosekunden;
- Amplitudenhöhe der einzelnen Hits (georteten Schallemissionsereignisse) in dB_{AE};
- absolute Energie in pJ (pico=10^{-12});
- mittlere Leistung im Burstfenster (> 5 % des maximalen Effektivwertes) in pW;
- mittlere Leistung in einem festen Fenster von 1024 Samples ab Burstbeginn in pW;
- Mittenfrequenz in kHz;
- höchster Frequenzanteil am Gesamtspektrum in dB.

Insbesondere auf einer drehenden Anlage überlagern elektromagnetische Störungen ständig die akustischen Nutzsignale. Ihr Einfluss kann erst mit Hilfe von Plausibilitätsbetrachtungen bei der planaren Ortung der Schallemissionsereignisse minimiert werden. Hits mit zu großen oder zu kleinen Laufzeitdifferenzen sowie einer zu kleinen Variationsbreite des AIC, die auf zu geringe Burstenergie hinweist, werden in diesem Prozess aussortiert. Im Rahmen der hyperbolischen Ortung selbst erfolgt eine Prüfung auf Singularität der Koeffizientenmatrix (und damit Lösbarkeit des Gleichungssystems) durch Prüfung der Pivot-Elemente.

6.3.1.4.1 SHM-gestützte Ermüdungstests

Im Rahmen von dynamischen Blatttests wurde die Schadensentwicklung von Rotorblättern mit akustischen Messungen begleitet. Auf dem IMA-Versuchsstand in Dresden erfolgten Ermüdungsversuche eines 37,5 m Rotorblattes, zuerst in Schwenkrichtung, danach in Schlagrichtung. Im Unterschied zu dem Anregungssystem auf dem Nordex-Gelände in Rostock, dass mit einem Unwuchterreger arbeitet, erfolgte die Anregung auf dem IMA-Versuchsstand in Dresden mit einem Feder-Masse-System in Resonanz, d.h. einem servohydraulischen Zylinder zur Krafterzeugung und einem Gummiseil zur Entkoppelung. Bei den Versuchen in Schwenkrichtung wurden mit dieser hydraulischen Anregung am IMA-Versuchsstand 50 % bis 90 % der Zielschwingweite erreicht (100 % der Regelgröße entsprachen 1700 µm/m am DMS beim Radius 9 m). Der Versuch in Schlagrichtung kam aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der Hydraulik nicht über 60 % der Zielschwingweite hinaus, sodass sich die Projektpartner entschieden, das instrumentierte Blatt auf den Versuchsstand auf dem Nordex-Gelände in Rostock zu verbringen. Der Versuch in Schlagrichtung wurde dort mit einem Unwuchterreger zur Krafteinleitung fortgesetzt.

Im Verlauf der dynamischen Ermüdungstests von NR 37,5 m Rotorblättern auf den Versuchsständen in Rostock und Dresden manifestierte sich die zunehmende Schädigung spezifischer Blattelemente im Ergebnis der beiden akustischen Verfahren Acoustic Emission Testing (AE) und Acousto-Ultrasonics (AU). Amplitudenänderungen oder Phasenverschiebungen in den Signalen der aktiven AU-Messungen treten räumlich in Bereichen erhöhter AE-Schallemissionsereignisdichte auf, was auf eine Schädigung der Gurt-Steg-Verklebung als Ursache von Folgeschäden in der aerodynamischen Hülle bei spezifischen Blattradien, insbesondere im Bereich der Schleppkantenverklebung, hinweist. Deutliche Änderungen in der akustischen Signatur der AU-Messungen fallen auch zeitlich mit dem gehäuften Auftreten von Schallemissionen zusammen. Am Teststandort Dresden erfolgten zusätzlich aktive Ultraschall-Messungen, bei denen nicht das zu entwickelnde Verfahren eingesetzt wurde. Vielmehr wurde das Rotorblatt mit Ultraschallköpfen normal zur Blattoberfläche abgescannt, um die Ursachen spezifischer Indikationen im Ergebnis der SHM-Verfahren zu verifizieren.

Abbildung 6.3.1-17 zeigt den Vergleich der während der Anregung in Schwenk- bzw. Schlagrichtung auf dem Versuchsstand in Dresden georteten Schallemissionen. Bei der Anregung in Schwenkrichtung wird die Endkante des Rotorblatts stark belastet. Die größte Häufung von Schallemissionsereignissen an der Endkante trat dabei in einem Abstand von X=18 m (Radius R=19 m) von der Blattwurzel auf. In diesem Blattbereich wurden mit der in Abbildung 6.3.1-18 dargestellten, speziell entwickelten Prüfkopfklammer Ultraschall-Transmissionsmessungen zur Erfassung der Qualität der Endkantenverklebung durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten auf Parallelprofilen in Abständen von 30 mm, 50 mm und 70 mm von der Hinterkante. In den in Abbildung 6.3.1-19 dargestellten B-Bildern ist auffällig, dass in einem wiederkehrenden Abstand von ca. 200 mm ein Signalversatz und eine Amplitudenschwächung auftreten, die auf Anrisse hindeuten. Auf den B-Bildern im Abstand von 50 mm und 70 mm zur Hinterkante sind zwischen X=18 m und X=18,2 m und X=18,8 m und X=19 m nur schwache Signale zu erkennen. In diesen Abschnitten sind Ablösungen der Hinterkantenverbindungen zu vermuten, welche die eingangs genannten Schallemissionen bei Anregung in Schwenkrichtung verursacht haben können.

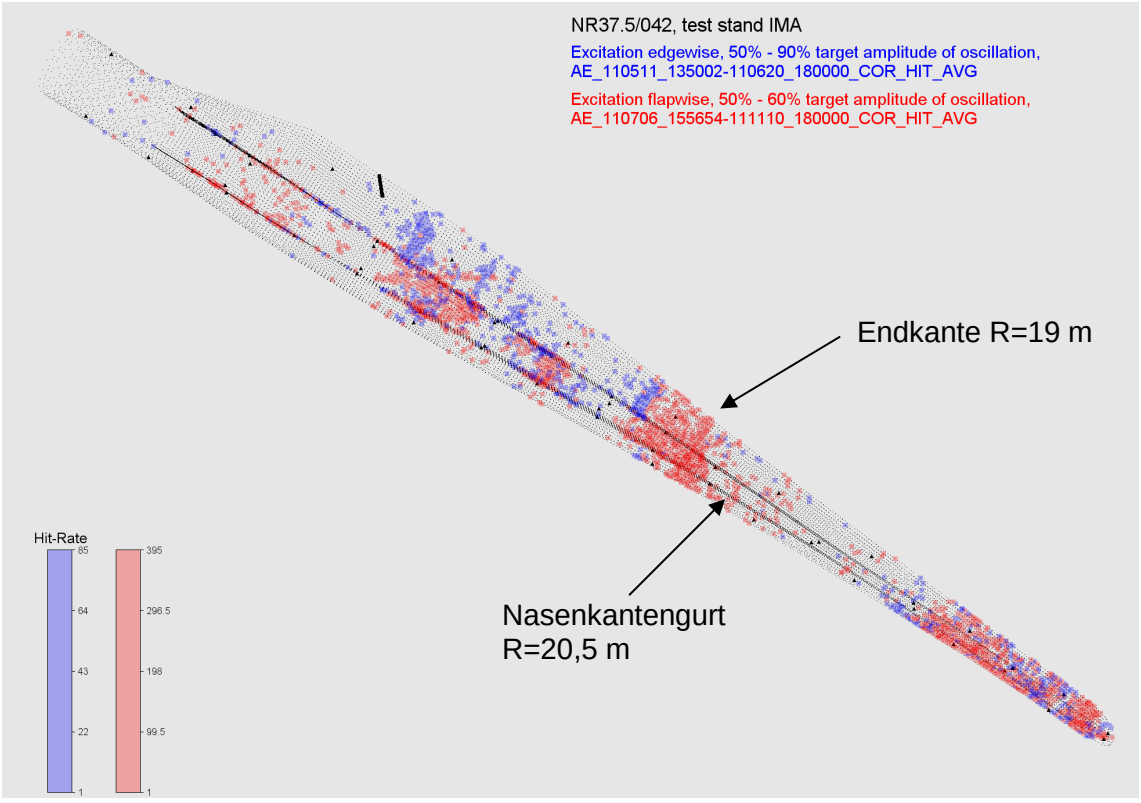


Abbildung 6.3.1-17: Schallemissions-Ortungsplot, Rotorblatt NR 37,5 Dresden, Blattanregung Hydraulik, Blick auf die Druckseite, farbcodiert geortete Schallemissionsereignisse während der Anregung in Schwenkrichtung (in Blattebene, blau) sowie in Schlagrichtung (senkrecht zur Blattebene, rot)

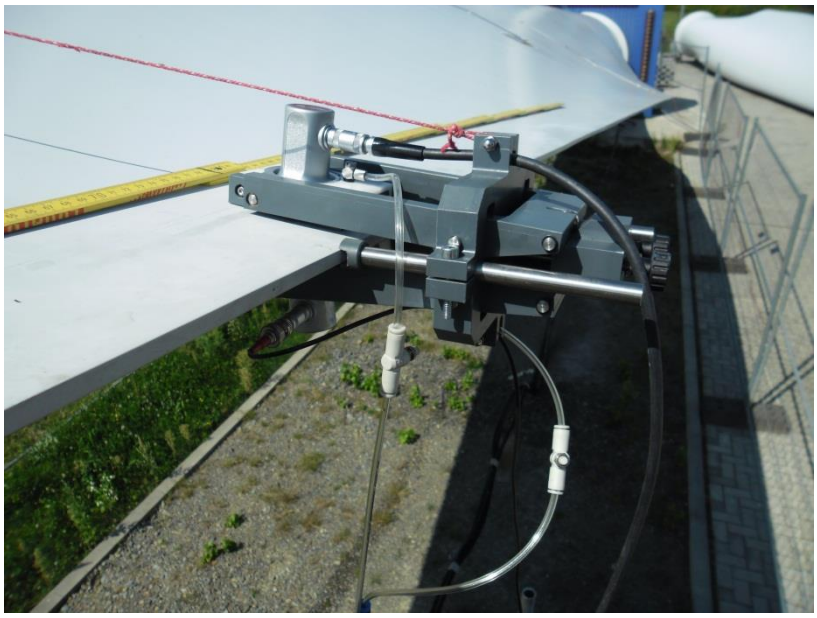


Abbildung 6.3.1-18: Ultraschall-Transmissionsmessungen zur Bestimmung der Integrität der Rotorblatt-Endkante mit einer speziell entwickelten Prüfkopfklammer

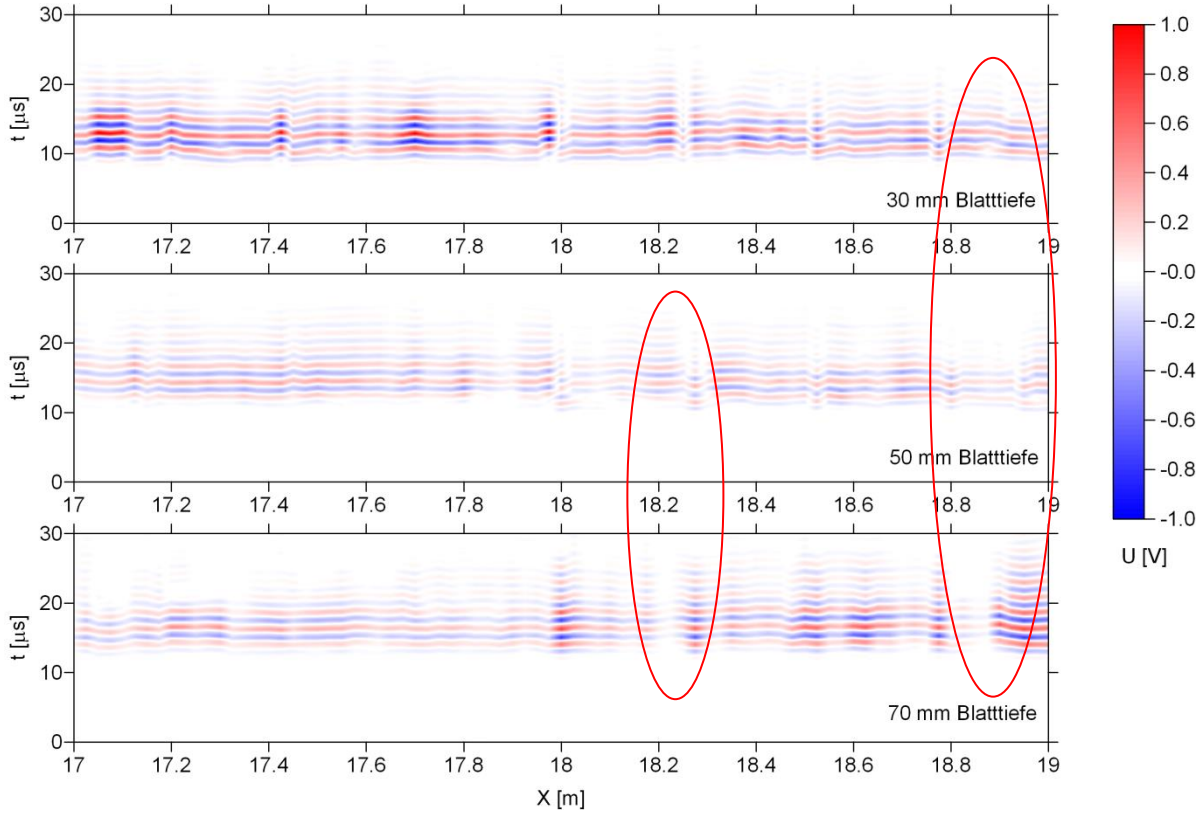


Abbildung 6.3.1-19: B-Bilder (Amplitudenschnitte) im Ergebnis der Ultraschall—Transmissionsmessungen zur Bestimmung der Integrität der Rotorblatt-Endkante auf Parallelprofilen in Abständen von 30 mm, 50 mm und 70 mm von der Hinterkante, Abstand zur Blattwurzel X=17…19 m entspricht einem Blattradius R=18…20 m

Bei der Anregung in Schlagrichtung treten vordringlich Schwachstellen in der Qualität der GFK-Gurte und Gurtverklebungen zutage. In Abbildung 6.3.1-20 ist das Ergebnis einer Ultraschall-Echo-Testmessung mit dem Wind Turbine Rotor Blade Scanner AMS 46 der Fa. FORCE Technology von X=10 m bis X=24 m Rotorblattlänge dargestellt. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen Manipulator mit zwei festen Prüfköpfen zur Überwachung von Ondulationen im Hauptgurt und zwei beweglichen Prüfköpfen, die sich auf Auslegern quer zur Fahrtrichtung des gummibereiften Gerätes befinden. Diese Prüfköpfe scannen den Hauptgurt und die Stegverklebung. Auf der Rotorblattoberfläche wird eine Linie angezeichnet, an der sich die Person, die den Manipulator bedient, per Kamera orientieren kann. Der AMS 46 wird mit einem Gabelstapler o. Ä. auf das Rotorblatt gesetzt und fährt dann entlang der Linie das Rotorblatt ab. So wird eine großflächige Messung des Rotorblatts in relativ geringer Zeit ermöglicht. In dem in Abbildung 6.3.1-20 dargestellten B-Bild des Rotorblattquerschnitts bei 19,5 m Blattlänge sowie dem C-Bild (Draufsicht) ist eine Indikation farblich hervorgehoben, die auf Rückstreuungen aus dem CFK-Gurt des Nasenkantenstegs schließen lässt. Eine Inspektion des Blattinnern belegt, dass ab 19,5 m Blattlänge (Radius 20,5 m) markante Ondulationen im Glasfaser-Komposit des Nasenkantengurts auf der Druckseite auftreten.

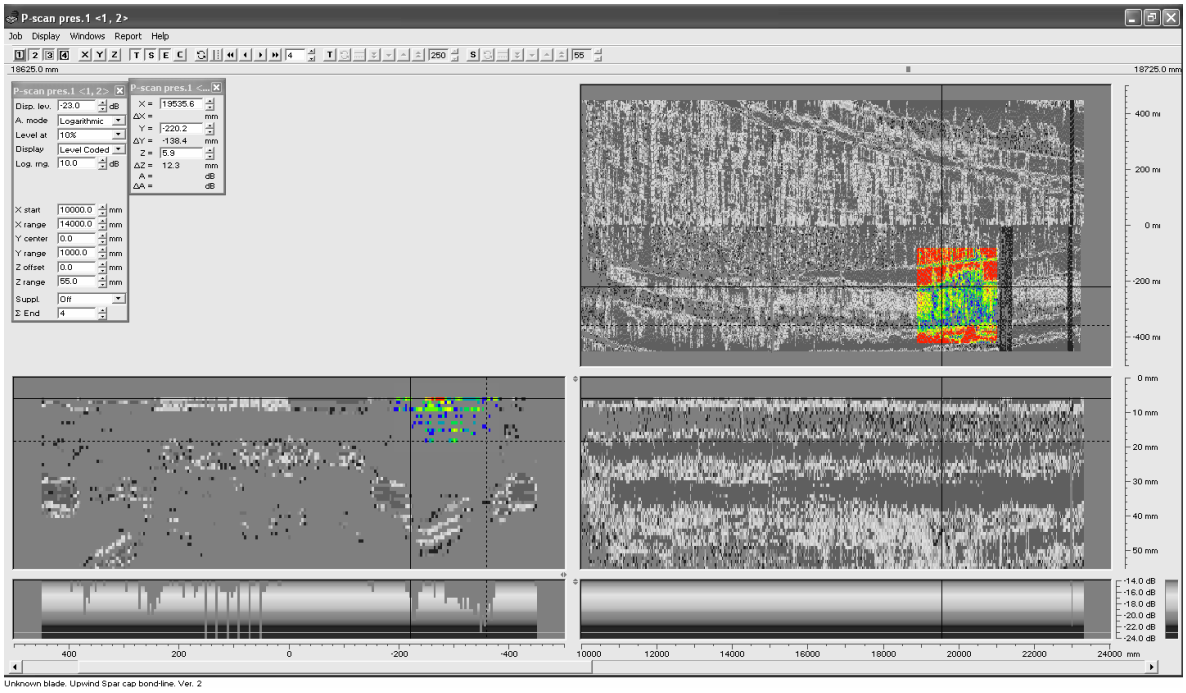


Abbildung 6.3.1-20: Ultraschallscan-Ergebnis mit dem Wind Turbine Rotor Blade Scanner AMS-46 der Fa. FORCE Technology von X=10 m bis X=24 m Rotorblattlänge (Radius R= 11 m bis R=25 m), Rückstreuungen aus dem Balsa-Material und Reflexionen an den Klebeschichten der Steganbindungen, farblich hervorgehoben sind Rückstreuungen aus dem CFK-Gurt des Nasenkantenstegs, links B-Bild (Querschnitt bei X=19,5 m/ Radius R=20,5 m Blattlänge) rechts C-Bild (Draufsicht)

Abbildung 6.3.1-21: Farblich hervorgehobene Ondulationen im Glasfaser-Komposit des Nasenkantengurts auf der Druckseite ab X=19,5 m Blattlänge / Radius R=20,5 m

Diese Ondulationen, die in Abbildung 6.3.1-21 farblich hervorgehoben wurden, führen dazu, dass der Gurt bei einer Belastung in Schlagrichtung nicht mehr die entsprechenden Spannungen aufnehmen kann. Wie bereits in dem in Abbildung 6.3.1-17 dargestellten Schallemissions-Ortungsplot zu erkennen ist, treten in dieser Schwächezone bei Anregung in Schlagrichtung vermehrt akustische Ereignisse auf, die auf Einzelfaserrisse und verstärkte Reibungsvorgänge in deren Folge hindeuten. Abbildung 6.3.1-22 zeigt detaillierter einen Ausschnitt des Schallemissions-Ortungsplots mit dieser Schwächezone bei X=19,5 m Blattlänge.

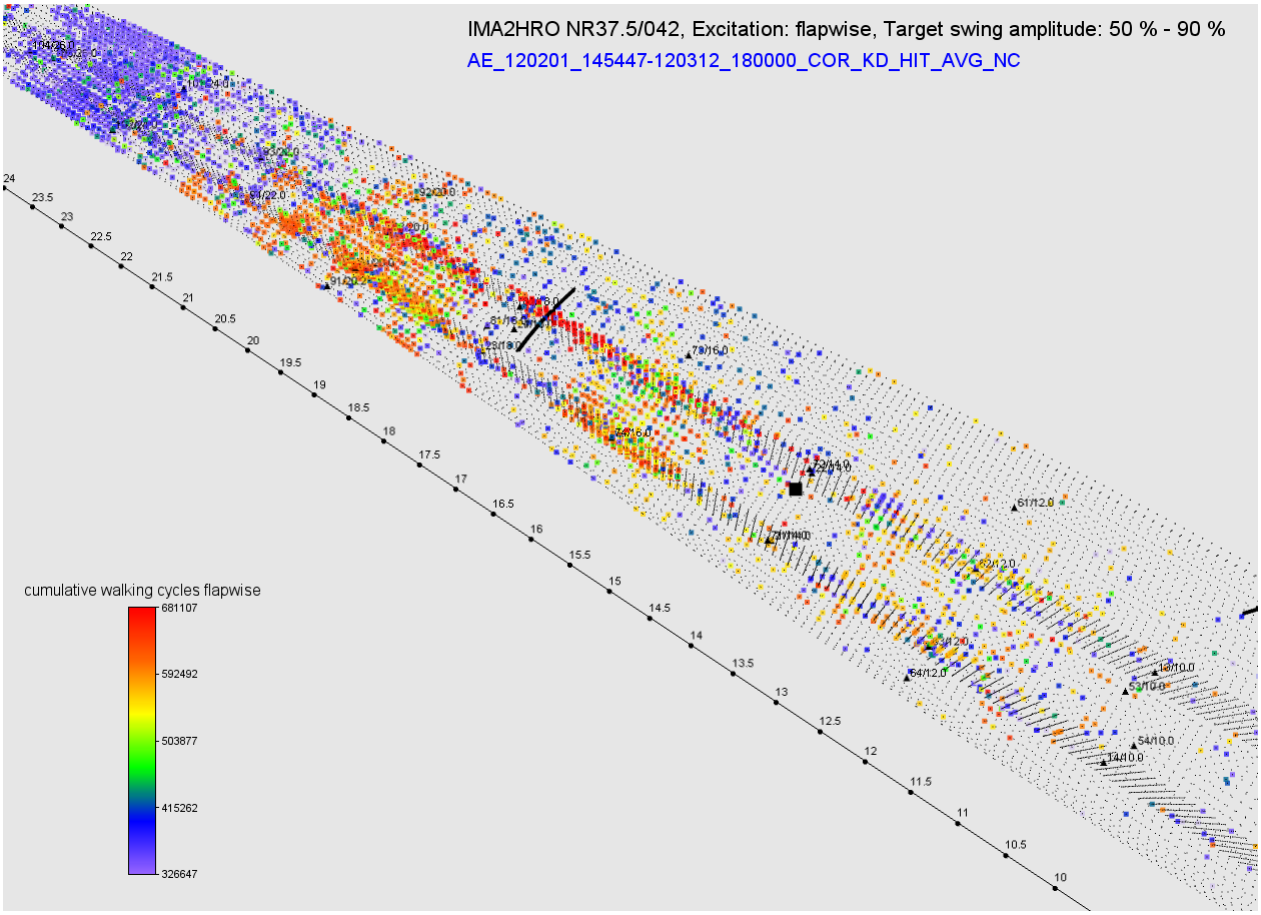


Abbildung 6.3.1-22: Schallemissions-Ortungsplot, Rotorblatt NR 37,5/0421 Blattanregung Hydraulik IMA Dresden, Blick auf die Druckseite, farbcodiert geortete Schallemissionsereignisse während der Anregung in Schlagrichtung (Ausschnitt mit Schwächezone durch Ondulationen im Nasenkantengurt bei X=19,5 m Blattlänge/Radius 20,5 m)

Bei einer Zielschwingweite von 90 % trat beim Test des Rotorblattes NR 37,5/0421 nach 680000 Schwingzyklen mit flapwiser Anregung ein Bruch des Endkantengurtes auf der Saugseite bei Radius R=17,5 m auf. Wie der in Abbildung 6.3.1-23 dargestellte Schallemissions-Ortungsplot zeigt, bei dem die Flapwise-Schwingzyklen farbcodiert sind, trat das eigentliche Bruchgeschehen im Endkantengurt erst während der letzten 20000 Schwingzyklen auf. Die Bruchzone wird von beiden Seiten von Bereichen flankiert, die sich seit längeren Zeiten durch eine erhöhte Schall-emissionsrate auszeichnen. Zur Blattspitze hin ist dies die oben beschriebene Zone bei R=20,5 m, in der starke Ondulationen im GFK-Gurt sichtbar sind (vgl. Abbildung 6.3.1-21).

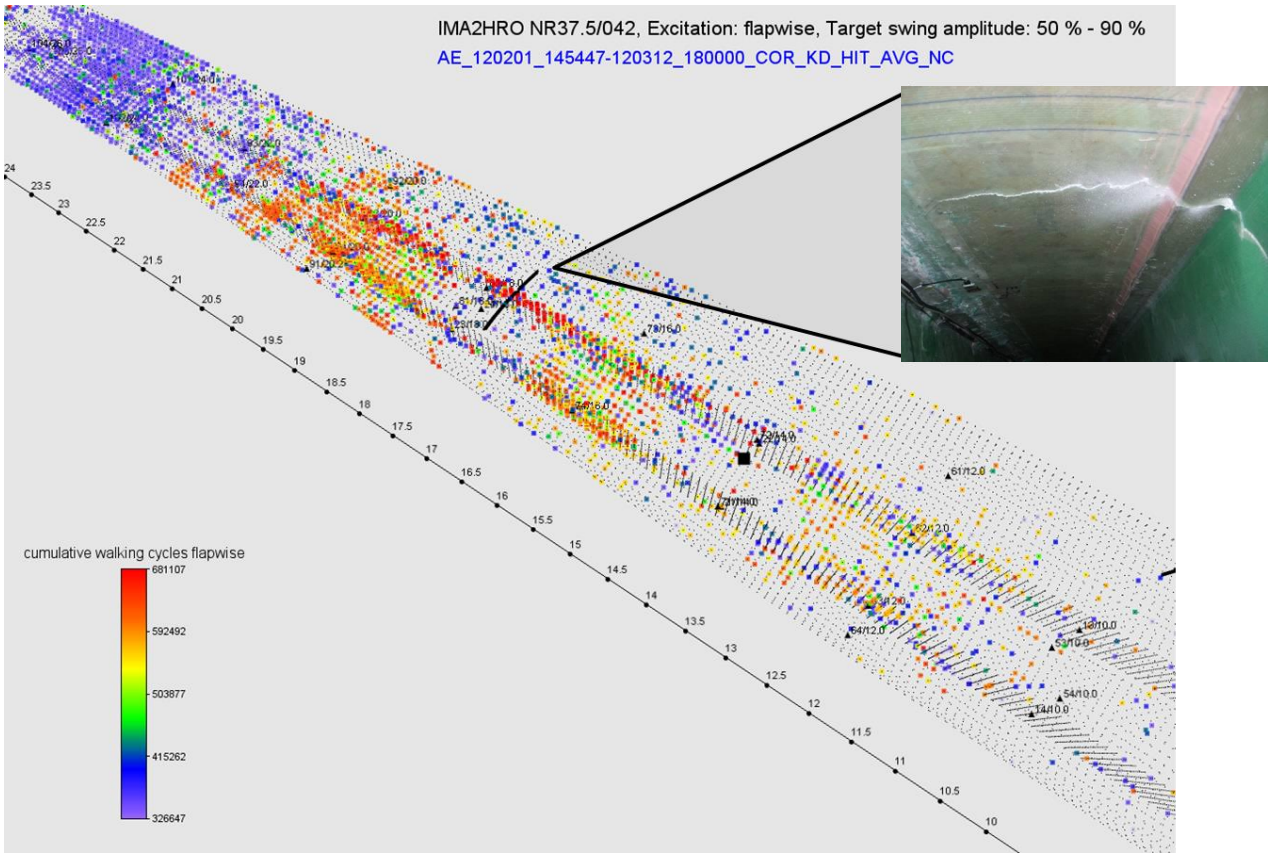


Abbildung 6.3.1-23: Schallemissions-Ortungsplot, Rotorblatt NR 37,5/0421, Blick auf die Saugseite, Testzeitraum: Blattanregung flapwise Rostock, farbcodiert: Schwingzyklen flapwise, rechts: Bruch des Endkantengurtes auf der Saugseite bei R=17,5 m nach 680000 Schwingzyklen mit flapwiser Anregung, Mittelkammer

Um die Ursachen des Gurtbruches bei R=17,5 m zu finden, wurden je drei Proben beidseits der Bruchlinie mit zerstörungsfreien Prüfverfahren untersucht. In den in Abbildung 6.3.1-24 dargestellten Ergebnissen von Röntgentomographie, Terahertz-Elektromagnetik und Ultraschall Impakt-Echo-Messungen bilden sich bruchzonennah verdeckte Ondulationen im Glasfaser-Komposit des Endkantengurts ab. Wie bereits oben erwähnt, führen diese Ondulationen dazu, dass der Gurt bei einer Belastung in Schlagrichtung nicht mehr die entsprechenden Spannungen aufnehmen kann.

