

# Pulsotronic GmbH Hinweis zur Umfirmierung im Anhang

Schlussbericht Forschungsvorhaben „Life-Odometer“

Verbundvorhaben: „Life-Odometer - Neue Ansätze für die Nachverfolgung des Lebensdauer verbrauchs von Windenergieanlagen“

Teilvorhaben: „Entwicklung einer industrietauglichen Zustandsüberwachung für Windkraftanlagen inklusive Sensorik und Auswerteeinheit mit dem Ziel der Lebensdauer verläng erung“

Förderkennzeichen: 03EE3037D

Pulsotronic GmbH & Co. KG  
Neue Schichtstr. 14b  
09366 Niederdorf

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

# Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	1
Tabellenverzeichnis.....	1
TEIL I – Kurzbericht.....	2
1. Aufgabenstellung.....	2
2. Voraussetzungen.....	2
3. Planung und Ablauf.....	3
4. Stand der Technik.....	3
5. Ergebnisse und Zusammenarbeit.....	3
TEIL II – Eingehende Darstellung.....	4
1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	4
1.1 Ausgangslage und Motivation.....	4
1.2 Arbeitspakete und Meilensteine.....	5
2. Durchgeführte Arbeiten.....	6
2.1 AP2.1 Sensor-Technologie.....	6
2.2 AP2.5 Validierung an Windenergieanlagen.....	7
2.3 AP3.1 Daten-Handling.....	9
2.4 AP4.1 Unsicherheiten der direkten Lebensdauerermittlung.....	11
3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	13
4. Notwendigkeit und Angemessenheit.....	14
5. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung.....	14
5.1 Technischer Nutzen.....	14
5.2 Wirtschaftliche Verwertung.....	15
6. Fortschritt bei anderen Stellen.....	15
7. Veröffentlichungen.....	15
Anlagenverzeichnis.....	15

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Messpunkt Turm1 .....	6
Abbildung 2 Anordnung Torsionsaufnehmer .....	7
Abbildung 3 Messpunkte Anlage Gera .....	8
Abbildung 5 Software Achitektur .....	10
Abbildung 6 Prüfstand für Belastung und klimatische Einfüsse .....	12

# Tabellenverzeichnis

Table 1: Relevant uncertainties for the PTJ Project Structural Noise Sensors.....	11
---	----

# Abschlussbericht – PTJ Life Odometer

---

## TEIL I – Kurzbericht

### 1. Aufgabenstellung

Im Verbundvorhaben "Life-Odometer – Neue Ansätze für die Nachverfolgung des Lebensdauerungsverbrauchs von Windenergieanlagen" wurde eine durchgängige Methodik entwickelt, die den tatsächlichen Lebensdauerungsverbrauch einzelner Windenergieanlagen (WEA) deutlich präziser bewertbar macht.

Das Teilvorhaben der Pulsotronic GmbH & Co. KG (FKZ 03EE3037D) hatte dabei folgende Schwerpunkte:

- Entwicklung einer industrietauglichen Sensorik zur Messung von Dehnung, Torsion und strukturellem Rauschen an Turm, Blattadapter und Rotorblatt.
- Aufbau einer Messkette, die von der Sensorik über IO-Link-basierte Module und Steuerungstechnik bis hin zu einer Cloud-basierten Datenauswertung reicht.
- Durchführung einer Unsicherheitsbewertung, um die Qualität der erfassten Messgrößen für die Lebensdauerermittlung quantifizierbar zu machen.

Ziel war es, eine praxistaugliche Grundlage für Lebensdauererlängerung, Weiterbetrieb und zustandsorientierte Instandhaltung zu schaffen.

### 2. Voraussetzungen

Die Projektlaufzeit erstreckte sich von 01.07.2021 bis 30.06.2025. Pulsotronic brachte umfangreiche Erfahrung in der Sensortechnik für Windenergie ein.

Herausfordernde Rahmenbedingungen:

- Pandemiebedingte Einschränkungen erschwerten Meetings und Abstimmungen.
- Die globale Chipkrise führte zu langen Lieferzeiten und Mehrkosten.
- Personelle Engpässe verzögerten einzelne Arbeitsschritte.

