

KISWind – „KI-unterstütztes Schallemissionsmonitoring zur automatischen Schadenserkenkung in Tragstrukturen von Windenergieanlagen“

Teilvorhaben: Automatisiertes Überwachungssystem und Validierung (AutoVal)

Schlussbericht

Auftragnehmer:

MKP GmbH

Zum Hospitalgraben 2
99425 Weimar

FKZ: 020E-100396323

Auftragnehmer:

Projekträger Jülich (PTJ)

Energie und Klima

Geschäftsbereich Energiesystem Erneuerbare Energien (ESE)

Windenergie onshore (ESE 2)

Das Verbundvorhaben wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Berichtszeitraum: 01.07.2020 bis 30.06.2024

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Freigabe

Max Fiedler

Rev. 00

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ii
1 Kurzdarstellung	3
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen im Rahmen der Projektdurchführung	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4 Wissenschaftliche und technische Stand vor dem Projekt	4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2 Eingehende Darstellung	6
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	6
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	29
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	29
2.4 Voraussichtlicher Nutzen bzw. Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes	29
2.5 Kenntnisse zu Fortschritten auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	30
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	30
3 Literaturverzeichnis	31
Anlage Erfolgskontrollbericht	33

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das BMWK hat das Ziel gesetzt, dass der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch auf 60% steigen soll, während die Treibhausgasemissionen um mindestens 80% gegenüber dem Jahr 1990 sinken sollen (BMWK 2021). Für die Windenergie bedeutet dies vor allem eine Reduktion der Errichtungs- und Instandhaltungskosten. Im Sinne einer prädiktiven Instandhaltung zur Reduzierung der Instandhaltungskosten müssen Schädigungen automatisiert und kostengünstig detektiert werden. Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung von Methoden zur effizienten und automatisierten Dauerüberwachung der Tragstruktur von Windenergieanlagen zur Detektion von Schädigungsereignissen und Anomalien mithilfe der Schallemissionsanalyse und innovativer Auswertemethoden aus der künstlichen Intelligenz (KI). Im Fokus der Untersuchungen stehen die hochbeanspruchten Spannglieder und deren Verankerungen in Hybriddürmen. Drahtbrüche in Spanngliedern in Windenergieanlagen sind aufgrund von vielen Faktoren wie beschränkter Zugänglichkeit und hohen Betriebsgeräuschen schwer zu detektieren und die Detektion ist daher mit Unsicherheiten und großem Aufwand verbunden. Die Spannglieder oder Verankerungen können infolge von Ermüdungsbeanspruchungen oder Überlastungen geschädigt werden und es kann zu Drahtbrüchen in den Spanngliedern oder zu anderen charakteristischen Schädigungen kommen.

Die Entwicklung der geplanten Methoden kann nur interdisziplinär mit den beteiligten Projektpartnern erfolgen. MKP übernahm im Konsortium die Aufgabe Schallemissionsmessungen im laufenden Betrieb einer Windenergieanlage durchzuführen und hiermit die erforderliche Datengrundlage zu schaffen. Weiterhin wurde das Ziel verfolgt, ein kosten- und leistungseffizientes SHM-System zu entwickeln, welches eine automatisierte Aufbereitung und Auswertung der Daten ermöglicht.

1.2 Voraussetzungen im Rahmen der Projektdurchführung

Die MKP GmbH befasst sich seit ca. 20 Jahren intensiv mit dem Bauwerksmonitoring. Neben der reinen messtechnischen Erfassung von Bauwerksreaktionen hat die Automatisierung der Auswertungen und die intelligente Verknüpfung von Daten aus verschiedenen Messstellen und Quellen eine immer größere Bedeutung. Die Erfahrungen aus dem langjährigen Betrieb von Monitoringsystemen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Projektdurchführung gewesen. Hierzu zählen insbesondere Erfahrungen aus dauerüberwachenden Schallemissionssystemen im Brückenbau und aus FuE Projekten im Bereich der messtechnischen Überwachung von Windenergieanlagen (HyTowering).

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben KISWind „KI-unterstütztes Schallemissionsmonitoring zur automatischen Schadenserkennung in Tragstrukturen von Windenergieanlagen“ ist in insgesamt sieben Arbeitspakete unterteilt. Die ursprünglich geplante Projektlaufzeit betrug drei Jahre und startet am 01.07.2020. Eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung um ein Jahr war aufgrund der Einschränkungen der Corona-Pandemie erforderlich. Es fanden regelmäßig Projekttreffen

statt, um die Arbeitsstände abzugleichen. Das Teilvorhaben, für welches MKP zuständig ist, umfasste folgende Arbeitspakete:

- Arbeitspaket 2: Aufzeichnung von Betriebsgeräuschen an einer realen Turmstruktur
- Arbeitspaket 6: Implementierung der entwickelten Verfahren und der Datenbank in ein SHM-System
- Arbeitspaket 7: Validierung der entwickelten Methoden und Verfahren an einer realen WEA

Die im Verbundvorhaben geplanten Aktivitäten seitens MKP wurden erfolgreich abgeschlossen.

1.4 Wissenschaftliche und technische Stand vor dem Projekt

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Windenergieanlagen (WEA) sind dynamisch hochbeanspruchte Strukturen, die für eine Lebensdauer von etwa 20 Jahren ausgelegt sind. Im Bereich der Schadensüberwachung und -detektion wird traditionell die Messung globaler, struktureller Schwingungen mittels herkömmlicher Sensoren wie Dehnmessstreifen oder Beschleunigungssensoren eingesetzt. Diese Messverfahren erlauben es, strukturdynamische Veränderungen, die auf größere Schädigungen hinweisen, durch modale Analyseverfahren zu erkennen (Marwala (2010)). Neben der globalen Überwachung werden auch zerstörungsfreie Prüfmethode, wie Ultraschall- oder Schallemissionsmessungen, für die gezielte Überwachung spezifischer Strukturelemente eingesetzt. Derartige Anwendungen beschränken sich in der Regel auf die Früherkennung von Schäden an der Maschinentechnik oder den Rotorblättern. befinden sich dabei noch in der Entwicklungsphase (Krämer (2011), Jüngert et. al. (2008)). Die Überwachung der Spannglieder in hybriden Turmkonstruktionen wurde bisher nicht untersucht. In den Bereichen der Forschung im Bereich der Tragstrukturen von Windenergieanlagen und der Überwachung von Rotorblättern waren die Projektpartner der TUB und der LUH langjährig tätig (Marx (2017); Von Der Haar and Marx (2015); Kang et. al. (2019); Hartwig and Marx (2021); Klein and Marx (2021), Krause et. al. (2015)). Diese Expertise bildet eine wesentliche wissenschaftliche und technische Basis für die geplanten Forschungsaktivitäten im Rahmen des Teilvorhabens.

Die Schallemissionsanalyse (SEA) hat sich in der Vergangenheit als vielversprechendes Verfahren zur kontinuierlichen Erfassung von Schädigungsprozessen etabliert. Insbesondere wurde diese Methode erfolgreich im Ingenieurbau eingesetzt, um Spannstahlbrüche in Spannbetonbrücken zu detektieren und zu lokalisieren (Schacht et al. (2018); Käding et. al. (2022)). Bei Monitoringanwendungen kommen der SEA verfahrensspezifische Vorteile zu Gute. Im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren kann mit der SEA ein Bauteil bzw. Bauwerk mit gut verteilten Sensoren integral überwacht und der Ort der Schädigung lokalisiert werden. Die Sensoren reagieren jedoch auch auf andere Ereignisse. Nebengeräusche, die bspw. infolge Wind oder Verkehr entstehen, werden i. d. R. auch aufgezeichnet. Die Herausforderung bei solchen Daueranwendungen besteht darin, in den riesigen Datenmengen die Signale struktureller Schädigungen vom unbrauchbaren Noise zu trennen. Die langjährige Er-

fahrung in der Anwendung der SEA im Ingenieurbau zeigt das große Potential für Windenergieanlagen und stellt eine wesentliche technische Grundlage für die Realisierung des Teilvorhabens da.

Die Antragsteller haben darauf aufbauend das Konzept selbst entwickelt, die Schallemissionsanalyse in die Bewertung von der Tragstruktur der Windenergieanlagen zu integrieren. Hierfür wurden keine Schutzrechte für die Durchführung des Vorhabens benutzt.

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Im Rahmen der Untersuchungen über Methoden der Detektion von Schadensereignissen mit Hilfe von Schallemissionsanalyse und zum Entwurf von Sensornetzwerken wurde eine Literaturanalyse – insbesondere mit Hilfe der Online-Bibliothek „Scopus“ – durchgeführt. Diese wird u. a. in einer geplanten Publikation der Autoren (siehe Kapitel 2.6, Fiedler (2025)) zusammengefasst. Durch den starken Praxisbezug des Projektes hat sich die Benutzung von weiteren Informations- oder Dokumentationsdiensten erübrigt. Es bestanden vor dem Projekt keine geeigneten Datensätze von Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen, auf die zurückgegriffen werden konnte.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit innerhalb des Verbundvorhabens erfolgte über einen engen und intensiven Austausch zwischen allen Partnern. Für den direkten Austausch mit allen am Verbundvorhaben beteiligten Partnern fanden jährliche Projektberatungen statt, in deren Rahmen die aktuellen Forschungsergebnisse regelmäßig vorgestellt und mit allen Projektpartnern diskutiert wurden. Der Austausch zwischen zusammenarbeitenden Stellen erfolgte in weiteren Treffen und regelmäßigen Telefonkonferenzen.

Nachfolgend sind alle Vorhabenspartner im am Projekt KISWind beteiligten Partner aufgelistet:

- TUD IMB Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau
- LUH tnt Leibniz Universität Hannover, Institut für Informationsverarbeitung
- MKP GmbH Marx Krontal Partner

Assoziierter Partner:

- Bögl Max Bögl Wind AG
- TÜV SÜD TÜV SÜD Industrie Service GmbH

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

AP 2: Aufzeichnung von Betriebsgeräuschen an einer realen Turmstruktur
MKP, TUD, LUH

Zwischenziele:

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde die Aufzeichnung von Betriebsgeräuschen an einer realen Turmstruktur angestrebt. Hierzu sollte ein Monitoringkonzept erstellt und abgestimmt werden. Dieses Konzept beinhaltet die Planung und Festlegung der messtechnischen Komponenten, sowie die Erstellung einer Ausführungsplanung. Das betriebsbereite Messsystem sollte dann in einer Windenergieanlage installiert werden. Während der geplanten Betriebsphase von 6 Monaten ist die Anlage funktionsfähig vorzuhalten und nach Beendigung der Messungen rückstandslos zurückzubauen.

Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Dieses Arbeitspaket bildete eine wichtige Grundlage für das gesamte Forschungsprojekt. Es ist damit eng mit den weiteren Arbeitspaketen verzahnt.

Zu Beginn dieses Arbeitspaketes wurde ein Monitoringkonzept für die Überwachung einer Windenergieanlage erstellt. Die Verteilung der Sensoren und der messtechnischen Komponenten wurde aus planerischer Sicht dargestellt wurde, siehe Abbildung 1. In diesem Zuge wurden die Anforderungen an Sensorik und die Datenerfassung definiert und mit den Projektpartner der LUH und TUD abgestimmt. Im Anschluss wurden technische Komponenten (Sensoren, A/D-Wandler, Datenlogger, Modem, Stromversorgung etc.) gewählt, beschafft und in einem Schaltschrank montiert. Die Software der unterschiedlichen Gerätetechnik wurde konfiguriert und im Zuge des Probetriebs wesentlich Funktions- und Belastungstest in Laborumgebung durchgeführt.

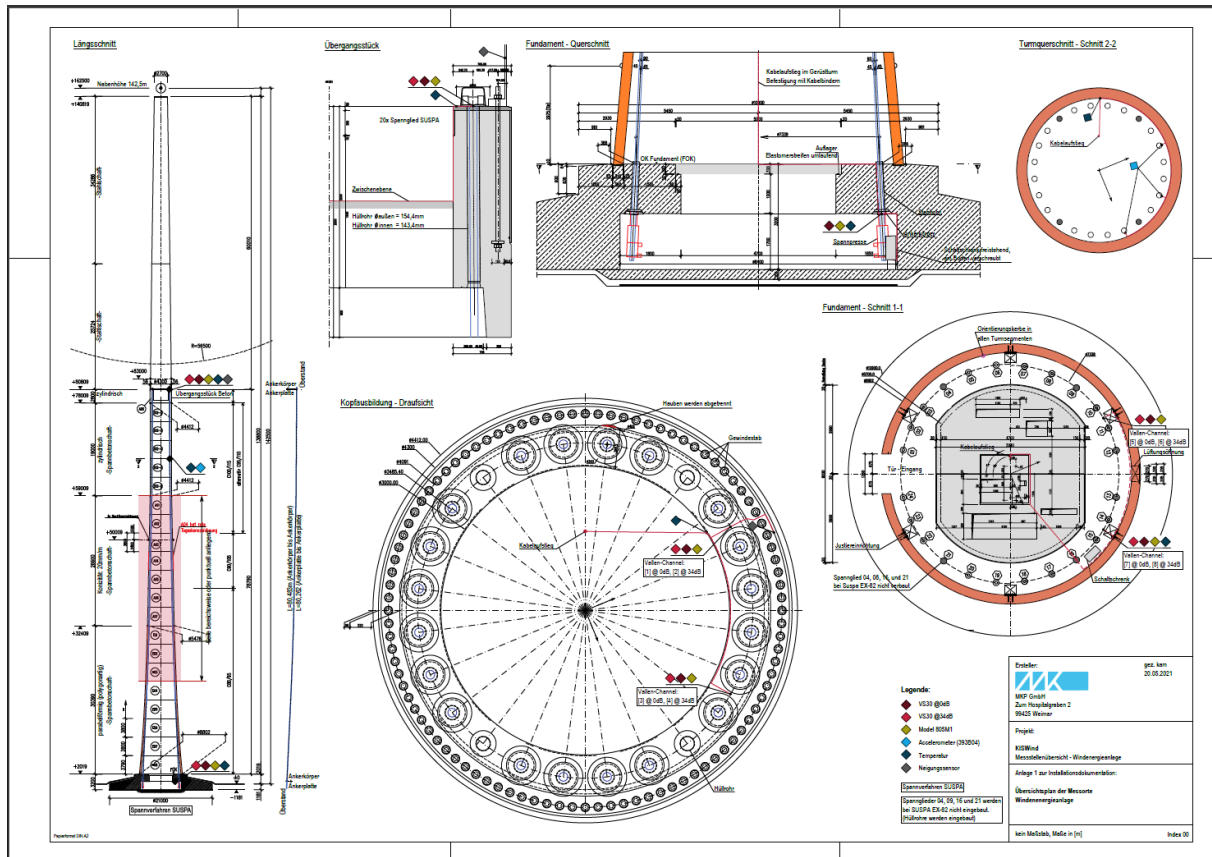


Abbildung 1: Ausführungsplanung, Übersichtsplan mit Verteilung der messtechnischen Komponenten.