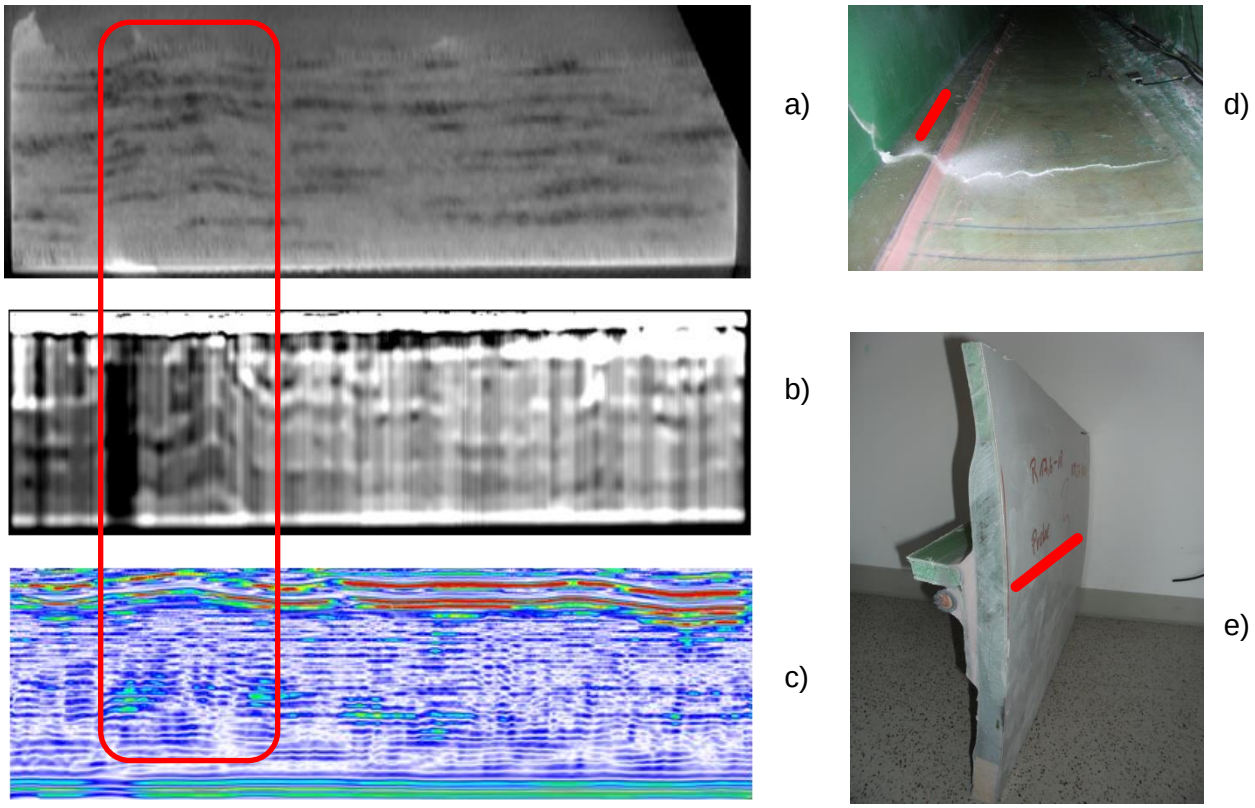


Abbildung 6.3.1-24: Rotorblatt NR 37,5/0421, Endkantengurt, Saugseite, Gurtprobe 3 (R=17,6…18,0 m), Ergebnisse der ZfP-Verfahren, b-Scans (Profilschnitte)
a) Röntgentomographie, b) THz-Elektromagnetik, c) Ultraschall-Echo-Messung, hervorgehoben: Ondulationen im GFK, d) Mittelkammer mit Profilspur auf dem Gurt, e) Profilspur auf der Probe

Abschließend wird gezeigt, dass zur Bewertung der Schadensentwicklung auch die über längere Messzeiträume beobachtete Burstrate der Schallemissionen herangezogen werden kann.

Abbildung 6.3.1-25 zeigt die eingestellte Zielschwingweite und die Anzahl georteter Schallemissionsereignisse (Hits) pro Schwingzyklus im Verlauf der bisherigen dynamischen Ermüdungsversuche der beiden NR 37,5 m Rotorblätter. Begonnen wurden die Versuche in Rostock und Dresden mit Tests in Schwenkrichtung (Edgewise-Test), bei denen hohe Zug- und Druckspannungen an den Verklebungen der beiden Blattschalen auftreten. Beide Versuche in Schwenkrichtung wurden mit geringerer Zielschwingweite weitergefahren bzw. beendet, wenn sich der in beiden Versuchen bei R=9 m einstellende Anriss der Schleppkante auf ca. 50 cm Länge vergrößert hatte. Beim Edgewise-Test des Blattes 0382 in Rostock war dies nach 120 % Zielschwingweite (200 µm/m), beim Rotorblatt 0421 auf dem IMA-Prüfstand in Dresden bereits nach 90 % Zielschwingweite. Die Lage des Schleppkantenanrisses in der aerodynamischen Hülle des Blattes ist bei diesem Rotorblatttyp konstruktiv vorgezeichnet, beim Radius 9 m endet eine von der Blattwurzel aus angelegte Versteifung der Schleppkante. Die 45°-Richtung des Anrisses entspricht einer der beiden GFK-Fasergelegerichtungen in der aerodynamischen Hülle des Blattes.

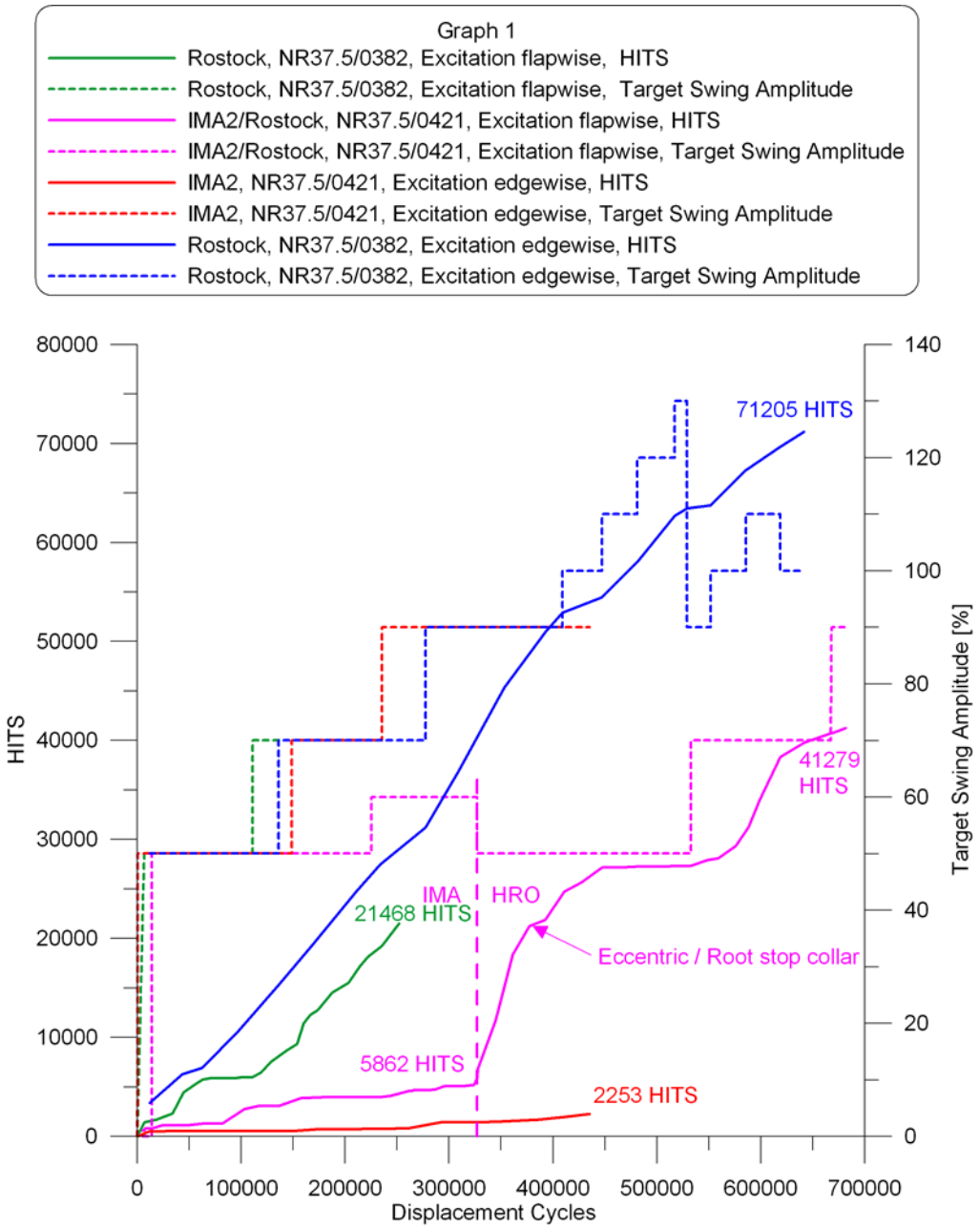


Abbildung 6.3.1-25: Verlauf der Zielschwingweite und der Anzahl georteter Schallemissionsereignisse (HITS) pro Schwingzyklus im Verlauf bisheriger dynamischer Ermüdungsversuche von NR 37,5 m Rotorblättern

In Abbildung 6.3.1-25 unterscheidet sich die Burstrate der akustischen Emissionen bei den Versuchen wesentlich. Der Vergleich der Ergebnisse aller bisherigen Versuche bestätigt, dass die über einen längeren Beobachtungszeitraum von mehreren Tagen auftretende mittlere kumulative Burstrate der Schallemissionsmessungen geeignet ist, die Belastungsgeschichte eines Rotorblattes und damit seinen Schädigungsgrad zu beschreiben. Im vorgeschädigten Kompositmaterial werden akustische Emissionen bei Belastung vermehrt durch Reibungsvorgänge verursacht. Auf diesen bereits oben eingeführten Felicity-Effekt sind die höheren Burstraten, insbesondere beim Edgewise-Test des Blattes 0382 zurückführbar. Das bereits mehrfach reparierte Blatt besitzt eine deutlich längere Belastungsgeschichte als das Blatt 0421, dessen Edgewise-Test und die ersten Flapwise-Messungen auf dem IMA-Teststand erfolgten. Die höhere Burstrate beim Versuch in Schlagrichtung, in Bezug auf den Test des Blattes in Schwenkrichtung auf dem IMA-Prüfstand, bestätigt den Zusammenhang zwischen Belastungsgeschichte und Rate der Schallemissionen.

Eine Ausnahme bilden Schallemissionen, die durch technische Randbedingungen verursacht wurden. Dies betrifft den Versuchsstart des Flapwise-Tests vom Blatt 0421 in Rostock, bei dem ein hoher Anteil der akustischen Emissionen auf die ungenügende mechanische Stabilität des Einspannringes an der Blattwurzel und des Exzenterkragens zurückgeführt werden kann.

6.3.1.4.2 Verifikation der Rotorblattmessungen am IWES Testbalken

Vom Fraunhofer IWES wurde ein baugleicher Balken wie für den Ermüdungsversuch mit Schallemissionsmessungen gefertigt und instrumentiert. Der zweite Ermüdungsversuch wurde sowohl durch Schallemissionsmessungen als auch Thermografie begleitet. Der Balken wurde dynamisch bis zum Versagen der oberen Klebefläche nach ca. 350000 Lastwechseln kraftgesteuert belastet. Nach 186541 Lastwechseln wurde die nominelle Anregungskraft von 10,2 auf 10,75 kN erhöht, um ein früheres Versagen der Klebeflächen zu provozieren, das aber nicht mehr im Rahmen der akustischen Messungen erfolgte. Abbildung 6.3.1-26 zeigt den mit 12 Schallemissionssensoren instrumentierten Balken. Aufgrund der hohen Dehnungen, die mit bis zu +-3700 µm/m insbesondere auf der Ober- und -Unterseite des Balkens auftraten, versagten beim Versuch im März 2011 einige der aufgeklebten DuraAct Wandler. Beim Test im November 2011 wurden kleinere DuraAct Wandler eingesetzt als beim Ermüdungsversuch im März 2011. Wegen der parallel durchgeführten Thermografiemessungen wurde die kameraabgewandte Seitenfläche des Balkens instrumentiert.

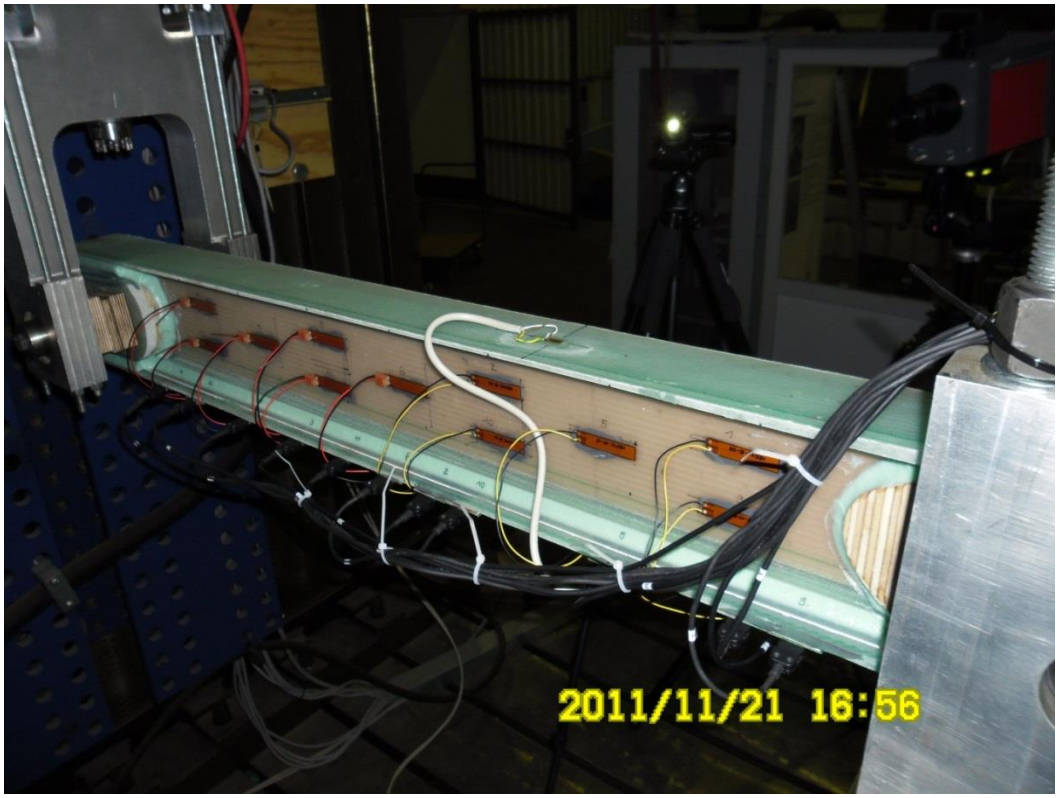


Abbildung 6.3.1-26: Henkel-UpWind-2010-Balken, Instrumentierung des Ermüdungsversuches mit 12 DuraAct Schallemissionssensoren

In Abbildung 6.3.1-27 ist der Verlauf der Anzahl georteter Schallereignisse (Hits) sowie der am Hydraulikzylinder gemessenen Kraft- und Auslenkungsmaximalamplituden über der Schwingzykluszahl dargestellt. Bemerkenswert ist, dass die Anzahl der Hits weitgehend unbeeinflusst von der Erhöhung der Anregungskraft bzw. der maximalen Auslenkung nach 186541 Lastwechseln ist. Zum anderen ist vor allem in der ersten Phase des Tests eine gegenläufige Tendenz zwischen den Gradienten von Schallemissionsanzahl und dem Anstieg der Maximalauslenkung erkennbar. Dieser Effekt lässt vermuten, dass die dominante Zunahme von Schallemissionen durch Rissentstehung bzw. -wachstum erfolgt und die Reibungsemissionen in der Folge, auf die ein starker Anstieg der Auslenkungsrate hindeutet, geringere Burstraten verursachen.

Im Unterschied zu metallischen Werkstoffen, bei deren Belastung Schallemissionen bis zum Überschreiten der vorangegangenen maximalen Belastung ausbleiben (Kaiser-Effekt nach Kaiser, J.; Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch; Dissertation, Technische Hochschule München; München 1950), treten bei Verbundwerkstoffen signifikante Schallemissionsereignisse bereits bei einer Belastung unter der vorangegangenen Maximallast auf. Dieser als Felicity-Effekt eingeführte Wirkmechanismus ist in der Hauptsache auf Reibungsvorgänge im vorgeschädigten Kompositmaterial zurückzuführen. Wie bereits im Ergebnis der Schallemissionstests im Rahmen vorangegangener dynamischer Rotorblatt-Ermüdungsversuche deutlich wurde, kann auf der Basis dieses Effekts aus der Burstrate auf die Schädigungsgeschichte des Kompositwerkstoffes geschlossen werden.

Abbildung 6.3.1-28 enthält als Ergebnis der Schallemissionsprüfung während des Ermüdungsversuches des Henkel-UpWind-2010-Balkens einen planaren Ortungsplot. Als Parameter wurde die Häufigkeit von georteten Schallemissionsereignissen (Hits) in den 1,2 x 1,2 cm² großen Flächenelementen farbkodiert. In der am stärksten mechanisch belasteten Zone, in der ein Dehnmessstreifen auf der Oberseite des Balkens implementiert wurde, treten die meisten Schallemissionsquellen in Erscheinung. Dies war bei dem Versuch auch der Ort, an dem die Struktur versagte.

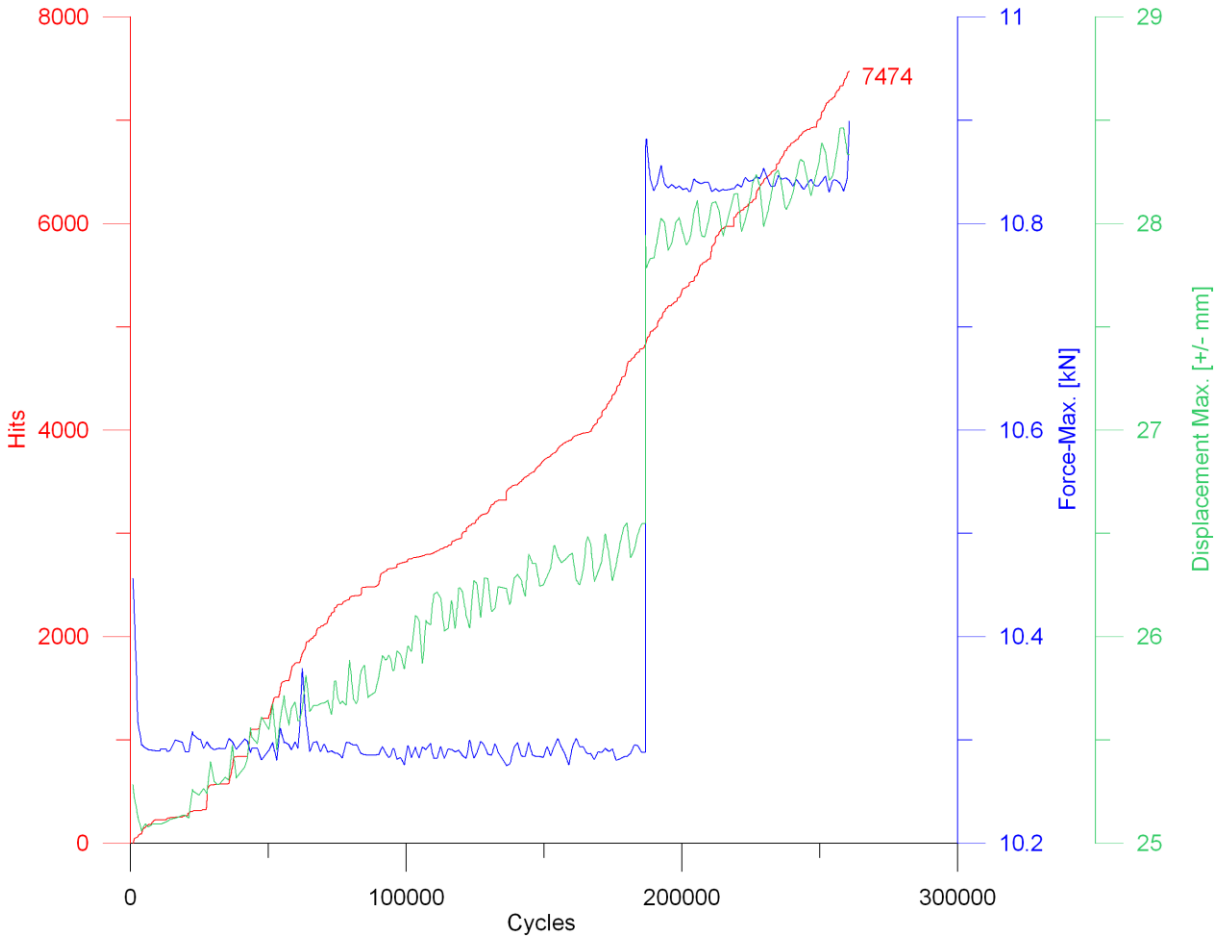


Abbildung 6.3.1-27: Verlauf der Anzahl georteter Schallereignisse (Hits, rot) sowie der am Hydraulikzylinder gemessenen Kraft- (blau) und Auslenkungsmaximalamplituden (grün) über der Schwingzykluszahl

Die Abbildungen 6.3.1-29 bis 6.3.1-32 enthalten Schallemissions-Ortungsplots, in denen der zeitliche Versuchsablauf sowie spezifische Signalparameter der gemessenen Bursts farbcodiert sind. In Abbildung 6.3.1-29 ist die mittlere Schwingzyklenanzahl, bei der Schallemissionen im Flächenelement auftraten, dargestellt. In der Zusammenschau mit den genannten Signalparameter-Darstellungen ist ersichtlich, dass am Beginn des Versuches kurze, energiereiche Bursts mit einer relativ hohen Vorzugsfrequenz emittiert wurden. Die Quellorte dieser Bursts liegen bei 700 mm Balkenlänge, links vom Dehnmessstreifen. Als Quellmechanismus dominieren in dieser frühen Versuchsphase Rissentstehung und -wachstum. Während des Versuches wandern die Quellorte nach rechts in Richtung Anregungszylinder, Energiegehalt und Vorzugsfrequenz nehmen ab, was zunehmend für Reibungsvorgänge als Quellmechanismus spricht.

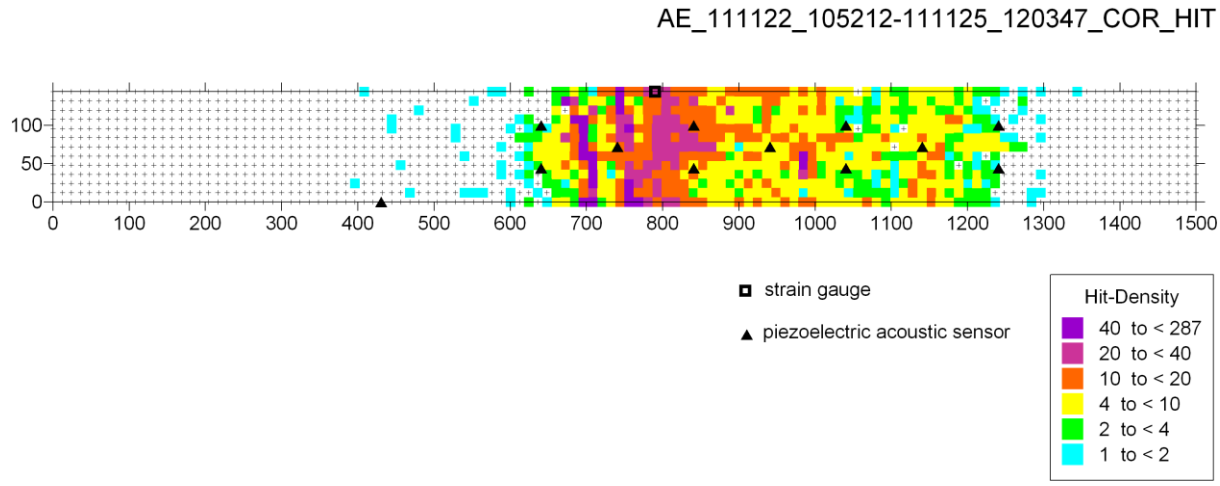


Abbildung 6.3.1-28: Schallemissions-Ortungsplot, Henkel-UpWind-2010-Balken, Ermüdungsversuch, farbcodiert: Schallemissionsdichte pro Flächenelement von 1,2 cm x 1,2 cm

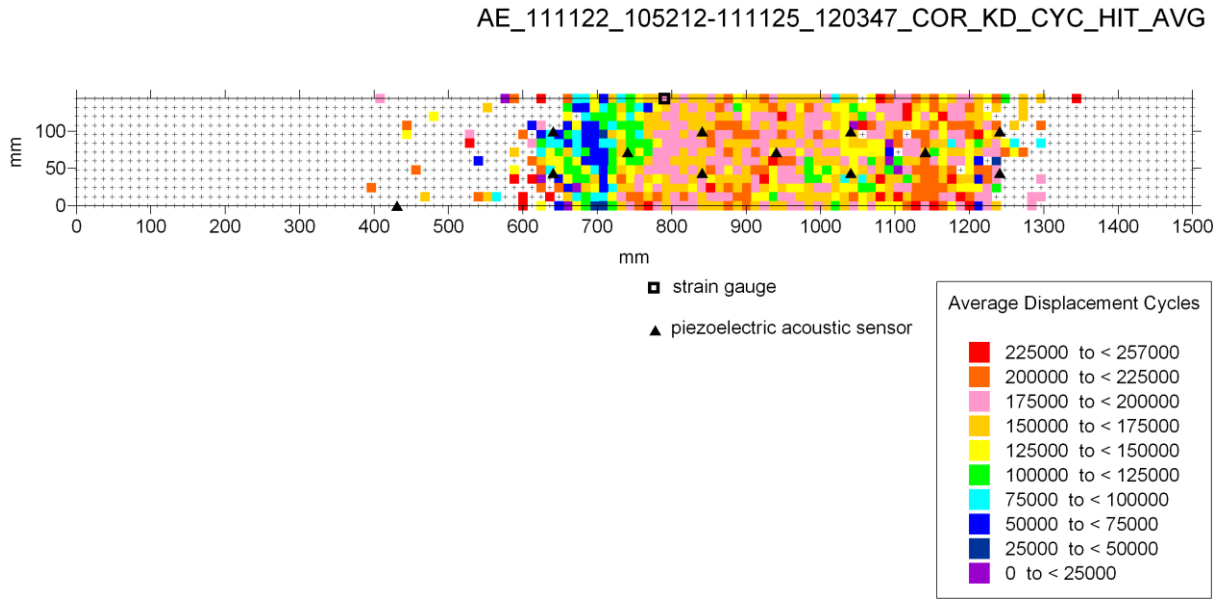


Abbildung 6.3.1-29: Schallemissions-Ortungsplot, Henkel-UpWind-2010-Balken, Ermüdungsversuch, farbcodiert: mittlere Schwingzyklenanzahl, bei der Schallemissionen im Flächenelement auftraten

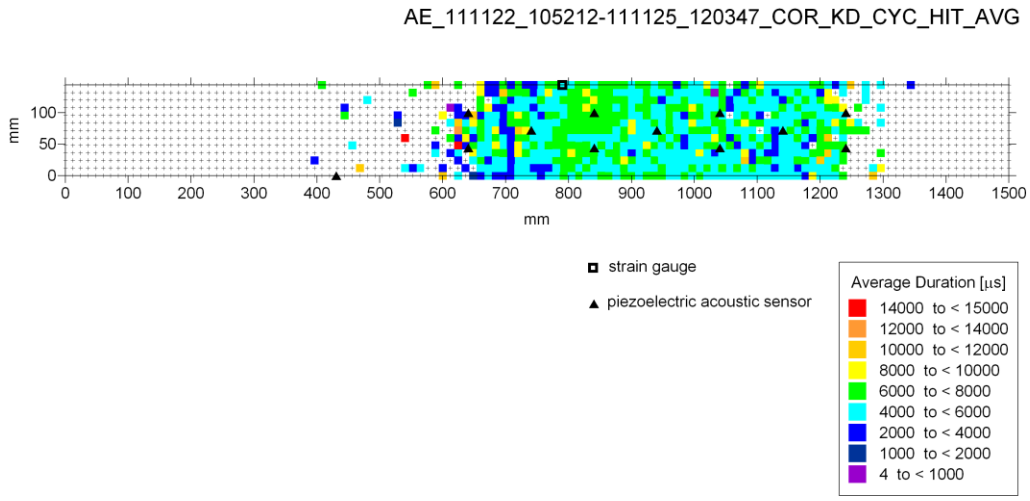


Abbildung 6.3.1-30: Schallemissions-Ortungsplot, Henkel-UpWind-2010-Balken, Ermüdungsversuch, farbcodiert: mittlere Burstlänge

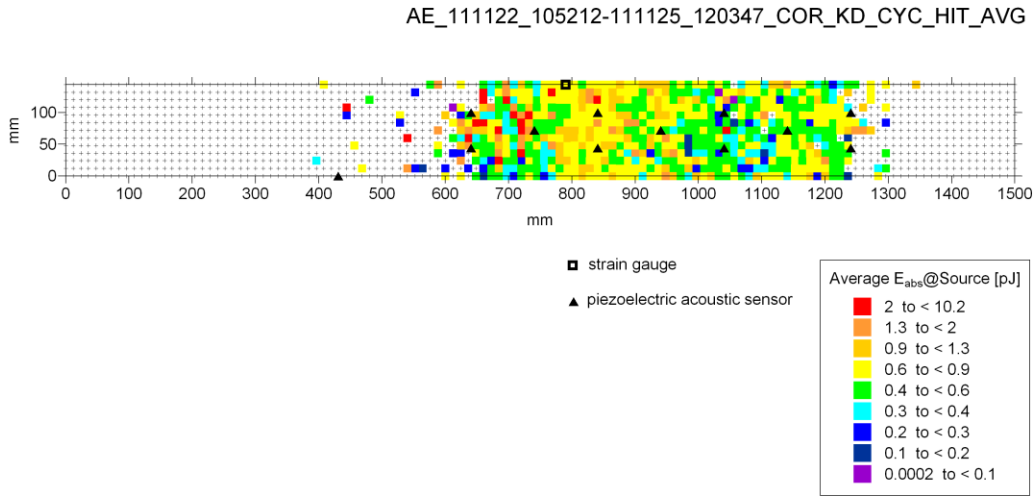


Abbildung 6.3.1-31: Schallemissions-Ortungsplot, Henkel-UpWind-2010-Balken, Ermüdungsversuch, farbcodiert: mittlere Burstenergie, zurückgerechnet an den Quellort