Gleichzeitig standen starke Partner zur Verfügung, die u. a. Anlagenzugänge, Lastrekonstruktion und Unsicherheitsmodelle bereitstellten.

### 3. Planung und Ablauf

Die Arbeiten waren in folgende Arbeitspakete gegliedert:

- AP2.1 Sensor-Technologie – Definition und Auslegung der Sensorkonfiguration
- AP2.5 Validierung – Herstellung, Installation und Erprobung der Sensorik an zwei WEA
- AP3.1 Daten-Handling – Aufbau einer modernen Datenerfassungs- und Cloudinfrastruktur
- AP4.1 Unsicherheiten – Quantifizierung relevanter Unsicherheitsanteile

Wesentliche Meilensteine umfassten: vollständige Spezifikation der Sensorkonfiguration; erfolgreiche Instrumentierung zweier Windenergieanlagen (Gera, Jever); durchgängige Datenerfassung ab Herbst 2023 bzw. Frühjahr 2024; Aufbau eines skalierbaren Cloud-Backends; Durchführung umfangreicher Labor- und Temperaturuntersuchungen. Eine Projektverlängerung um 12 Monate kompensierte externe Verzögerungen.

### 4. Stand der Technik

Life-Odometer schließt die Lücke zwischen theoretischer Lastabschätzung und realer Belastung einzelner Anlagenkomponenten. Bestehende Condition-Monitoring-Systeme bieten nur begrenzt Informationen zur komponentenbezogenen Restlebensdauer. Daher wurden optimierte Sensorik für Rotorblatt und Turm, vollständige Messketten mit industrieller Ausprägung und eine integrale Unsicherheitsanalyse aller Messstufen adressiert.

### 5. Ergebnisse und Zusammenarbeit

Zentrale Ergebnisse: validiertes Sensorkonzept für Turm und Rotorblatt; dokumentierte Installations- und Kalibrierprozesse; stabile, skalierbare Dateninfrastruktur; experimentell ermittelte Unsicherheitsbudgets und Kompensationsstrategien. Die Zusammenarbeit im Verbund erfolgte über regelmäßige Abstimmungen, gemeinsame Workshops sowie abgestimmte Datenanalysen.

## TEIL II – Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

#### 1.1 Ausgangslage und Motivation

Moderne Windenergieanlagen werden üblicherweise anhand standardisierter Normlastkollektive – beispielsweise gemäß IEC 61400 – ausgelegt. Diese Kollektive beruhen auf typisierten Windklassen und vereinfachten Belastungsannahmen, die jedoch nur einen eingeschränkten Bezug zu den tatsächlich vorherrschenden Standortbedingungen besitzen. Insbesondere bei Bestandsanlagen führt diese Diskrepanz zu deutlichen Unsicherheiten, wenn es um die technische Bewertung der Restlebensdauer, die Planung eines Weiterbetriebs oder die wirtschaftliche Einschätzung der verbleibenden Nutzungspotenziale geht. Genau an dieser Stelle setzt das Verbundprojekt *Life-Odometer* an, dessen Ziel darin besteht, reale Lastzustände einzelner Anlagen präzise zu erfassen und daraus den tatsächlichen Lebensdauerverbrauch abzuleiten.

Das Projekt kombiniert drei zentrale methodische Säulen: die direkte Messung strukturmechanisch relevanter Größen wie Dehnung, Torsion und Schwingung, die rückwirkende Bestimmung historischer Lasten über modellbasierte und datengetriebene Verfahren sowie die explizite Modellierung und Bewertung sämtlicher Messunsicherheiten. Diese integrative Herangehensweise ermöglicht es, reale Lastkollektive wesentlich präziser abzubilden, als dies über normative Ansätze möglich wäre.

Das Teilvorhaben der Pulsotronic GmbH & Co. KG hatte innerhalb dieses Gesamtprojekts die Aufgabe, eine industriell einsetzbare und skalierbare Sensor- und Messkettenlösung zu entwickeln, die eine direkte, komponentenaufgelöste Lebensdauerermittlung im realen Anlagenbetrieb ermöglicht. Dazu gehörte die Entwicklung feldtauglicher Sensorik für Turm, Nabe und Rotorblatt, die Gestaltung IO-Link-basierter Elektronikmodule sowie der Aufbau einer durchgängigen Datenkette von der Sensorik über die Steuerungstechnik bis hin zu cloudbasierten Analyseplattformen. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und Systemlösungen bilden damit einen zentralen technologischen Baustein für zukünftige Konzepte zur zustandsbasierten Instandhaltung, Lebensdauererlängerung und industriellen Verwertung der Life-Odometer-Methodik.