Besonders hervorzuheben ist die Entwicklung eines Signalsplitter, der es ermöglichte, die Sensorsignale eines hochentwickelten, aber auch kostenintensiven Schallemissionsgerätes aufzuteilen und in einfachere, kostengünstige Messhardware einzuspeisen. Die Signale eines Sensors können so mit zwei unterschiedlichen Erfassungssystemen aufgenommen und die qualitative Eignung der Geräte untersucht werden. In Laboruntersuchungen wurde ein experimenteller Vergleich der Frequenzantwort beider Sensoren durchgeführt und ein vielversprechendes Ergebnis festgestellt, siehe Abbildung 2. Hiermit wurden die Grundlagen für ein kostengünstiges Alternativsystem für die Überwachung der Windenergieanlagen gelegt. Die kostengünstigeren Sensoralternativen wurden bei der Dauermessung in das System integriert.

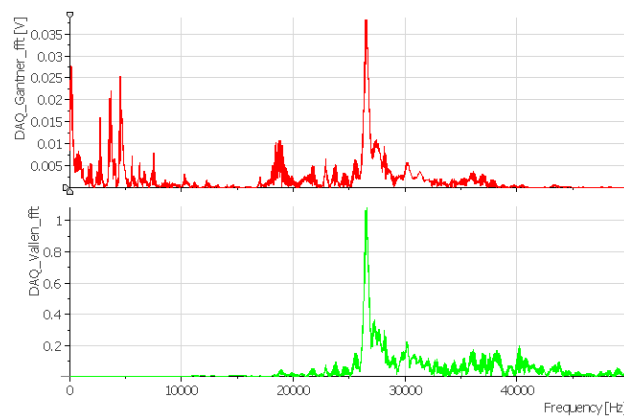


Abbildung 2: Vergleich der Frequenzspektren eines Sensorsignal gemessen mit klassischer und alternativer Messhardware.

Als Ergebnis der vorbereitenden Arbeiten ist ein voll funktionsfähiges und einsatzbereites Monitoringsystem entstanden, siehe Abbildung 2. Die Messanlage wurde an einer sich in Betrieb befindlichen Windenergieanlage fest installiert und erfolgreich in Betrieb genommen, siehe Abbildung 4 links. In Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner *MAX BÖGL* wurde eine Windkraftanlage mit einem konventionellen Fundament in der Nähe von Neumarkt i.d.OPf. (Karholz) für diesen Zweck ausgewählt, die bereits in anderen Forschungsprojekten (z. B. "MISTRALWIND", "IM Wind", Rupfle et. al. (2023)) untersucht wurde. Das Monitoringsystem wurde vom 25. Februar 2021 bis zum 22. Februar 2022 nahezu ein Jahr lang betrieben. Anschließend erfolgte der rückstandslose Rückbau der Anlage.

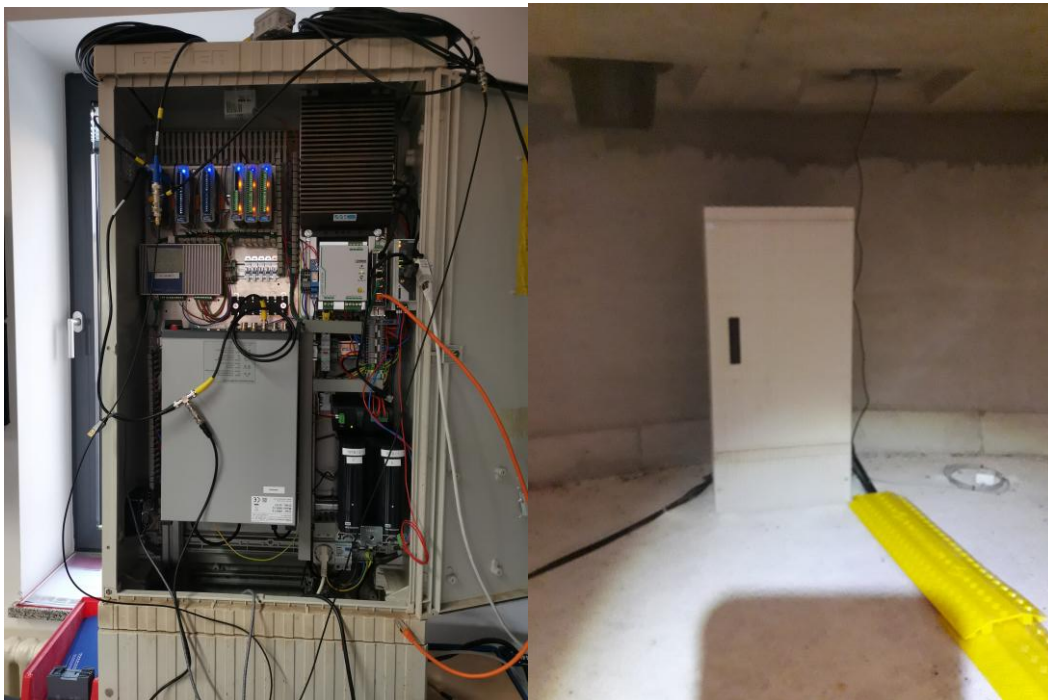


Abbildung 3: Aufgebaute Messanlage im Labor (links) und an der Windenergieanlage (rechts).

Das Fundament des Turms bietet einen geräumigen Spannkammerbereich, in dem die Haupteinheit des Messsystems eingerichtet und installiert wurde. Freie Leerrohre zwischen der Erdoberfläche und der Spannkammer wurden für die Kabelverlegung genutzt, sodass beispielsweise ein Stromkabel nach unten in die Spannkammer und Messkabel sowie Antennen nach oben verlegt werden konnten.

Die Bereiche um die Verankerungen der Spannglieder am Fundament und am Übergangsstück wurden als Sensorpositionen ausgewählt. Zum einen wurden die Verankerungen als potenziell häufige Schadensorte identifiziert. Zum anderen ist es nur an diesen Positionen möglich, mehrere Spannglieder mit einem einzigen Sensor zu überwachen. Diese Möglichkeit kann genutzt werden, um die Gesamtzahl der Sensoren im Rahmen eines generalisierten Überwachungskonzepts zu reduzieren.

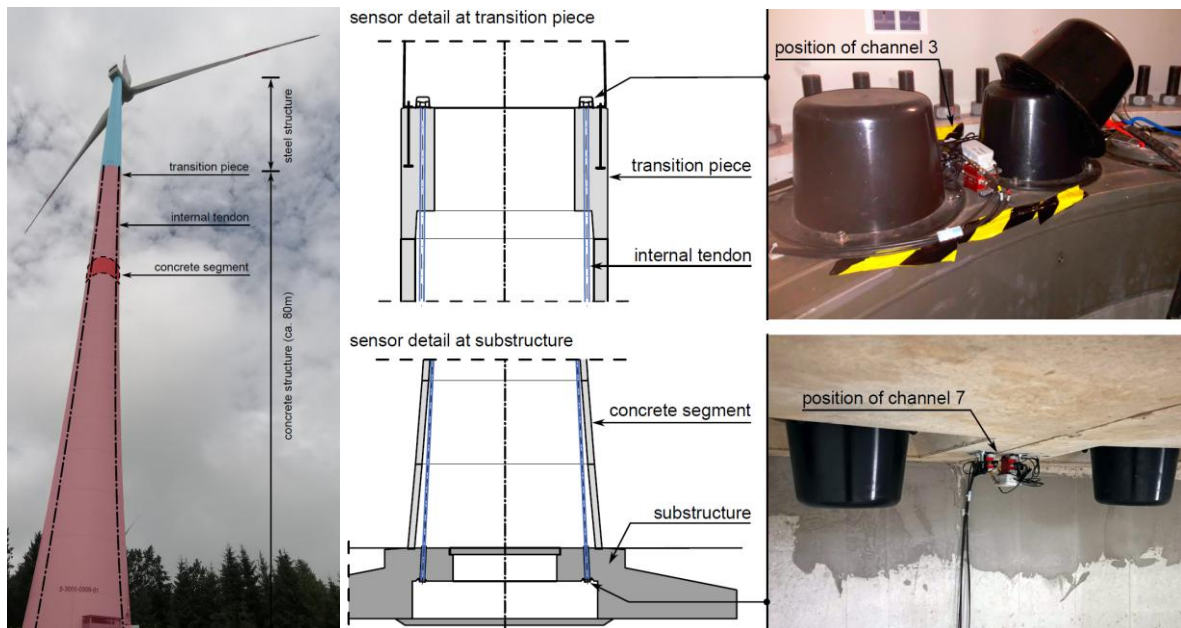


Abbildung 4: Messkonzept, Übersichtsplan mit Verteilung der messtechnischen Komponenten.

Es wurden Schallemissionssensoren vom Typ VS30-V installiert (Vallen (2022)). Diese Sensoren wurden sowohl an den Seilverankerungen im Bereich des Fundaments als auch am Überhangsstück in Turmmitte installiert. Insgesamt wurden acht dieser Sensoren an der Turmstruktur installiert. Abbildung 4 (rechts) zeigt die relevanten Sensorpositionen. Im Spannkeller wurden vier Sensoren an zwei Messstellen zwischen den Verankerungen der unteren Kabelenden (Spannanker) vorgesehen. Diese Sensoren wurden an den Viertelpunkten des Turmdurchmessers und zentrisch zwischen zwei Verankerungen positioniert. An jeder Messstelle wurde jeweils ein Sensor mit einer Vorverstärkung von 0 dB und 34 dB betrieben. Diese Sensoren sind speziell im Bereich von 25 bis 80 kHz empfindlich. Diese Verstärkungsstufe wurde gewählt, da die Hintergrundgeräuschpegel im Vorfeld nicht bestimmt werden konnten und das tatsächliche Niveau des Hintergrundrauschens unklar war.

Zusätzlich wurde an jeder dieser Messstellen ein Sensor des Typs 805M1 installiert (TE (2022)). Dieser Sensor weist eine niederfrequente Charakteristik auf und stellt eine kostengünstige Alternative dar. Es ist jedoch anzumerken, dass die Dauerhaftigkeit dieses Sensors nicht vergleichbar zum VS30-V ist.

Die Abtastrate der Schallemissionssensoren betrug 100 kHz. Es wurde eine kontinuierliche Messung (Stream) ohne zusätzliche Filterung durchgeführt.

Weiterhin wurden Beschleunigungssensoren an den Seilen appliziert, siehe Abbildung 5. Hierfür wurde ein Sensor des Typs PCB 393B04 gewählt. Die Abtastrate betrug 100 Hz. Die Kabelverlegung über die Höhe des Turms und die Installation der Beschleunigungssensoren erfolgte u. a. mit Hilfe von Industriekletterern.



Abbildung 5: Messstelle zur Erfassung der Seilbeschleunigungen installiert mit Hilfe von Industriekletterern.

Es wurden auch Neigungssensoren am Übergangsstück zur Erfassung der Turmneigungen installiert. Diese Messwerte stellten sich jedoch als ungeeignet heraus, dass die Verformungen des Turmes im Vorfeld der Messung nicht genau genug abgeschätzt werden konnten und die Bewegungen des Turmes regelmäßig den Messbereich ausgeschöpft haben. Temperatursensoren wurden an den Messquerschnitten im Fundament, an den Seilen und am Übergangsstück Messinstalliert, um die Umgebungsbedingungen im Turm kontinuierlich aufzuzeichnen. Die Aufzeichnung erfolgte mit alle zehn Minuten.

Die Umweltbedingungen und Betriebsparameter der Windkraftanlage (einschließlich Temperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Rotordrehzahl, Blattwinkel und Gondelrichtung) wurden standardmäßig von einem SCADA-System (Supervisory Control and Data Acquisition) erfasst. Dieses System ermöglicht es dem Betreiber der Windkraftanlage, deren Leistung aus der Ferne zu steuern und zu überwachen. Diese Daten wurden mit einer Abtastrate von 15 Minuten bereitgestellt.