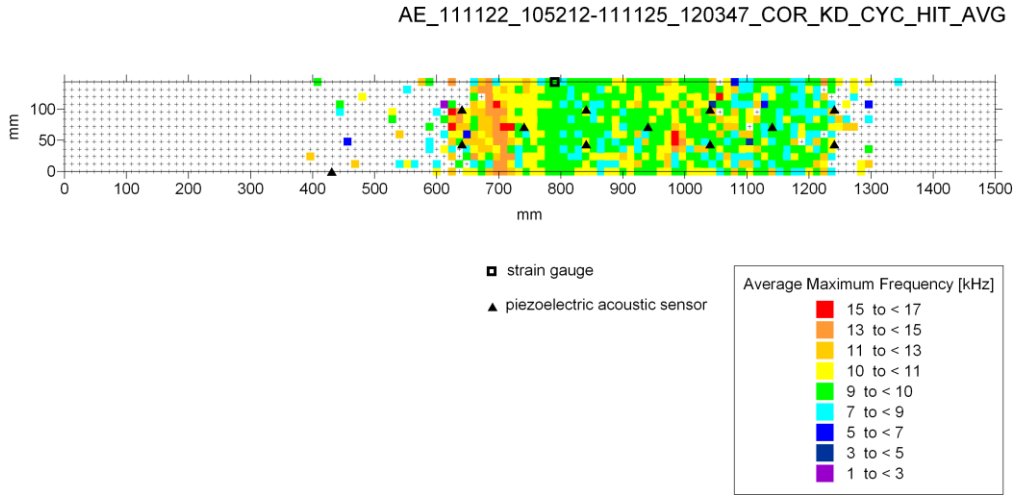


Abbildung 6.3.1-32: Schallemissions-Ortungsplot, Henkel-UpWind-2010-Balken, Ermüdungsversuch, farbcodiert: mittlere Vorzugsfrequenz des Bursts

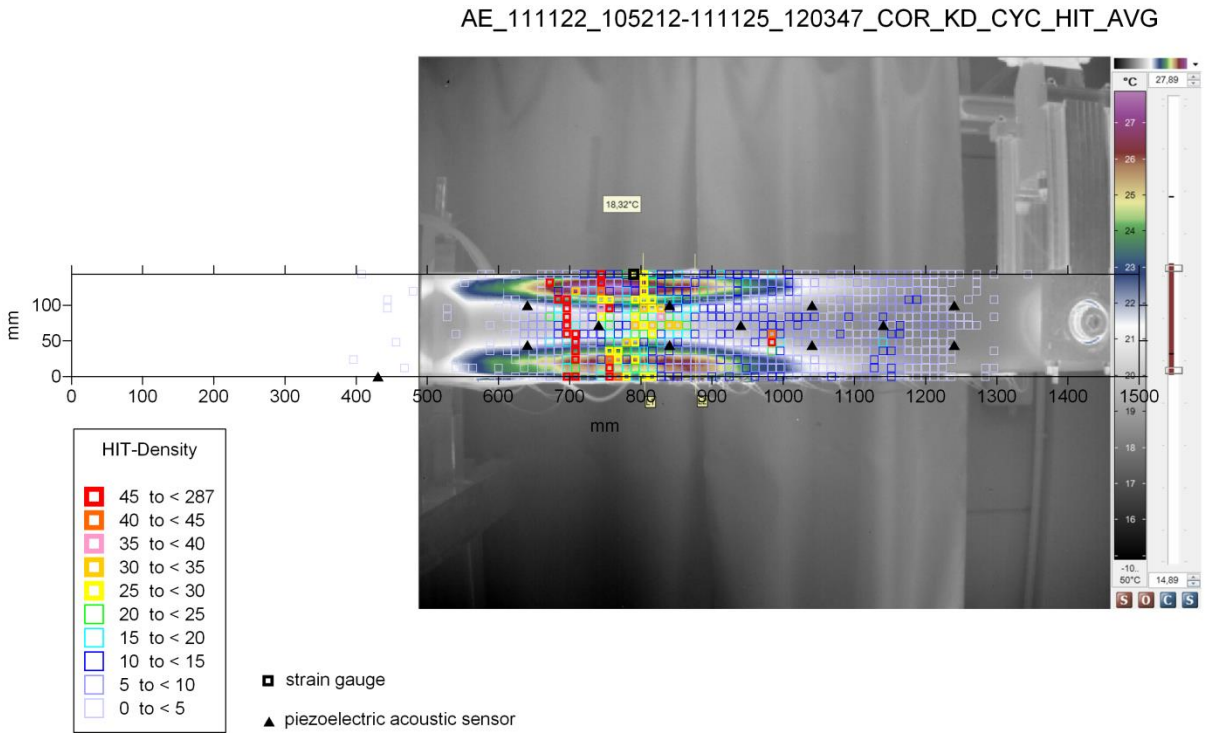


Abbildung 6.3.1-33: Schallemissions-Ortungsplot, Henkel-UpWind-2010-Balken, Ermüdungsversuch, farbcodiert: Schallemissionsdichte pro Flächenelement von 1,2 cm x 1,2 cm, im Hintergrund Thermogramm bei 10.75 kN, Schwingzyklus 249384

Abbildung 6.3.1-33 blendet die Schallemissionshäufigkeit aus Abbildung 6.3.1-28 über das Ergebnis der thermografischen Aufnahme beim Schwingzyklus 249384. Das Thermogramm zeigt besonders beanspruchte Zonen der beiden Klebeflächen, die mit der lateralen Lage von Rissgeflechten, die mit den Schallemissionstests nachgewiesen wurden, korrespondieren.

Literatur:

Schubert, L.: Zustandsüberwachung an Faserverbundwerkstoffen mit geführten Wellen, Dissertation, TUDpress, 2012, ISBN 978-3-942710-72-5

Kaiser, J.; Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch; Dissertation, Technische Hochschule München; München 1950

6.3.2 Modales Verfahren, WBI

Wenn man ein komplettes Rotorblatt überwachen will, muss man entweder ein Sensornetzwerk installieren, das das ganze Rotorblatt überzieht und damit überwacht, oder man muss solche Methoden anwenden, bei denen durch den entstehenden Schaden Signale über weite Strecken ausgesendet und von wenigen Sensoren empfangen und lokalisiert werden - wie das z.B. bei der Acoustic Emission der Fall ist. Oder man muss Indikatoren finden, die mit relativ wenigen Sensoren den Zustand des ganzen Blattes erfassen können. Letzteres gilt für die hier näher zu beschreibende Operational Modal Analysis, OMA, ein Verfahren zur Systemidentifikation, das bei SHM Wind vornehmlich im Zeitbereich arbeitet.

Die Operational Modal Analysis wird seit den 90er Jahren als ein komplementäres Verfahren zur experimentellen Modalanalyse entwickelt. Ein Vorteil von OMA ist, dass die Kräfte, mit der eine Struktur zu Schwingungen angeregt wird, nicht bekannt sein müssen. Deshalb wird OMA auch als Output-Only Modal Analysis bezeichnet. Bei OMA wird die Strukturantwort infolge einer Anregung durch Umweltrauschen (es sollte breitbandig und zufallsbestimmt sein, idealerweise ein weißes Rauschen) unter Belastungen und mit Randbedingungen gemessen, wie sie im normalen Anlagenbetrieb gegeben sind. Wie bei der experimentellen Modalanalyse muss auch bei OMA darauf geachtet werden, dass bei mehreren Messpunkten die Phasenbeziehungen der Messsignale untereinander erfasst werden. Die auftretenden Amplituden an den verschiedenen Messpunkten werden dargestellt. Letztendlich werden aus den Messdaten die modalen Parameter Eigenfrequenz, Eigenform und Dämpfung bestimmt.

Das Hauptziel des SHM-Systems für Rotorblätter ist es, Schädigungssignaturen oder -merkmale (sog. features) in den Monitoringdaten zu finden und anzuzeigen. Die Schädigungsindikatoren sollen möglichst sensitiv gegenüber Schäden und nicht sensitiv gegenüber Änderungen der Umgebungs- und Betriebszustände der Anlage (eng. **E**nvironmental and **O**perational **C**onditions, **EOC**) sein. Die Verfahrensentwicklung musste deshalb einen Schwerpunkt darauf legen, Veränderungen der Monitoringdaten, die auf geänderten EOCs beruhen, von solchen zu trennen, hinter denen sich die Entwicklung eines Strukturschadens verbirgt. Daher waren die Methoden prinzipiell so zu gestalten, dass diese unerwünschten Effekte der EOCs auf die extrahierten Merkmale minimal sind. Dieses Ziel ist allerdings mit der Output-Only-Methode und der Überwachung von Schädigungsmerkmalen, die auf den charakteristischen tieffrequenten Schwingungen von WEAs fußen, nur schwer zu erreichen. Denn es gilt das bei WORDEN, K.; FARRAR, C. R.; MANSON, G. und PARK, G. (2005) erläuterte Prinzip: „Je sensitiver ein Schädigungsmerkmal gegenüber Strukturschäden ist, desto sensitiver ist es auch gegenüber EOC-Veränderungen."

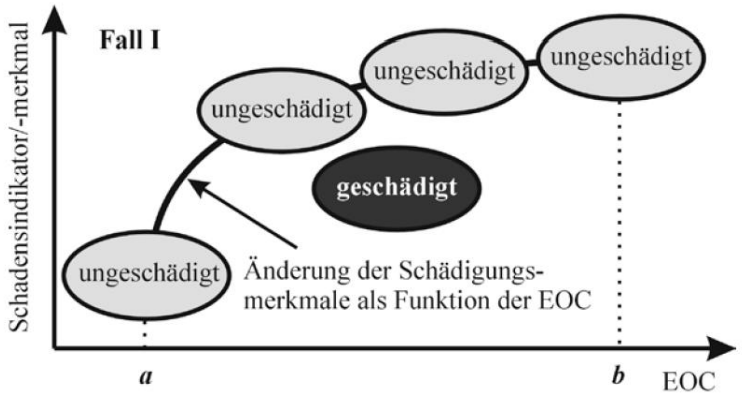


Abbildung 6.3.2-1: Änderung der schädigungssensitiven Merkmale mit den EOCs

Die hier angewandten Methoden zur EOC-Kompensation gehen davon aus, dass die Schädigungsmerkmale, die sich in Veränderungen von Systemeigenwerten und Eigenvektoren zeigen, als lineare oder nichtlineare Funktionen der EOCs, bezogen auf den ungeschädigten Zustand, den wir als Referenzzustand bezeichnen, beschrieben werden können (vgl. dazu KRAEMER (2011) und Abbildung 6.3.2-1). Die Kompensation der EOC-Einflüsse erfolgt im SHM Wind-Verfahren mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse bzw. PCA (Principal Component Analysis), auf die später noch einzugehen sein wird.

Neben der Kompensation der EOC-Einflüsse gab es noch zahlreiche weitere ungelöste Fragenkomplexe. Die wichtigsten davon seien hier genannt:

- Bei der OMA an rotierenden Komponenten muss grundsätzlich beachtet werden, dass die Rotorblätter durch mehrere unterschiedliche Anregungsmechanismen in Schwingung gebracht werden. Dadurch ist die Annahme einer Anregung durch ein weißes Rauschen – das ist eine Grundvoraussetzung für das Funktionieren der Methode – zunächst einmal verletzt. Nichtsdestotrotz ist es gelungen, Systemeigenwerte und Eigenvektoren aus den Monitoringdaten zu extrahieren. Voraussetzung dafür ist allerdings die Kenntnis der Betriebszustände der Anlage. Sie werden zur Kompensation der Einflüsse aus der Rotation auf die Messdaten genutzt.
- Eine weitere wichtige Funktionalität ist die Trennung der bei WEA immer vorhandenen harmonischen Anregungen von den echten Moden.
- Rotorblätter sind Großstrukturen, die weitgehend manuell aus Glas- und Kohlefaserverbundwerkstoffen gefertigt werden. Dadurch gibt es erhebliche Abweichungen bezüglich der Masseverteilung und der erreichten Steifigkeit. Gewichtsabweichungen bis 5 % werden im Allgemeinen noch toleriert! Aus fertigungstechnischer Sicht stellt jedes Rotorblatt ein Individuum dar. Was derart große Abweichungen bei Masse und Steifigkeit für ein Verfahren bedeuten, das sich auch auf die Messung von Eigenfrequenzen stützt, ist offenkundig. Denn die Eigenfrequenzen einer Struktur werden in erheblichem Umfang von Masse und Steifigkeit bestimmt.
- Wenn ein SHM-System einerseits kritische, die Tragfähigkeit gefährdende Veränderungen des Rotorblattes erkennen soll, andererseits aber keinen Fehlalarm auslösen darf, sind die folgenden Fragen zu beantworten:
    - Woher weiß das SHM-System, welcher Zustand gut bzw. schlecht ist?
    - Wie werden Schwellenwerte zur Abgrenzung eines schlechten Zustandes für die Alarmierung gesetzt?
    - Wie sind die produktionsbedingten Abweichungen von Blattsteifigkeit, Masse und ihrer Verteilung, die jedes Rotorblatt zu einem Individuum machen, mit allgemeingültigen Schwellenwerten zu vereinbaren?

Diese und weitere Aufgaben können nur gelöst werden, wenn ein selbstlernendes System entsteht, das möglichst alle Systemzustände kennt, die durch die ganze Bandbreite der EOCs hervorgerufen werden. Deshalb müssen für jeden Rotorblatttyp in einer Konfigurationsphase die „Grundeinstellungen“ des SHM-Systems festgelegt werden. Dazu wird ein FEM-Modell des Blattes erstellt und die dynamischen Kenngrößen werden berechnet. Wegen der bereits erwähnten Fertigungstoleranzen kann die Vorauslegung nur Schwellenwerte mit einer vergleichsweise großen Bandbreite liefern. Deshalb schließt sich bei Inbetriebnahme jeder WEA eine kurze Lernphase des SHM-Systems an. In dieser Lernphase lernt das SHM Wind-System bei jedem einzelnen Rotorblatt sein Überwachungsobjekt durch eine intelligente Auswertung der Messdaten näher kennen und findet seine Referenzwerte selbst. Das soll an einer Übersicht über den Datenfluss in Abbildung 6.3.2-2 gezeigt werden. Die Anlagendaten (Windgeschwindigkeit, Temperatur des Rotorblattes, Pitchwinkel, Leistung der Anlage usw.) und die niederfrequenten Monitoringdaten in Form von Beschleunigungen werden über 24 Stunden am Tag kontinuierlich mit 250 kHz abgetastet und in Blöcken als Rohdaten in einen Ringspeicher geschrieben. In einer vieldimensionalen Capture-Matrix erfolgt danach eine Zuordnung von Schwingungsdaten zu unterschiedlichen Anlagenzuständen, z. B. zu einem bestimmten Pitchwinkel oder einer bestimmten Drehzahl, bzw. zu Umgebungsbedingungen wie Temperatur oder Windgeschwindigkeit.

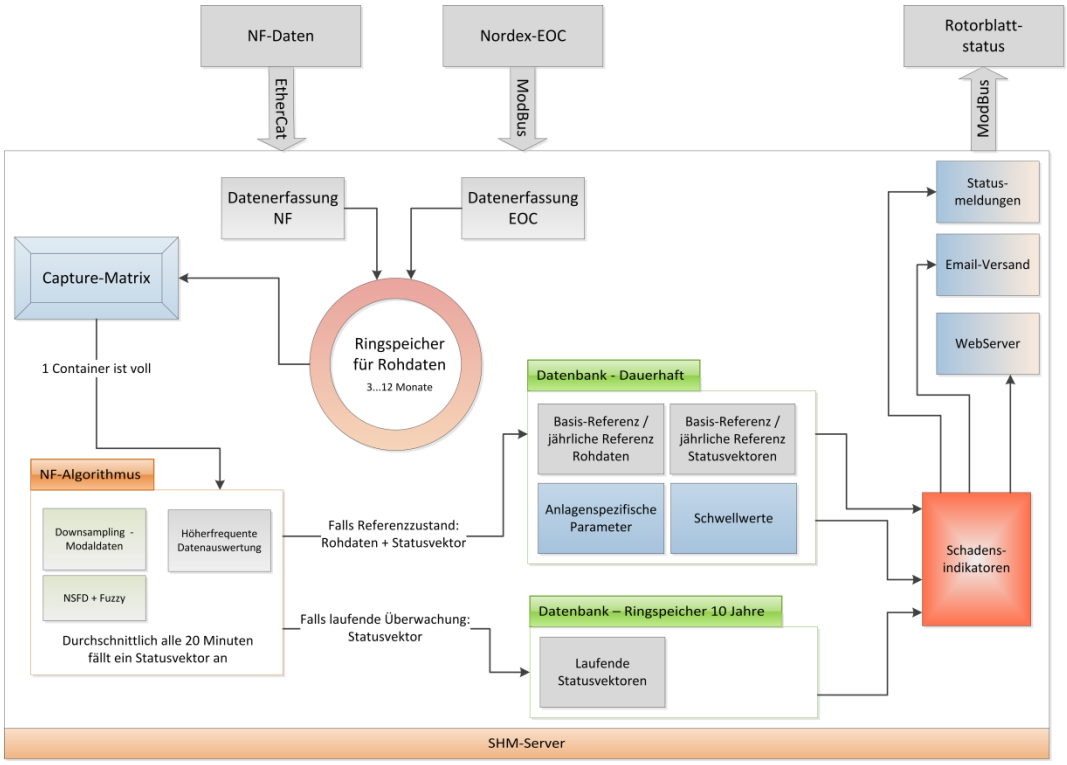


Abbildung 6.3.2-2: Datenfluss für Schwingungs- und Anlagendaten

Beispielsweise werden die Beschleunigungswerte nach den Merkmalen Windgeschwindigkeit und Temperatur zu Clustern zusammengefasst und in Container der Capture-Matrix eingetragen (vgl. dazu Abbildung 6.3.2-3).

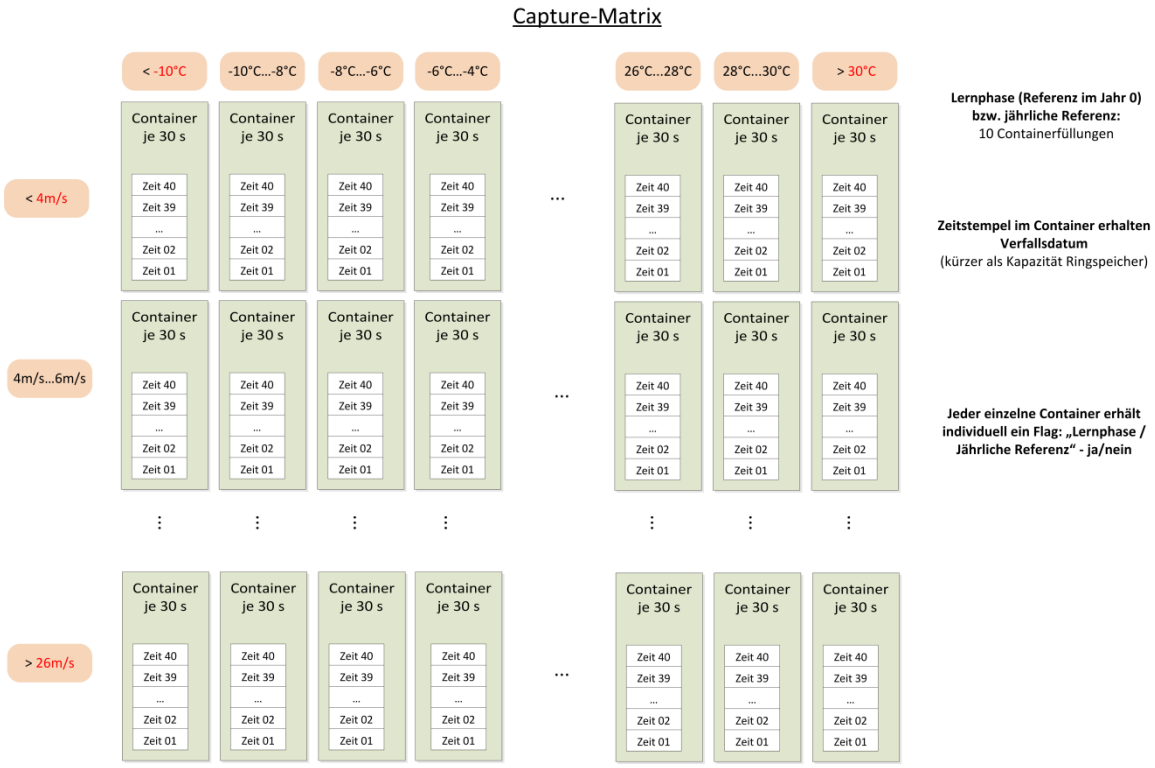


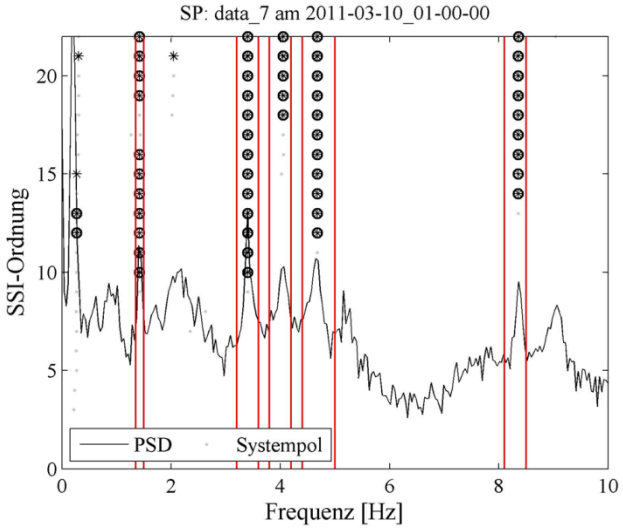
Abbildung 6.3.2-3: Organisation der Capture-Matrix

Ist ein Container gefüllt, wird sein Inhalt mit Hilfe der Stochastic Subspace Identification analysiert und in Form eines Statusvektors zusammen mit den Rohdaten in eine Datenbank geschrieben. Wurde ein Container 10 Mal befüllt, ist die Lernphase abgeschlossen und ein Referenzwert in Form eines Referenzstatusvektors für die betreffende Kombination Windgeschwindigkeit plus Temperatur gefunden. Ab diesem Zeitpunkt werden die Rohdaten nicht mehr in der Datenbank gespeichert. Im Abstand eines Jahres werden die abgelegten Statusvektoren durch Referenzmessungen analog zur Lernphase wiederholt. Aus der laufenden Überwachung werden nur die Statusvektoren in die Datenbank geschrieben.

In der Datenbank befinden sich neben Statusvektoren und Rohdaten aus der Lernphase auch die jährlich neu ermittelten Rohdaten, Statusreferenzvektoren und Schwellenwerte und weitere anlagenspezifische Daten. Mit Hilfe dieser Daten werden in SHM Wind Schadensindikatoren berechnet. Nach diesem Verfahren setzt sich das SHM-System vollautomatisch die Referenzwerte für jedes einzelne Rotorblatt. Sie beschreiben den gesunden Zustand eines Rotorblattes.

Der Grundgedanke des SHM-Systems soll beispielhaft anhand der Versuche auf den Teststänlden und einer rotierenden Anlage nochmals näher erläutert werden. Einer der grundlegenden Schritte des Health Monitoring besteht in der Extraktion der Systempole aus den Messdaten. Dazu werden Stabilitätsplots erstellt. In Abbildung 6.3.2-4 b zeigen die schwarzen Kreise, dass die Dämpfungsverhältnisse und die Schwingungsformen der Blätter bei den entsprechenden Eigenfrequenzen für unterschiedliche Systemordnungen stabil sind.

Abbildung 6.3.2-4 a: WEA in Uelitz



6.3.2-4 b: Modalanalyse mit Darstellung stabiler Systempole für WEA in Uelitz, sog. Stabilitätsplot, SP

Zur Erzeugung des Stabilitätsplots in Abbildung 6.3.2-4 b werden die Pole (sie beinhalten u.a. die Eigenfrequenzen, modale Dämpfung und Eigenvektoren) eines Zustandsraummodells für unterschiedliche Modellordnungen gerechnet. Ändern sich die Eigenfrequenzen, modale Dämpfungen und Eigenvektoren von einer Modellordnung zu der nächst höhen Modellordnung nicht bzw. nur in einer vorgeschriebenen Toleranzgrenze, dann werden die Systempole als stabil bezeichnet. Die schwarzen Kreise zeigen, dass die entsprechenden Eigenfrequenzen und die dazugehörigen Dämpfungsverhältnisse und Eigenvektoren über die Modellordnung stabil sind. Die Kurve stellt ein aus allen beteiligten Sensoren gebildetes, auf die Modellordnung normiertes und gemitteltes Leistungsdichtespektrum dar. Dieses wird für die Berechnungen der Modalanalyse nicht verwendet und dient lediglich zu einem visuellen Vergleich zwischen den Spektren und berechneten Eigenfrequenzen des Systems.

Wenn diese Messungen über der Zeit aufgetragen werden, kann man die Änderung der stabilen Eigenwerte mit der Zeit sehen, welche sich selbstverständlich auch mit den variablen Umweltbedingungen (Windgeschwindigkeit, Temperatur usw.) und den wechselnden Betriebsbedingungen (Drehzahl, Pitchwinkel usw.) ändern. Dies ist in Abbildung 6.3.2-5 dargestellt.

Eine der wichtigsten Aufgaben bestand darin, Veränderungen der Monitoringdaten, die auf geänderten EOCs beruhen, von solchen zu trennen, hinter denen sich die Entwicklung eines Strukturschadens verbirgt. Deshalb wird während der Lernphase des Algorithmus die Abhängigkeit der Schädigungsmerkmale zu den EOCs mit Hilfe der Regressionsanalyse (EOCs sind messbar) bzw. der Hauptkomponentenanalyse (EOCs sind nicht messbar) definiert. Die Trennung zwischen dem geschädigten und dem ungeschädigten Zustand des Systems erfolgt erst nach der Bildung des Referenzzustandes in einer sogenannten Testphase, die auch als Detektions- oder Online-Phase bezeichnet wird. Dabei werden die extrahierten Merkmale bzw. Indikatoren mit dem Referenzzustand des Systems verglichen.

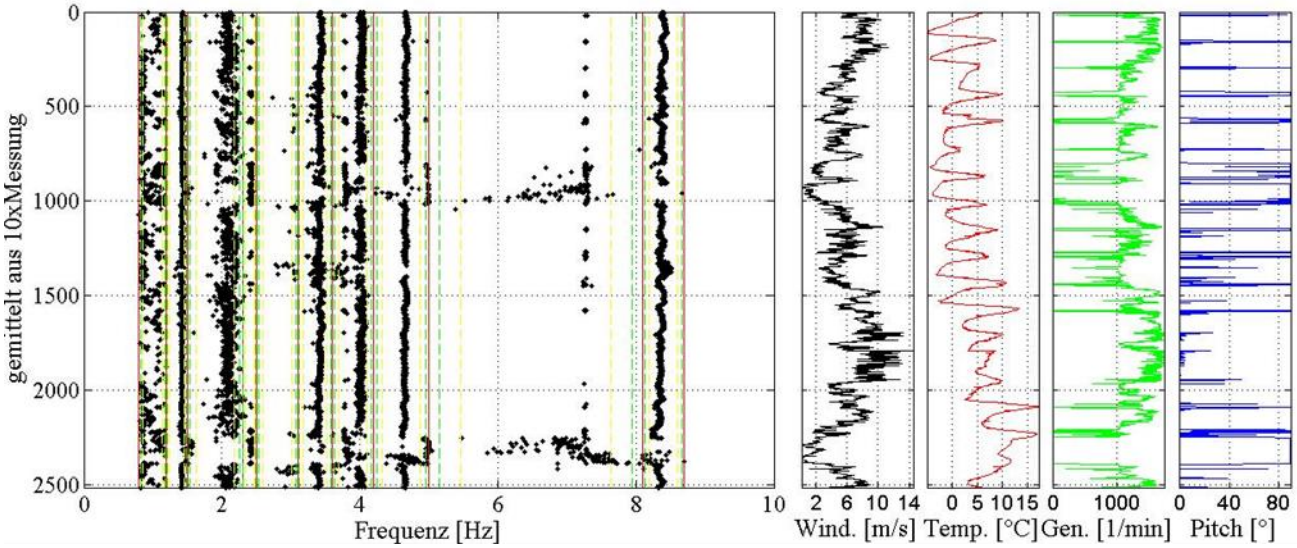


Abbildung 6.3.2-5: Ergebnisse einer automatisierten Langzeitüberwachung eines rotierenden Blattes der WEA in Uelitz (Zeitraum Februar bis März 2011)

Bei der PCA geht es um die Darstellung von multivariaten Daten auf einem niedrig-dimensionalen Raum mit einem minimalen Verlust an Information. Abbildung 6.3.2-6 gibt ein sehr einfaches Beispiel der PCA-Anwendung zur Erfassung der Veränderung der ersten drei Eigenfrequenzen des Versuchsstands in Rostock wieder. Da die Eigenfrequenzen der unbeschädigten Struktur sich infolge Temperaturschwankungen linear zueinander ändern (siehe grüne Punkte in Abbildung 6.3.2-6), kann diese Veränderung mit Hilfe der ersten Hauptkomponente sehr gut erfasst werden. Die 1. Hauptkomponente (für den einfachen 2-D Fall eine Gerade) repräsentiert den Referenz- oder Sollzustand der Struktur. Der Abstand der gelben und roten Frequenzwerte zu der Gerade gibt Auskunft über den Schädigungszustand der Struktur. Überschreiten die vordefinierten Abstände (z. B. Euklidischer Abstand) zwischen den aktuell gemessenen Werten und dem Referenzzustand eine aus statistischer Sicht etablierte Grenze, spricht man von der Entdeckung eines neuen Zustands des Systems. Dieser neue Zustand kann durch eine Änderung der Merkmale infolge von Strukturschäden entstanden sein, oder er kann das Ergebnis einer unzureichenden Lernphase sein, in der der Referenzzustand nicht ausreichend definiert wurde.