## 1.2 Arbeitspakete und Meilensteine

Das Teilvorhaben war in folgende Arbeitspakete gegliedert:

- AP1.1/1.2 Projektmanagement und Bewertung;
- AP2.1 Sensor-Technologie;
- AP2.3 Simulation der Messkette (Mitwirkung);
- AP2.4 Effizienz der Sensorkonfiguration;
- AP2.5 Validierung;
- AP3.1 Daten-Handling;
- AP4.1 Unsicherheiten aus der direkten Lebensdauerermittlung.

Meilensteine:

- Spezifikation der Sensorkonfiguration;
- Instrumentierung zweier WEA;
- Aufbau und operativer Start des Datenmanagementsystems;
- Rückbau nach Messphasen;
- Abschlussbewertung.

## 2. Durchgeführte Arbeiten

### 2.1 AP2.1 Sensor-Technologie

Die Planungsphase umfasste die detaillierte Definition der Sensorkonfiguration für Turm, Blattadapter und Rotorblätter. Dabei wurden die zu erfassenden Messgrößen, geeignete Einbaupositionen sowie eindeutige Schnittstellen festgelegt, um eine konsistente Integration in die Gesamtarchitektur sicherzustellen. Die frühe Festlegung der Sensortypen, Orientierungen und mechanischen Befestigungspunkte bildete die technische Grundlage für den weiteren Systementwurf.

Darauf aufbauend entstand ein vollständiger Systementwurf, der alle funktionalen, elektrischen und mechanischen Anforderungen zusammenführt. Die Messkette wurde in die Bereiche Turm, Nabe/Blattadapter und Blätter unterteilt, um Installation und Diagnose gezielt zu strukturieren. Ein zentraler Bestandteil war die Verwendung der IO-Link-basierten Sensorknoten, welche eine durchgängige Standardkommunikation ermöglichen und die Grundlage für die modulare Systemarchitektur bilden.

Die exemplarischen Messpunkte am Standort Gera verdeutlichen die strukturierte Anordnung: Am Turm wurden je drei Dehnungsmessstellen im unteren und oberen Bereich in 120°-Anordnung installiert, ergänzt durch Torsionsmessstellen in  $\pm 45^\circ$ -Orientierung sowie drei Structural-Noise-Sensoren. Am Blatt und Blattadapter befinden sich entlang definierter radialer Positionen mehrere Dehnungs- und Geräuschemessstellen, deren Orientierung strikt den strukturellen Vorgaben folgt, um eine eindeutige Interpretation der Messwerte sicherzustellen.