Eine Übersicht über die Datenströme an der Windenergieanlage ist in Abbildung 6 gegeben.

data aquisition

operational data | data stream at wind turbine

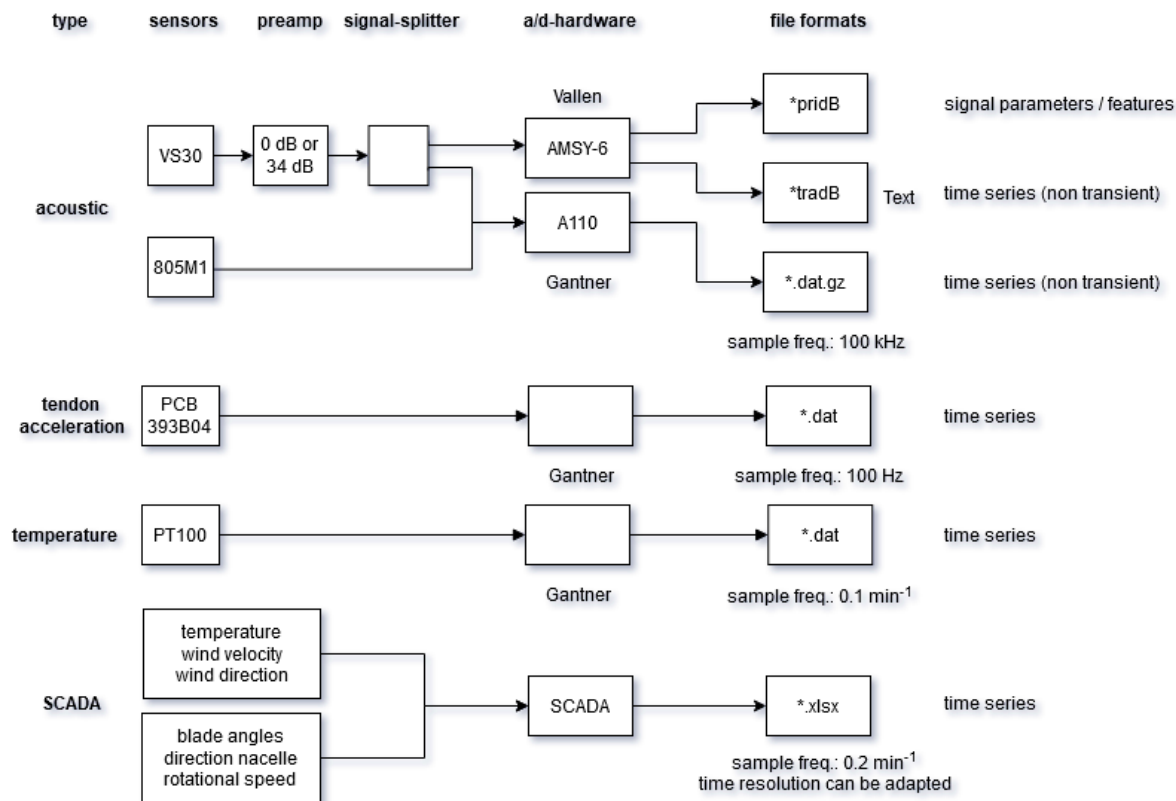


Abbildung 6: Darstellung der gemessenen Datenströme an der Windenergieanlage.

Der Betrieb der Messanlage wurde durch automatisierte und teilautomatisierte Prozesse überwacht und sichergestellt. Die Daten wurden einerseits durch das klassische Schallemissionsmesssystem und andererseits über einen Signalsplitter mit einem alternativen System erfasst. Die gemessenen Daten wurden lokal aufgezeichnet und vor Ort gespeichert, da die aufgezeichneten Datenmengen die Möglichkeiten der mobilen Datenübertragung überschreiten. Da eine sofortige Datenanalyse nicht erforderlich war, wurde auf eine Fernübertragung verzichtet und stattdessen die lokale Speicherung auf Festplatten gewählt. Dies war aufgrund der großen Datenmengen auch erforderlich. Während des Messzeitraums mussten die Festplatten daher im Rahmen von Wartungsarbeiten ausgetauscht werden. Insgesamt wurden zwei Wartungseinsätze am 23.06.2021 und 26.11.2021 durchgeführt. Es war dabei nicht immer möglich, den Austausch rechtzeitig einzuplanen, sobald die Festplatten voll waren. Der Zugang zu Windenergieanlage musste in Abstimmung mit dem Anlagenbetrieb mit bestimmtem Vorlauf und in Abhängigkeit der Windverhältnisse erfolgen. In einigen Fällen ist es daher zu Datenlücken von mehreren Wochen gekommen. Der ursprünglich vorgesehene Messzeitraum von 6 Monaten wurde daher in Abstimmung mit den Projektpartner verlängert, um die entstandenen Datenlücken auszugleichen. In der Betrachtung der kompletten Jahresscheibe ergibt sich nun der Vorteil, dass alle Jahreszeiten abgedeckt werden.

Ein Überblick über den Messzeitraum ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Datenlücken sind deutlich zu erkennen. Am Sensor 3 des Übergangsstücks zeigt sich im Vergleich zum Sensor 7

am Fundament eine höhere Intensität der Nebengeräusche. Bemerkenswert ist auch, dass das Streuband am Sensor 3 deutlich schmaler ist. Diese Beobachtung lässt die Vermutung aufkommen, dass die Nähe zur Gondel und die Applikation am Stahlbauteil des Turms hierbei eine Rolle spielen könnten. Offensichtlich übertragen sich die Vibrationen des Generators mit signifikanter Intensität bis zu diesem Punkt im Turm. Im Gegensatz dazu könnte die geringere Intensität am Sensor 7 mit der höheren Dämpfung durch den Beton des Fundaments in Zusammenhang stehen.

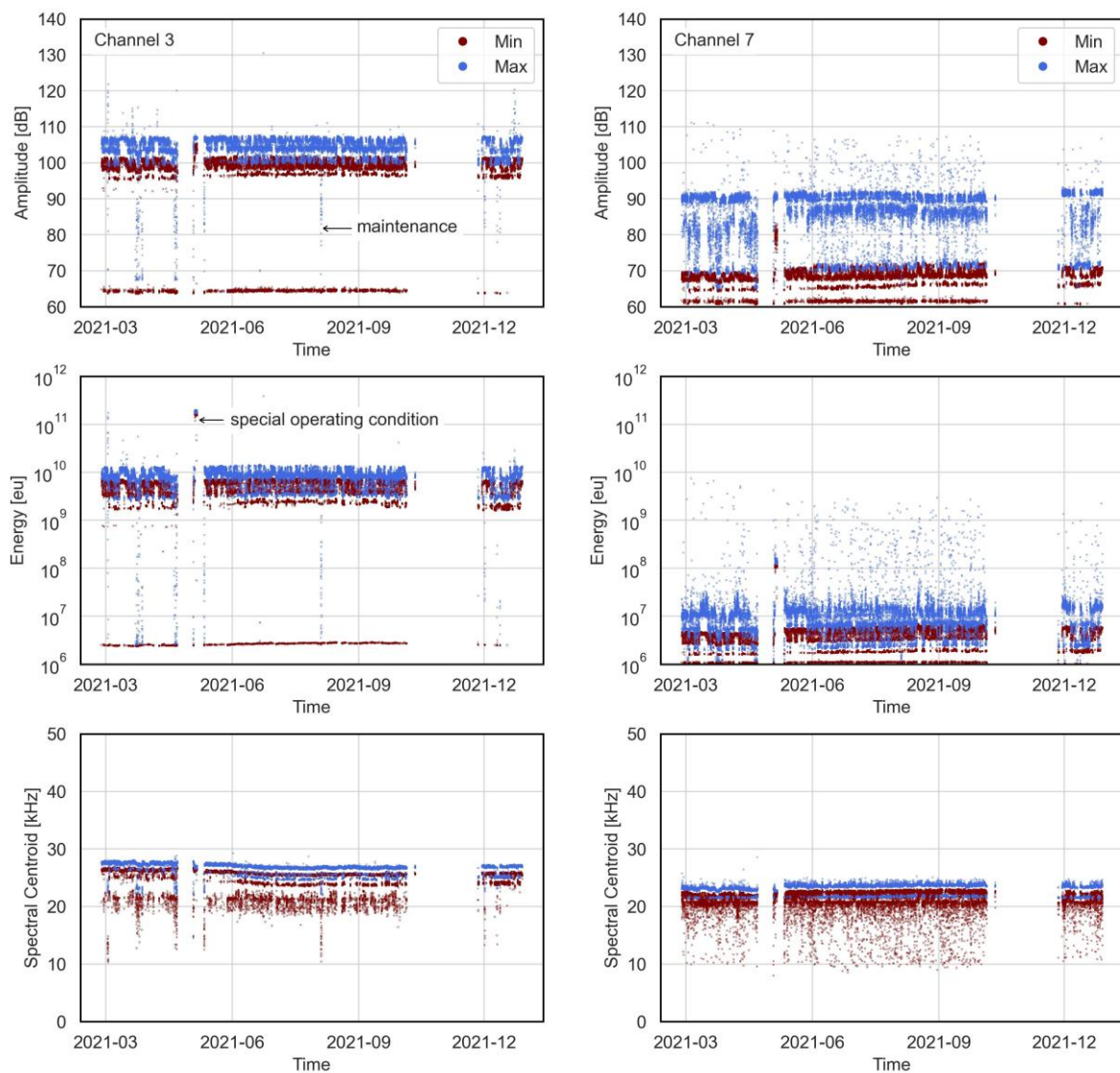


Abbildung 7: Darstellung der Minimal- und Maximalwerte der Signaleigenschaften (Spitzenamplitude, Energie und spektraler Schwerpunkt) über den gesamten Messzeitraum für Sensor 3 am Übergangsstück (links) und Sensor 7 am Fundament (rechts).

Bei genauerer Analyse konnte ein Zusammenhang zu Wartungsarbeiten identifiziert werden. In den Datenwolken sind vertikale Streifen an verschiedenen Stellen erkennbar, insbesondere bei den Peak-Amplituden zwischen den Minima im Bereich von ca. 60 dB (Level des elektrischen Noise) und den darüberliegenden horizontalen Bändern. Diese regelmäßigen Abfälle

lassen sich eindeutig zu denen in den Wartungsprotokollen angegebenen Zeitpunkten zuordnen. Während Wartungsarbeiten wird die gesamte Anlage ab- bzw. angeschaltet, Betreten und ist somit einer anderen Quellcharakteristik ausgesetzt. Diese Veränderungen sind offensichtlich in Form der identifizierten Abfälle in den Daten erkennbar, ohne dass weitere Hilfsmittel erforderlich sind. Ein besonderer Betriebszustand ist im Mai 2021 eingetreten.

Über den gesamten Messzeitraum hinweg wurde ein Gesamtdatenvolumen von 78 TB aufgezeichnet, siehe Abbildung 8.

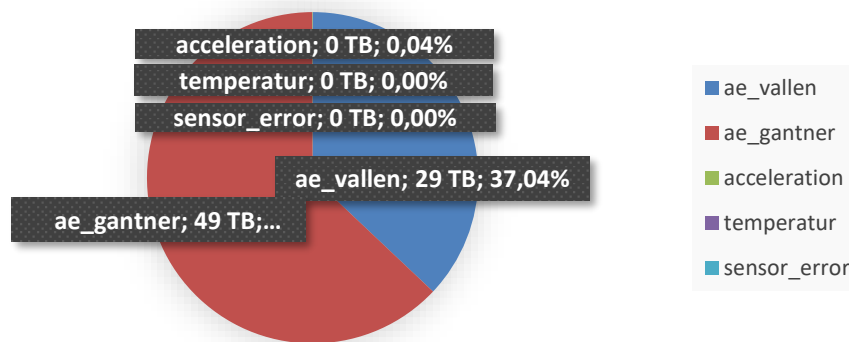


Abbildung 8: Quantitative Verteilung der generierten Datenmengen.

AP 6: Implementierung der entwickelten Verfahren und der Datenbank in ein SHM-System

MKP, TUD, LUH

Zwischenziele:

In diesem Arbeitspaket sollten die Projektergebnisse in ein allgemeines Gesamtkonzept zur Überwachung von Spanngliedern in Windenergieanlagen mittels Schallemissionsmonitoring überführt werden. Hierbei sollte ein Sensorkonzept entwickelt werden, welches ein optimales Überwachungsergebnis bei minimaler Sensoranzahl ermöglicht. Für eine automatisierte Auswertung stehen dabei auch Schnittstellen im Fokus, die eine Kommunikation zwischen der Messanlage am Bauwerk, der Online-Datenbank, dem Datenmanagement, der Auswerterroutinen und der Visualisierung ermöglichen. Diese Schnittstellen sollen definiert und programmiertechnisch umgesetzt werden.

Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Zur Entwicklung eines effektiven Sensorlayouts wurde das Konzept der Detektionswahrscheinlichkeit (Probability of Detection, PoD) in der Schallemissionsanalyse verwendet (Sause et. al. (2018), Pollock (2012)). Diese Methode wurde aus dem Bereich der Drahtbruchdetektion in Brückenstrukturen auf Windenergieanlagen adaptiert (Käding (2022)). Abbildung 9 veranschaulicht dieses Konzept exemplarisch für ein Merkmal.

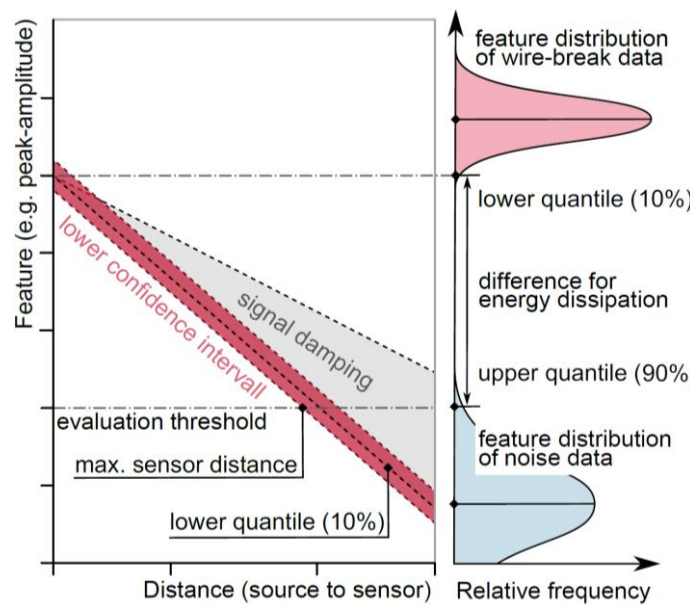


Abbildung 9: Konzept der Detektionswahrscheinlichkeit zur Approximation von Sensorabständen für ein allgemeines Sensorkonzept.

Drei wesentliche Eingabekomponenten sind für die Anwendung dieser Methodik entscheidend: das Ursprungssignal, die spezifische Dämpfung entlang einer Struktur oder an strukturellen Übergängen sowie das Hintergrundrauschen. Das Wissen über deren Eigenschaften diese Komponenten wurde experimentell durch die umfangreichen Messungen in Arbeitspa-

ket 1 und 2 an den Testobjekten gewonnen. Die erforderlichen statistischen Parameter wurden aus den Daten abgeleitet, siehe u.a. Arbeitspaket 1 und 5. Die Merkmalsverteilung der Schadenssignale wurde durch den Mittelwert und die Standardabweichung beschrieben. Die Dämpfung wurde durch Regressionsanalyse für eine Gruppe von Sensoren bestimmt. Hier von wurde ein oberer Quantilwert, in diesem Fall das 90%-Quantil, berücksichtigt. Mit dem Dämpfungskoeffizienten wurde der räumliche Zusammenhang hergestellt, und das betrachtete Merkmal wurde mit der Entfernung zwischen Quelle und Sensor in Beziehung gesetzt. Der Standardfehler der Dämpfungskoeffizienten wurde durch Einzelmessungen berechnet, was die Einführung des 95%-Konfidenzintervalls ermöglichte. Für das Hintergrundrauschen wurde ebenfalls der obere 90%-Quantilwert bestimmt, der als Schwellenwert für die Bewertung im Modell und zur Berechnung der Detektionswahrscheinlichkeit diente.