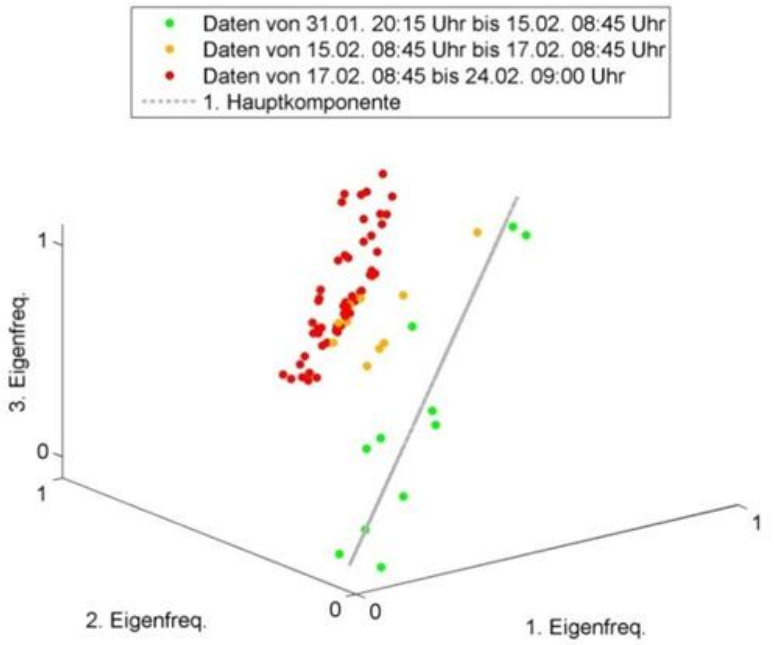


Abbildung 6.3.2-6: Abstände dreier Merkmale (Eigenfrequenzen 1 bis 3) in einem normierten Raum zum Referenzzustand (1. Hauptkomponente). Kompensation der Umgebungseinflüsse mit Hilfe der PCA

Die roten Punkte sind somit Ausdruck einer strukturellen Veränderung, die nicht auf Temperaturschwankungen zurückgeführt werden kann, z.B. können sie einen Schaden zeigen. Wie aus Abbildung 6.3.2-6 zu entnehmen ist, benötigt die Methode keine direkte Messung der Temperatur. Es muss schließlich sichergestellt werden, dass Strukturveränderungen infolge Temperaturschwankungen während der Lernphase des Algorithmus durch Messungen erfasst werden.

Der zulässige Abstand der Merkmale zum Referenzraum (vgl. Abbildung 6.3.2-6) wurde während der Lernphase mit Hilfe der Ausreißer-Analyse (Outline Analysis) definiert. Abbildung 6.3.2-7 zeigt die Trennung zwischen dem ungeschädigten und geschädigten Zustand des Rotorblattes anhand der Schwellenwertüberschreitung.

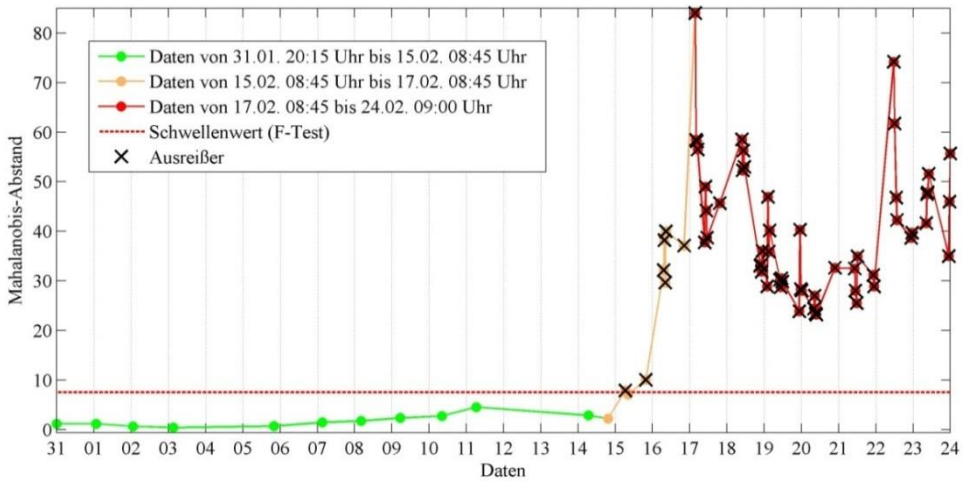


Abbildung 6.3.2-7: Statistische Entscheidung auf Grundlage der Outline-Analysis. Dieses Diagramm wird weiterentwickelt zum Damage Indicator. Grüne Linie: Struktur in Ordnung; rote Linie: Struktur geschädigt

In SHM Wind werden Messdaten, die nicht durch die statistische Basis abgesichert werden können, als Ausreißer (engl. ‚outlayer') bezeichnet. Fehlerhafte Messungen können durch Routinen zur Identifikation von Sensorfehlern ausgeschlossen werden. ‚Ausreißer' bezeichnet zunächst nur die messtechnische Beschreibung eines unbekannten Zustandes. Der englische Fachbegriff ‚novelty detection' trifft diesen Sachverhalt wesentlich genauer als der deutsche Fachbegriff ‚Ausreißer'. Ob sich hinter einem Ausreißer ein Schaden oder eine andere Ursache verbirgt, muss mit anderen Kriterien entschieden werden. Eines dieser Kriterien ist die notwendige Überschreitung des Konfidenzintervalls durch konsekutive Ausreißer. Weitere Kriterien kommen aus dem Verständnis der Strukturdynamik der WEA.

Eine Auswertung der Ergebnisse der Langzeitüberwachung der rotierenden Blätter in Uelitz ist in Abbildung 6.3.2-8 zusammengefasst. Die statistischen Tests für die Residuen zwischen den extrahierten Merkmalen und dem Referenzzustand zeigen, dass die meisten Daten unter dem Schwellenwert der Verteilung der Residuen bleiben. Damit ist eine Klassifizierung des Blattes als „ungeschädigt" möglich. Die wenigen Ausreißer, die bereits während der Lernphase aufgetreten sind, repräsentieren lediglich zugelassene Ausreißer im Rahmen des voreingestellten Konfidenzintervalls für die Verteilung der Residuen. Diese Ausreißer können auch auf regelungsbedingte Ausnahmeereignisse der Anlage zurückgeführt werden. Sie sind nicht repräsentativ für das Anlagenverhalten und treten nur sporadisch auf.

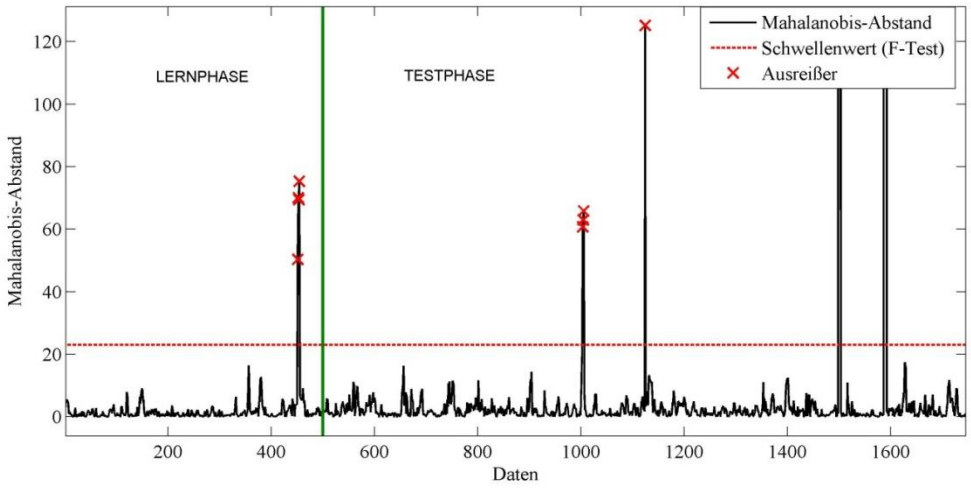


Abbildung 6.3.2-8: Ausreißer-Analyse der drehenden Rotorblättern in Uelitz

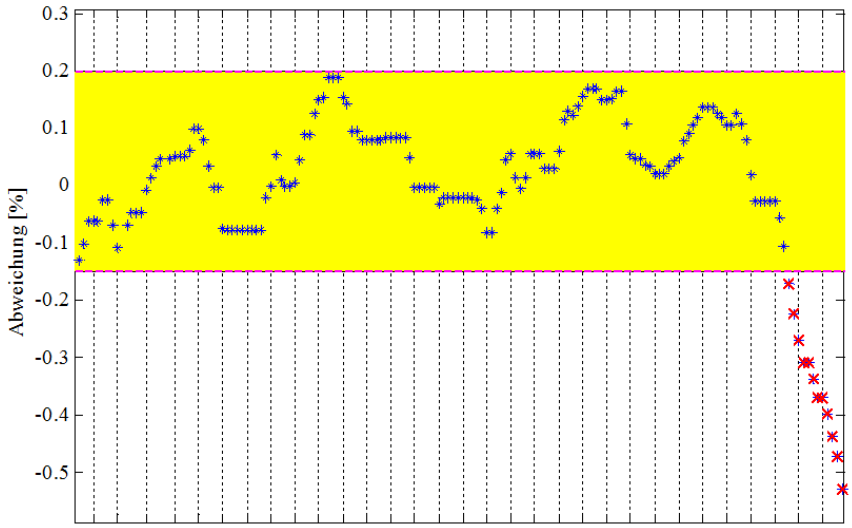


Abbildung 6.3.2-9: Detektion des Hinterkantenrisses bei einem Ermüdungstest. Kombination zwischen Modalanalyse und robuster Regressionsanalyse

Die Abbildungen 6.3.2-9 und 6.3.2-10 zeigen die oben dargestellte Vorgehensweise anhand der Entstehung eines Schadens. Er wurde bei einem Ermüdungsversuch auf dem Teststand bei einer Anregung „flapwise“ erzeugt. Die Schadensindikatoren stützen sich auf die Auswertung der Modaldaten anhand der Regression und/oder Hauptkomponentenanalyse. Der Schaden konnte in seiner Entstehungsphase entdeckt werden, als visuell noch keine Schädigungsmerkmale sichtbar waren.

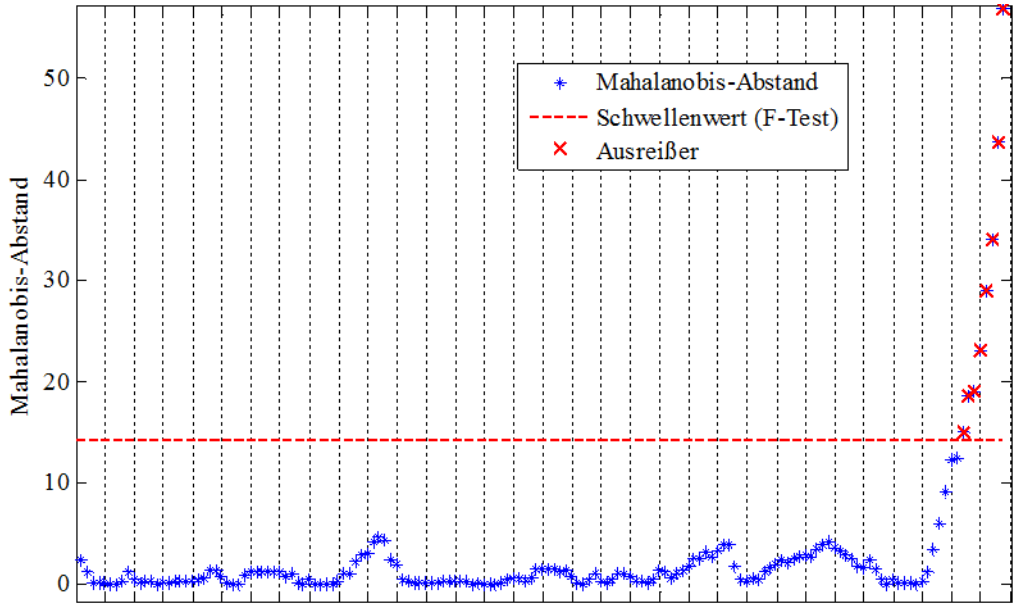


Abbildung 6.3.2-10: Schadensindikator beim Beginn der Rissentwicklung an der Blatthinterkante. Kombination zwischen Modal- und Hauptkomponentenanalyse

Insgesamt gesehen kommt das von Wölfel entwickelte SHM-Verfahren mit wenigen Sensoren pro Rotorblatt aus und stützt sich auf die dargelegte Messung der integralen Größen Schwingungen und Schall. Denn die Eigenfrequenzen von Rotorblättern verändern sich, wenn infolge eines Schadens die Steifigkeit abnimmt oder wenn durch Eisbesatz die schwingende Masse größer wird. Eisbesatz ändert auch das aerodynamische Profil eines Blattes und damit schließlich auch das Strömungsgeräusch. Unter Umständen entsteht durch Eisansatz neben der Massenunwucht auch eine aerodynamische Unwucht des Rotors.

Schwingungen in Form von Beschleunigungen, Schalldruck und die Temperatur werden in jedem Rotorblatt gemessen. Besonders die Beschleunigungsaufnehmer müssen hochempfindlich sein und einen sehr guten Signal-Rausch-Abstand haben, denn die zu erkennenden und zu bewertenden Veränderungen sind in der Regel weitaus kleiner als 1 Hz. Die Sensorsignale werden in der DAU (data acquisition unit) digitalisiert, zwischengespeichert und dann über eine TCP/IP-Verbindung in die Gondel geschickt und dort weiter verarbeitet. In der Gondel befindet sich die DPU (data processing unit) in Form eines Industrie-PCs. Hier werden die Messdaten ausgewertet und weiter verarbeitet. Dazu müssen aus der Anlage die aktuellen Betriebsdaten wie Windgeschwindigkeit, elektrische Leistung, Generator- oder Rotordrehzahlen und Pitchwinkel abgerufen werden. Die Sensorsignale bzw. Monitoringdaten werden zusätzlich einer automatischen Plausibilitätskontrolle unterworfen.

6.3.3 Ergänzende Verfahren und Decision Support, IZP

6.3.3.1 Vorbemerkung

Die Projektaufgaben des Partners IZP mussten während der Projektlaufzeit geändert werden. Es werden im Weiteren nur die Ergebnisse zum neuorientierten Aufgabenprofil dargestellt, Vergleiche mit den ursprünglichen Aufgaben werden nicht durchgeführt.

6.3.3.2 Datenerfassung

Einordnung

IZP hatte die Verwaltung der anfallenden Messdaten zu übernehmen. Dafür sollten Konzepte erarbeitet werden, die sowohl für die Felddaten in Uelitz als auch für die Testdaten bei IMA wirksam werden konnten. Schließlich war ein Tool zur Speicherung und Archivierung in eine Datenbank und deren Handling zu entwickeln.

Zwei Anforderungen dafür:

- Synchronisation der eigentlichen Messwerte aus dem Monitoring (im Folgenden **Monitoringdaten**) mit den Messwerten der Umwelt- und Betriebsbedingungen (im Folgenden **Betriebsdaten**)
- Filtermöglichkeiten des Datenbestands nach vorgegebenen Kriterien für die Entwicklung und Validierung von Auswertungsalgorithmen

Fragen, die im Vorfeld geklärt werden mussten:

- Wie viele Daten fallen in welcher Zeit an? Wie sind Rechnerleistung und Festplattenkapazität zu dimensionieren?
- Wie soll die Datensicherung (Backup) erfolgen?
- Wie sind die Datenstrukturen beschaffen? Welche Daten liegen als ASCII-Daten vor und welche als Binärdaten?
- Wie erfolgt die Zuordnung von Monitoringdaten und Betriebsdaten?
- Nach welchen Kriterien sollen sich die Daten filtern lassen?

Konzept und Umsetzung

Jede Lösung, auch eine spätere Industrielösung, wird auf ein **Datenbankmanagementsystem** (DBMS) zurückgreifen müssen. Dessen Wahl orientiert sich an den folgenden Leitlinien. Das DBMS soll

- möglichst für verschiedene Betriebs- und Rechnerplattformen verfügbar und
- gut skalierbar sein (sowohl für „kleine“ als auch für „große“ Lösungen einsetzbar), da das Datenvolumen einer „fertigen“ Lösung zur Entwicklungszeit nicht abgeschätzt werden konnte.

Die Wahl fiel auf **Firebird**. Einige Gründe:

- Firebird ist ein leistungsfähiges, aber in Bezug auf Rechnerleistung, Platzbedarf und Administrationsaufwand vergleichsweise anspruchsloses Datenbanksystem;
- Weder im Rahmen der Entwicklung, noch im Rahmen des Einsatzes entstehen Lizenzkosten;
- Ein Firebird-Datenbankserver kann aktuell unter Windows, Linux oder Solaris betrieben werden. Für die Version 2.0 existiert sogar ein Port auf die ARM Plattform (Linux).

Rechentechnik

Vereinbarungsgemäß wurden zwei HP ProLiant DL 120 G5 angeschafft (1 x Uelitz, 1 x IMA). Einer der Rechner wurde in den Räumen der IZP vollständig installiert, wobei unter anderem die beiden vorhandenen 250 GB Festplatten zu einem RAID 1 Verbund für erhöhte Ausfallsicherheit zusammengeschaltet wurden. Alle Simulationen und Tests fanden auf diesem System statt.

Die Abstimmungen hinsichtlich **Datenstruktur** und die Arbeiten dafür erstreckten sich über einen längeren Zeitraum. Einige Aspekte dazu:

- Datentypen und Maßeinheiten, auch und insbesondere bei Umweltdaten,
- Vorgehensweise bei Ausfall von Komponenten der Messsysteme und damit verbundener Umgang mit ggf. fehlerhaften Daten,
- Algorithmus für die Interpolation von Umweltdaten auf den Zeitpunkt der Messung der Monitoringdaten, insbesondere bei zwischenzeitlichem Ausfall von Messsystemen,
- Konsistenz und ggf. Überlappung von Messwerten (Übergabezeitpunkt von Messwerten als ASCII-Datei von Messteams an IZP Datenbank, Überlappung von geloggten Umweltdaten).

Das Datenbanksystem wurde einem **Stresstest** unterworfen, wodurch sich zeigte, dass die geplante Kombination aus Rechnerleistung und Datenbankmanagementsystem für den vorgesehenen Einsatz geeignet war.

Die **Software** wurde modular als ein Paket konzipiert, welches ohne Nutzerinteraktion in der Lage ist, zyklisch Textdateien einzulesen, zu verarbeiten, nach Anforderungen zu transformieren und in eine Datenbank zu speichern.

Als Module waren vorgesehen:

- Eine Funktion für die eigentliche Datenverarbeitung, die als Dienst autonom unter MS Windows läuft (SHM-Catcher genannt) mit einer Reihe weiterer Unterfunktionen,
- eine Funktion, die den SHM-Catcher überwacht und kommunizieren kann, wenn der Dienst nicht mehr funktioniert (z.B. per E-Mail),
- eine Archivierungsfunktion, die regelmäßig Backups der Datenbank erstellt.

Im Demonstrationsprogramm wurden sämtliche Funktionen integriert und mit simulierten Daten getestet. Die eigentlichen Fallstricke einer Lösung, nämlich fehlerhafte oder unvollständige Daten, konnten zu dieser Zeit noch nicht an echten Daten getestet werden.

Das **Zusammenführen** der Monitoringdaten mit den Betriebsdaten erfolgte durch lineare Interpolation. Trotz der Einfachheit dieses Ansatzes entsteht rechentechnisch erheblicher Aufwand. Einige Stichworte: Grenzwerte der Einsatzdaten bestimmen oder festlegen, Zeitsynchronisation erzeugen, Interpolation ausführen, alles gegebenenfalls iterativ.

Andere Konzepte zur Zusammenführung (Synchronisierung der Messungen, Taktung der Messungen) wurden verworfen, weil sie vor allem messtechnisch nicht realisierbar waren.

Ergebnisse

Grundsätzlich wurden die angestrebten Ziele erreicht, aufgrund des Projektablaufs konnten sie allerdings unter Realbedingungen weder getestet noch eingesetzt werden.

Für die nachfolgenden Arbeiten stellte insbesondere die Programmierung einer konfigurierbaren Schnittstelle zum Einlesen und zur Simulation von Daten eine wertvolle Vorarbeit dar. Darüber hinaus konnten die konzeptionellen Ansätze bezüglich Zusammenführen von Monitoring- und Anlagen-/Umweltdaten sowie der Validierung der Eingangsdaten weiter verwendet werden.

6.3.3.3 Datenarchivierung und -aufbereitung für das Decision Support System

Einordnung

Weiterer Schwerpunkt für die IT-Arbeit der IZP war die Entwicklung von möglichen Strategien zur Archivierung und Vorverarbeitung der Messdaten. Aufbauend auf den bisherigen Arbeiten rückte allerdings im Verlauf des Projektes eine mehr industrietaugliche Variante der notwendigen Datenverarbeitung für ein SHM-System in den Vordergrund.

Ziel der geänderten Aufgabenstellung war die Entwicklung einer Lösung, um

- die Eingangsdaten zu archivieren,
- die Eingangsdaten für die nachfolgenden Analysemethoden zu clustern,
- die Ergebnisse der verschiedenen Analyseverfahren als Referenzdaten zu archivieren und dem Decision Support System zur Verfügung zu stellen sowie
- als eine Art Front-end die Visualisierung der Entscheidungslogik (Decision Support System) vorzunehmen.

Die letzte Zielstellung war ein eigenständiges Thema und konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr bearbeitet werden.

Die Monitoringdaten wurden analog zur bisherigen Vorgehensweise bereitgestellt, die Betriebsdaten (Anlagen- und Umweltdaten) dagegen werden vom **SCADA-System** der Windenergieanlage über eine Modbus-Schnittstelle zur Verfügung gestellt.

Entscheidungen bezüglich der **Plattform** wurden in der Projektlaufzeit noch nicht getroffen.

Die zentrale **Anforderung** war die Clusterung der Monitoringdaten in einer sogenannten Capture-Matrix, da die Modalanalyse auf der Basis klassierter Messwerte durchgeführt werden soll. Die Anzahl der Klassen ist komponentenabhängig (abhängig von den Einflussgrößen wie Temperatur oder Windstärke). Datensätze sollen nur bis zu einem bestimmten Alter archiviert bleiben.

Für die Datenverarbeitung bedeutet dies:

- jeden Datensatz nach einer definierten Anzahl von Einsatzkomponenten zu klassieren,
- den Datensatz in einen der Klassierung entsprechenden Container der Capture-Matrix einzusortieren,
- volle Container (Container, die eine definierte Obergrenze an Datensätzen erreicht haben) als Block für die Auswertung zur Verfügung zu stellen,
- im Zuge des altersbedingten Entfernens von Datensätzen die Konsistenz der Daten zu gewährleisten.

Konzept und Umsetzung

Die in 6.3.3.2 geschilderten Arbeiten flossen in das erweiterte Konzept ein.

- Die Anbindung der Monitoringdaten konnte übernommen werden. Bemerkung dazu: Die IZP erachtet den Import der Daten aus Textdateien als nicht geeignet für eine industrietaugliche Lösung. Das direkte Schreiben von Messwerten in die Datenbank ist aus unterschiedlichen Gründen in jedem Falle vorzuziehen.
- Die Vorarbeiten zur Zusammenführung der zwei Datengruppen hatten ebenso Bestand. Sie wurden aber für die konkreten Arbeiten nicht benötigt, da nach wie vor keine Felddaten zur Verfügung standen.
- Auch die Archivierung der Daten konnte auf den bisherigen Arbeiten aufbauen. Zu erweitern war die bisherige Vorgehensweise um diverse Datensatzkennzeichnungen sowie ein Konzept und Tool zum Aufräumen der Datenbank.

Aus den Erfahrungen der ersten Projektphase wurden die bisherigen **Designziele** ergänzt durch

- größtmögliche Flexibilität/Konfigurierbarkeit zur Anpassung an geänderte Anforderungen durch Parametrisierung und Modularisierung;
- Portabilität bezüglich Betriebs- und Datenbanksystem.

Einige Recherchen zeigten, dass die Anbindung an ein SCADA-System mit Hilfe der bisher genutzten Programmierwerkzeuge möglich ist, dass Bibliotheken zum Zugriff auf einen **Modbus-Client** existieren. Die Demonstrationslösung des ersten Projektabschnitts wurde deshalb so weiterentwickelt, dass auch Umweltdaten mittels Modbus-Protokoll zur Verfügung gestellt werden können. Da reale Tests nach wie vor nicht möglich waren (die Datenstruktur betrifft nicht mehr die Anlage in Uelitz), mussten die zu Monitoringdaten gehörenden Einsatzdaten über die benannte Schnittstelle simuliert werden.

Das durch WBI vorgeschlagene Konzept der **Capture-Matrix** (vgl. dazu Abbildungen 6.3.2-2 und 6.3.2-3) wurde gemeinsam mit den Projektpartnern zu dem Ablaufkonzept gemäß 6.3.3-1 verfeinert. Einige dieser Arbeitsschritte sind bereits Bestandteil der Projektphase 1 gewesen (Monitoringdaten in Pufferdatenbank, Einsatzdaten über Modbus-Client, Zusammenführen der Datenarten), ergänzt wurden diese insbesondere durch alle Aktivitäten rund um die Capture-Matrix.

Unabhängig davon läuft zeitlich parallel ein Prozess, der veraltete Datensätze aus der Archivdatenbank und ungültige Datensätze aus der Pufferdatenbank löscht.

Die Synchronisation der drei beteiligten Datenbanken wird gewährleistet, um speziell bei Abstürzen eine Inkonsistenz der Datenbanken zu verhindern.

Beim **Demonstrationsprogramm** Capture-Matrix wurde nach den Erfahrungen der ersten Projektphase besonderes Gewicht auf die Konfigurierbarkeit des Programmes gelegt. Die Vorgabe der Einsatzdaten mit allen ihren Komponenten und Klassenbildung ist komplett über eine Konfigurationsdatei steuerbar und kann damit leicht und unkompliziert an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden. Auch die Datenbankanbindung und die Datendefinitionen können vollständig durch eine Konfigurationsdatei vorgegeben werden.

Einige offene Themen konnten außerdem bearbeitet werden.

Offen in Bezug auf das Demonstrationsprogramm waren:

- Integration der SCADA-Anbindung (Modbus-Protokoll)
- Modularisierung der Datenbankanbindung (Lösung von der festen Bindung an das Firebird Datenbankmanagementsystem)
- Parametrisierung der Datenvalidierung und -transformation

Offen in Bezug auf die Gesamtaufgabenstellung waren:

- Feldtests des Programmes mit Realdaten
- Portierung des Programmes auf eine Betriebssystem- und Rechnerplattform
- Arbeiten am Visualisierungskonzept des Decision Support Systems

Am Demonstrationsprogramm wurde nicht weitergearbeitet, da wegen des generellen Projektarbeitsstandes keine neuen Erkenntnisse oder Lösungsansätze für das SHM Thema zu erwarten gewesen wären.

Stattdessen entschied sich die IZP für das in Bezug auf eine Industrielösung interessanteste Thema, nämlich die **Portierung des Programmes**. Hintergrund dafür waren projektinterne Diskussionen, bei denen es um die Frage ging, welche Betriebssystemplattform und Rechnerarchitektur für ein Monitoringsystem am besten geeignet wären.

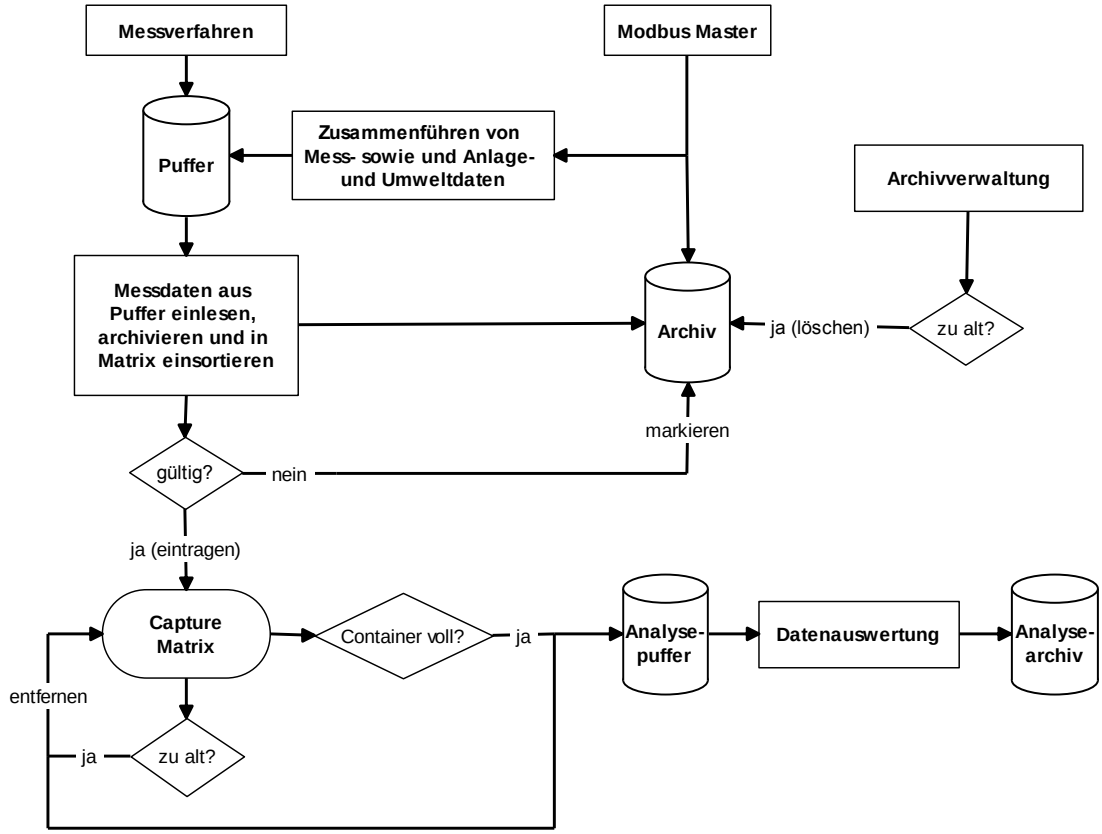


Abbildung 6.3.3-1: Konzept Capture-Matrix

SCADA-Systeme laufen üblicherweise auf kleinen, robusten, aber eher leistungsarmen Rechnern. Es handelt sich dabei nicht um x86-, sondern um ARM-Rechner. Als Betriebssysteme kommen Windows CE, Linux oder weitere embedded Betriebssysteme zum Einsatz.

Dass für die Erprobung eines SHM-Systems ggf. leistungsfähige Hardware benötigt wird, stand nicht zur Diskussion. Die IZP vertritt jedoch die Meinung, dass eine industrietaugliche Lösung, die auf einer Windenergieanlage zum Einsatz kommen soll, nicht nur im Bereich der unmittelbaren sensorischen Datenerfassung innerhalb von Rotorblättern und Rotornabe, sondern auch im Bereich der Auswertungseinheit (Datenmanagement, Datenanalyse, Decision Support System) mit geringen Systemanforderungen auskommen muss und idealerweise auf einer ARM/Windows CE oder ARM/Linux Plattform lauffähig sein muss. Als ein weiteres IT-Ziel hatte sich IZP daher eine solche Portierung des Demonstrationsprogrammes vorgegeben.

Wichtige Arbeitsschritte und **Ergebnisse dieser Entwicklung**:

- Stufenweise Portierung von Delphi (Zielsystem und Entwicklungsplattform Windows)
  1. zu FreePascal (Zielsystem Windows / Entwicklungsplattform Lazarus für Windows),
  2. zu FreePascal (Zielsystem Linux und Entwicklungsplattform Lazarus für Linux, x86)
  3. zu FreePascal (Entwicklungsplattform Lazarus/Linux für x86, Zielsystem ARM)
- Vereinfachung des Programmcodes vor allem in Hinblick auf die grafische Oberfläche, um nicht mit noch anderen Bibliotheken arbeiten zu müssen
- Umstellung des Programmcodes und der benötigten Bibliotheken auf FreePascal und Kompilierung mit dem FPC unter Windows für Win32. (Vorteilhaft, dass die bisherige Entwicklung weitgehend mit Open-Source-Komponenten erfolgte.)
- Kompilierung des Programmcodes unter Linux. Neben weiteren Anpassungen beim Zugriff auf Systemfunktionen musste für einen Bug in der Client Bibliothek des Firebird Datenbankservers ein Workaround gefunden werden.

Der letzte Schritt, die Portierung auf Linux/ARM, konnte nicht mehr vollendet werden. Zum einen fehlte dazu die erforderliche Zeit, zum anderen konnte die erforderliche Testplattform nicht mehr rechtzeitig beschafft werden. Das Programm läuft fehlerfrei unter Linux/x86 und Windows.

6.3.3.4 Modellierung von Referenzfunktionen für das OMA-Messverfahren

Einordnung

Das **OMA-Messverfahren** (Operational Modal Analysis) des Projektpartners WBI nutzt u. a. die Kenngrößen „Eigenfrequenzen“, „Eigenformen“ und „Dämpfung“ des Rotorblatts, um dessen Schadzustände sowie deren zeitliche Entwicklung erkennen zu können.

Die Kenngrößen sind erstens abhängig von Einflussgrößen aus WEA-Betrieb und Umwelt. Zweitens sind nicht vordergründig die Werte der Kenngrößen von Interesse, sondern deren Veränderungen im Zeitverlauf. Um zeitliche Veränderungen der Kenngrößen zu detektieren, braucht es die Kenntnis des Ausgangs- oder Referenzzustands dieser Kenngrößen, und zwar blattindividuell.

Anliegen dieser Modellierung ist die mathematische Beschreibung des Referenzzustands, das heißt eine funktionale Abhängigkeit der Kenngrößen (z.B. Eigenfrequenzen) von den Einflussgrößen beim noch nicht gestörten Blatt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Abhängigkeit letztlich polynomial dargestellt werden kann.

Als **empirische Basis** lagen der IZP für diese Aufgabe zwei Messreihen (10/2011 und 04/2012) vor. Vier Spalten dieser Tabellen enthalten die Haupteinflussgrößen Temperatur t und Windstärke w sowie Generatordrehzahl n und Pitchwinkel β. In den übrigen 10 Spalten sind die Messwerte der Frequenzbänder B1 bis B10 eingetragen. Leider sind jedoch sehr viele Messergebnisse durch zu häufiges Auftreten nicht numerischer Frequenzwerte (NaN) unbrauchbar. Aus diesem Grunde konnten nur einige Frequenzbänder bewertet werden, speziell B2, B6, B8 und B10.

IZP-Untersuchungen betreffen insbesondere folgende Themen:

- Welche der Einflussgrößen sind signifikant, welche eher marginal?
- Welche funktionalen Ansätze für die Referenzfunktion sind erforderlich?
- Wie sollten die ohnehin stark streuenden Messwerte geglättet werden, ohne dadurch die interessierenden Effekte zu verfälschen?

Das dritte Thema (Rauschen der Messwerte) zwingt zu einer Gratwanderung zwischen einerseits einer zu starken Glättung der Messdaten (unpassendes Behandeln zu weit abweichender Streuungsspitzen, Ausreißern) und dadurch potenziellem Verfälschen der Referenzfunktion und andererseits der nicht rechtzeitigen Feststellung einer Schadentwicklung. Dass die Kenngrößenänderung, die mit der Schadentwicklung verbunden ist, im Rauschen untergehen kann, ist der eigentlich kritische Aspekt. Das erfordert eine Basiskenntnis darüber, in welchen Größenordnungen welche Schäden am Blatt den Ausgangswert der Kenngröße zu verändern vermögen (Schadeinflüsse auf die Kenngröße).

In diesem Sinne muss sich der Beitrag der IZP leider etwas bescheiden. Zwar ist das Ziel eine Referenzfunktion. Beim notwendigen Glätten der Messwerte kann aber die Grenze der Schadeinflüsse nicht verbindlich berücksichtigt werden, da hierzu keine Informationen vorliegen.

Arbeitsschritte

Arbeitsschritt 1: Zuerst wurde das Frequenzband B2 mit 2140 numerischen Messwerten aus der Datei vom Oktober 2011 analysiert. Als Einflussgrößen wurden Temperatur und Windstärke berücksichtigt. Dies entspricht dem WBI-Konzept einer Capture-Matrix für vorerst genau diese zwei Parameter (vgl. dazu Kapitel 6.3.2).

Die Streuung der Frequenz-Messwerte ist sehr stark. Eine Ursachendiskussion hierzu kann seitens der IZP nur in Vermutungen münden. Diese liefern aber Begründungen hinsichtlich der hier skizzierten späteren Behandlung des Streueffekts:

- Erwartungswert als Kennwertschätzer, Streichen von Ausreißern, damit iteratives Reduzieren der Streubreite bis zu jener Grenze, bis zu der die Fehlererkennbarkeit gewährleistet bleibt. (Jedoch: Gerade zu diesem wichtigen Punkt lagen der IZP noch keine Informationen vor.)

Die Frequenz f wird als Polynom in t und w beschrieben. Der Polynomgrad drei ist vom Ergebnis her motiviert.

$$f(t,w) = a_0 + a_{10}\cdot t + a_{11}\cdot w + a_{20}\cdot t^2 + a_{21}\cdot t\cdot w + a_{22}\cdot w^2 + a_{30}\cdot t^3 + a_{31}\cdot t^2\cdot w + a_{32}\cdot t\cdot w^2 + a_{33}\cdot w^3 \qquad (1)$$

Aus Gründen der grafischen Präsentation wird diese Funktion (1) als eine Schar von Funktionen mit jeweils festem t in Abhängigkeit allein von w zerlegt. Die Abbildung 6.3.3-2 zeigt vier ausgewählte derartige Grafiken. (Die Parameterwerte erlaubten 18 solche Grafiken, die sich aber ihrem Inhalt nach decken.) Interpretation beispielhaft für die Temperatureintragung $-3 \le t < -2$ mit 88 der insgesamt 2140 Sätze: Allen diesen Messungen wird die mittlere Temperatur t=-2,5 zugeordnet und

$$f = f(-2.5, w) = b0 + b1\cdot w + b2\cdot w2 + b3\cdot w3 \qquad (2)$$

als Funktion von w allein betrachtet mit Polynomkoeffizienten b_k aus der üblichen Regressionsrechnung. Die Ergebnisse sind in der Reihenfolge b_0, ..., b_3 in die Kopfzeile eingetragen.

Diskussion:

- Für einige Temperaturklassen (z.B. für t<-4) liegen noch zu wenige Messwerte vor, um gesichert auch für diese Klassen die nachfolgenden Statements vertreten zu können. Auch enthalten einige ansonsten relativ gut gefüllte t-Klassen (z.B. für -3<t<-2) für gewisse Windstärkebereiche noch größere Lücken.
- In allen Temperaturklassen existieren einzelne starke Abweichungen von der Approximationskurve, insbesondere nach unten.
- Die Notwendigkeit eines Polynoms dritten Grades als Ausgleichskurve ist ebenfalls in allen Temperaturklassen nur durch die kleinen Windstärkewerte bedingt.

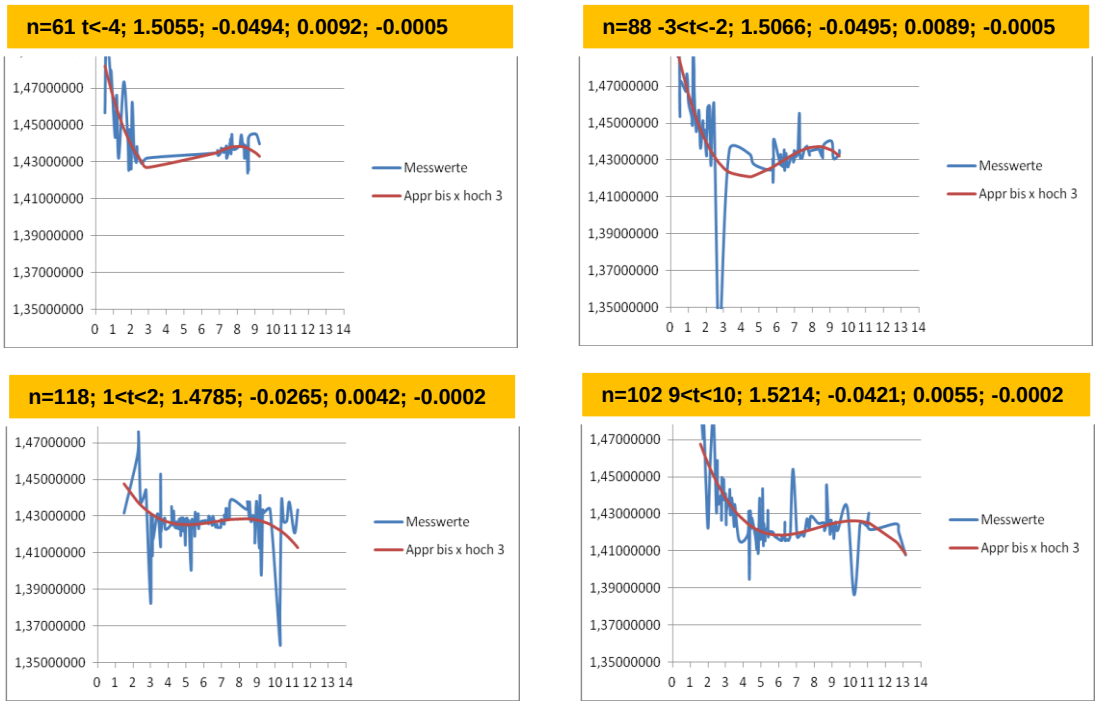


Abbildung 6.3.3-2: Frequenz bei festem t als Funktion von w

Arbeitsschritt 2: Weitere Untersuchungen vorrangig zur Linearisierung der Approximation:

- Vergleiche der bisherigen eindimensionalen Approximation bei fester t-Klasse mit der zweidimensionalen Approximation (1). Diese ergibt
  $f(t,w) = 1.4883 + 0.0016 \cdot t - 0{,}0297 \cdot w + 0.0001 \cdot t^2 - 0.0006 \cdot t \cdot w + 0.0044 \cdot w^2$
  $- 0.0000 \cdot t^3 + 0.0000 \cdot t^2 \cdot w + 0.0000 \cdot t \cdot w^2 - 0.0002 \cdot w^3$.
- Verwendung nur ausgewählter Messwerte mit dem Ziel einer linearen Approximation.
- Glättung der Messwerte
- Einbeziehung der zweiten, im April 2012 vorgelegten Datei zur Bestätigung oder Verbesserung der bisherigen Ergebnisse

Erstes Thema: Liefern die Schnitte (2) ein reales Bild der Fläche (1)? Die Antwort lautet: Ja.

Zweites Thema: Bei **Beschränkung** auf Windstärken zwischen 3 und etwa 10, auf Drehzahlen zwischen 1000 und 1800 und auf einen Pitchwinkel kleiner als null sind die Kennlinien der WEA Uelitz linear. Die Ergebnisse Arbeitsschritt 1 nähren die Hoffnung, dass sich diese Linearität auf die Referenzfunktion überträgt. Deshalb wurde aus der Datei vom Oktober 2011 allein aus Messsätzen mit obigen Einschränkungen (Anzahl 1208) eine lineare Approximation durchgeführt, also die Ausgleichsgeraden

$$f = f(t, w) = b0 + b1 \cdot w \qquad (3)$$

ermittelt, wieder für jede Temperaturklasse separat. Die Einschränkung der Messwerte auf diejenigen des linearen Kennlinienbereichs macht eine Ansatzerweiterung für die Referenzfunktion auf die Einflussgrößen Pitchwinkel oder Drehzahl unnötig.

Drittes Thema: Vor der Schätzung der Ausgleichsfunktionen wurden die Messwerte noch geglättet. Das Prinzip der **Glättung** der Messwerte wurde bereits skizziert:

> Iterative Abfolge in zwei Schritten: Erwartungswert als Kennwertschätzer, Streichen einer gewissen Anzahl von Ausreißern. Reduzieren der Streubreite solange Fehlererkennbarkeit gewährleistet bleibt.

Viertes Thema: Abschließend wurde die gleiche Prozedur mit der Datei vom April 2012 durchgeführt und schließlich mit den Daten beider Dateien. Letzteres erforderte eine Temperatureinschränkung, da beide Dateien in unterschiedlichen Jahreszeiten entstanden sind. Die Ergebnisse sind bis auf statistische Schwankungen gleich.

Ergebnisse: Die Wirksamkeit eines linearen Ansatzes konnte mit den gelieferten Daten nachgewiesen werden. Für die Temperaturklasse -2<t≤-1 sind einzelne Zwischenergebnisse der iterativen Glättung in Abbildung 6.3.3-3 zu finden.

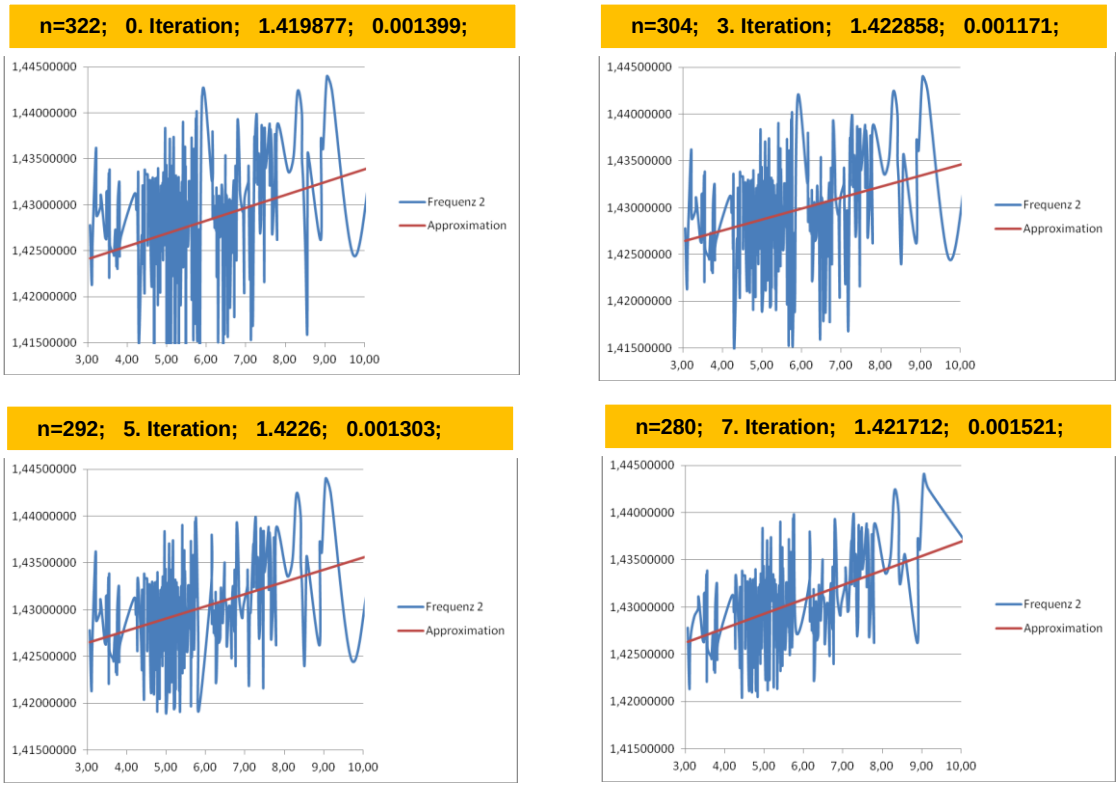


Abbildung 6.3.3-3: Iterative Glättung bei fester Temperatur

Andere Ansätze zur Ausreißerbehandlung mit anderen Abstandsbegriffen (z.B. Mahanalobis-Abstand) benötigen ebenfalls eine Bezugsgröße („Abstand wozu?“). Und diese Bezugsgrößen sind üblicherweise robuste Schätzungen gewisser Mittelwerte. Genau das ist hier geschehen. Offen bleiben noch Diskussionen generell um das Glättungsverfahren. Ohne Kenntnis der Auswirkung von Blattschäden auf die Kenngrößen sind solche Diskussionen aber nur konzeptioneller Natur.

6.3.3.5 Modellierung von Referenzfunktionen für das AU-Messverfahren

Einordnung

Das Grundprinzip aus 6.3.3.4 wird auch beim aktiven AU-Verfahren der Signaturanalyse (**Acousto-Ultrasonics**) des Projektpartners IZFP Dresden verfolgt. Bei diesem Verfahren werden Ultraschallsignale durch Piezowandler in das Blatt eingeschallt und längs gewisser Signalpfade durch umliegende Wandler empfangen. Die Kenngrößen zur Beschreibung des Schadzustands sind hier Signalparameter wie die Hilbertamplitude oder deren Änderungen.

Das Anliegen der Untersuchungen ist wieder die mathematische Beschreibung des Referenzzustands durch eine funktionale Abhängigkeit der Kenngrößen (z.B. Eigenfrequenzen) von den Einflussgrößen beim noch nicht gestörten Blatt. Die Referenzfunktion ist hier nicht nur blattindividuell, sondern individuell für einen jeden Signalweg „Sender-Empfänger“. Einschränkung: Die Messergebnisse konnten der IZP erst kurz vor Projektende übergeben werden, weshalb eine tiefergehende Bearbeitung dieses Themas nicht mehr möglich war.

Die Kenngrößen sind die Hilbertamplitude *HD* und die zwei Zeitwerte *del_gr* und *del*, alle jeweils als Differenzen zweier Messungen. Einflussgrößen sind Innendruck *d*, Außentemperatur *t_a*, Luftfeuchte *rha*, Niederschlag *n* und Windstärke *w*. Messergebnisse wurden von 671 Signalwegen vorgelegt, pro Signalweg-Datei (path) 196 Wertezeilen, also 196/2=98 Messungen zu unterschiedlichen Bedingungen.

Die **Referenzfunktion** für z.B. die Kenngröße HD beschreibt eine Abhängigkeit

$$HD = HD(d, t_a, rha, n, w) \quad (1)$$

für das noch ungestörte Blatt. Die Vorgabe der Kenngrößen als Differenzen (also keine Vorgabe der Hilbertamplitude selbst) erzwingt vorerst die Annahme einer **linearen Abhängigkeit** der Kenn- von den Einflussgrößen. (1) vereinfacht sich dann zu

$$HD = a0 + aD \cdot d + aT \cdot t_a + aR \cdot rha + aN \cdot n + aW \cdot w \quad (2).$$

Bemerkung: Es mussten also für die Referenzfunktionen von vornherein lineare Ansätze gewählt werden, Untersuchungen mit anderen Funktionstypen wurden nicht durchgeführt. Wenn statt der vorgegebenen Differenz-Kenngrößen (wie *HD*) die Kenngrößen selbst (wie *Hilbert-Amplitude*) vorgegeben werden können, kann man von der Linearität des Zusammenhangs abrücken.

Alle hier und im Weiteren verwendeten Abkürzungen wurden oben erklärt, sind aber auch im Verzeichnis der Abkürzungen enthalten.

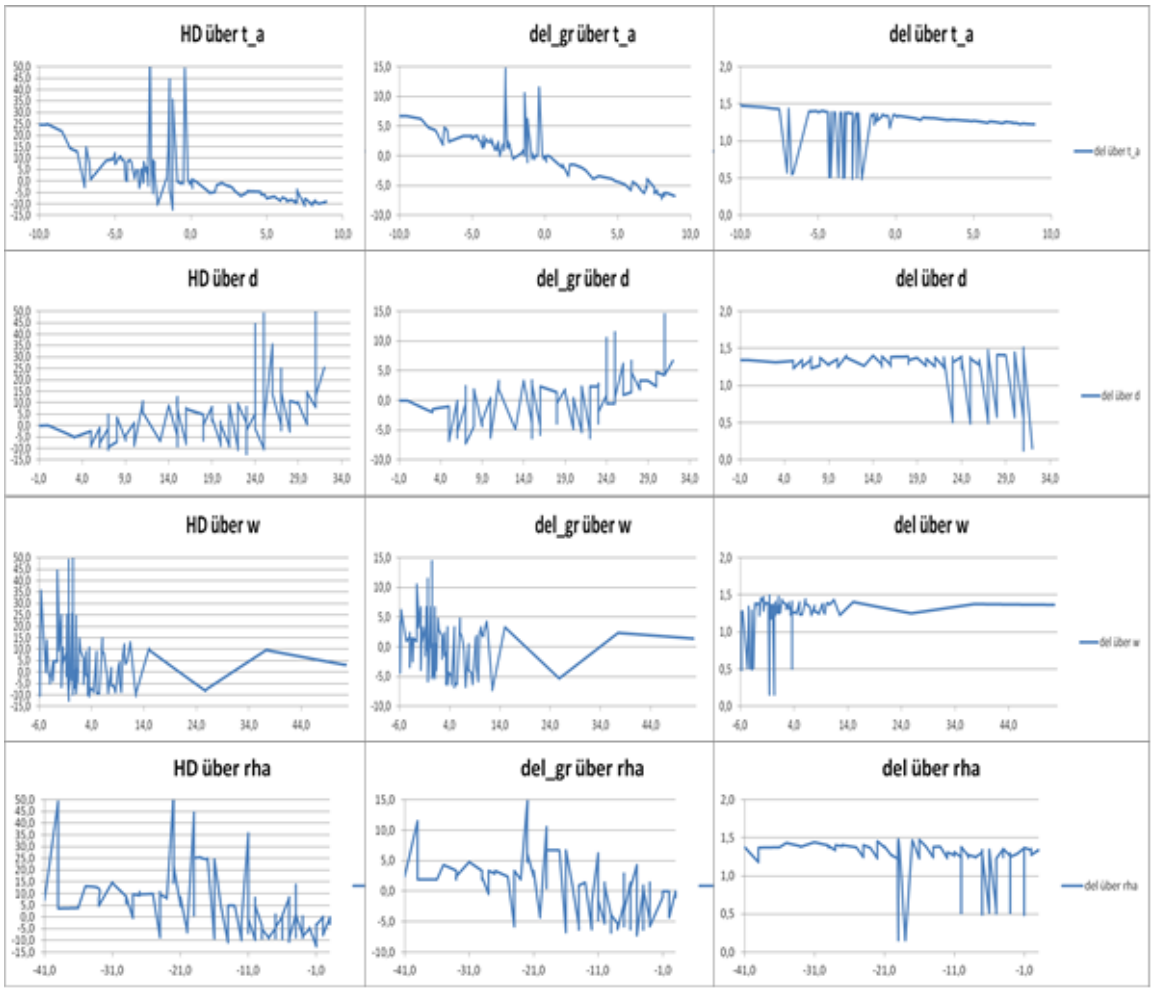


Abbildung 6.3.3-4: Path_0001, Kenngrößen über Einflussgrößen

Arbeitsschritte

Die Untersuchungen erfolgten insbesondere zu nachstehenden Themen:

- Welche der Einflussgrößen sind signifikant, welche eher marginal?
- Führt der lineare Ansatz (2) eventuell sofort zu Widersprüchen?
- Wie sollten die ohnehin stark streuenden Messwerte geglättet werden, ohne dadurch die interessierenden Effekte zu verfälschen?

Beim Glätten der Messwerte konnte die Grenze der Schadeinflüsse nicht verbindlich berücksichtigt werden, da diesbezüglich keine Informationen vorliegen.

Die **Auswertung der Weg-Dateien** wurde aus Zeitgründen nur mit wenigen Wegdateien durchgeführt, diejenige mit der Datei *path_0001* wird hier vorgestellt.

Zuerst wurden die empirischen Gegebenheiten veranschaulicht. Dazu sind sämtliche Kenngrößen über jeweils einer Einflussgröße gezeichnet (Abbildung 6.3.3-4). Die jeweiligen Ordinaten enthalten normierte Messwerte. Die Einflussgröße *Niederschlag* ist dabei unberücksichtigt geblieben, da fast alle Messungen bei Niederschlag=0 aufgezeichnet worden sind.

Bei manchen Doppelmessungen (diejenigen mit gleichen Einflussgrößen) weichen die Ergebnisse stark voneinander ab. Es bestanden diesbezüglich Behandlungsunsicherheiten (z.B. einen mittleren Wert verwenden oder beide Werte gleichberechtigt, Letzteres hier praktiziert).

Einige Dateneigenschaften fallen sofort auf:

- Die Messungen sind mit zum Teil sehr großen Ausreißern belastet.
- Einige Messungen liefern „alternative“ oder diskrete, also scheinbar nicht stetige Ergebnisse, insbesondere del. Eine Approximation kann dann nicht besser werden als die halbe Sprunghöhe und ist daher eventuell überhaupt nicht mehr sinnvoll. Ein solches Flattern der Messwerte kann messseitig verhindert werden und ist hier deshalb kein weiteres Thema.
- Ausreißer, wenn es denn solche sind, existieren auch in der Einflussgröße Wind.
- Von Wind und teils auch der Feuchte sind die Kenngrößen weniger abhängig als von Temperatur und Druck.
- In Abbildung 6.3.3-4 nicht erkennbar, da nur *ein* Weg: Der Grad der Abhängigkeit der Kenn- von den Einflussgrößen ist in hohem Maße wegabhängig.

Glättungen: Ausreißerwerte z.B. bei HD scheinen teilweise gewissen Regeln zu folgen. Sie treten bei mittleren Temperaturen auf, bei höherem Druck, bei kleinen Windstärken, hinsichtlich der Feuchte sind sie jedoch gestreut. Dennoch (auch, weil eine dafür möglicherweise existierende Gesetzlichkeit nicht erkannt worden ist) gehen wir davon aus, dass solche starken Abweichungen von den übrigen „mittleren“ Messwerten zufällig entstehen. Aus diesem Grunde fiel die Entscheidung - wie bereits im Rahmen des OMA-Verfahrens - nicht für multivariate Glättungstechniken, sondern für zielfunktionsorientierte Glättungen. Mit anderen Worten: Da bereits die Verwendung linearer Ausgleichsfunktionen nahegelegt wurde, werden pro Kenngröße die Abweichungen der Messwerte von linearen Ausgleichsfunktionen als Kriterium benutzt.

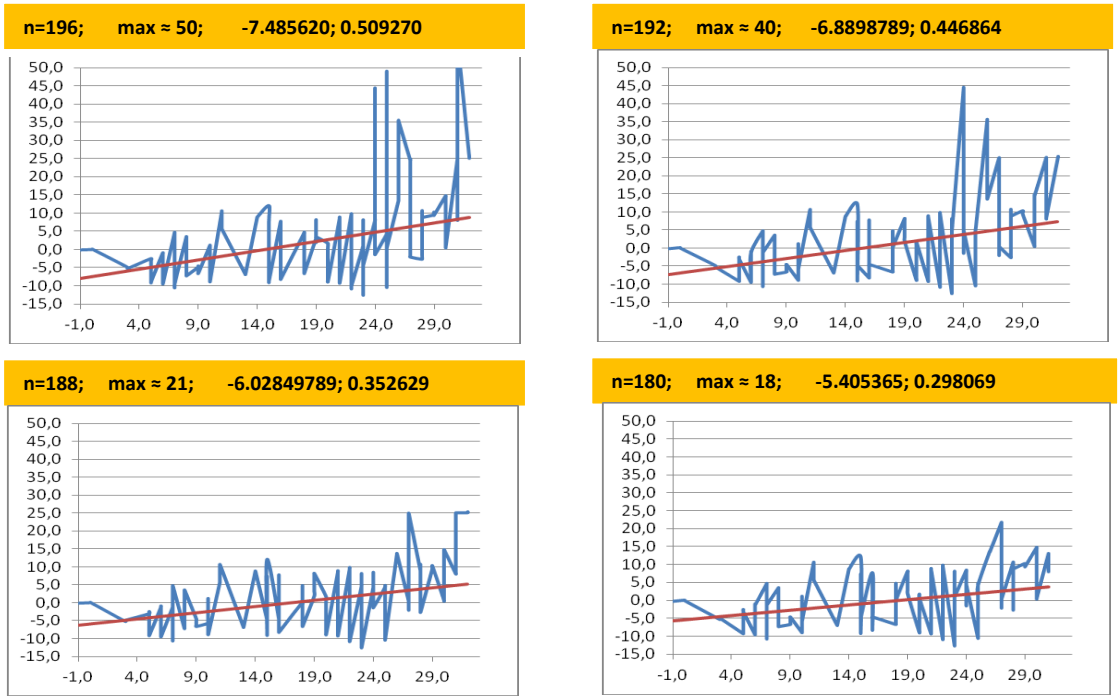


Abbildung 6.3.3-5: Path_0001, Lineare Approximation HD über d mit schrittweiser Glättung

Abbildung 6.3.3-5 illustriert den Glättungsmechanismus grafisch, wieder mit der Datei path_0001 und der Kenngröße HD. Iterativ werden zwei Schritte durchgeführt: Erstens Ausgleichsgerade durch die Messpunkte legen, zweitens eine gewisse Anzahl der Spitzen entfernen.