Die statistischen Parameter wurden in einem stochastischen Modell (PoD-Modell) kombiniert, das auf einer Normalverteilung basiert und jene Wahrscheinlichkeit berechnet, dass ein Signalmerkmal unter den Schwellenwert und damit in das Hintergrundrauschen an der jeweiligen Position fällt. Der Bewertungsort und damit die maximale Sensorreichweite wird am Schnittpunkt des 95%-Konfidenzintervalls mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% erreicht. Die räumliche Verteilung der Detektionswahrscheinlichkeit kann somit für die Struktur in Bezug auf die Sensorpositionen angegeben werden.

Die Unterscheidung zwischen den Signalklassen ähnelt dabei einer Ausreißerererkennung. Je größer der Unterschied zwischen dem Schadenssignal und den Nebengeräuschen ist, desto größere Sensorabstände können gewählt werden, während eine zuverlässige Unterscheidung weiterhin sichergestellt ist. Ist dieser Unterschied gering, können nur kleine Sensorabstände realisiert werden. Diese Zusammenhänge bilden die Grundlage für die Entwicklung des generalisierten Überwachungskonzepts. Das Besondere an Windenergieanlagen ist, dass die Übertragung von Signalen aus den Spanngliedern zum Fundament oder zum Übergangsstück durch Zonen hoher Impedanz stattfindet, die explizit berücksichtigt werden müssen. Weiterhin ermöglicht es dieser Ansatz eine generalisierte Sensorverteilung zu entwickeln, welches auch gegenüber schwankenden Umgebungsbedingungen robust ist, die zwischen verschiedenen Windenergieanlagen existieren können. Die durchgeführten Untersuchungen und vorliegenden Messdaten sind dahingehend limitiert, dass keine repräsentative Anzahl verschiedener Anlagen gleichen Typs oder anderen Typs untersucht wurden. Daher muss von unbekanntem Unterschieden beispielsweise im Nebengeräuschlevel ausgegangen werden.

Im Ergebnis der Arbeitspakete 1, 2 und 5 wurden die statistischen Eingangsgrößen ermittelt, die für die Erstellung des PoD-Modells zur Ermittlung der Detektionswahrscheinlichkeit erforderlich waren. Diese Statistikparameter sind in Tabelle 1 bis Tabelle 3 zusammengefasst und aufgeführt. Vorrangig betrachtet wurden hier die Signalfeature Amplitude (A), Energie (E) und Schwerpunktwellenlänge (Spectra Centroid, SC) und nur ausgewählte Sensoren betrachtet.

Tabelle 1: Statistikparameter für die gemessenen Nebengeräusche am Fundament und am Übergangsstück.

BAUTEIL	SENSOREN	FEATURE	Q _{0,1}	Q _{0,9}
Fundament	7	A [dB]	-	91,5
		E [eu]	-	1.71×10^7
		SC [kHz]	19,5	-
Übergangsstück	3	A [dB]	-	106,9
		E [eu]	-	1.22×10^{10}
		SC [kHz]	21,5	-

Tabelle 2: Statistikparameter für die gemessenen Spanndrahtbrüche an den verschiedenen Bauteilen des Versuchsrahmens (Sensorbezeichnung siehe AP1, TUD).

BAUTEIL	SENSOREN	FEATURE	μ	σ	Q _{0,1}	Q _{0,9}
Spannglied	2 und 3	A [dB]	134.89	4.55	128.93	140.32
		E [eu]	1.49×10^{12}	1.07×10^{12}	2.86×10^{11}	2.72×10^{12}
		SC [kHz]	11.60	3.39	7.31	15.65
Fundament	16	A [dB]	93.64	5.16	85.94	98.07
		E [eu]	1.76×10^8	1.68×10^8	3.17×10^7	2.95×10^8
		SC [kHz]	25.44	1.44	23.57	27.09
Übergangsstück	24	A [dB]	123.61	6.81	115.31	133.98
		E [eu]	3.26×10^{11}	6.54×10^{11}	8.65×10^9	8.48×10^{11}
		SC [kHz]	17.47	5.92	11.90	24.87

Tabelle 3: Statistikparameter für die Dämpfung der gemessenen Spanndrahtbrüche entlang des Seils, des Fundament und Übergangsstück-Balken und den Übergängen von Seil zu Fundament und Übergangsstück am Versuchsrahmen (Sensorbezeichnung siehe AP1, TUD).

BAUTEIL	SENSOREN	μ	σ	Q _{0,9}
Seil (longitudinal)	2 bis 5	-1.62	4.16	-2.19
Fundament (transversal)	13 bis 16	-5.48	5.39	-6.30
Übergangsstück (transversal)	21 bis 24	-1.49	7.40	-2.56
Verankerungskonstruktion	1 und 16	-43.62	5.37	-45.95
Spannglied / Übergangsstück	2 und 24	-14.30	5.40	-17.10

Bei der Auswertung der Daten sind bestimmte Auffälligkeiten zu beachten, die an dieser Stelle noch einmal explizit aufgeführt werden sollen. Dies betrifft vor allem die Erkenntnisse zu den unterschiedlichen Verankerungskonstruktionen aus AP1. Bei der Signalübertragung vom Spannglied zum Fundament durch die neuartige Verankerungskonstruktion wurde beispielsweise eine deutliche Dämpfung von mindestens 23,0 dB festgestellt, mit einem durchschnittlichen Wert von 43,6 dB. Der Bruchort lag teilweise in unmittelbarer Nähe der Ankerplatte und der nächstliegende Sensor 16 am Querträger befand sich ebenfalls in direkter Nähe zur Verankerungskonstruktion, so dass die Impedanz gut bewertet werden kann. Dies verdeutlicht, dass keine ausreichende Signalübertragung durch die neuartige Verankerungskonstruktion möglich ist und die Sensoranordnung entsprechend darauf ausgerichtet werden muss.

Im Vergleich dazu weist die konventionelle Verankerung zwischen Spannglied und Fundament weniger Übertragungsgrenzflächen auf. Dieser Fall konnte durch die Betrachtung der Übertragung zwischen Spannglied und dem Querträger des Übergangsstück analysiert werden, wobei die Sensoren 2 und 24 berücksichtigt wurden. Obwohl Sensor 8 generell näher am Querträger liegt und eine genauere Bewertung der Dämpfung ermöglichen könnte, ist der Messbereich aufgrund der Hardwarekonfiguration auf 134 dB begrenzt, was eine quantitative Analyse ausschließt. Folglich führt die Verwendung von Sensor 2 tendenziell zu einer Überschätzung der Dämpfung. Der durchschnittliche Wert der Dämpfung beträgt etwa 14,3 dB. Dies ist deutlich weniger als bei der neuartigen Verankerungskonstruktion und daher kann eine hinreichende Signalübertragung angenommen werden.

Je Bauteil wurde ein Modell zur Berechnung der Detektionswahrscheinlichkeit (PoD-Modell) wurde aufgestellt und potenzielle Sensorabstände berechnet und die erforderliche Anzahl an Sensoren bestimmt. In Abbildung 10 sind die Modelle für das Fundament mit konventioneller Verankerung und das Übergangsstück für die Amplitude dargestellt. Beide Modelle basieren auf Drahtbruchmessdaten von Sensor 24, die am Übergangsstück erfasst wurden. Die Signalübertragung vom Seil zum Übergangsstück bzw. Fundament wurde hierbei als vergleichbar angenommen, da konstruktiv betrachtet die Anzahl und Qualität der Übergangszonen ähnlich sind. Die Dämpfung durch die Signalübertragung wird implizit im Modell berücksichtigt, indem Messungen von Sensor 24 verwendet werden und hierdurch das lokale Ausgangssignal charakterisiert wird. Die Werte sind konservativ und berücksichtigen bereits die Dämpfung des Drahtbruchsignals innerhalb des Spannglieds über eine Strecke von 9 m.

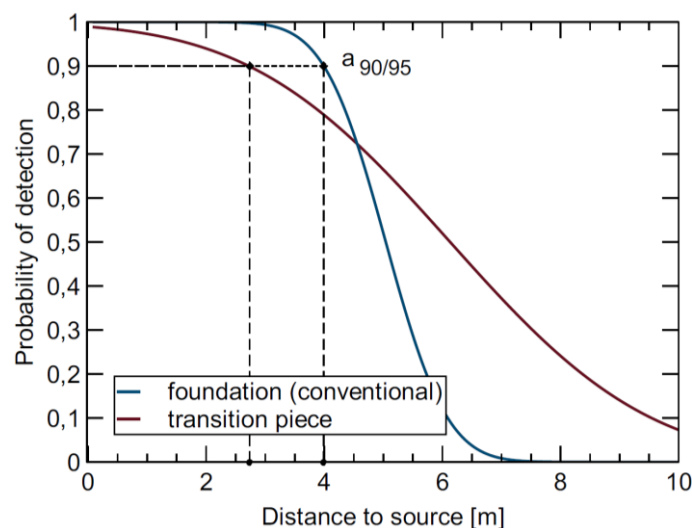


Abbildung 10: PoD-Modell in Abhängigkeit des Sensorabstands an einer konventionellen Verankerungskonstruktion mit Spannkeller und dem Übergangsstück.

Anhand der Modelle können maximale Sensorabstände von 4,0 m für das Fundament und 2,7 m für das Übergangsstück bestimmt werden. Dies ermöglicht die Überwachung mehrerer Spannglieder mit einem einzigen Sensor, wodurch eine gruppierte Überwachung in Querrichtung möglich wird und die Anzahl der Sensoren zur Drahtbruchdetektion in den Verankerungsbereichen reduziert werden kann.

Die Verankerungen sind radial am Fundament und am Übergangsstück angeordnet, was basierend auf deren jeweiligen Umfängen von etwa 25,1 m (Fundament) und 11,0 m (Übergangsstück) mindestens sieben Sensoren bzw. fünf Sensoren am Übergangsstück erforderlich macht. Die Verteilung der Sensorpositionen in den Verankerungsbereichen ist in Abbildung 11 dargestellt, wobei die Draufsicht auf die Eingangsbereiche auf Bodenniveau für konventionelle und neuartige Verankerungen (links und Mitte) sowie das Übergangsstück (rechts) hervorgehoben wird. Die Verteilung entlang der Spannglieder ist in dieser Darstellung nicht explizit enthalten.

Die Entwicklung und Analyse der Modelle zeigen, dass die Installation von Sensoren am Fundament für die neuartige Verankerung nicht praktikabel ist. Die hohe Dämpfung führte zu erheblichen Störungen durch Betriebsgeräusche. Daher muss jede Verankerung mit einem einzelnen Sensor überwacht werden, was zu insgesamt 24 Sensoren führt.

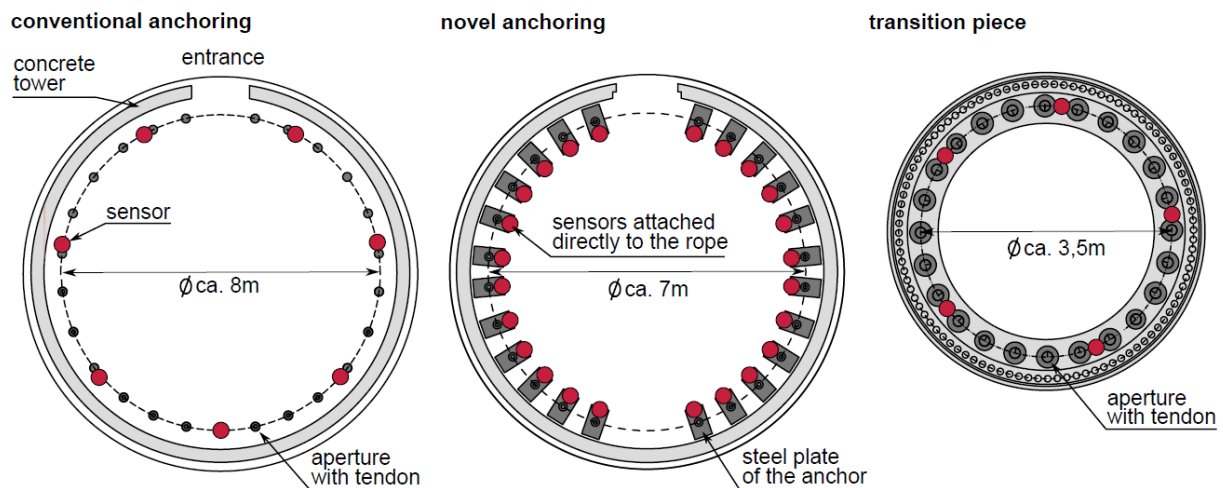


Abbildung 11: Draufsicht auf die Sensorpositionen auf Eingangslevel für die konventionelle und neuartige Verankerung (links und Mitte) sowie das Übergangsstück (rechts).

Entlang der Spannglieder, die durch eine vergleichsweise geringe Dämpfung gekennzeichnet sind, sind größere Sensorabstände möglich. Hierfür wurde ein niedriges Betriebsgeräuschniveau angenommen. Die Messungen haben gezeigt, dass die Kopplung über die Verankerung das Rauschen auf natürliche Weise dämpft. Jedoch kann der Kontakt der Spannglieder mit der Turminnenwand mögliche Signaleinkopplungen verursachen und Einflüsse auf die Signalübertragung haben. Eine Detektionswahrscheinlichkeit von 90% kann bei einer Entfernung von bis zu 17,2 m erreicht werden. Mit einer Länge der Spannglieder im Turm von etwa 80 m sind ca. vier bis fünf Sensoren für eine effektive Überwachung erforderlich.