Auch wenn nach der Glättung die linearen Ausgleichsfunktionen als geeignet zur Modellierung des Signalverhaltens erscheinen, bleiben noch manche Diskussionspunkte offen. Etwa: Gibt es theoretische/messtechnische Gründe, dass vielleicht HD über rha nicht als Gerade, sondern als Konstante mit Sprungstelle angesetzt werden sollte? Vor allem: Sind die (normierten) Abstände zwischen Mess- und Funktionswert von 10 und sogar größer im Rahmen des Brauchbaren? Welche Abweichungen sind durch Schadsituationen zu erwarten?

Die bisherigen Darstellungen dienten vor allem dazu, den linearen Ansatz (2) nicht sofort verwerfen zu müssen. Im Weiteren wird der Versuch einer **Clusterung** der Einflussgrößen vorgenommen, um dann längs geeigneter Flächenschnitte die Linearität begründeter als bisher nachzuweisen. „Versuch“ einer Clusterung deshalb, weil eine sinnvolle Diskretisierung aller Einflussgrößen wesentlich mehr Messwerte benötigt als momentan vorliegen.

Beispielsweise soll HD als Funktion der „Außentemperatur t_a“ dargestellt werden bei ansonsten gleichen Einflussgrößen. Letztlich musste mit folgenden groben Einschränkungen gearbeitet werden, da alle feineren Unterteilungen aus Datenmangel fehlschlugen:

- Die Einflussgrößen „Niederschlag außen“, „Wind außen“ und „Luftfeuchte außen“ werden vernachlässigt, als nicht relevant für HD angesehen.
- Die Einflussgröße „Druck innen“ wird in die 10 Gruppen [-1, 6], [7, 9], [10, 14], [15, 16], [18, 19], [20, 22], [23, 23], [24, 25], [26, 27], [28, 31] aufgeteilt.

Die Rechnungen beziehen sich auf die Datei *path_0001*, und zwar auf die geglättete Version mit 180 Messungen. Abbildung 6.3.3-6 zeigt beispielhaft die Grafiken für zwei Druckcluster.

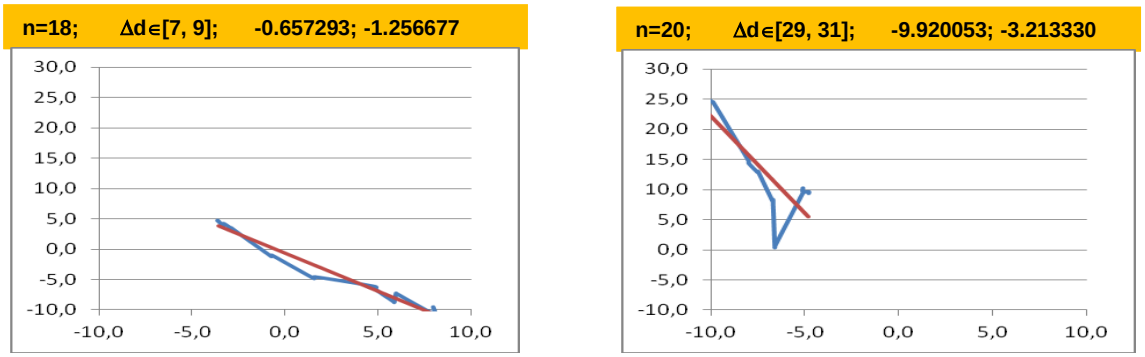


Abbildung 6.3.3-6: Path_0001, lineare Approximation HD über t_a bei festem d

Diskussion:

Bezüglich einiger Gruppen ist die Linearität realisiert. Anders in der Gruppe Δd∈[29, 31]: Dort existiert trotz Glättung noch ein HD-Ausreißer, der auf den Messungen 31/32 basiert. Die Messungen 29/30 direkt vorher liefen unter beinahe gleichen Umweltbedingungen ab, haben aber doch erheblich andere HD-Werte. Und es sind letztlich gerade solche Abweichungen, die der Glättung (noch) nicht zum Opfer fielen, aber eine Analyse sehr erschweren.

Abschließend noch eine Schätzung der **Ausgleichsfunktion** (2

$$HD(t, d, w, n, r) = -1{,}2547 + 0{,}0648 \cdot d - 1{,}2756 \cdot t - 0{,}0298 \cdot w + 3{,}5794 \cdot n - 0{,}1357 \cdot r$$

für HD aus *path_0001*, die mit Hilfe des Excel-Solvers produziert worden ist. Ein Abgleich mit den aus der Clusterung erhältlichen Schnitten dieser Fläche konnte noch nicht erfolgen, auch konnte nicht diskutiert werden, ob das verwendete Excel-Werkzeug dieser Aufgabe – Schätzung von sechs Parametern – gewachsen ist.

6.3.3.6 Schadenserkennung beim AE-Messverfahren

Hier wird beschrieben, ob und wie Rotorblattschäden anhand von Messdaten des Schallemissionsverfahrens (**AE Acoustic Emission**) des Projektpartners IZFP Dresden erkannt und prognostiziert werden können.

Datengrundlage waren die an einem Rotorblatt gemessenen akustischen Ereignisse. Pro Ereignis werden die Koordinaten der Geräuschquelle, Laufleistungsinformationen und mehrere Messwerte angegeben. Zum Ende der Datenaufnahme wurde ein Riss im Rotorblatt festgestellt. Eine Übertragbarkeit der dargestellten Schadenserkennung auf andere Situationen (andere Schadorte, andere Schadbilder) konnte nicht nachgewiesen werden.

Ziel der Datenanalyse ist die Beantwortung der drei folgenden Fragen:

- Lässt sich anhand des Datenmaterials der Zeitpunkt des Risses belegen?
- Lässt sich anhand des Datenmaterials der Ort des Risses belegen?
- Ermöglichen die Daten eine Rissprognose?

Zur Beantwortung der ersten Frage wurden sowohl die Reihen der einzelnen Messgrößen als auch abgeleitete Intensitäten auf ein Extremwertverhalten zum Messreihenende untersucht. Während bei den Messgrößen die Werte direkt aus den Ereignissen übernommen wurden, sind bei der Berechnung der Intensitäten zusätzlich die Ereignisdichten eingegangen. Zur Intensitätsberechnung für eine spezielle Laufleistung t wird ein kleines Laufleistungsintervall (Länge = 1/100 * (max. Laufleistungswert-minimaler Laufleistungswert)) um diese Laufleistung t betrachtet und sämtliche Messwerte, die in dieses Intervall fallen, summiert. Die Summe dividiert durch die Intervalllänge ergibt die Intensität.

Von den insgesamt 14 möglichen Kenngrößen waren 6 geeignet, um den Riss im Rotorblatt zu identifizieren. Das sind:

- Messgröße - Fix_Power(1024)_0m [pW]
- Intensität - Fix_Power(1024)_0m [pW]
- Messgröße - Eabs_0m [pJ]
- Intensität - Eabs_0m [pJ]
- Messgröße - Power_0m [pW]
- Intensität - Power_0m [pW]

Der über der Laufleistung (Cycles) abgetragene Kurvenverlauf dieser Kenngrößen zeigt ein deutlich ausgeprägtes Maximum zum Beobachtungsende als Indiz für den Rissschaden. Die anderen, hier nicht genannten Kenngrößen weisen keine Besonderheit am Messreihenende auf. Die Angabe eines zahlenmäßigen Kriteriums zur Schadenserkennung und eine Bewertung desselben waren im Rahmen des Projektes nicht möglich, da es dazu einer Vielzahl weiterer Beobachtungen mit Schäden bedurft hätte.

Die ausschließlich zeitliche Identifizierung des Schadens konnte ausgeweitet werden auf eine räumlich-zeitliche Identifizierung. Für die Ortung des Risses war es notwendig, lokal gültige Kenngrößen zu bilden. Dazu wurden Volumenelemente variabler Größe verwendet, auf denen Intensitäten für die oben bereits ausgewählten 3 Kenngrößen berechnet wurden. Für eine fest gewählte Größe des Volumenelementes wurde fortlaufend für steigende Laufleistungsstände jenes Volumenelement im Rotorblatt bestimmt, bei dem die Intensität maximal war. Die jeweils ermittelte maximale Intensität wurde in einem Diagramm gegenüber der Laufleistung abgetragen. Auf diese Weise erhielt man eine Kurve pro eingestellter Größe des Volumenelementes. Die Ortung des Risses anhand einer Kurve erfolgte in zwei Schritten:

- Ermittle die Laufleistung, bei der die zugehörige Intensität maximal ist.
- Bestimme das Volumenelement, dass bei der gefundenen Laufleistung die maximale Intensität realisiert.

Das Volumenelement gibt den Bereich an, in dem der Riss zu vermuten ist.

Ob überhaupt ein Diagramm (eine Volumengröße) zur Rissidentifizierung geeignet ist und - wenn ja - welche Kurve man am besten verwendet, konnte anhand folgender 3 Kriterien beurteilt werden:

- Wird der Riss in der Nähe des tatsächlichen Ortes identifiziert?
- Wird der Riss in der Nähe der tatsächlichen Ereigniszeit identifiziert?
- Wie genau kann der Ort des Risses abgeschätzt werden?

Da am Ende der vorliegenden Messreihe ein Riss beobachtet wurde, konnten die Kriterien für die spezielle Situation bewertet werden. Im Lebensdauerbereich des Risses treten auffallend viele Ereignisse auf, die sehr stark um den Rissbereich streuen. In den anderen Lebensdauerbereichen mit lokalem Intensitätsmaximum (aber ohne Schaden!) treten die Ereignisse örtlich wesentlich konzentrierter auf. Das hat zur Folge, dass der Rissschaden nur bei ausreichend großen Volumenelementen durch das zeitlich globale Intensitätsmaximum angezeigt wird. Bei kleiner werdendem Volumenelement treten die anderen Maxima (ohne Rissschaden) in den Vordergrund. Für die spezielle Situation mussten Volumenelemente von bis zu 1,5 m Kantenlänge in x-Richtung genutzt werden. Das Intensitätsmaximum (Mittelpunkt des Volumenelementes) liegt vom Schadensort um mehr als 1,5 m entfernt. Die stärkste Ereignishäufung war 1700 Zyklen vor dem Schaden zu beobachten.

Bleibt die Frage nach der Prognostizierbarkeit des Risses. Ein signifikanter Anstieg der Messgrößen und Intensitäten beginnt erst ca. 3000 Zyklen bzw. 2 Stunden vor Beobachtungsende. Diese kurze Zeit erlaubt im Wesentlichen schadensbegrenzende Maßnahmen (Stilllegung) und ein korrektives Eingreifen. Das ist natürlich ein Erfolg, denn dadurch sind Folgeschäden bei einer Havarie vermeidbar. Andererseits ist mit den Schlagworten „Monitoring“ und „Prognose“ in der Regel ein wirklich frühzeitiges Erkennen einer Schadentwicklung gemeint, um präventive Maßnahmen zum Einsatz bringen zu können. Aus der *einen* hier vorgelegten Schadsituation konnten wir dafür aber keine Erkenntnisse ableiten.

Zusammenfassung für Messdaten des vorliegenden Schadensfalls:

- Eine zeitliche Identifizierung des Risses war anhand der Daten möglich.
- Eine örtliche Identifizierung des Risses war anhand der Daten möglich.
- Der Riss konnte anhand der Daten nur in kurzen Prognosefenstern vorhergesagt werden.

6.3.3.7 Restlebensdauerprognose im Driftmodell

Dieser Abschnitt beschreibt eine Methode, wie man aus beobachteten Messsignalen eine Voraussage zur wahrscheinlichen Restlebensdauer einer Betrachtungseinheit ableiten kann. Genauer gesagt geht es um eine Schätzung der Verteilung der Restlebensdauer. Dabei findet das Monte-Carlo-Prinzip Anwendung. Mit steigender Anzahl der Simulationsrechnungen kann man die Schätzgenauigkeit der Verteilungsfunktion erhöhen. Da die Simulation per Computer realisiert werden kann, sollte eine Anzahl von etwa 1000 kein Problem darstellen. Mit dieser Anzahl wird eine ausreichend gute Schätzung der Verteilungsfunktion erreicht.

Kern des Gesamtmodells sind die den Messsignalen zugrunde liegenden Driftprozesse. Es wird angenommen, dass alle Messsignale monotone (o.B.d.A. wachsende) Trajektorien besitzen. Außerdem wird von der Unabhängigkeit der Signale ausgegangen. Wie abhängige Signale auf unabhängige reduziert werden können, wird separat erläutert.

Im Einzelnen sind pro Simulationsrechnung folgende Schritte abzuarbeiten:

- Simulation der Umgebungsbedingungen ausgehend vom aktuellen Umgebungszustand zum Zeitpunkt t_0 und dem Verteilungsgesetz des Prozesses der Umgebungsbedingungen.
- Umrechnung des aktuellen Systemzustandes (repräsentiert durch die aktuellen Messwerte und zu interpretieren im Zusammenhang mit aktuellen Umgebungsbedingungen) auf Normalbedingungen.
- Die auf Normalbedingungen umgerechneten Messwerte lassen sich durch Simulation fortsetzen, indem man die Zuwächse aus dem Driftmodell unter Beachtung der wechselnden Umgebungsbedingungen kumuliert.
- Berechnung des schadenanzeigenden Kenngrößenprozesses aus den pro Sensor ermittelten Signaltrajektorien $W_1(t)$, $W_2(t)$, $W_1(t)W_2(t)$... mit $t>t_0$ $t > t_0$: $KG(t) = KG(W_1(t), W_2(t), W_1(t)W_2(t)...)$.
- Die Restlebensdauer ergibt sich aus der Zeitdauer zwischen $t_0 t_0$ und dem Zeitpunkt, zu dem *KG* KGdas erste Mal nach $t_0 t_0$ einen Schaden anzeigt.

Um die Simulationsrechnungen durchführen zu können, müssen folgende 5 Prozesse bzw. Zusammenhänge in Modelle gefasst und anhand von Daten geschätzt werden:

- Prozess der Umgebungsbedingungen
- Driftprozesse der Messsignale
- Einwirkung der Umgebungsbedingungen auf die Parameter der Driftprozesse
- Einwirkung der Umgebungsbedingungen auf die Messungen
- Kenngrößendefinition

Als Ergebnis der Projektarbeit wurden Vorschläge für diese 5 Beschreibungskomponenten unterbreitet und in einem Gesamtmodell gekoppelt. Es wurde aufgezeigt, wie man die Modellparameter anhand von Daten schätzen kann. In Beispielrechnungen wurden die Schätzverfahren erfolgreich überprüft.

Prozess der Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen werden von den anderen Modellkomponenten nicht beeinflusst. Daher kann das zugehörige Modell separat formuliert und geschätzt werden. Als Beispielvorschlag wurden 4, d.h. jahreszeitlich unterschiedene, Markowmodelle verwendet, wobei 9 mögliche Umgebungsbedingungen (3 Temperaturstufen x 3 Windstufen) zugrunde gelegt wurden. Eine detailliertere Modellierung - z.B. Monatsmodelle mit genauer beschriebenen Umgebungszuständen (etwa Luftfeuchtigkeit hinzunehmen, …) – ist prinzipiell möglich. Allerdings läuft eine hohe Modelldetaillierung im Allgemeinen der Schätzgüte entgegen. Im Beispiel sind je Markowmodell (also 4 mal) 72 = 9x9-9 Übergangsraten zu schätzen. Abgesehen von den Übergangsraten, die aus seltenen Zuständen herausführen, konnten die Parameter sehr gut geschätzt werden. Bei der Monte-Carlo-Simulation haben die schlecht geschätzten Parameter wegen ihrer seltenen Anwendung kaum Einfluss.

Driftprozesse (pro Messsignal)

Es wird angenommen, dass alle Messsignale einer monotonen (o.B.d.A. wachsenden) Drift unterliegen. Des Weiteren mögen alle Abhängigkeiten zwischen den Signalen herausgefiltert sein (siehe Reduktion der Daten). Für alle Messsignale wird ein individuelles Schockmodell angesetzt. Schockmodelle beschreiben zum einen die Häufigkeit der Schocks durch einen Poissonprozess mit einem Parameter λ und zum anderen die Stärke der Schocks (Schadenszuwächse) über Erwartungswert μ_s und Standardabweichung σ_s. Über die spezielle Verteilung der Schockstärke wird keine Rechenschaft abgelegt, da über eine größere Anzahl von Schocks die Verteilung der eigentlich interessierenden Größe - dem Schadenszuwachs (=Summe der Schockhöhen) - nach ZGWS näherungsweise als normalverteilt bekannt ist.

Einfluss der Umgebungsbedingungen auf Driftprozesse

Abhängig von den Umgebungsbedingungen erfolgt der Schadenszuwachs mehr oder weniger stark. Sowohl die Schockhäufigkeit als auch die Schockstärke können durch die Umgebungsbedingungen beeinflusst werden. Entsprechend werden zu jeder Umgebungsbedingung zwei Faktoren $\alpha_\lambda\alpha_\lambda$ und$\alpha_s\alpha_{\lambda s}$ eingeführt, die Umrechnungsfaktoren für die Schockhäufigkeit und Schockstärke darstellen und zwar zwischen den aktuellen Umgebungsbedingungen und extra ausgezeichneten Normalbedingungen.

Einfluss der Umgebungsbedingungen auf Messsignale

Hervorgerufen durch unterschiedliche Umgebungsbedingungen bei der Messung kann es dazu kommen, dass ein und derselbe Schadenszustand unterschiedliche Messsignale erzeugt. Zur Kompensation dieses Effektes werden in das Modell β-Faktoren aufgenommen, die von den bei den Messungen herrschenden Umgebungsbedingungen abhängen und das Verhältnis zum entsprechenden Messsignal bei Normalbedingung darstellen.

Maximum-Likelihood-Schätzung der Modellparameter

Die Schätzung der Modellparameter erfolgt für jedes Messsignal einzeln. Grundlage sind Daten, die über einen längeren ununterbrochenen Zeitraum die Umgebungsbedingungen liefern und im selben Zeitbereich - aber zu diskreten Messzeitpunkten - die Zuwächse des Messsignals enthalten. Die Modellparameter $\alpha_{\lambda 1}\alpha_\lambda\alpha_{\lambda 1}$, …, $\alpha_{\lambda k}\alpha_\lambda\alpha_{\lambda 1}$, $\alpha_{s1}\alpha_{s1}$, …, $\alpha_{sk}\alpha_{sk}$, β_1, β_1…, β_k (k = Anzahl der Umgebungsbedingungen) und $\lambda\cdot\mu_s\,\lambda\cdot\mu_s$ sowie $\lambda\cdot(\mu_s^2+\sigma_s^2)\;\lambda\cdot(\mu_s^2+\sigma_s^2)$ können durch Maximierung der Likelihoodfunktion näherungsweise berechnet werden. Die Parameter λ, μ_s, σ_s λ sind nicht einzeln schätzbar. Die zu den Normalbedingungen gehörenden Faktoren $\alpha_{\lambda;norm}\alpha_{s1}$, $\alpha_{s;norm}\alpha_{s1}$, $\beta_{norm}\alpha_{s1}$ sind gleich 1 zu setzen. Pro Messsignal sind damit $3\cdot(k-1)+2$ Parameter zu bestimmen. Im Beispiel mit 9 Umgebungsbedingungen wären das immerhin 26 Parameter pro Messsignal. Neben der großen Parameteranzahl besteht das Hauptproblem der Berechnung in der Existenz „unzähliger“ lokaler Extremwerte der Likelihoodfunktion. Dem kann man aber Rechnung tragen dadurch, dass man zwischen die numerisch klassischen Iterationsschritte (Methode des steilsten Anstieges) eine stochastische Suche nach besseren Parameterkonstellationen einstreut.

In der Beispielrechnung wurden nach Parametervorgabe sowohl der Umgebungsprozess als auch die Driftprozesse zu 10 Messsignalen simuliert. Die Messsignale wurden an 10000 Messzeitpunkten aufgenommen. Die anschließende Schätzung der Modellparameter ergab eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Ausgangswerten.

Reduktion der Messdaten

In den bisherigen Ausführungen und insbesondere bei der Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung der Restlebensdauerprognose wurde davon ausgegangen, dass die Messsignale unabhängig sind. Das Anbringen der Messmittel mit dem Ziel, alle wesentlichen, aber keine redundanten/abhängigen Informationen zu gewinnen, ist schon kompliziert. Zumeist ergibt die Überprüfung der Abhängigkeit durch eine Korrelationsanalyse, dass keine Unabhängigkeit vorliegt. Eine Reduktion des Datenumfanges und gleichzeitiges Herausfiltern der Abhängigkeiten lässt sich mit einer Faktorenanalyse realisieren. Dieses Verfahren bietet auch gleich eine recht einfache Möglichkeit einer Kenngrößendefinition.

Kenngrößendefinition

Die Kenngröße stellt eine Funktion dar, die jeder Konstellation an Messsignalwerten den Zustand „Schaden“ oder „Nicht Schaden“ etwa in Form einer 0-1-Bewertung zuordnet. Sinnvoll wären auch Kennwerte zwischen 0 und 1, die man dann als Wahrscheinlichkeit interpretieren kann.

Prinzipielle Voraussetzung für die Definition einer Kenngröße sind Daten, in denen der simultane Verlauf der Messsignale und der jeweilige Zustand (Schaden/nicht Schaden) der Betrachtungseinheit dokumentiert sind. Besonders wichtig sind Beobachtungen in der Nähe der Schadensausbildung (also beidseitig der Grenze von „Schaden“ und „Nicht Schaden“). Die Definition kann dann auf empirischem Wege vorgenommen werden, indem man einer Konstellation von Messsignalwerten den Wert 0 oder 1 in Orientierung an den nahest gelegenen Datenpunkten zuordnet bzw. gewichtet errechnet, wobei die Entfernungen der Datenpunkte von der aktuell zu bewertenden Konstellation einfließen. Im Fall einer vorausgegangenen Faktorenanalyse gibt es eine besonders einfache Möglichkeit der Kenngrößenbestimmung.

6.3.3.8 Planung von Instandhaltungskapazitäten

Einordnung

Die Erhöhung der Effizienz der Instandhaltung von Rotorblättern ist letztlich das Anliegen des SHM-Projekts. Vertrauenswürdige, abgesicherte Modelle zur Drift der Schadparameter spiegeln den tatsächlichen technischen Zustand des Blattes und dessen Leistungsvorrat wider. Bei diesem Wissen bietet sich als Strategie zur (vorbeugenden) Instandhaltung die „Just in time“ – Variante an. Ob die Reparatur bei einer manchmal nur kurzfristigen Ankündigung auch wirklich durchgeführt werden kann, hängt dann noch vom Maßnahmeumfang, vom Organisationsgrad des Instandhaltungsbetriebs, von operativen Möglichkeiten zur Instandhaltungsdurchführung (Offshore) und anderen Begleitumständen ab.

Unabhängig von den Möglichkeiten, die ein Monitoringverfahren für die operative Instandhaltung eröffnet, verbleibt immer noch der Blick auf eine globale Instandhaltungsplanung, also die Lebenszykluskosten (LCC). Typische Fragestellungen hierzu sind „Wie viele Ersatzteile (Blätter) werden während der Lebenszeit der Gesamtanlage (bzw. während einer anderen, vorgegebenen Planungszeit) benötigt“, oder statt „Anzahl der Ersatzteile“ kann auch „Anzahl der Instandsetzungen (einer gewissen Art)“ stehen, also generell die Anzahl irgendwelcher Maßnahmen, die die LCC beeinflussen.

Die theoretische Basis zur Beantwortung liefert die **Erneuerungstheorie**, wofür als zentrale Eingangsgröße die Verteilungsfunktion der Blattausfälle vorliegen muss. Diese Funktion ist ein Ergebnis der Driftmodellierung in SHM.

Die IZP besitzt als Dienstleister zu RAMS/LCC eigene Software zu diesem Themenkreis, jedoch auf der Basis des einfachen Erneuerungsprozesses (EP). Gerade bei Offshore-WEA reicht das aber nicht aus. Der Instandsetzungsaufwand ist erhöht, längere Stillstandszeiten der WEA sind oft Realität. In das statistische Modell sollten also einfließen

- die Stillstandszeiten (alternierender EP) und zusätzlich
- das Alter der Blätter (modifizierter EP).

Die theoretischen Grundlagen des nun benötigten alternierenden, modifizierten Erneuerungsprozesses sind natürlich nicht neu, auch nicht anzupassen. Die eigene und abrechnungsfähige Arbeit der IZP ist die Zusammenstellung dieser Theorie zu einem auswertefähigen Algorithmus und dessen Software-Realisierung als DLL.

Ergebnis: Das Resultat, welches SHM-gestützt entstanden ist, ist der Algorithmus ***IHKalk***. Darin sind alle theoretischen und organisatorischen Vorbereitungen zur rechentechnischen Umsetzung der Ersatzteilaufgabe für den alternierenden EP enthalten. Der Algorithmus *IHKalk* ist danach als Software-Lösung realisiert worden. Die DLL, die sämtliche Anforderungen im Rahmen des alternierenden EP‘s realisiert, kann direkt bei der IH-Planung bei Offshore-WEA eingesetzt werden.

Vorzugebende Einflussgrößen für die Ersatzanzahl sind

- die statische Sicherheit α,
- die Planungszeit Pl,
- die Anzahl O der WEA (Objektzahl).

Hauptteile von *IHKalk*, die im Rahmen von SHM neu entstandenen sind:

- Berücksichtigung der Reparaturzeiten, die unter Umständen variabel sein können;
- neue theoretische Grundlagen für einen nahtlosen Übergang zu asymptotischen Gesetzmäßigkeiten;
- Berücksichtigung des Blattalters;
- Umstellung der Ersatzteilaufgabe nach einer ihrer Einflussgrößen „Sicherheit α“, „Planungszeit Pl“ oder „Objektzahl O“;
- Konzeption und Programmierung einer DLL; der erhebliche Aufwand dafür wurde nur zu geringen Teilen bei SHM abgerechnet.

6.4 Projektergebnisse im Überblick

Dieses Kapitel ist gewissermaßen die Fortsetzung von Kapitel 1, in dem die Projektziele genannt werden. An dieser Stelle soll ein kompakter und zusammenhängender Überblick über das Erreichte gegeben werden. Diese Vorgehensweise schließt die Erwähnung aller Arbeiten und aller Teilergebnisse aus. Beispielsweise kann hier nicht mehr auf die sehr umfangreichen Versuche eingegangen werden. Entsprechend der Vielzahl der Teilergebnisse ist jedoch eine Gliederung in Systementwicklung und Verfahrensentwicklung notwendig.

Mit 11 Partnern war das Projekt SHM Wind ein relativ großes Projekt mit entsprechend vielen weit gesteckten Zielen und einem hohen Innovationsgrad. Insgesamt gesehen war SHM Wind auch ein erfolgreiches Projekt, in dem nicht nur alle wichtigen, in den vorausgegangenen Kapiteln dargestellten Projektziele erreicht wurden, sondern das auch über die funktionsfähigen Demonstratoren hinaus etwa ein halbes Jahr nach Projektabschluss zu einem ersten Produkt ***SHM.Blade*** führte. Für weitere Produkte wurde in SHM Wind der Grundstein gelegt. Darauf wird später noch einzugehen sein.

6.4.1 Systementwicklung

Die Systementwicklung hatte die Aufgabe, Sensoren und Aktoren, Sensor- und Netzwerkknoten und eine optische Daten- und vor allem eine optische Energieübertragung für den Betrieb eines Sensornetzwerks im Rotorblatt bereitzustellen.

Zunächst ging es darum, die als Sensor und Aktor benötigten Piezofaserwandler für den Einsatz an Rotorblättern zu ertüchtigen. Insbesondere die hohen Dehnraten der Rotorblätter und das nichtlineare Verhalten der Klebung wurden als problematisch erachtet.

Ursprünglich bestand die Hoffnung, für alle drei Messmethoden, nämlich für AE, AU und OMA, die gleiche Sensortechnologie in Form von Piezofaser- bzw. Piezopatch-Wandlern zu verwenden. Denn mit dieser Technologie kann man einerseits für AU Oberflächenwellen erzeugen und richtungsbezogen in ein Rotorblatt einkoppeln und andererseits Dehnungen richtungsabhängig messen. Damit wäre es möglich gewesen, sowohl für die Verfahren AE und AU die Lambwellen zu empfangen als auch aus den richtungsabhängig gemessenen Dehnungssignalen für OMA die benötigten modalen Parameter Frequenz und Dämpfung abzuleiten bzw. aus synchron gemessenen Schwingungsdaten die Eigenform zusammenzusetzen. Aus verschiedenen Gründen war dieser umfassende, zunächst auf der Piezofaser-Technologie beruhende Ansatz nicht möglich. Deshalb wurden die geplanten Piezofasermodule durch die flexiblen, von PIC entwickelten speziellen DuraAct Wandler, die die Voraussetzungen für die erfolgreiche Gestaltung eines Überwachungssystems für WEA-Rotorblätter erfüllen, ersetzt. Die neu zu entwickelnden DuraAct Wandler sollten einerseits die Vorzüge der PZT-Faserwandler (an eine Richtung gebundene Dehnungsempfindlichkeit sowie die Möglichkeit, gerichtet Lambwellen zu senden und zu empfangen) besitzen, andererseits jedoch ihre konstruktiven Nachteile umgehen. Die Wandler müssen bei hohen Beschleunigungen und bei Temperaturen von –35 °C < T < 70 °C und hoher Luftfeuchtigkeit zuverlässig arbeiten. Insgesamt wurden die DuraAct Wandler in 5 Designstufen erfolgreich weiter entwickelt und getestet. Der Demonstrator der letzten Designstufe des Piezowandlers besitzt eine doppellagige PIC255 Keramik mit doppelt gelegten Sammelelektroden und erfüllt alle Blitzschutz- und EMV-Vorgaben. Der Signal-Rausch-Abstand ist sehr gut und der Wandler kann im Dehn- und im Biegemodus angesteuert werden.

Für die Anpassung der Piezowandler mit zugehöriger Elektronik an das Rotorblatt war es einerseits notwendig, die Elektronik der Netzwerkknoten mit einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik mit den Piezowandlern zu verbinden und dafür zu sorgen, dass diese Verbindung trotz der hohen mechanischen Belastung und der extremen Umwelteinflüsse dauerhaft zuverlässig arbeitet. Ein anderer Aspekt dieser Verbindungen ist, dass die gemessenen Dehnungen bzw. die sensorischen Eigenschaften des Wandlers nicht durch die notwendigen Aussteifungen des Sensorknotens oder durch nichtlineare Effekte des Klebstoffs verfälscht werden. Für diese Problematik wurden unterschiedliche Lösungskonzepte bis hin zur Befestigungstechnik entwickelt. Hinzu kam die Anforderung, dass für die Nachrüstung von WEA und für die Integration in neue Blätter komplett unterschiedliche Befestigungsverfahren notwendig werden. Im ersten Fall ist es eine Montagetechnik, im zweiten eher die Integration von Sensoren und Elektronik in das Laminat. Letztendlich werden die DuraAct Wandler für AE und AU eingesetzt. Wegen des längerfristig nichtlinearen Verhaltens von Piezokeramik war für den auf OMA fußenden Zweig des SHM-Systems angesichts der geforderten Genauigkeit bei der Erfassung der Schwingungsamplituden ein Umstieg auf konventionelle Beschleunigungsaufnehmer mit extrem gutem Signal-Rausch-Abstand zwingend notwendig.

Da mit dem SHM Wind-System sowohl lokale Daten (AU, z. T. auch AE) als auch globale Daten (OMA) gemessen werden, ist ein Sensornetzwerk notwendig. Es besteht aus Sensorknoten zur Sensorspeisung und Datenanbindung und aus den das Netz verknüpfenden Netzwerkknoten. Je nach Größe und Bauart des Rotorblattes sind 6 bis 36 Sensorknoten pro Rotorblatt erforderlich. Ein Sensorknoten bedient eine Sensorposition auf dem Rotorblatt. Die Funktionen sind Senden von geführten Wellen für AU, Empfangen von geführten Wellen aus AU und AE, Messung der Beschleunigung für OMA und Erfassung der Temperatur.

Das Gegenstück der Sensorknoten sind die Netzwerkknoten. In der drahtgebundenen Netzwerkvariante hat ein Netzwerkknoten 8 Sensorknoten zusammengeführt und die Messungen für OMA synchronisiert. In der späteren Netzwerkversion, die mit optischer Daten- und Energieübertragung kombiniert ist, verfügt ein Netzwerkknoten über 12 Kanäle. Aus dem Netzwerkknoten werden die Monitoringdaten über Power-LAN vom rotierenden Blatt zum stehenden Teil der Anlage und zum Auswerte-PC im Turm übertragen. Auf dem Auswerte-PC mussten eine Datenbank und ein Datenmanagement geschaffen werden, das die Weiterverarbeitung von Monitoring- und von Betriebsdaten gewährleistet. Des Weiteren war die Kommunikation des SHM-Systems mit der Anlagensteuerung sicherzustellen.

Demonstratoren der hier geschilderten Hardware wurden bezüglich ihrer Funktionstüchtigkeit an verschiedenen IWES-Balken und an mehreren Rotorblättern erfolgreich getestet. Gleichzeitig lieferten diese Tests die Messdaten, auf die die Verfahrensentwicklung aufsetzen konnte. Auf der drehenden Anlage kam das drahtgebundene Netzwerk zum Einsatz.

6.4.2 Verfahrensentwicklung

Das Ziel der Verfahrensentwicklung war es, die Monitoringdaten der drei unterschiedlichen Messverfahren mit den Betriebs- und Umweltdaten zusammenzuführen und Auswerteroutinen zu entwickeln, die aus der Vielzahl der gemessenen Signale jene herausfiltern, die ein Indiz für eine beginnende Schädigung liefern und letztendlich eine Zustandsbewertung des Rotorblattes zulassen. Erst in Verbindung mit dem Auswerteverfahren wird aus dem Sensornetzwerk ein multivariates SHM Wind-, also ein Health Monitoring-System. Im Antrag wurde dieses Auswerteverfahren als Decision Support System, DSS, bezeichnet. Im Verlauf des Projektes stellte sich jedoch heraus, dass die dazu notwenigen Arbeiten sehr viel stärker an das jeweilige Verfahren gekoppelt sein müssen. Deshalb wurden sie so integriert, dass jedes Messverfahren eine eigene Bewertung erstellt. Diese soll später einmal in einer Bewertungshierarchie zusammengeführt werden.

Entsprechend der unterschiedlichen Messmethoden haben die einzelnen Verfahren unterschiedliche Aufgaben, und die zugehörige Signalverarbeitung und -bewertung und die Schadensidentifikation müssen sich unterscheiden (vgl. dazu auch Kapitel 6.3 und Tabelle 6.3-1):

- **AE** hat primär die Aufgabe der **Lokalisation von Schäden**: Dazu wird ein Burst identifiziert und die Laufzeit des Signals zu verschiedenen Sensoren für Triangulationsverfahren zur Ortsermittlung der Signalquelle genutzt (vgl. Abbildung 6.4-1). Dieses Verfahren gehört auf ebenen Platten zum Standard, am Rotorblatt mit seiner komplexen Geometrie und den unterschiedlichsten, oft parallelen Pfaden vom Quellort des Bursts zu den Sensoren wird es jedoch zur Herausforderung, die in SHM-Wind gut gelöst wurde.

  Zur Schadensidentifikation kommen weitere Fragen hinzu. Während des Betriebes kommt es ständig zu Bursts. Ein einzelnes Schallereignis ist jedoch noch kein Hinweis auf einen strukturellen Schaden! Vielmehr sind Bursts akustische Signale in Form einer transienten geführten Welle, deren Quellmechanismen in Verbundwerkstoffen unterschiedlicher Natur sein können: Mikrorisse in der Matrix, Faserbruch, Delamination, Zwischenfaserriss oder reibungsakustische Signale. Es musste folglich herausgefunden werden, wo es an lokal begrenzter Stelle zu einer Häufung von bestimmten Schallereignissen kommt, die das normale Burstniveau eines Rotorblattes erheblich übersteigt. Erst dann kann von einem Schaden ausgegangen werden.

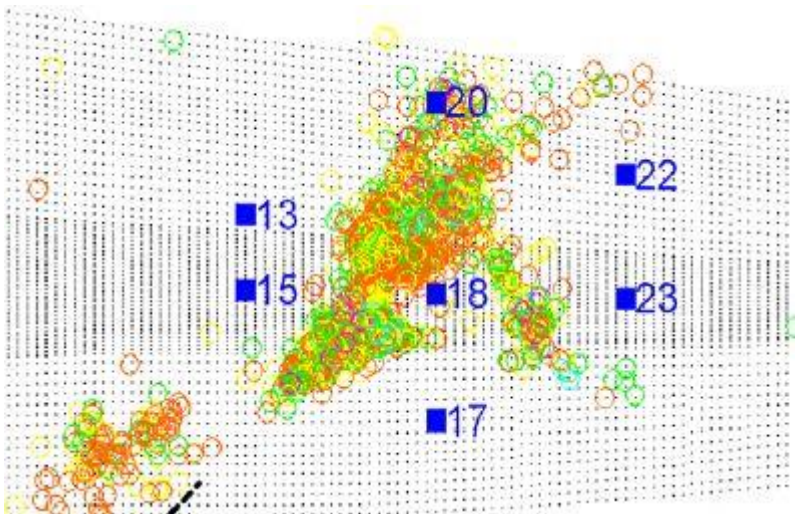


Abbildung 6.4-1: Charakteristische Häufung von Bursts an einem Rotorblatt, die auf einen Schaden hinweist. Die blauen Quadrate bezeichnen Sensoren. Jeder Kreis entspricht einem Burst, die Farben verweisen auf unterschiedliche Burstdauer und unterschiedlichen Energiegehalt.

Während AE voraussetzt, dass während der gesamten Betriebszeit des Rotorblattes Signale aufgezeichnet und ausgewertet werden, können die beiden folgenden Verfahren **AU** und **OMA** in periodischen Abständen eingesetzt werden. Beide Verfahren vergleichen aktuelle Messwerte mit Referenzwerten, zielen also auf das **Erkennen von Veränderungen**.

- **AU** dient vornehmlich der **lokalen Überwachung hoch belasteter Strukturteile** eines Rotorblattes (vgl. 6.4-2). Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Überwachung der aerodynamischen Hülle bezüglich Erosionsschäden. Bei dem Verfahren wird die Übertragungsfunktion des Signals vom Piezoaktor zum Piezosensor für den ungeschädigten Zustand des Rotorblattes als Referenz ermittelt. Bei späteren Messungen wird die aktuelle Übertragungsfunktion mit dem Referenzsignal verglichen und die Abweichung bewertet. Da Spannungszustände des Rotorblattes, Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt des Materials usw. sich auf die Wellenausbreitung auswirken, ist auch bei AU eine umfangreiche weitergehende Auswertung notwendig.

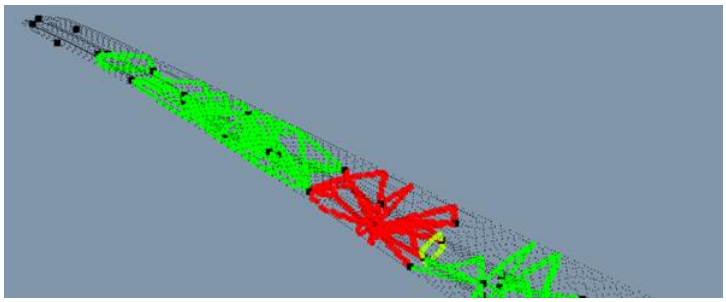


Abbildung 6.4-2: Veränderung der Übertragungsfunktion an einem Rotorblatt. Rote Übertragungspfade zwischen Aktor und Sensor zeigen, dass Referenzsignal und aktuelles Signal sehr schlecht bis gar nicht korrelieren. Daraus kann auf eine erhebliche Veränderung des Signalpfades geschlossen werden.

- Die **OMA** ist das am weitesten entwickelte **globale Überwachungsverfahren** und stellt die Grundlage des späteren Produktes ***SHM.Blade*** dar. Die Hauptaufgabe ist die frühzeitige Warnung vor Schäden, die die **strukturelle Tragfähigkeit** eines Rotorblattes gefährden. Das Verfahren kann auch weiter entwickelt werden, um später einmal Eisansatz am Rotorblatt zu erkennen.

  Die OMA stützt sich vornehmlich auf die Auswertung der modalen Parameter Eigenfrequenz, Eigenform und Dämpfung. Diese modalen Parameter sind eng mit der Steifigkeit und dem Gewicht eines Rotorblattes verknüpft. Da aus fertigungstechnischen Gründen jedes Rotorblatt ein Individuum ist, können keine generellen Referenzwerte festgesetzt werden. Vielmehr muss das SHM-System als selbstlernendes System ausgebildet werden, das sich in einer Lernphase seine Referenzwerte selbst setzt. Abbildung 6.4-3 stellt die generelle Verfahrensweise bei OMA dar.

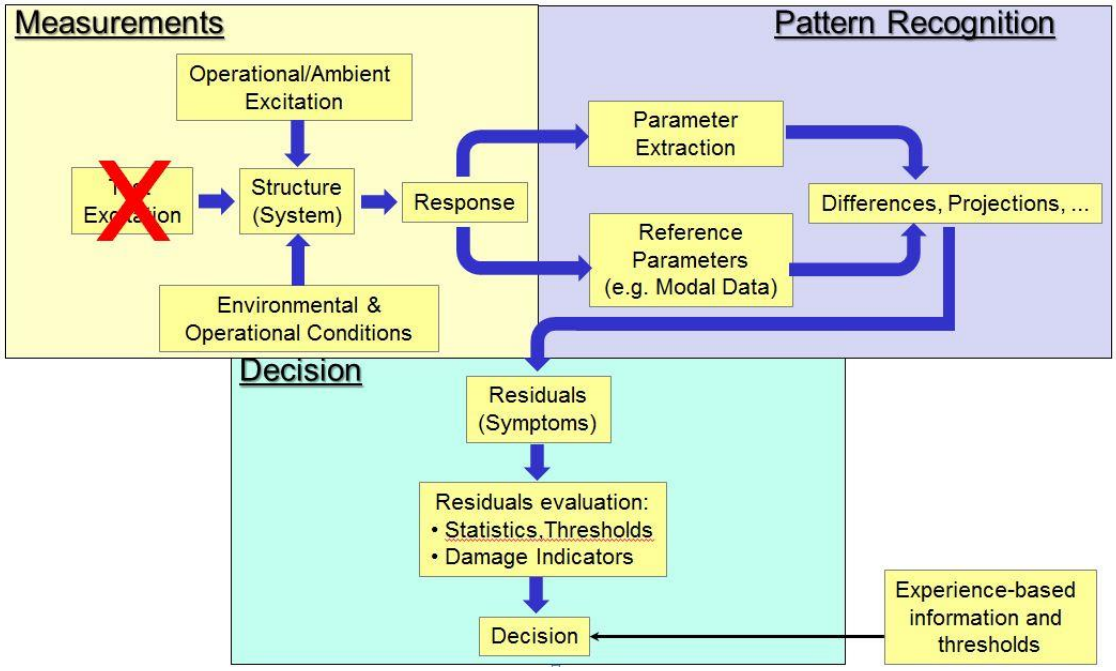


Abbildung 6.4-3 nach Fritzen/Kraemer (2010) stellt die generelle Verfahrensweise bei OMA dar.

Das Rotorblatt wird durch physikalische Phänomene in der Umgebung wie z. B. den Wind (ambient excitation) und durch Betriebsbedingungen wie z. B. die Verstellung des Pitchwinkels oder ein Abbremsen der WEA (operational excitation) zu Schwingungen angeregt. Die Strukturantwort (response) wird in Form von Beschleunigungen des Rotorblattes gemessen. Beeinflusst wird die Strukturantwort von Umgebungsbedingungen wie z. B. der Temperatur (environmental conditions) und durch Betriebsbedingungen wie z. B. der Stellung des Rotorblattes, der Rotordrehzahl oder dem Pitchwinkel (operational conditions). Beim Vergleich der aktuellen, von den vorgenannten Faktoren abhängigen Messdaten mit den Referenzdaten muss im Rahmen einer Mustererkennung (pattern recognition) geprüft werden, ob eine Abweichung der aktuellen Daten von den Referenzdaten nur von veränderten Umwelt- oder Betriebsbedingungen abhängt oder ob es sich um einen Schaden handelt. Erst, wenn die Differenzen als Schädigung erkannt wurden, werden die Residuen analysiert (residuals evaluation) und es kommt zu einer Entscheidung über den Zustand des Blattes. Das kann z. B. in Form einer Ampel bzw. eines Damage Indicators, wie er in Abbildung 6.4-4 gezeigt wird, mit den Farben grün, gelb und rot geschehen.

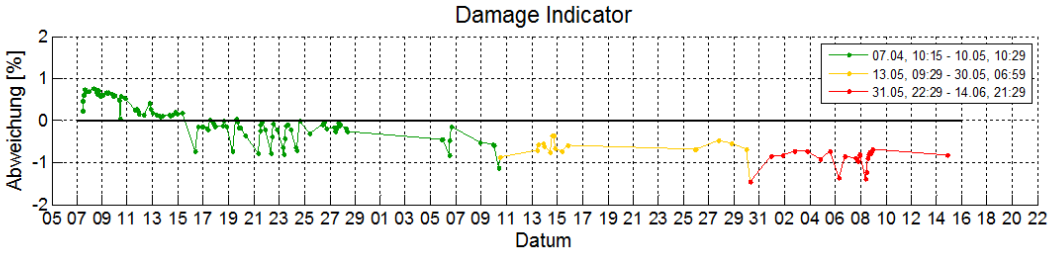


Abbildung 6.4-4: Der Damage Indicator zeigt die langsame Entwicklung eines Strukturschadens. Grün dargestellte Messdaten sind im Normbereich, bei gelb gefärbten Werten deutet sich eine Verschlechterung an und bei den rot dargestellten Werten liegt mit großer Sicherheit ein Strukturschaden vor

6.4.3 Ausblick

Als sich im Verlauf des Projektes SHM Wind der Erfolg abzeichnete, wurden Überlegungen angestellt, wie ein späteres Produkt auf den Markt gebracht werden könnte. Wegen der Marktentwicklung schien es geboten, nicht zu warten, bis alle unterschiedlich weit entwickelten Demonstratoren reif für die industrielle Umsetzung sind. Vielmehr wurde beschlossen, mit einer Markteintrittslösung möglichst frühzeitig zur HUSUM WindEnergy 2012 ein Produkt zu haben.

Diese Markteintrittslösung wurde unter der Produktbezeichnung ***SHM.Blade*** im September 2012 von Wölfel Beratende Ingenieure GmbH + Co. KG vorgestellt. Sie stützt sich auf Beschleunigungssensoren im Wurzelbereich und die Auswerteverfahren der Operational Modal Analysis OMA.

Endausbaustufe SHM.Wind: Wölfel mit Zulieferung von Partnern	OMA: Erkennen globaler Schäden, Eisansatz + AE: Lokalisierung der Schäden + AU: Überwachung hoch belasteter Stellen + Oberflächen + optische Energie- / Datenübertragung
Basislösung SHM.Wind mit Upgrade-Option: Wölfel mit Zulieferung von Partnern	OMA: Erkennen globaler Schäden, Eisansatz + AE: Lokalisierung der Schäden Drahtgebundenes Sensornetzwerk im ersten Drittel des Rotorblattes
Markteintrittslösung ***SHM.Blade*** mit Upgrade-Option: Wölfel	OMA: Erkennen globaler Schäden

Tabelle 6.4-1: Vermarktungsstrategie für SHM Wind

In einem zweiten Schritt (vgl. dazu Tabelle 6.4-1) soll ***SHM.Blade*** zu einer Basislösung SHM.Wind werden. Zur Warnung bei strukturgefährdenden Schäden käme die Eiserkennung hinzu. Außerdem soll im wurzelnahen Bereich des Rotorblattes ein drahtgebundenes Sensornetzwerk mit Hilfe von AE eine Schadenslokalisation ermöglichen.

Die Endausbaustufe ist ein multivariates SHM.Wind, das sich auf drei Messverfahren stützt und bei dem das ganze Rotorblatt mit einem Sensornetzwerk überzogen ist. Dazu ist die optische Daten- und Energieübertragung notwendig, und als drittes Verfahren käme AU hinzu.

6.5 Zitierte Literatur

- Ebert, C., (2012): Systemidentifikation zur Modellierung mechanischer Strukturen – Markovparameter zur experimentellen Schadenserfassung, Dissertation Universität Siegen, im Druck
- Fritzen, C.-P., Kraemer, P. (2010): Structural Health Monitoring, Methodische Ansätze und Anwendungsbeispiele, Vortrag bei Wölfel Beratende Ingenieure am 30.08.2010
- Kaiser, J.; Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch; Dissertation, Technische Hochschule München; München 1950
- Kraemer, P., (2011): Schadensdiagnoseverfahren für die Zustandsüberwachung von Offshore-Windenergieanlagen, Dissertation, ISSN 2191-5601, Universität Siegen
- Nagy, B.: University of Cincinnati, AEEM-727 lecture 4th part
- Rytter, A., (1993): Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures, PhD, Aalborg 1993
- Schubert, L.: Zustandsüberwachung an Faserverbundwerkstoffen mit geführten Wellen, Dissertation, TUDpress, 2012, ISBN 978-3-942710-72-5
- Vorpahl, Sayer, Antoniou, van Wingerde, 2011.: Entwicklung neuer experimenteller und numerischer Verfahren der Komponentenentwicklung von sehr großen Windenergieanlagen, Abschlussbericht von HookUp²Wind, FhG IWES, 2011
- Worden, K.; Farrar, C. R.; Manson, G. und Park, G., (2005): Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring, 4th International Workshop Structural Health Monitoring, Stanford 2005, Stanford University, pp. 26-41

6.6 Abkürzungsschlüssel

Abkürzung	Erklärung
2D	zweidimensional
3D-Modell	dreidimensionales Modell
ADC	Analog-Digital-Wandler (Analog-Digital Converter)
A-D-Wandler	Analog-Digital-Wandler
AE	acoustic emission, Schallemission
AIC	Akaike's Information Criterion, Kriterium zur Auswahl eines statistischen Modells, das die Güte der Anpassung bewertet
AMS-46	Wind Turbine Rotor Blade Scanner AMS-46 der Fa. FORCE Technology
ARM	Advanced Risc Machines
AU	Acousto-Ultrasonics, akustische Signaturanalyse
B-Bild, b-scan	Ultraschallbild mit brightness modulation, Information des Amplituden-Modus, bei der die Echointensität in eine Helligkeit umgesetzt wird
BD 5	Elektrodynamischer Shaker von Wölfel mit einer Aktorkraft von 500 N
Burst	akustisches Signal in Form einer transienten geführten Welle, Quellmechanismen in Kompositen sind Mikrorisse in der Matrix, Faserbruch, Delamination, Zwischenfaserriss, reibungakustisches Signal
CAN-Bus	controller area network, weit verbreitetes Feldbussystem
C-Bild	bei Ultraschallprüfung erstelltes Echohöhenbild eines Werkstückes, ein projiziertes Bild der Größen der Fehlstellen
CMS	condition monitoring system, Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen
CPLD	Programmierbare Logische Schaltung (Complex Programmable Logic Device)
CPU	Central Processing Unit
d	Innendruck
DAU	data acquisition unit, Sensorknoten bei ***SHM.Blade***
DBMS	Datenbankmanagementsystem
del	Verzögerung des hochfrequenten Signals
del_gr	Verzögerung des hochfrequenten Signals nach Hilbert-transformation
DLL	Dynamic Link Library
DMS	Dehnmessstreifen
DPU	Industrie-PC, auf dem die autonome Datenauswertung bei ***SHM.Blade*** durchgeführt wird
DS	Druckseite
DSP	Digitaler Signalprozessor
DSS	Decision Support System, programmiertes Auswerteverfahren für Messdaten
DuraAct	piezoelektrischer Flächenwandler, Patch Wandler, Patch Transducer der Firma PIC

E2000	Faseroptischer Steckverbindertyp mit passivem Laserschutz durch Verschlussmechanismus
EK	Endkante
EOC	environmental and operational conditions, Betriebs- und Umgebungseinflüsse
EP	Erneuerungsprozess
f	Frequenz
FBG	Faser-Bragg-Gitter
FEM	Finite Elemente Methode
FONA	Forschung für die Nachhaltigkeit
FPC	Free Pascal Compiler
FPGA	Programmierbare Logische Schaltung (Field Programmable Gate Array)
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GL	Germanischer Lloyd, Zertifizierungsgesellschaft
GOF	Glas-Optische Faser
GWT-TUD	Gesellschaft für Wissens- und Technologietransfer der TU Dresden mbH
HD	Differenz der maximalen Amplitude nach Hilberttransformation
HG	Hauptgurt im Rotorblatt
Hit	Detektion eines transienten Schallemissionssignales (DIN EN 1330-9 Begriffe der Schallemissionsprüfung)
HKS	Hinterkantensegment
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
ICP	integrated circuit piezoelectric sensors, Piezo-Beschleunigungsaufnehmer
IEC	International Electrotechnical Commission
IPHT	Institut für Photonische Technologien Jena
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energietechnik
JDSU	JDS Uniphase, US-amerikanische Firma der Photonikindustrie
KG	Kenngröße
LCC	Lebenszykluskosten
LED	Leuchtdiode (Light Emitting Diode)
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanischer Sensor
MM	Mehrmodenfaser (Multi-Mode, typischerweise 50µm bzw. 62,5µm Kerndurchmesser)
MPO	Optischer Mehrfaserstecker (Multipath Push-On, auch MTP für Mechanical Transfer)
n	Generatordrehzahl
n	Niederschlag
NF	Niederfrequenz
NK	Nasenkante des Rotorblattes
NKS	Nasenkantensegment
OMA	operational modal analysis, Betriebsschwingungsanalyse bzw. Modalanalyse ohne Messung der Schwingungsanregung

PCA	principal component analysis, Hauptkomponentenanalyse
PLD	programmierbare logische Schaltung
POD	probability of detection
POF	Polymer-Optische Faser
Power-LAN	power local area network, Netzwerk, das die vorhandene Stromleitung zum Aufbau des Netzes nutzt
PWM	Pulsweitenmodulation
PZT	Plumbum, Zirconat, Titanat, Abkürzung wird für gängige Piezokeramik
R	Radius des Rotors ab Nabenmittelpunkt
RC4	Raised-Cosinus-Sendesignal, 4 Perioden
rha	Luftfeuchte
SHM	structural health monitoring, Strukturüberwachung
SHM Wind	Acronym des F+E-Projektes, gleichzeitig Bezeichnung des zu entwickelnden multivariaten Structural Health Monitoring Systems für Rotorblätter
SHM.Blade	Markteintrittsversion des SHM-Systems
SNS	structural noise sensor, Kombination aus Beschleunigungssensor plus Mikrofon, spezieller Sensor für ***SHM.Blade***
SS	Saugseite des Rotorblatts
t	Temperatur
T	Temperatur
t_a	Außentemperatur
TCP/IP	Transmission Control Protocol und Internet Protocol, Internetprotokoll
Tdect	time domain based compensation technique of environmental influences, Verfahren zur Kompensation der Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die Gruppengeschwindigkeit
VCSEL	Laser mit Vertikalresonator (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)
w	Windstärke
WEA	Windenergieanlage
Wk(t)	k-te Signalgröße zur Zeit t
ZfP	zerstörungsfreie Prüfung
ZGWS	Zentraler Grenzwertsatz
β	Pitchwinkel

7 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinn des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

FhG-ISC

Aufgabe des Fraunhofer-ISC war es, piezoelektrische Sensoren und Aktoren in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner PIC zu entwickeln und zu testen, um sie für den dauerhaften Einsatz im Rotorblatt auszulegen. Durch die am Fraunhofer ISC vorhandenen Testmöglichkeiten und Expertisen konnten die piezoelektrischen Wandler des Projektpartners PI Ceramic elektrisch und mechanisch bezüglich ihrer Lebensdauer unter realistischen Klimabedingungen analysiert werden und lieferten somit einen wertvollen Beitrag zur Optimierung dieser Wandler. In Kooperation mit dem Projektpartner Nordex konnten Applikationsverfahren für die Erstausrüstung und auch Nachrüstung der Rotorblätter mit den Überwachungssensoren erarbeitet werden.

Die dabei erzielten technologischen Ansätze und Lösungen werden sowohl in wissenschaftlichen Arbeiten als auch in zukünftigen Projekten mit anderen industriellen und institutionellen Einrichtungen eingesetzt werden können. Insbesondere die Weiterentwicklung zu energieautarken Sensorknoten durch Nutzung der Energiewandlung aus der mechanischen Schwingungsenergie in den Piezo-elementen soll in weiteren Projekten durchgeführt werden.

Daraus ergeben sich auch neue Anwendungsbereiche, z. B. für die Applikation auf gekrümmten Oberflächen von schwingenden Maschinenbauteilen, Fahrzeugen oder Flugzeugen. Im europäischen Projekt HARCO wird die Kombination aus elektromechanischer Energiewandlung und Aktorik mittels piezoelektrischer DuraAct Wandler zur Vibrationsreduzierung von Elektrospindeln in Werkzeugmaschinen weiterentwickelt.

FhG-IWES

Am Fraunhofer-IWES wurde in den letzten drei Jahren eine vielseitige Balkenprüfung entwickelt mit dem Ziel, ein repräsentatives Verfahren zur Validierung von Klebverbindungen in Rotorblättern für Windenergieanlagen aufzubauen. Diese entwickelte Komponentenprüfung wurde im Rahmen von SHM Wind erfolgreich auf das Testen des SHM-Systems übertragen. Der Prüfbalken diente als eine Plattform für die Evaluierung der unterschiedlichen Structural Health Monitoring-Verfahren. Hierbei sind die Hauptbewertungsfaktoren die Empfindlichkeit und Genauigkeit des Verfahrens bezüglich der Identifikation von Schadensinitiierung und Ausbreitung.

Besonders Versagensarten in dicken Klebverbindungen unter konstanter Wechsellast (Ermüdung) wurden untersucht. Structural Health Monitoring-Verfahren wurden angewendet, und die Ergebnisse korrelierten mit den visuellen Inspektionsergebnissen. Schadensinitiierung und -ausbreitung wurden mit Hilfe von AE und Thermografie überwacht. Ein Temperaturanstieg im Klebstoff wurde von der Wärmekamera detektiert, dieser entstand aufgrund der wechselnden Spannungszustände und der inhärenten Reibungsmechanismen. Lokale Temperaturspitzen entlang der Klebverbindung konnten direkt mit den identifizierten Rissen von der Sichtprüfung korreliert werden. Passive Thermografie wurde erfolgreich für die genaue Zeitbestimmung der Rissentstehung in der Klebnaht implementiert.