Bei der Entscheidung über den endgültigen Messumfang ist zu berücksichtigen, dass der Zugang zu den Spanngliedern herausfordernd ist und nur mit geeigneten Techniken erreicht werden kann. Angesichts der höheren Wahrscheinlichkeit von Drahtbrüchen in den Verankerungsbereichen (Kurz et. al. (2013)) erscheint es sinnvoll, das Überwachungskonzept auf diese Bereiche und die unmittelbar angrenzenden Abschnitte der Spannglieder zu konzentrieren.

rieren. Folglich besteht die Mindestkonfiguration für ein generalisiertes Überwachungskonzept aus zwölf Sensoren für die konventionelle Verankerung und 29 Sensoren für die neuartige Verankerung.

Für das SHM-System wird auf herkömmliche Schallemissionstechnik zurückgegriffen, da diese für die dauerhafte Anwendung und unter anspruchsvollen Bedingungen geeignet und dafür ausgelegt ist. Es werden Sensoren vom Typ VS30 eingesetzt, wie sie bereits in AP2 zum Einsatz kamen. Weitere Sensorik kommt nicht zum Einsatz und ist nicht erforderlich. Zur Reduktion der Datenmengen wird die Abtastrate auf 100 kHz beschränkt werden.

Basierend auf den Erfahrungen aus der Installation und dem Rückbau des Messsystems im Zuge des AP 2.2 wurde ein allgemeiner Zeitplan entwickelt. Voraussetzung für die störungsfreie Umsetzung sind das Vorliegen sämtlicher Genehmigungen zum Betreten der Anlage, sowie der technischen und personellen Voraussetzungen und Befähigungen. Weiterhin werden die Verfügbarkeit und Lieferbarkeit der technischen Komponenten vorausgesetzt. Nach Entscheidung zur Ausführung einer Maßnahme wird das generalisierte Konzept auf die individuellen Randbedingungen an der Anlage vor Ort angepasst und die Unterlagen für die Ausführung zusammengestellt. Anschließend erfolgen die Materialisierung und der Aufbau der Messanlage im Labor. Der Testbetrieb ist für einen Zeitraum von mindestens einer Woche einzuplanen. Nachdem weitere Installationsvorbereitung getroffen wurden kann die Messanlage an der Windenergieanlage installiert werden. Die Installation kann innerhalb eines Tages erfolgen. Insgesamt ergibt sich hieraus eine Umsetzungsphase von ca. 8 Wochen, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Geschätzte Zeitplanung für die Umsetzung eines Monitoringsystems.

ARBEITSPHASE	ARBEITSWOCHE							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Planung								
Aufbau der Messanlage im Labor								
Installationsvorbereitung								
Installation								

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes lag auf der Entwicklung einer automatisierten Datenverarbeitung, in die KI-Algorithmen eingebunden werden können. Das Datenmanagement ist hierbei in mehrere Komponenten unterteilt, die über geeignete Schnittstellen mit Hilfe der Management-Plattform *Conductor* automatisiert kommunizieren. Das Vorgehen und die Komponenten werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Zusammenfassend gehören hierzu:

- Lokaler Industrie-PC und Messhardware zur Erfassung und Zwischenspeicherung der Monitoringdaten, Automatisierte Selektion auf dem lokalen Endgerät (Edge-Computing), Extraktion relevanter Signale
- Datenbank (Azure Data Explorer, Blob-Storage) für selektiven Upload von Features und Zeitreihenausschnitten
- Processing-Functions zur Weiterverarbeitung der Daten in weiteren Analyseschritten
- Visualisierung im MKP-Dashboard IRIS von Klassifikationsergebnissen oder der zeitlichen und örtlichen Verteilung relevanter Ereignisse

Die Daten werden an der Turmstruktur lokal durch eine Messanlage mit Industrie-PC akquiriert. Lokale Datenverarbeitungsprozesse erlauben die Reduktion der Datenmenge und das Aussortieren von Nebengeräuschen. Die vorselektierten Daten werden in eine Online-Datenbank übertragen. Hierfür wurde ein Blob-Storage gewählt (Azure Data Explorer, (Azure (2024))). Wenn ein Dateneingang registriert wird, löst ein Triggermechanismus automatisch einen „Workflow“ aus, welcher die Datenverarbeitung initiiert und die Ergebnisse abspeichert.

In Abbildung 12 ist der grundlegende Aufbau eines Workflows dargestellt. Diese bestehen aus aneinandergereihten Modulen, welche Microservices genannt werden, die jeweils eine spezifische Aufgabe erfüllen, wie das Laden von Daten oder die Anwendung eines Algorithmus. Der Workflow beginnt stets mit einem Ladevorgang und endet mit der Speicherung der verarbeiteten Daten in Zielsystemen. In diesem Projekt ist der Azure Data Explorer (Blob-Storage) besonders relevant gewesen. Zwischen diesen Schritten können beliebig viele Operationen, einschließlich paralleler Prozesse, eingefügt werden, was die Effizienz bei der Verarbeitung großer Datenmengen steigert.

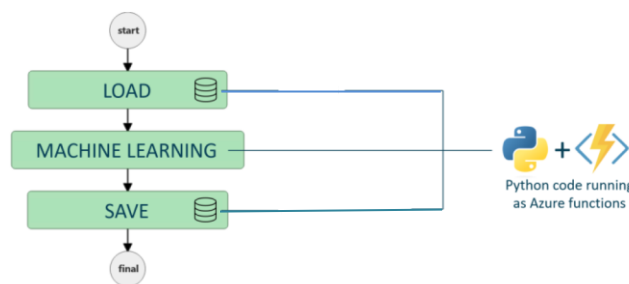


Abbildung 12: Aufbau eines Workflows.

Für die Orchestrierung wird ein Open-Source-Framework genutzt, das eine parallele Ausführung zahlreicher Workflows ermöglicht. Dies erfolgt durch den cloudbasierten Dienst namens Conductor (Netflix (2024)). Fehlerhafte Prozesse werden automatisch neu gestartet, und ein Loggingsystem liefert Einblicke in die Performance und mögliche Störungen. Verschiedene selbstentwickelte Python-Tools bieten Steuerungs- und Überwachungsmöglichkeiten, bzw. erlaube die Kommunikation zwischen einzelnen Microservices.

Die Analyseschritte innerhalb eines Workflows werden durch Processing-Functions ausgeführt. Diese Functions dienen zur numerischen Verarbeitung von Roh- oder teilverarbeiteten Messdaten und ermöglichen die Erstellung flexibler und komplexer Verarbeitungspipelines. Diese Processing-Functions können sowohl Eingaben von Datenladefunktionen als auch von anderen Verarbeitungsmodulen nutzen. Zu den verfügbaren Operationen gehören grundlegende Berechnungen der Feature-Extraktion (siehe Abbildung 13), wie Bestimmung der Peak-Amplitude, Signal-Energie oder RMS, sowie fortgeschrittene Anwendungen wie statistische Analysen und Machine-Learning-Modelle. Die Implementierung erfolgt mithilfe von Python-Bibliotheken, die für ihre Effizienz in der numerischen Datenverarbeitung bekannt sind.

```

1  from pathlib import Path
2
3  from mkp.io.dbclients.azure import ingest_adx
4
5  from mkp.scripts.acoustic_emission_features.ae_loader import (load_pribd_hits,
6                                                                load_tradb)
7  from mkp.scripts.acoustic_emission_features.feature_extractor import \
8      extract_features
9  from mkp.scripts.helpers import run_from_command_line
10
11 # In some cases it could be useful to define default arguments to override
12 # certain arguments, e.g. for the loader function.
13 > DEFAULT_ARGS = {
14     }
15
16 > def main(load_ae_kwargs: dict, ingest_adx_kwargs: dict) -> bool:
17     return True
18
19
20 if __name__ == "__main__":
21     run_from_command_line(main_function=main, default_args=DEFAULT_ARGS)

```

```

1  import numpy as np
2  import pandas as pd
3  import vallena as vae
4  from scipy.signal import butter, filtfilt
5
6
7 > def get_transient(
137     return result_transients
138
139
140 > def get_spectrum(y, samplerate):
158     return freq, fft_magnitude
159
160
161 > def bandpass_filter(
190     return filtfilt(b, a, data)
191
192
193 > def get_features_from_transient_data(
262     return df_features
263
264
265 > def extract_features(
311     return df_results

```

Abbildung 13: Beispiel einer Processing-Funktion in der Python zur Extraktion von Signal-Features.

Der modulare Ansatz erhöht die Flexibilität und Wiederverwendbarkeit der einzelnen Komponenten. Jede Operation wird als eigenständige Einheit entwickelt und kann in verschiedenen Workflows wiederverwendet werden. Bei Fehlern in einem Modul wird lediglich der betroffene Code aktualisiert, und dank automatisierter Deployment-Prozesse werden Änderungen effizient ausgerollt. So bleibt die Infrastruktur skalierbar und flexibel anpassbar an unterschiedliche Anforderungen.

Der in Abbildung 14 dargestellte Workflow zeigt das Flowchart für eine angelegte Datenverarbeitung, die die Schallemissionsdaten lädt und verarbeitet. Die Daten werden in diesem Fall vom Cloud-Speicher geladen, transformiert, verarbeitet und der Output wieder gespeichert. Die Ergebnisse stehen dann in der Cloud weiter zur Verfügung und können dort durch die MKP-Plattform IRIS visualisiert werden.

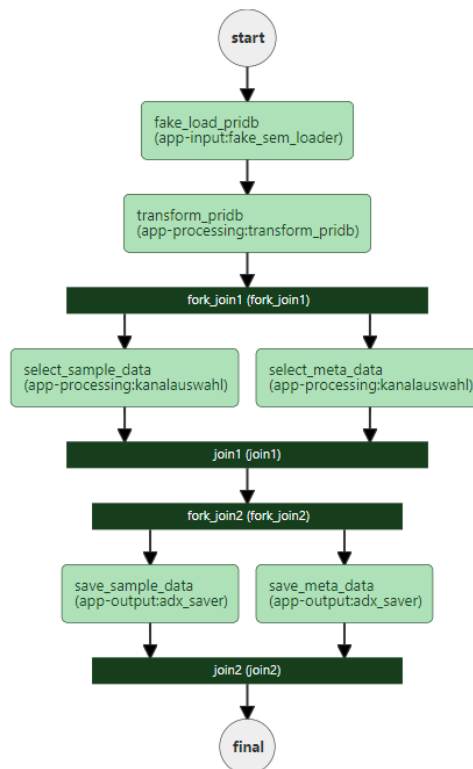


Abbildung 14: Beispiel eines Workflows in der Conductor-Visualisierung. Der Workflow lädt und verarbeitet Schallemissionsdaten in der Could.

Der letzte Schritt der Datenverarbeitung im SHM-System ist die Visualisierung der Ergebnisse. Hierfür bietet die MKP-Plattform IRIS umfangreiche Darstellungsmöglichkeiten. Die Anzahl und Verteilung von Ereignissen, die als Drahtbruch klassifiziert wurden, kann auf diese Weise leicht zugänglich dargestellt werden. Abbildung 15 zeigt beispielsweise die Verteilung von energiereichen Ereignissen die entweder als unkritisch oder als potentielle Drahtbrüche bewertet wurde. Eine andere Darstellung wurde gewählt, um beispielhaft die Lokalisierung von Drahtbrüchen über die Länge der Seile hinweg zu verdeutlichen. In Abbildung 16 sind die Seile als jeweils eine Sensorgruppe zusammengefasst, die sich aus zwei Sensoren an den Verankerungsenden zusammensetzt. Jeder Punkt entlang der Seile stellt ein lokalisiertes Event dar, welches mit Hilfe einer farblichen Codierung hinsichtlich seiner Intensität (Amplitude) skaliert ist. Anhand solcher Verteilungen können Hotspots entlang eines Seils identifiziert werden.

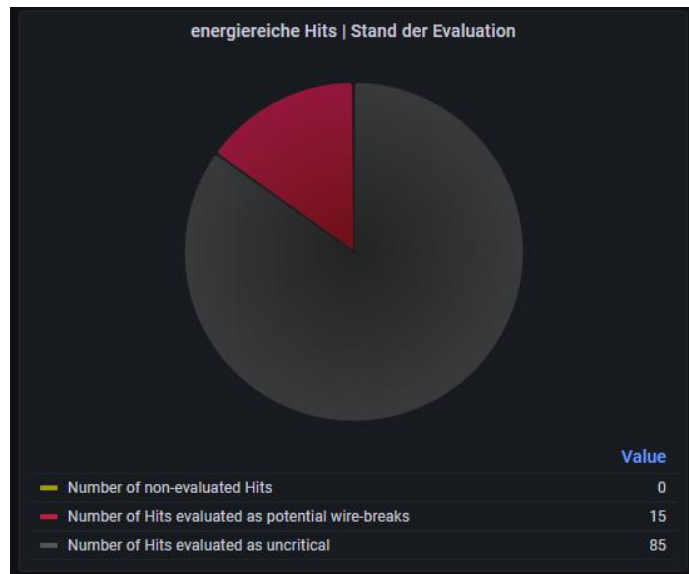


Abbildung 15: Visualisierung der Verteilung von Klassifikationsergebnissen im IRIS-Dashboard.

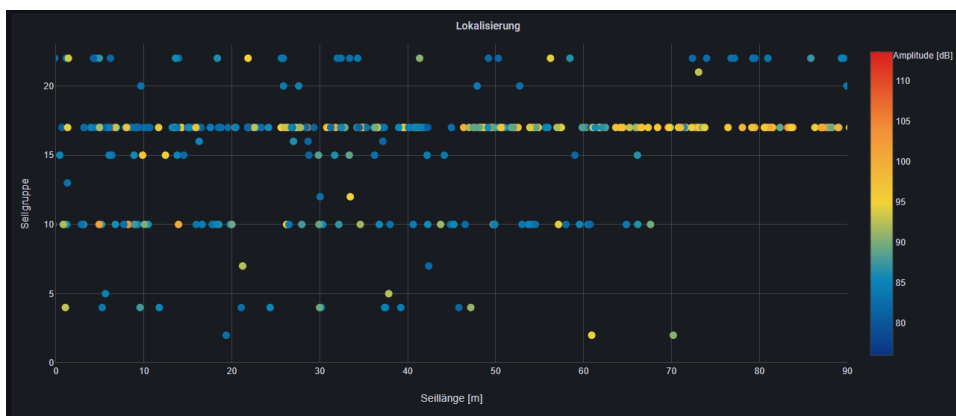


Abbildung 16: Visualisierung von Lokalisierungsergebnissen über die Seillänge im IRIS-Dashboard. Die Seilnummer ist auf der y-Achse über die Seillänge auf x-Achse aufgetragen. Jedes lokalisierte Event wird als Punkt dargestellt und ist farblich hinsichtlich der Höhe seiner Amplitude codiert.

AP 7: Validierung der entwickelten Methoden und Verfahren an einer realen WEA

MKP, TUD, LUH

Zwischenziele:

Das entwickelte SHM-System soll im Rahmen dieses Arbeitspaketes validiert und angewandt werden. Im Fokus steht dabei, die entwickelten Methoden zu testen und Erkenntnisse darüber zu gewinnen, mit welcher Genauigkeit Schäden erkannt werden können und wie fehleranfällig das System ist.

Erreichte wissenschaftlich-technische Ergebnisse:

Zur Validierung der entwickelten Methoden wurden separate Messungen durchgeführt. Bereits in früheren Untersuchungen hat sich der Rückprallhammer als geeignete Referenzquelle erwiesen und wurde auch in diesen Kampagnen als Prüfquelle genutzt. Zu Vergleichszwecken wurden an Spanngliedern Testsignale mit dem Rückprallhammer an der Verankerungskonstruktion erzeugt, siehe Abbildung 17. An den Verankerungen wird die kritische Schadensstelle vermutet, weshalb die Anregung in diesen Bereichen als besonders relevant eingeschätzt wird.



Abbildung 17: Signalemission mit dem Rückprallhammer an der Verankerung.

Das Spannglied wurde u. a. longitudinal zur Spanngliedachse angeregt und mit Hilfe der umgebend und am Spannglied angebrachten Sensoren die Dämpfung und Signalübertragung beurteilt. Die Ergebnisse der Rückprallhammersignale wurden dann den Ergebnissen der Drahtbruchsignale gegenübergestellt, siehe Tabelle 5. Entlang der Spannglieder ist Dämpfung für die künstliche Anregung größer als bei Drahtbrüchen. Es wird vermutet, dass für diesen Fall eines externen Spanngliedes mit Einzeldrähten beim Drahtbruch die Energie kontinuierlich über die Länge des Drahtes freigesetzt wird, weil sich der im Fett gebettete Spanndraht über die gesamte Länge mehr oder weniger frei verformen kann. Entlang des Drahtes findet eine kontinuierliche Rückdehnung statt, die zur Formierung der elastischen Welle beiträgt. Bei einer künstlichen Anregung formiert sich die elastische Welle hingegen lokaler und es findet nur die Ausbreitung dieser Welle entlang des Spanngliedes statt. Diese zugrundeliegenden Effekte führen zu anderen Dämpfungen. An der Verankerung wurde im Gegensatz hierzu eine geringe Dämpfung mit dem Rückprallhammer ermittelt. Eine mögliche Ursache für diesen Unterschied kann in der örtlich lokalen Anregung liegen. Im Hinblick auf das Gesamtkonzept hat dieses

keine Auswirkungen auf die Sensoranzahl und eine Anpassung des Konzeptes wird daher als nicht erforderlich erachtet.

Tabelle 5: Dämpfungskoeffizienten für die Drahtbruch- und Rückprallhammersignale an Spanngliedern und der konventionelle Verankerungskonstruktion.

QUELLE	BAUTEIL	DÄMPFUNG [DB/M]		
		MITTELWERT	5%-QUANTIL	95%-QUANTIL
Drahtbruch	Spannglied	-0,95	-0,46	-1,44
	Konv. Verankerung	-5,48	-4,50	-6,46
Rückprallhammer	Spannglied	-2,98	-2,64	-3,32
	Konv. Verankerung	-2,62	-2,32	-2,92



Abbildung 18: Innenansicht des Spannbetonteils eines Hybridturmes.

Neben den zuvor bereits ausführlich dargestellten Signalmerkmalen, welche einige kommerziell verfügbare Schallemissionsmesssysteme unmittelbar während der Messungen berechnen und in einer separaten Datenbank speichern, wurden im Rahmen der AP 3 und 5 (vgl. Abschlussbericht der LUH) die Rohdaten, welche mit einer Abtastfrequenz von 100 kHz erfasst wurden, detaillierter ausgewertet. Anhand dieser Daten wurden verschiedene Signalmerkmale aus unterschiedlichen Anwendungsdomänen untersucht und im Hinblick auf die Detektion von Drahtbruchereignissen unter Berücksichtigung realer Betriebsmessungen aus AP 2 evaluiert. Um der teilweise großen Streuung der Drahtbrüche in traditionellen Signalmerkmalen, wie der maximalen Amplitude oder der Signalenergie (vgl. auch Tab. 2) Rechnung zu tragen, wurden speziell auch Signalmerkmale zur Beschreibung der Charakteristik der Frequenzspektren evaluiert, welche schließlich in die Entwicklung eines Schadensindex geflossen sind. Um die Robustheit des Schadensindex bzgl. des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses von Schadenssignal zu Betriebsrauschen hervorzuheben, wurden im Rahmen der Validierung künstliche Fremdgeräusche eingebracht und zusätzlich derart skaliert, dass mehrere Validierungsdatensätze mit unterschiedlichen Signal-zu-Rausch-Verhältnissen von 10 dB, 5 dB, 3 dB und 0 dB vorlagen. Die Rohdaten des ersten Zeitfensters des Validierungsdatensatzes, in welchem die Testsignale eingebracht wurden, sind für verschiedene Signal-zu-Rausch-Verhältnisse in Abbildung 19 dargestellt.

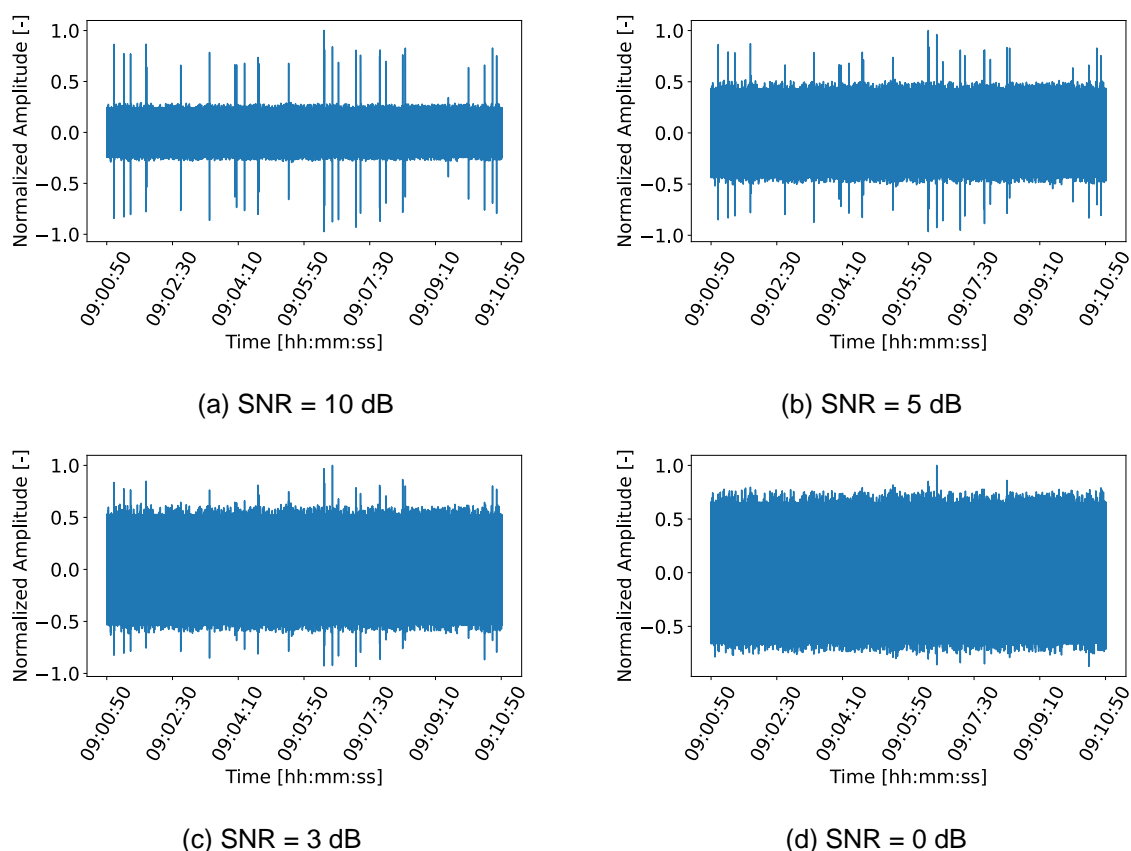


Abbildung 19: Ausschnitt der Rohdaten aus dem Validierungsdatensatz mit den künstlich erzeugten Fremdgeräuschen, welche als Testsignale für die Verifikation des entwickelten Algorithmus zur Drahtbruchdetektion verwendet wurde. Die erzeugten Testsignale wurden künstlich skaliert, um die Robustheit des Schadensindicators bei unterschiedlichen Signal-zu-Rauschverhältnissen (Abb. (a) – (d)) zu evaluieren. Zur besseren Darstellung sind die Amplituden normalisiert.

Insgesamt wurden im Zuge der Validierung Messdaten über eine Zeitperiode von 24 Stunden (ein Messtag) ausgewertet. Die Testsignale wurden zu definierten Zeiten einmal ab 09:00 Uhr am Vormittag und einmal ab 14:30 Uhr am Nachmittag eingebracht. Dieser Validierungsdatensatz wurde schließlich mithilfe des auf Frequenzmerkmalen basierenden Schadensindex analysiert und ausgewertet. Bei der Berechnung des Schadensindex werden die Messdaten zunächst in sich überlappende Segmente mit einer Dauer von 50 Millisekunden zerlegt, wodurch eine neue Zeitreihe mit geringerer Zeitauflösung entsteht. Diese Zeitreihe wird im weiteren Verlauf zur Detektion von Ausreißern, in diesem Fall den künstlich eingebrachten Testsignalen, genutzt. Abbildung 20 zeigt den Verlauf des auf den Rohdaten berechneten Schadensindex über die gesamte Dauer des Validierungsdatensatzes bei unterschiedlichen Signal-zu-Rausch-Verhältnissen. Die Zeiträume der künstlich eingebrachten Testsignale sind durch die erhöhten Werte des Schadensindex deutlich zu erkennen. Zusätzlich sind die genauen Zeitsegmente jedes Testsignals durch entsprechende Markierungen (grüne Kreuze) hervorgehoben. Zwar ist bei abnehmenden Signal-zu-Rausch-Verhältnis auch hier eine Reduktion des Wertes des Schadensindex zu beobachten, eine gute Trennung der üblichen Betriebsgeräuschen von den Testsignalen ist aber selbst bei einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 0 dB bei dem hier verwendeten Schwellwert $T = 5$ noch gegeben. So werden selbst bei einem solch niedrigen Signal-zu-Rausch-Verhältnis noch 50 von 58 künstlichen Testsignalen

(86 %) erfolgreich detektiert. Weiterhin gibt es – ebenso wie bei besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnissen – nur einen Fehlalarm während der gesamten 24 Stunden (vgl. auch Tabelle 6). Eine manuelle Überprüfung der Rohdaten des Validierungsdatensatzes zeigte zudem, dass diese Fehldetektion eine deutliche Veränderung des betriebsbedingten Rauschens zu diesem Zeitpunkt kennzeichnet. Solche Änderungen im Betriebsrauschen von kurzzeitigen, schadensrelevanten Ereignissen zu unterscheiden, erscheint anhand der bisher aufgezeichneten Daten durchaus möglich, aber konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens noch nicht weiter umgesetzt werden. Die Fehldetektion ist somit ein an sich wünschenswertes Ergebnis, da auch andere Anomalien bzw. Änderungen in den Messdaten mithilfe des entwickelten Schadensindex erfolgreich erkannt werden können. Eine weitere Analyse und die Möglichkeit zur automatisierten Klassifikation unterschiedlicher Anomalien müssen in zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten weiter untersucht werden.

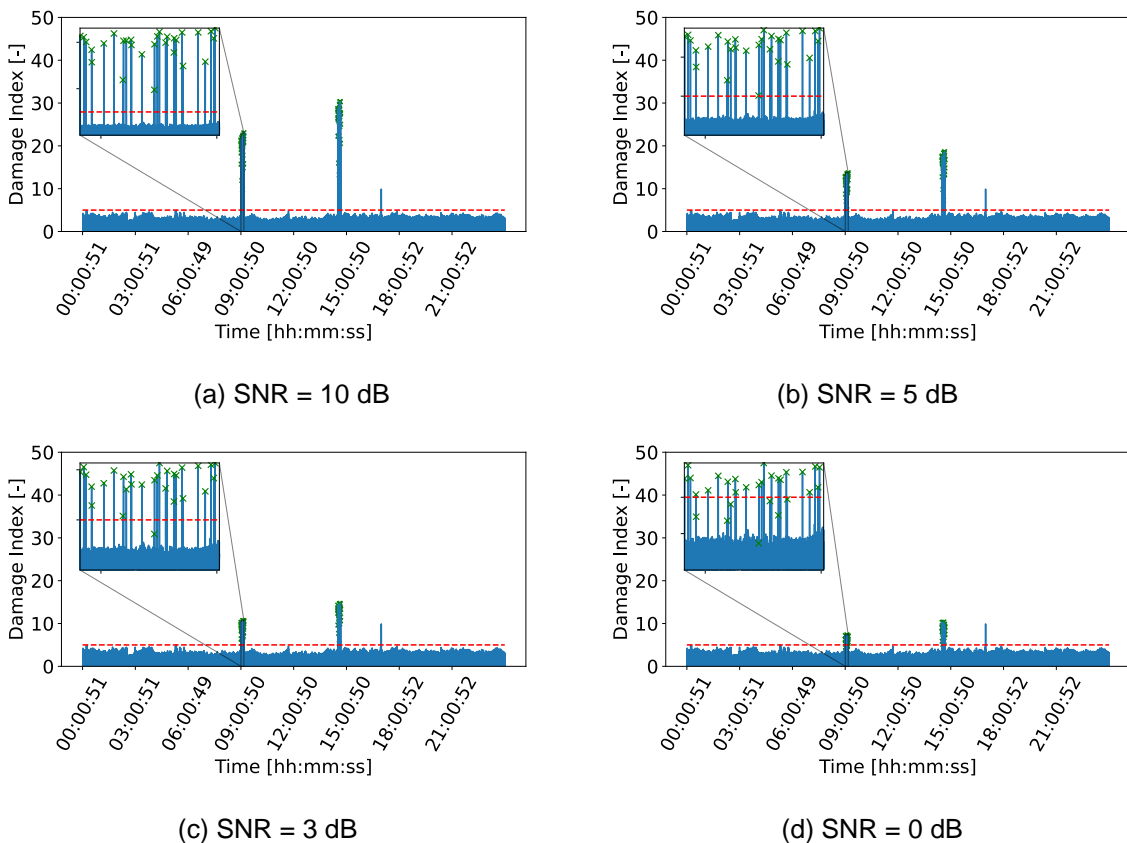


Abbildung 20: Zeitverlauf des entwickelten Schadensindex über den gesamten Validierungsdatensatz. Die Zeiträume der eingebrachten Testsignale erstrecken sich von 09:00 – 09:15 Uhr sowie 14:30 - 14:45 Uhr. Die Werte des Schadensindex sind in diesen Zeiträumen deutlich erhöht. Die tatsächlichen Zeitsegmente der einzelnen Testsignale sind zudem hervorgehoben (rote Kreuze). Im gesamten Validierungsdatensatz konnten alle Testsignale mithilfe des Schadensindex erfolgreich detektiert werden, wobei nur eine Fehldetektion beobachtet wurde.