Die thermische Emission kann in der Zukunft für die Identifizierung von Rissen in der Klebverbindung verwendet werden. Diese Methode kann auch für die Validierung der Versagenskriterien für den Klebstoff unter Ermüdungslasten angewendet werden. Dabei wird der Versagenspunkt durch Unregelmäßigkeiten in der Temperaturverteilung in der Klebverbindung angezeigt. Mit Hilfe von Structural Health Monitoring-Verfahren konnten die Schadensinitiierungen und deren Positionen bestimmt werden. Der nächste Schritt beinhaltet eine umfangreichere Untersuchung der verschiedenen Versagensarten und deren akustischen Emissionseigenschaften auf Balken-/ Komponentenebene. Durch den Einsatz von Thermografie und den Vergleich mit der SHM-Methode AE wurden neue Erkenntnisse über das Versagen von Klebverbindungen gewonnen.

FhG-IZFP-Dresden

Innerhalb des Konsortiums wurde vereinbart, dass das "Modellgestützte Structural Health Monitoring System" in 3 Phasen in den Markt eingeführt werden soll. In der ersten Phase wird das vom Projektpartner WBI entwickelte "***SHM.Blade***" als Markteintrittslösung verwendet. Dieses System kann globale Schäden und Eisansatz erkennen. In einem zweiten Schritt soll das optisch basierte System von den Partnern zur Marktreife gebracht werden, und es kann die zweite Phase der Einführung beginnen. Diese beinhaltet die Erkennung und Lokalisation von Schäden über "Acoustic Emission" basierend auf einem Sensornetzwerk. In der dritten Phase wird das System mit der Möglichkeit, hoch belastete Stellen und Oberflächen mittels "Acousto-Ultrasonics" zu überwachen, ergänzt. Gemeinsam mit Nordex wird an einem Projekt zur Umsetzung der Phase 2 gearbeitet.

IZFP-D ist an der Umsetzung der 2. Phase des Planes zur Markteinführung beteiligt. Dazu wird eine Forschergruppe in Rostock etabliert, die ab 2013 wirksam werden soll und bis 2015 auf 5 Personen anwachsen soll. Gemeinsam mit dem Fraunhofer AGP-Rostock und dem FB Elektrotechnik der Universität Rostock sollen in Zusammenarbeit mit Nordex technische Probleme bei der Systemapplikation gelöst werden. Dazu ist ein Umsetzungsprojekt für den Zeitraum 2013/2014 geplant.

Das IZFP-D wurde basierend auf den im Projekt gewonnen Erkenntnissen Mitglied im Windenergie Netzwerk Mecklenburg-Vorpommern, einem Zusammenschluss von Industriebetrieben, Universitäten und Forschungseinrichtungen dieser Region.

Im Rahmen von Vorträgen wurden die Forschungsergebnisse vorgestellt und eine Umsetzung bei verschiedenen Herstellern angeboten. Das IZFP-D war im Rahmen des Netzwerkes Mitaussteller auf der HUSUM WindEnergy Messe (Sept. 2012) und hat eine Vielzahl erfolgversprechender Gespräche (z.B. mit ENO Wind) geführt.

Die Verkopplung des entwickelten SHM-Systems zur Rotorblattüberwachung mit alternativen CMS-Systemen zur Antriebsstrangüberwachung ermöglicht eine wesentlich umfangreichere Beurteilung des Zustandes der gesamten Windenergieanlage. Daran arbeitet das IZFP-D in entsprechenden europäischen Projekten gemeinsam mit Partnern. Dies sind das Projekt HiPRwind, bei dem eine schwimmende Offshore-Windenergieanlage als Forschungsobjekt getestet werden soll, und das Projekt CMS-Wind, welches die Überwachung verschiedener Komponenten des Antriebsstranges beinhaltet.

IMA

Die IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH erhält immer wieder Anfragen nach dynamischen Prüfungen an Rotorblättern. Dabei wird offensichtlich, dass viel Unkenntnis über die Erregerkräfte für den Versuch in Schlagrichtung besteht, die auf die unbekannte aerodynamische Dämpfung zurückzuführen ist. Bei der Bearbeitung dieses Themas hat die IMA GmbH Dresden viel Wissenszuwachs auf diesem Gebiet erhalten, um dies bei einer Neuauslegung eines eigenen oder fremden Prüfstandes zu nutzen.

Der Betreibermarkt von Windenergieanlagen verlangt immer stärker nach der Zustandsüberwachung signifikanter Komponenten seiner Anlagen.

Die IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH hat mit DAVID-Wind ein von Allianz zertifiziertes CMS-System für Windenergieanlagen entwickelt. Dabei beschränkt sich der Leistungsumfang auf die Überwachung und Diagnose des Getriebes in den Windenergieanlagen.

Nach erfolgreichem Abschluss des SHM-Wind Forschungsthemas kann DAVID-Wind um die Funktion der Rotorblattüberwachung erweitert werden. Durch die gute Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ist schon ein erster Schritt erfolgt.

IZP

Generell: Alle von der IZP geleisteten Arbeiten sind in ihrem jeweiligen Zusammenhang verwertbar, wobei es teilweise jedoch noch weiterer Entwicklungen bedarf. Auf jeden Fall sind die tatsächliche Verwertung und der damit zusammenhängende Nutzen untrennbar mit der Kooperation der Projektpartner verbunden.

a) IT-Arbeiten

Das in 6.3.3.3 beschriebene Programm zu Datenarchivierung und -aufbereitung ist sowohl unter Windows als auch unter LINUX sofort einsetzbar. Letzteres ist dabei als Vorbereitung für den Einsatz auf einer ARM-Plattform zu sehen. Anpassungsarbeiten für konkrete Gegebenheiten sind natürlich nicht auszuschließen.

b) Referenzfunktionen

Die in 6.3.3.4, 6.3.3.5 vorgestellten Arbeiten zur Modellierung von Referenzfunktionen als Basis für die Erkennung von Schäden und deren Entwicklung müssen als ein Anfang für derartige Entwicklungen verstanden werden. Das gilt auch für die in 6.3.3.6 vorgestellte Fixierung von Kenngrößen als Schadensindikatoren. Das Haupthindernis für ausgereiftere Lösungen ist in der aktuell noch vorhandenen Unkenntnis (bzw. Kenntnis nur einer einzigen Situation) der Auswirkung von Blattschäden auf die in den jeweiligen Messverfahren verwendeten Kenngrößen zu sehen. Mit dem Fortgang der messtechnischen Arbeiten sollten diese Ansätze vor allem im Blick auf die Glättungsverfahren weiterentwickelt werden. Sie sind in diesem Sinne direkt verwertbar.

c) Driftmodelle

In 6.3.3.7 sind theoretische Vorbereitungen für Driftmodelle mit mehrdimensionalen Parametern getroffen worden. Es ist derzeit einfach nicht abzusehen, ob die Kenngrößenentwicklung im Schadensfall sich in solchen Modellen wiederfindet. Wenn ja, dann ist der Nutzen offensichtlich und die bisherigen Ergebnisse sind die Basis für konkrete Anpassungsarbeiten. Wenn nein, dann sind diese Arbeiten für die SHM-Zielstellung wertlos und es müssten völlig andere Modellierungsversuche gestartet werden. Aber das ist bei Grundlagenentwicklungen stets in Betracht zu ziehen.

d) Instandhaltungsplanung

Die in schließlich 6.3.3.8 beschriebene DLL zur Abschätzung der Ersatzstückzahlen ist ebenfalls sofort einsetzbar. Ein solches Tool ist unverzichtbar für die Planung eines effizienten Instandhaltungsablaufs. Die IZP ist der Ansicht, dass diese DLL auch unabhängig von der Rotorblattanwendung auf dem Markt Fuß fassen kann.

Nordex Energy GmbH

Die Forderung nach immer größeren Rotordurchmessern macht auch eine Zustandsüberwachung der Rotorblätter erforderlich. Auch in anderen Bereichen des Anlagenbaus sind Condition Monitoring Systeme (CMS) bereits Standard. Somit wächst die Nachfrage nach CMS auch für Rotorblätter.

Acoustic Emission / Acousto-Ultrasonics – Verfahren

Die Messungen insbesondere an den Testständ haben gezeigt, dass lokale, strukturelle Schädigungen im Rotorblatt durch die Erfassung von Schallereignissen erkennbar sind. Die Interpretation der Messdaten ist derzeit für den Anwender (z. B. Service-Personal) allerdings kaum möglich. Außerdem erscheint die Definition des Zeitpunktes und des Ortes, ab dem der Fortschritt der strukturellen Schädigung kritisch wird, sehr fließend.

Für eine detaillierte Ortsauflösung ist eine signifikante Anzahl von Sensoren erforderlich. Es gilt abzuwägen zwischen nötiger Auflösung und sinnvollen Kosten für die Sensoren. Gegebenenfalls sind Bereiche festzulegen, die besonders kritisch sind, um die lokale Überwachung auf diese Bereiche zu beschränken.

Optische Energieversorgung der Sensorknoten im Rotorblatt

Da sich die zu überwachenden Bereiche über das gesamte Rotorblatt erstrecken können, ist der Blitzschutz besonders zu beachten. Um keine elektrischen Leiter im Rotorblatt zu verlegen, wurde in diesem Projekt eine optische Energieversorgung entwickelt, die die Sensorknoten mit der nötigen Energie versorgen soll. Zusätzlich können über die optischen Fasern die Daten der Sensoren transportiert werden. Dieses System ist jedoch bisher nur im Labor getestet worden. Für die Verwendung in einer WEA sind noch einige Herausforderungen zu lösen. Neben den Kosten ist das System für die raue Umgebung in einer Rotornabe mit sehr großem Temperaturbereich und Erschütterungen zu ertüchtigen. Außerdem müssen die Geräte und Leitungen für die industrielle Fertigung und spätere Wartungsarbeiten geeignet sein.

Operational Modal Analysis-Verfahren (OMA)

In den Rotorblatttests an den Teststänlden konnte gezeigt werden, dass die Überwachung des Schwingverhaltens des Rotorblattes das Auftreten eines strukturellen Schadens erkennen lässt. Auch unter Betriebsbedingungen sind die dafür verwendeten Signale ausreichend herauszufiltern, um einen Schadenindikator zu berechnen. Für diesen Schadenindikator können Schwellen für die Warnung und Alarmierung definiert werden.

Das Verfahren kommt mit einer geringen Anzahl von kombinierten Sensoren im Rotorblatt und den Umgebungs- und Betriebsdaten der WEA aus. Vorbereitungen zur Integration eines Systems mit diesem Verfahren in Nordex WEA laufen. Es ist geplant, dieses System als Option anzubieten.

PI

Die Suche nach einer technisch realisierbaren Lösung war erfolgreich, eine Menge von 15 Versuchsträgern konnte letztlich an die Projektpartner übergeben werden.

Die grundsätzliche Möglichkeit eines faseroptisch versorgten Sensors wurde aufgezeigt. In kleinen Stückzahlen und mit hohem Arbeitseinsatz kann dieser auch produziert werden.

Erfahrungen wurden insbesondere gesammelt in der Entwicklung sehr sparsamer Elektronik sowie der Stromversorgung mit kleiner Spannung und Leistung unter Berücksichtigung der kritischen Sensoreigenschaften.

Besonders hervorzuheben ist einerseits der erreichte Signal-Rausch-Abstand der Auswerteschaltung, andererseits die gesamte Funktion Signaturanalyse. Hier wird durch einen Schaltwandler die sehr geringe kontinuierlich verfügbare Energiemenge so lange angesammelt, bis die Menge für eine Kurvenform ausreicht. Für den benötigten Arbeitspunkt von Spannung und Strom sind die meisten bekannten Schaltungen ungeeignet. Als weiterer Aspekt ist die Versetzung des kurvengenerierenden Prozessors in einen sehr stromsparenden Modus bei gleichzeitiger kurzfristiger Aufweckphase zu nennen.

PI ist kein Marktteilnehmer in der Windenergiebranche. Durch die strenge Fixierung der Projektziele sind wir auf den Erfolg der Projektpartner in der Vermarktung angewiesen.

TU Dresden

Das IAVT erwarb durch die Projektergebnisse einen wesentlichen Zuwachs an Wissen in dem Bereich der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik. Die dabei erarbeiteten technologischen Ansätze und Lösungen werden sowohl in die wissenschaftlichen Arbeiten in zukünftigen Projekten mit anderen industriellen und akademischen Einrichtungen als auch in die Lehre einfließen. Das wichtige Alleinstellungsmerkmal des IAVT an der TU Dresden, die enge Verbindung zwischen Forschung, Praxis und Lehre, garantiert die Nachhaltigkeit der Ergebnisse. Ein bereits seit April 2011 laufendes und auf SHM Wind-Ergebnissen aufbauendes Projekt ist das Verbundprojekt Kombi-Sens, das gemeinsam mit Fraunhofer IZFP-D und dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik bearbeitet wird. Ziel des Projektes ist ein kombiniertes Sensorsystem zur ganzheitlichen Überwachung von Faserverbundstrukturen. Dazu werden zwei physikalische Messprinzipien, nämlich die Spannungs-Dehnungs-Messung und die Strukturanalyse mittels Schallwellen, in ein einziges Sensorsystem integriert, das kritische Schädigungen bei laufendem Betrieb wesentlich zuverlässiger erfassen kann, als es bei Anwendung nur eines Messprinzips möglich wäre.

Das innerhalb des SHM Wind-Projektes weiterentwickelte Package-Konzept für fasergekoppelte quasi-hermetische SMD-Bauelemente in Waferlevel-Fertigung wird über die Projektlaufzeit hinaus fortgeführt.

Teletronic

Die im Projekt entwickelte Baugruppe SHMW-Master ist so konzipiert worden, dass sie in weiteren Produktlinien der Teletronic Rossendorf GmbH verwendet werden kann. Die Verwendung eines Dual-Core-Prozessorsystems (DSP +ARM-CPU) war verbunden mit der Einführung des Betriebssystems LINUX, eine neue Arbeitsrichtung für die Firma. Dieses im Projekt erworbene Know-how wird in weiteren Produkten der Firma Verwendung finden. Vorrangig wird dies in der mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) entwickelten Produktlinie „Zweiphasenmesstechnik“ stattfinden. Dieses Messsystem erfordert eine leistungsstarke Datenverarbeitung, welche große Datenmengen aufzeichnen und übertragen kann (bis zu 64 GByte je Messung).

Weiterhin wird ab 2013 die bisher vorrangig von Forschungseinrichtungen genutzte Zweiphasenmesstechnik gemeinsam mit dem HZDR in ein industrielles Messsystem weiterentwickelt. Dieses System soll den Gasgehalt und Informationen über die Strömungsform online ausgeben. Die hierfür nötigen Algorithmen erfordern eine erhebliche Rechenleistung und wurden bisher offline ausgeführt. Mit dem im SHM Wind-Projekt entwickelten Prozessorsystem, das für diese Anwendung adaptiert wird, kann die Berechnung nun online erfolgen.

Wölfel Beratende Ingenieure GmbH + Co. KG

Wölfel hat in dem vorausgegangenen F+E-Projekt CMS den Grundstein für ein modales Structural Health Monitoring-System gelegt und diese Arbeiten im hier zu besprechenden F+E-Projekt SHM Wind weiter ausgebaut. Nach Ende des Projektes wurden die Arbeiten bis zu einem Produkt weitergeführt. Produktvorstellung war Ende September 2012 auf der Messe HUSUM WindEnergy 2012.

Im Einzelnen wurden folgende wissenschaftlich-technischen Ziele erreicht:

- Verfahren zur Auswertung von Schwingungsdaten von Rotorblättern:
    - Entwicklung eines selbstlernenden SHM-Systems, das seine Referenzwerte mit Bezug zu den individuellen Eigenschaften eines jeden Rotorblattes selbst ermittelt.
    - Automatische Ermittlung von Alarmschwellen.
    - Unterscheidung von Schwingungssignalen aus Änderungen der EOCs (environmental and operational conditions) von solchen Strukturantworten, die aufgrund von strukturellen Veränderungen wie z. B. Massenzuwachs (z. B. durch Eis) bzw. Steifigkeitsverlust erfolgen.
    - Erkennen von Strukturschäden.
- Datenbank, Datenmanagement, Softwareumgebung für obiges Verfahren.
- Auswahl geeigneter Sensorik, Konfiguration Sensornetz, Datenübertragung, Anbindung an Anlagensteuerung.
- Test des Verfahrens auf Testständen und auf drehenden Anlagen

Der in der Anlage befindliche Prospekt beschreibt das fertige Produkt, wie es nach Abschluss von SHM Wind entstanden ist. Keiner der oben genannten Stichpunkte war bei Projektende fertiggestellt. Eine technische Spezifikation des auf die Arbeiten in SHM Wind aufbauenden Produktes ***SHM.Blade*** kann auf Wunsch angefordert werden bei friedmann@woelfel.de.

Nebenergebnisse sind Verfahren zur Eiserkennung und zur Lebensdauerüberwachung von Türmen. Für diese Verfahren wurden erste Machbarkeitsstudien auf der Basis der vorhandenen Messdaten durchgeführt. Sie werden in eigenen Projekten voraussichtlich auch zu Produkten weiterentwickelt werden. Bezüglich der Sensorik wurden Überlegungen und Vorstudien für einen sogenannten Structural Noise Sensor, SNS, angestellt, der Beschleunigungen, Schalldruck und Temperatur misst. Die Entwicklung eines derartigen eigenen Sensors wurde zusammen mit einem belgischen Partner Micromega SA inzwischen in einem EU-Projekt HiPRwind begonnen (Förderkennzeichen FP7 ENERGY.2010.2.3-1 256812).

Im Zuge des Vorläuferprojektes CMS beschäftigte sich Wölfel erstmals mit der Windenergie. Im Verlauf von SHM Wind wurde bei Wölfel ein neues Geschäftsfeld „Windenergie“ eröffnet. Diesen Vorgang kann man erst richtig würdigen, wenn man weiß, dass die Firma ihren Ursprung in der Kerntechnik hat und heute in ihrem Spezialgebiet Dynamik (Lastfälle Erdbeben und Flugzeugabsturz) weltweite Anerkennung genießt und z. B. auch für die IAEA tätig ist. Im Geschäftsfeld Windenergie sind inzwischen mehr als 10 Ingenieure beschäftigt, und um ***SHM.Blade*** entstehen weitere Produkte wie z. B. zur Eiserkennung an Rotorblättern.

Das zwischenzeitlich im Markt vorgestellte Produkt ***SHM.Blade*** wird mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vom Projektpartner Nordex als Zusatzoption zu den neuen Windenergieanlagen angeboten. Die Vertragsverhandlungen dazu stehen kurz vor dem Abschluss. Betreiber großer Windparks interessieren sich ebenfalls für ***SHM.Blade***.

Ein weiterer Ausbau des SHM-Systems ist in Zusammenarbeit mit einigen Projektpartnern geplant. Dadurch würden die zusätzlichen ultraschallbasierten Verfahren Acoustic Emission, AE, und Acousto-Ultrasonics, AU, eine Lokalisation und eine genauere Beschreibung des Schadens ermöglichen. Der Zeitpunkt der Umsetzung hängt von den Entwicklungserfolgen bei den Partnern ab. Wölfel benötigt zur Erweiterung von ***SHM.Blade*** qualitätsgesicherte und industriefähige Produkte.

Eine Übertragung des SHM-Verfahrens auf andere Strukturen und Fragestellungen ist geplant.

8 Während der Durchführung von SHM Wind bekannt gewordene Fortschritte an anderer Stelle

Die unter 4.1 beschriebenen Mitbewerber sind nach wie vor mit ihren Produkten am Markt, allerdings handelt es sich bei den meisten eher um Anbieter spezieller Sensorsysteme, jedoch ohne SHM-Auswertealgorithmen (vgl. dazu 6.3). Von solchen speziellen Sensorsystemen kamen weitere in den Markt, z. B. fos4X. Diese speziellen Sensorsysteme sind aus unserer Sicht jedoch keine Wettbewerber, vielmehr ist zu prüfen, ob ***SHM.Blade*** auch auf die Auswertung solcher speziellen Sensoren zurückgreifen sollte.

9 Publikationen

- Ebert, C., 2012: Systemidentifikation zur Modellierung mechanischer Strukturen – Markovparameter zur experimentellen Schadenserfassung, Dissertation Universität Siegen, im Druck
- Ebert, C.; Friedmann, H.; Henkel, F.-O.; Frankenstein, B.; Schubert, L.: Entwicklung eines Condition-Monitoring-Systems zur Zustandsüberwachung von Rotorblättern; in: Tagungsband zur VDI-Fachtagung Baudynamik 2009, Kassel 2009
- Ebert, C.; Friedmann, H.; Henkel, F.-O.; Frankenstein, B.; Schubert, L.: Entwicklung eines modellgestützten Structural-Health-Monitoring-Systems zur Zustandsüberwachung von Rotorblättern, in: VDI-Tagung Schwingungen in Windenergieanlagen 2010, VDI-Bericht 2088, 2010
- Ebert, C.; Friedmann, H.; Henkel, F.-O.; Frankenstein, B.; Schubert, L.: Structural-Health-Monitoring von Rotorblättern - Systemidentifikation auf Basis von Schwingungsmessungen; in: Tagungsband zur VDI-Fachtagung Schwingungsanalyse und Identifikation, Leonberg, 2010
- Frankenstein, B.; Schubert, L.; Klesse, T.; Schulze, E.; Friedmann, H.; Ebert, C.: Überwachung von Rotorblättern von Windkraftanlagen, in: MP Materials Testing, Ausgabe 10/2009, Volume 51
- Frankenstein, B.; Möser-Drechsler, U.; Friedmann, H.: Überwachung von Faserverbundstrukturen am Beispiel von Rotorblättern von Windkraftanlagen, in: DVM-Bericht 678, Bauteilzuverlässigkeit – Schäden und ihre Vermeidung, Berlin 2011, S. 111 ff
- Frankenstein, B.; Fischer, D.; Weihnacht, B.; Rieske, R.: Lightning safe rotor blade monitoring using an optical power supply for ultrasonic techniques, in: Boller, Ch. (ed.): Proceedings of 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 3. – 6. July 2012, Dresden
- Friedmann, H.; Ebert, C.; Frankenstein, B.: Synapsen im Rotorblatt, in: Erneuerbare Energien, Heft 2, 2012, S. 42 – 45
- Friedmann, H.; Ebert, C.; Kraemer, P.; Frankenstein, B.: SHM of floating Offshore Wind Turbines – Challenges and first Solutions, in: Boller, Ch. (ed.): Proceedings of 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 3. – 6. July 2012, Dresden
- Kraemer, P., 2011: Schadensdiagnoseverfahren für die Zustandsüberwachung von Offshore-Windenergieanlagen, Dissertation, ISSN 2191-5601, Universität Siegen
- Schubert, Lars: Zustandsüberwachung an Faserverbundwerkstoffen mit geführten Wellen, Dissertation, TUDpress, 2012, ISBN 978-3-942710-72-5
- Sohr, S.; Rieske, R.;Nieweglowski, K.; Wolter, K.-J.: Laser Power Converters for Optical Power Supply, in: Proceedings 34th International Spring Seminar on Electronics Technology, High Tatras, Slovakia, 11th - 15th of May
- Sohr, S.; Fischer, D., Rieske, R.;Nieweglowski, K.; Wolter, K.-J.: Packaging and Characterisation of Ultra Low Power VCSEL for Sensor Networks, in: Proceedings of 2011 International Students and Young Scientists Workshop Photonics and Microsystems

10 Tagungen

- 3. VDI-Fachtagung Baudynamik, 14.-15. Mai 2009 in Kassel, WBI, Vortrag: C. Ebert, H. Friedmann, F.-O. Henkel, B. Frankenstein, L. Schubert: Entwicklung eines Condition-Monitoring-Systems zur Zustandsüberwachung von Rotorblättern
- 17. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 24.09. - 25.09.2009, Bad Schandau, FhG IZFP-D, Vortrag: Schulze, E.; Frankenstein, B.; Schubert, L.: Schallemissionsanalyse beim Gesamtermüdungstest eines Windkraftrotorblattes
- VDI-Tagung Schwingungen von Windenergieanlagen, 3.-4. Februar 2010, Hannover, WBI, Vortrag: Ebert, C.; Friedmann, H.; Henkel, F.-O.; Frankenstein, B.; Schubert, L.: Entwicklung eines modellgestützten Structural-Health-Monitoring-Systems zur Zustandsüberwachung von Rotorblättern
- VDI-Fachtagung Schwingungsanalyse und Identifikation, Leonberg, 2010, WBI, Vortrag: Ebert, C.; Friedmann, H.; Henkel, F.-O.; Frankenstein, B.; Schubert, L.: Structural-Health-Monitoring von Rotorblättern - Systemidentifikation auf Basis von Schwingungsmessungen
- EMAUG 2011, European Modal Analysis Users Group, 9. März 2011, Ingolstadt, WBI, Vortrag: Structural-Health-Monitoring von Rotorblättern - Systemidentifikation auf Basis von Schwingungsmessungen
- HUSUM WindEnergy 2010, FhG IZFP-D, WBI,Vortrag: Ebert, C.; Friedmann, H.; Katz, S.; Frankenstein, B: Modellbasiertes multivariates Structural Health Monitoring System für Rotorblätter von Windenergieanlagen
- 11. Vibrometer-Anwenderkonferenz, 26./27. Oktober 2010, Waldbronn bei Karlsruhe, WBI, Vortrag: Carsten Ebert, Structural-Health-Monitoring von Rotorblättern – Einsatz der LDV zur Bestimmung modaler Eigenschaften von Rotorblättern
- 2011 International Students and Young Scientists Workshop „Photonics and Microsystems", FhG IZFP-D, IVAT, Vortrag: S. Sohr, D. Fischer, R. Rieske1, K. Nieweglowski and K.-J. Wolter: Packaging and Characterisation of Ultra Low Power VCSEL for Sensor Networks
- 34th International Spring Seminar on Electronics Technology, High Tatras, Slovakia, 11th - 15t^{h} of May, IVAT, Vortrag: Sohr, S.; Rieske, R.;Nieweglowski, K.; Wolter, K.-J.: Laser Power Converters for Optical Power Supply
- VDI-Fachkonferenz „Rotoren und Rotorblätter von Windenergieanlagen", Hamburg, 12.-13. April 2011, WBI, Vortrag: Lutz, O.; Schamo, J.; Pankoke, S.: Schäden, Schadensfortpflanzung und Schadensursachen
- Haus der Technik Essen, Rotorblätter von Windenergieanlagen, 28./29. Juni 2011, Essen, WBI, Vortrag: Pankoke, S.; Ebert, C.; Friedmann, H.; Frankenstein, B.; Schubert, L.: Structural Health Monitoring of Rotor Blades - Damage Detection by Acoustic Emission, Acoustic Ultrasonic and Modal Analysis
- DVM-Tag 2011, 4.-6. Mai 2011, Berlin, FhG IZFP-D, IMA, WBI, Vortrag: Frankenstein, B.; Möser-Drechsler, U.; Friedmann, H.: Überwachung von Faserverbundstrukturen am Beispiel von Rotorblättern von Windkraftanlagen
- EMAUG 2012, European Modal Analysis Users Group, 8.-9. März 2012, Magdeburg, WBI, Vortrag: C. Ebert: Output-Only-Modalanalyse an rotierenden und nichtrotierenden Windenergieanlagen
- Cluster Energietechnik, 28. Juni 2012 an der TU München, WBI, Vortrag: Friedmann, H.; Ebert, C.; Kraemer, P.; Frankenstein, B.: Zustandsüberwachung im Fertigungsprozess und Betrieb

- Sixth European Workshop on Structural Health Monitoring 2012, EWSHM, 3. – 6. Juli 2012 Dresden, FhG IZFP-D, FhG IZFP-D, TUDD, WBI, Vorträge:
    - Friedmann, H.; Ebert, C.; Kraemer, P.; Frankenstein, B.: SHM of floating Offshore Wind Turbines – Challenges and first Solutions
    - Frankenstein, B.; Fischer, D.; Weihnacht, B.; Rieske, R.: Lightning safe rotor blade monitoring using an optical power supply for ultrasonic techniques
- HUSUM WindEnergy 2012, FhG IZFP-D, WBI, Vorträge:
    - B. Frankenstein, A. Schnabel, E. Schulze: Acoustic Measurement during a full scale fatigue test
    - Ebert, C.: SHM.Blade – Zustandsüberwachungssystem für Rotorblätter
- 2. FACHTAGUNG NANO-KOHLENSTOFF, Augsburg, 28.09.2012, WBI, Vortrag: Kraemer,. P.; Ebert, C.; Friedmann, H.: Structural Health Monitoring extremer Leichtbaustrukturen am Beispiel der Rotorblätter von WindenergieanlagenSensorik und Messtechnik für die Windenergie, 4. – 5. Dezember 2012, Mainz, WBI, Vortrag: Friedmann, H.; Kraemer, P.: Integrale Überwachungskonzepte für Getriebe, Rotorblatt und Turm
- 17. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 24.09. - 25.09.2009, Bad Schandau, FhG IZFP-D, Vortrag: Schulze, E.; Frankenstein, B.; Schubert, L.: Schallemissionsanalyse beim Gesamtermüdungstest eines Windkraftrotorblattes

11 Patente

Es wurden zwei Patente angemeldet. Die Arbeiten für das erste Patent reichen zurück bis in das Projekt CMS:

- Modellbasiertes Verfahren zur Zustandsüberwachung von Rotorblättern; gemeinsame Anmeldung von FhG IZFP-D und Wölfel, Anmeldetag 08.09.2009, amtliches AZ der europäischen Anmeldung 2476033, Offenlegung am 17.03.2011, ebenfalls Anmeldung in USA
- Verfahren und Vorrichtung zur Zustandsüberwachung von Rotorblättern, Anmelder Wölfel Beratende Ingenieure am 31.08. 2011, amtliches AZ der europäischen Anmeldung 11 007 069.5