Tabelle 6: Übersicht der Fehlalarme und richtig erkannten Anomalien (Testsignale) im Validierungsdatensatz bei unterschiedlichem Signal-zu-Rausch-Verhältnis (vgl. auch Abb. 19). Für diese Ergebnisse wurde ein Schwellwert für den Schadensindex von $T = 5$ (unabhängig vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis) gewählt (vgl. auch Abb. 20).

SIGNAL-ZU-RAUSCH-VERHÄLTNIS	ANZAHL FEHLALARME	ERKANNT ANOMALIEN
10 dB	1	58 von 58
5 dB	1	58 von 58
3 dB	1	57 von 58
0 dB	1	50 von 58

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass keine Anpassung des in AP 6 entwickelten Konzeptes erforderlich ist. Die Verteilung der Sensoren kann als robustes Maximalsetup mit hoher Detektionsgenauigkeit verwendet werden.

Interessanterweise verdeutlichen die Klassifikationsergebnisse das Potential, dass am Übergangsstück und der konventionellen Verankerung mit Spannkeller theoretisch Sensoren eingespart werden könnten. Jedoch ist die Reduktion auf ein oder zwei Sensoren im Hinblick auf die Sicherheit und Redundanz des Überwachungssystems bedenklich.

Ein zentraler Vorteil des Einsatzes mehrerer Sensoren liegt in der gegenseitigen Validierung der Messdaten, die an einem Bauteil erfasst werden. Diese Plausibilisierung ist insbesondere bei verrauschten Signalen oder einem hohen Nebengeräuschpegel zweckmäßig und erhöht die Verlässlichkeit und Belastbarkeit der Ergebnisse. Ohne diese Redundanz steigt die Wahrscheinlichkeit für Fehlinterpretationen oder ungenaue Aussagen. Insbesondere bei der Schallemissionsanalyse, bei der das Phänomen zugrunde liegt, dass der Schaden (Drahtbruch) nur einmalig das zu bewertende Signal emittiert, ist diese Redundanz relevant. Die Belastbarkeit der Messergebnisse steigt durch die Nutzung einer Netzwerkwirkung an.

Darüber hinaus ist die Möglichkeit eines Sensorausfalls oder -defekts bei stark reduzierter Sensoranzahl ein kritischer Risikofaktor. Ein solcher Ausfall könnte nicht nur Überwachungslücken zur Folge haben, sondern auch dringende und kostenintensive Reparatureinsätze erforderlich machen. Dies könnte den reibungslosen Anlagenbetrieb gefährden und steht in keinem angemessenen Verhältnis zu den vergleichsweise geringen Kosten für zusätzliche, potenziell redundante Messstellen.

Das entwickelte Konzept berücksichtigt diese Bewertungskriterien und ist somit ausgewogen zwischen Effizienz und Sicherheit. Durch die vorgeschlagene Sensoranzahl wird die Zuverlässigkeit des Überwachungssystems und die langfristige Betriebssicherheit gewährleistet.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Arbeiten von MKP wurden gemäß der ursprünglichen Gesamtkostenplanung durchgeführt. Die Zeitplanung wurde innerhalb des Projektkonsortiums ohne Gefährdung der Projektzielstellung eingehalten. Der Nachweis für den Zeitraum vom 01.07.2020 bis zum 30.06.2024 erfolgt gesondert mit den dazugehörigen Unterlagen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die Zielerreichung in diesem Projekt war die Förderung für die Durchführung der Arbeiten unbedingt erforderlich. Ohne diese hätten die hohen Risiken durch die Projektpartner getragen werden müssen, was nicht möglich gewesen wäre. Dies betrifft insbesondere die Durchführung von Messungen an der Windenergieanlage zur Erfassung der erforderlichen Datenbasis im Rahmen von Arbeitspaket 2. Die Angemessenheit rechtfertigt sich durch den erfolgreichen Abschluss des Projektes.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen bzw. Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Die Arbeiten von MKP sowie die Erkenntnisse innerhalb des Projektes fließen in weitere Projekte im Bereich des Schallemissionsmonitorings ein. Dieses Leistungsfeld ist insbesondere seit dem Teileinsturz der Carolabrücke besonders nachgefragt und die Vorarbeiten im Rahmen dieses Projektes führen zu zahlreichen Umsetzungen und verbessern den Betrieb der SHM-Systeme und die Zuverlässigkeit in der Detektion von Spanndrahtbrüchen in erheblichem Maße. Zum Beispiel wird die Carolabrücke selbst derzeit mit einem System ausgestattet, um temporäre Schiffspassagen zu ermöglichen. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass über 1.000 Bauwerke in vergleichbarer Weise potenziell gefährdet sind und ein signifikanter Anteil hiervon mit dem entwickelten SHM-System zuverlässig überwacht werden können. MKP geht davon aus, dass das System in 2025 an ca. zehn Bauwerke instrumentiert wird. Es wird jedoch auch für den Bereich der Windenergieanlagen von weiteren Anwendungen ausgegangen.

Im Bereich der Datenverarbeitung wurde ein robustes und skalierbares Workflow-System entwickelt, das die regelmäßige Verarbeitung und Analyse von Daten ermöglicht. Hierbei können von einfachen Berechnungen bis hin zur Anwendung komplexer Machine-Learning-Modelle Anwendungen finden. Die Ergebnisse können an Datenbanken übermittelt und über die MKP-eigene IRIS-Plattform visualisiert werden, wodurch eine nahtlose Integration mit bestehenden und zukünftigen Projekten gewährleistet ist. Dieses System bildet die Grundlage für eine effektive Dauerüberwachung.

Der Einsatz von KI-gestützten Methoden trägt wesentlich zur Zuverlässigkeit bei der Spanndrahtbruchdetektion bei. Die Daten werden automatisiert verarbeitet, was den Bedarf an manueller Sichtung erheblich verringert. Dies reduziert nicht nur Fehleranfälligkeit und Personalaufwand, sondern ermöglicht es Fachkräften, sich verstärkt auf die Weiterentwicklung der Algorithmen und ingenieurtechnische Aufgaben zu konzentrieren.

Insgesamt verhelfen die Erkenntnisse bzw. Ergebnisse des Projektes das Angebot an digitalen Leistungen der Partner auszubauen. Die technologischen Konzepte und darüber erzielten wissenschaftlichen Erkenntnisse stehen allen Projektpartnern auch nach Projektabschluss zur

Verfügung und können für vertiefende oder weiterführende Arbeiten in forschungs- bzw. anwendungsorientierten Projekten zur Verfügung.

2.5 Kenntnisse zu Fortschritten auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens wurden keine spezifischen Kenntnisse über parallele Fortschritte oder vergleichbare Arbeiten bei anderen Stellen bekannt.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

erfolgt:

- Xu, R., Käding, M., Lange, A., Ostermann, J. & Marx, S., "Detection of impulsive signals on tendons for hybrid wind turbine using acoustic emission measurements", Sept. 2022, *International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2022)*. 9 Aufl., Band 27.
- Xu, R., Hicke, K., Chruscicki, S. & Marx, S., „Akustisches SpRK-Monitoring mit SEA und verteilten faseroptischen Sensoren“, 1 Juni 2023, *12. Symposium Experimentelle Untersuchungen Von Baukonstruktionen*. Curbach, M., Marx, S., Scheerer, S. & Hampel, T. (Hrsg.). Dresden, S. 136-147, 12 S.
- Xu, R., Beltrán Gutiérrez, R. E., Käding, M., Lange, A., Marx, S. & Ostermann, J., „Frequency dependent amplitude response of different couplant materials for mounting piezoelectric sensors.“ *NDT and E International*. 2023; 141: 102993
- Xu, R., Lange, A., Käding, M., Ostermann, J. & Marx, S., "Detecting wire breaks in post-tensioned tendons of wind turbines: A signal energy spectrum analysis approach", 1 Juli 2024, *Proceedings of the 11th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024)*. S. 1-10, 10 S.
- Lange A, Xu R, Käding M, Marx S, Ostermann J., "Matched Filter for Acoustic Emission Monitoring in Noisy Environments: Application to Wire Break Detection." *Acoustics*. 2024; 6(1):204-218. <https://doi.org/10.3390/acoustics6010011>

geplant:

- Xu, R., Lange, A., Fiedler, M., Ostermann, J. & Marx, S., „Identification of tendon wire breaks under high background noise“ (geplant für 2025) “
- Fiedler, M., Xu, R., Lange, A., Ostermann, J. & Marx, S., Betz, T., „Wire-break detection in hybrid wind turbines towers: a novel application to monitor tendons using acoustic emission analysis“, *Applied Science*. 2025 (unter Begutachtung)

3 Literaturverzeichnis

- BMWK (2021) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Die Energie der Zukunft – 8. Monitoring-Bericht. 2021.
- HARTWIG AND MARX (2020) Hartwig, Steffen; Steffen Marx: Modellentwicklung torsionsbeanspruchter Kreisringsegmente mit trockenen Fugen. *Beton- und Stahlbetonbau* 116 (5): 370–77. <https://doi.org/10.1002/best.202000088>.
- JÜNGERT ET. AL. (2008) Jüngert, A., Große, C.U., Krüger, M.: Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit akustischen Verfahren, DACH-Jahrestagung, 2008.
- KÄDING ET. AL. (2022) Käding, Max; Schacht, Gregor; Marx, Steffen: Acoustic Emission Analysis of a Comprehensive Database of Wire Breaks in Prestressed Concrete Girders. *Engineering Structures* 270 (November):114846. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114846>.
- KANG ET. AL. (2018) Kang, Chongjie; Hartwig, Steffen; Marx, Steffen: Behavior of Externally Prestressed Segmental Towers' Dry Joint under Torsion Effects." *Structural Concrete* 20 (4): 1350–57. <https://doi.org/10.1002/suco.201800266>.
- KLEIN AND MARX (2021) Fabian, Klein; Marx, Steffen: Torsional Load-Bearing Capacity of Half-Shell Segments for Prestressed Concrete Towers. *Engineering Structures* 243 (September):112589. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112589>.
- KURZ (2013) Kurz, J. H.; Laguerre, L.; Niese, F.; Gaillet, L.; Szielasko, K.; Tschuncky, R.; Treysse, F.: Ndt for need based maintenance of bridge cables, ropes and prestressed elements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 3, 2013, 285–295.
- KRÄMER (2011) Krämer, P.: Schadensdiagnoseverfahren für die Zustandsüberwachung von Offshore-Windenergieanlagen. Universität Siegen, Dissertation, 2011, 256 S.
- KRAUSE ET. AL. (2015) Krause, T.; Preihs, S.; Ostermann, J.: Acoustic Emission Damage Detection for Wind Turbine Rotor Blades Using Airborne Sound. 10th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2015.
- MARWALA (2010) Marwala, T.: Finite-element-model updating using computational intelligence techniques: applications to structural dynamics. Springer, 2010.
- MARX (2017) Marx, Steffen: Sachstandbericht - Grenzzustände der Ermüdung Von Dynamisch Hoch Beanspruchten Tragwerken Aus Beton. 1st ed. DAFStb-Heft Series, v. 618. Berlin: DIN Media.
- AZURE (2024) Microsoft Azure: Azure Data Explorer. <https://azure.microsoft.com/en-us/products/data-explorer>. [Accessed: 15.12.2024]
- NETFLIX (2024) Netflix, Inc.: Conductor: A Microservices Orchestration Framework. <https://github.com/Netflix/conductor>. [Accessed: 15.12.2024].
- POLLOCK (2012) Pollock, A. A.: Probability of detection for acoustic emission, *Journal of Acoustic Emission*, 2012.

- RUPFLE ET. AL. (2023) Rupfle, J., Wondra, B., Grosse, C.U.: Long-Term Multiple Sensor Monitoring of a Hybrid Tower Wind Turbine – Lessons Learned. In: Limongelli, M.P., Giordano, P.F., Quqa, S., Gentile, C., Cigada, A. (eds) Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. EVACES 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 432. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5_55
- SAUSE ET. AL. (2018) Sause, M. G. R.; Linscheid, F.; Wiehler, M.: An experimentally accessible probability of detection model for acoustic emission measurements, Journal of Non-destructive Evaluation 37, 2018.
- SCHACHT ET. AL. (2018) Schacht, G; Käding, M.; Bolle, G; Marx, S.: Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrisskorrosionsgefahr. Beton- und Stahlbetonbau 144 (2) (2018), S. 85-94 - DOI: 10.1002/best.201800087.
- TE (2022) TE Connectivity: Model 805M Accelerometer Datasheet. TE Connectivity. <https://www.te.com/en/product-CAT-EAC0009.datasheet.pdf>. [Accessed: 01.04.2024].
- VALLEN (2022) Vallen Systeme GmbH: AE-Sensor Data Sheet VS30-V. Vallen Systeme GmbH, Wolfratshausen, Germany, 2022. <https://www.vallen.de/zdownload/DataSheets/Sensors/VS30-V.pdf>. [Accessed: 01.04.2024].
- VON DER HAAR AND MARX (2015) Von Der Haar, Christoph; Steffen Marx: Design Aspects of Concrete Towers for Wind Turbines." <https://doi.org/10.15488/4856>.

Anlage Erfolgskontrollbericht

Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung von Methoden zur effizienten und automatisierten Dauerüberwachung der Tragstruktur von Windenergieanlagen zur Detektion von Schädigungsereignissen und Anomalien mithilfe der Schallemissionsanalyse und innovativer Auswertemethoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI).

Die Ergebnisse des Projekts leisten einen bedeutenden Beitrag zu den förderpolitischen Zielen, insbesondere im Hinblick auf die Förderung der nachhaltigen Energieversorgung und der technischen Innovationskraft. Die im Projekt entwickelten Methoden zur Analyse von mit Betriebsgeräuschen überlagerten Drahtbruchsignalen haben eine entscheidende Grundlage für eine fortschrittliche Schadensdetektion in Windenergieanlagen geschaffen. Die gezielte Untersuchung und Modellierung von Schallemissionssignalen sowie die Entwicklung geeigneter Filter- und Analyseverfahren ermöglichen eine zuverlässigere und frühzeitigere Erkennung von Schäden in Spanngliedern. Dies trägt nicht nur zur Erhöhung der strukturellen Integrität und Betriebssicherheit von Windenergieanlagen bei, sondern reduziert auch die Risiken plötzlicher Ausfälle, die potenziell hohe wirtschaftliche und ökologische Kosten verursachen könnten. Die gewonnenen Erkenntnisse unterstützen die Planung und Durchführung vorausschauender Instandhaltungsmaßnahmen, wodurch Ressourcen effizienter genutzt und Betriebskosten gesenkt werden können. Die optimierte Zustandsüberwachung trägt zur Schonung natürlicher und finanzieller Ressourcen bei. Da Windenergie eine Schlüsselrolle in der globalen Energiewende einnimmt, stärken die Projektergebnisse nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit der Technologie, sondern tragen auch maßgeblich zur Erreichung nationaler und internationaler Klimaziele bei. Sie fördern die Zuverlässigkeit und Akzeptanz von Windenergie als zentraler Bestandteil einer nachhaltigen und klimaneutralen Energieversorgung.

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse, erreichte Nebenergebnisse, gesammelte Erfahrungen

Im Folgenden werden die wesentlichen wissenschaftlich-technischen Ergebnisse, Nebenergebnisse sowie gesammelten Erfahrungen vorgestellt.

- Es wurde eine umfangreiche Datengrundlage während der nahezu einjährigen Dauerüberwachung einer Windenergieanlage unter normalen Betriebsbedingungen geschaffen. Diese Daten sind eine einzigartige Basis zur Entwicklung, Erprobung und Anwendung von Auswertemethoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz. Die Daten wurden mit verschiedenen Sensoren und Sensorkonfigurationen erfasst.
- Die Schallemissionsmessungen der Betriebszustände zeigen über die Messperiode hinweg kein zeitabhängiges Verhalten. Es sind betriebsbedingte Zustände festzustellen.
- Während der Betriebsmessungen wurden Sensoren in der Nähe der Verankerungen der Spannglieder angebracht. Am oberen Ende ist das Spannglied am Übergangsstück verankert, welches die Verbindung zwischen den Beton- und Stahlkonstruktion des Turms bildet. In diesem Bereich waren die Betriebsgeräusche deutlich lauter als an den Verankerungen am Fundament mit Spannkeller. Es wurde ein Unterschied von etwa 16 dB bei den Peak-Amplituden festgestellt, was etwa dem 6,5-fachen entspricht.

Dies ist hauptsächlich Beeinflussung der Messstellen am Übergangsstück durch die Geräusche der Maschinenkomponenten in der Gondel zurückzuführen. Der Betonturm sorgt am Fundament hingegen für eine verstärkte akustischen Abschirmung, wobei am Fundament vermutlich die Betriebsgeräusche aus Elektroanlagen (z. B. Transformatoren) eine zunehmende Rolle spielen.

- Die Korrelation zwischen Betriebsgeräuschen und Betriebsparametern des Maschinenbetriebs wurde untersucht. Höhere Windgeschwindigkeiten und dadurch bedingt höhere Rotordrehzahlen führen zu einem lauterem Geräuschpegel. Besonders auffällig war eine primäre Veränderung im Bereich von 5 bis 7 U/min, wobei die maximalen Peak-Amplituden in der Nähe des Fundaments um etwa 12 dB und am Übergangsstück um 6 dB anstiegen. Ein kleinerer Blattwinkel führt ebenfalls zu einem höheren Geräuschpegel.
- Die Korrelationsanalysen zwischen Betriebsparametern und Hintergrundgeräuschen zeigen die komplexen wechselseitigen Zusammenhänge. Die isolierte Identifizierung der individuellen Einflüsse von Rotordrehzahl, Blattwinkel und Windgeschwindigkeit erwies sich praktisch als schwierig.
- Die Signalübertragung vom Spannglied zum Fundament durch die *neuartige Verankerungskonstruktion* ist durch eine hohe Impedanz gekennzeichnet. Folglich muss jedes Ende dieser Spannglieder mit einem einzelnen Sensor überwacht werden, was insgesamt 24 Sensoren erfordert.
- Bei der *konventionellen Verankerung* der Spannglieder im Fundamentbereich kann die Anzahl der Sensoren auf (mindestens) sieben Stück reduziert werden. Die moderate Dämpfung durch Signalübertragung und Ausbreitung quer zum Spannglied ermöglicht die gruppierte Überwachung mehrerer Spannglieder mit wenigen Sensoren.
- Auch im Bereich des *Übergangsstücks* ist eine gruppierte Überwachung möglich. Die Anzahl der Sensoren kann in diesem Bereich auf (mindestens) fünf reduziert werden.
- Das Anbringen von Sensoren entlang der Spannglieder erwies sich als aufwändig und aufgrund struktureller Eigenschaften ist die Wahrscheinlichkeit von Drahtbrüchen im Bereich der Verankerungen höher. Daher erscheint ein Fokus auf die Verankerungen und angrenzenden Abschnitte der Spannglieder sinnvoll. Entlang der Spannglieder wurden in Laborversuchen niedrige Dämpfungskoeffizienten festgestellt, wodurch eine zuverlässige Detektion über große Distanzen ermöglicht wird. Daher können die 80 m langen Spannglieder mit (maximal) vier bis fünf Sensoren vollständig überwacht werden.

Fortschreibung der Verwertungsplanes

Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u. a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten:

- Keine eingereicht oder geplant

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt):

- Die im Rahmen dieses Projekts entwickelten Methoden und Technologien zur Erkennung von Drahtbrüchen bieten vielversprechende wirtschaftliche Erfolgsaussichten. Insbesondere durch den Teileinsturz der Carolabrücke in Dresden steigt im Brückenbau die Nachfrage nach akustischen Überwachungssystemen zur Spanndrahtbruchdetektion enorm. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass über 1.000 Bauwerke in vergleichbarer Weise potenziell gefährdet sind und ein signifikanter Anteil hiervon mit dem entwickelten SHM-System zuverlässig überwacht werden kann. MKP geht davon aus, dass das System in 2025 an ca. zehn Bauwerke instrumentiert wird. Es wird jedoch auch für den Bereich der Windenergieanlagen von weiteren Anwendungen ausgegangen.
- Im Bereich der Datenverarbeitung wurde ein robustes und skalierbares Workflow-System entwickelt, das die regelmäßige Verarbeitung und Analyse von Daten ermöglicht. Hierbei können von einfachen Berechnungen bis hin zur Anwendung komplexer Machine-Learning-Modelle Anwendung finden. Die Ergebnisse können an Datenbanken übermittelt und über die MKP-eigene IRIS-Plattform visualisiert werden, wodurch eine nahtlose Integration mit bestehenden und zukünftigen Projekten gewährleistet ist. Dieses System bildet die Grundlage für eine effektive Dauerüberwachung.
- Der Einsatz von KI-gestützten Methoden trägt wesentlich zur Zuverlässigkeit bei der Spanndrahtbruchdetektion bei. Die Daten werden automatisiert verarbeitet, was den Bedarf an manueller Sichtung erheblich verringert. Dies reduziert nicht nur die Fehleranfälligkeit und den Personalaufwand, sondern ermöglicht es Fachkräften, sich verstärkt auf die Weiterentwicklung der Algorithmen und ingenieurtechnische Aufgaben zu konzentrieren.
- Insgesamt verhelfen die Erkenntnisse bzw. Ergebnisse des Projektes das Angebot an digitalen Leistungen der Partner auszubauen. Die technologischen Konzepte und darüber erzielten wissenschaftlichen Erkenntnisse stehen allen Projektpartnern auch nach Projektabschluss zur Verfügung und können für vertiefende oder weiterführende Arbeiten in forschungs- bzw. anwendungsorientierten Projekten verwendet werden.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen:

- Die entwickelten Methoden werden konkret im Bereich des Brückenbaus Anwendung finden und stehen somit öffentlichen Auftraggebern direkt nutzbar für die Bewertung der Standsicherheitsgefährdung zu Verfügung. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass über 1.000 Bauwerke mit dem Schadensbild Spannungsrisskorrosion potenziell gefährdet sind und ein signifikanter Anteil hiervon mit dem entwickelten SHM-System zuverlässig überwacht werden kann.

- Die erhobenen Daten der Drahtbruchsignale und der Betriebsgeräusche bieten eine einmalige Basis für die Anwendung von Verfahren der künstlichen Intelligenz. Diese Datenbasis soll weiter genutzt werden und entsprechende Algorithmen entwickelt werden. In diesem Zusammenhang ist auch eine Weiterentwicklung der Einbindung der Algorithmen in den Kontext von Microsoft Azure mit robusten Pipelines anzustreben. Dies betrifft nicht nur die Verarbeitung von akustischen Daten, sondern auch eine stärkere Fusion mit anderen Strukturinformationen, z. B. aus Dehnungsmessungen. Ebenso muss die Interoperabilität mit bestehenden Dateninfrastrukturen, wie den meist existierenden SCADA-Systemen, hergestellt werden.
- Die gewonnenen Erkenntnisse bieten im Bereich der Windenergie den Betreibern von Windenergieanlagen die Möglichkeit die Anwendung des Verfahrens zu evaluieren und für die Überwachung der Tragstrukturen in Betracht zu ziehen. Insbesondere im Hinblick auf Predictive Maintenance sind hierfür jedoch ganzheitliche, nutzerfreundliche Darstellungen aggregierter Informationen und Vorhersagen zu entwickeln, um wirtschaftliche Entscheidungen bezüglich der Instandhaltungsplanung zu treffen. Hierfür werden auch weitere Untersuchungen an Anlagen des gleichen und andersartigen Turmtyps erforderlich sein, einerseits um die Anwendung an verschiedenen Turmtypen planen zu können und andererseits um übergreifende, vergleichende Bewertung mehrerer Anlagen vornehmen zu können.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse:

- Die Ergebnisse des Projekts eröffnen eine vielversprechende Anschlussfähigkeit sowohl auf wissenschaftlicher als auch auf wirtschaftlicher Ebene. Die entwickelten Algorithmen zur Schadensdetektion und die Signalverarbeitungsmethoden bieten ein Potenzial für weiterführende Forschungen zur Verbesserung der Erkennungsgenauigkeit in komplexeren Szenarien. Hierbei bietet die Entwicklung der Verfahren für lebensdauerübergreifende Überwachung großes Potential. Bisher findet das Schallemissionsmonitoring zur Detektion von Spanndrahtbrüchen hauptsächlich bei konkreten Problemstellungen Anwendung und wird anlassbezogen zur Bewertung von Bestandsbauwerken verwendet. Eine integrale Überwachung von Strukturen hinsichtlich anderer Fragestellung und bspw. ab der Herstellung wurde bisher wenig erforscht. In diesem Zusammenhang ist die Nutzung eines Schallemissionssystems für verschiedene Zwecke zu erforschen. Dies würde z. B. die Erstellung tomographischer Repräsentationen erlauben, mit denen Schädigungen im Bauwerk frühzeitig erkannt werden können. Bei diesen Anwendungen können auch KI-Algorithmen einen wesentlichen Beitrag leisten, um Schäden zu erkennen.
- Des Weiteren gibt es zahlreiche Fragestellung zur Integration der Messergebnisse in digitale Zwillinge im Hinblick auf Predictive Maintenance. Hierfür müssen ganzheitliche, nutzerfreundliche Darstellungen aggregierter Informationen und Vorhersagen entwickelt werden, um wirtschaftliche Entscheidungen bezüglich der Instandhaltungsplanung zu treffen. Weitere Untersuchungen an Anlagen des gleichen und andersartigen

Turmtyps sind erforderlich, um die Übertragung von Ergebnissen zwischen verschiedenen Anlagen zu ermöglichen und eine übergreifende, vergleichende Bewertung mehrerer Anlagen vornehmen zu können.

Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine

Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse werden allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt und können für weitere Forschungs- und Entwicklungszwecke genutzt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, diese Ergebnisse auf verschiedenen Plattformen und Veranstaltungen zu präsentieren, um die Sichtbarkeit und den Austausch innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft sowie der Industrie zu fördern. Eine Präsentation der Ergebnisse kann auf Fachkonferenzen, in Fachzeitschriften sowie bei Workshops und Symposien erfolgen.

Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Die Kostenplanung wird in einem separaten Bericht, den zahlenmäßigen Nachweis, ausführlich dargestellt. Die geplanten Aktivitäten im Teilvorhaben bewegen sich größtenteils innerhalb des ursprünglich vorgesehenen Rahmens. Es kam jedoch zu gewissen Verzögerungen bei einigen Arbeitspaketen, verursacht durch die pandemiebedingten Einschränkungen zu Beginn des Jahres 2021. Aus diesem Grund wurde das gesamte Vorhaben kostenneutral um ein Jahr verlängert.