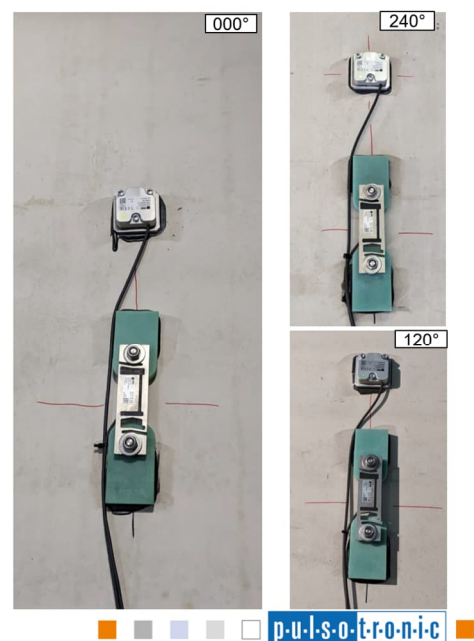
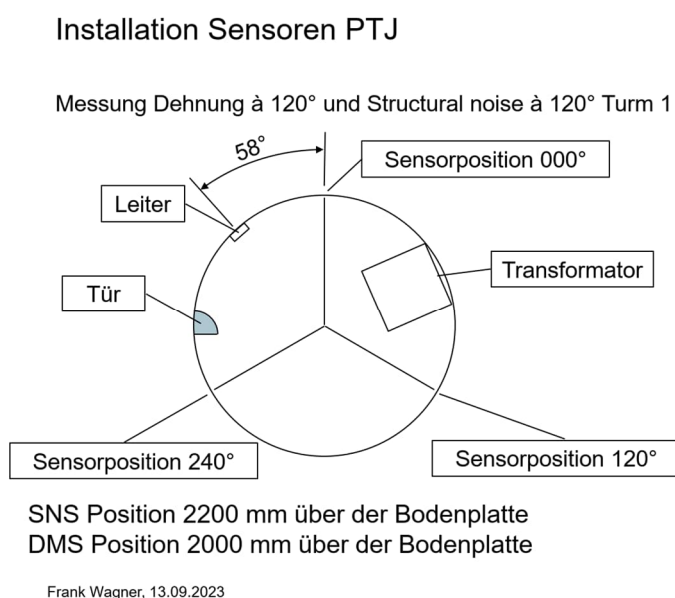
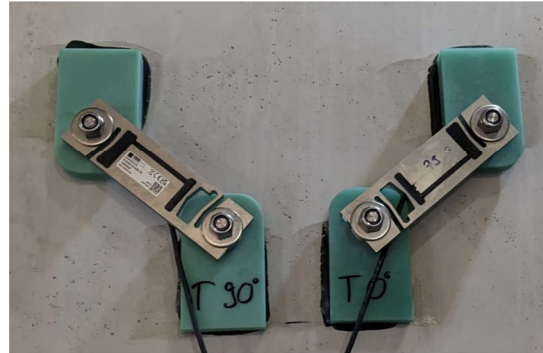
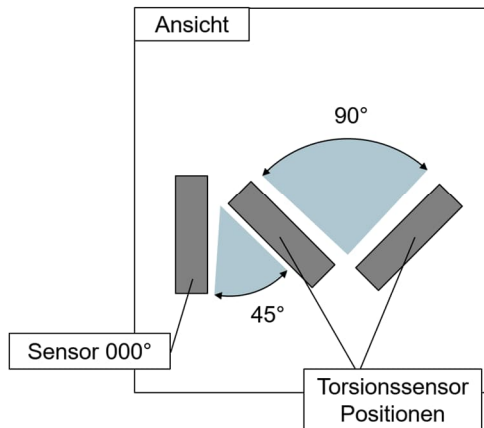


Abbildung 1 Messpunkt Turm1

## Installation Sensoren PTJ

Messung Torsion Turm 1 \*gilt für alle Torsionsmessungen



Frank Wagner, 13.09.2023



Abbildung 2 Anordnung Torsionsaufnehmer

Die Schnittstellenarchitektur basiert vollständig auf IO-Link als durchgehender Sensorebene. Lokale Mastermodule in Turm und Nabe übernehmen Aggregation und Adressierung; industrielle Controller wie PLCnext sowie Edge-Computer erfassen und verarbeiten die Daten zentral. Dadurch entsteht ein skalierbares, robustes Messsystem, das sich bei Bedarf um zusätzliche Sensorik erweitern lässt und eine zuverlässige Datenbasis für Analyse- und Diagnoseprozesse liefert.

### 2.2 AP2.5 Validierung an Windenergieanlagen

Die ursprüngliche Projektplanung sah vor, die Validierung des Systems an drei unterschiedlichen Anlagen durchzuführen, um ein breites Spektrum realer Standortbedingungen abzudecken und die Leistungsfähigkeit der Sensorik unter variierenden Umgebungs- und Belastungsszenarien zu prüfen. Aufgrund externer Einflüsse – darunter eingeschränkte Anlagenverfügbarkeit sowie organisatorische Rahmenbedingungen – wurde die Umsetzung jedoch gezielt auf zwei Anlagen reduziert. Trotz dieser Anpassung bleibt die Aussagekraft der Validierung vollständig erhalten, da die ausgewählten Standorte hinsichtlich klimatischer Bedingungen, Betriebscharakteristik und Anlagenkonfiguration repräsentativ für das Gesamtspektrum der Zielumgebung sind.

Im Bereich Herstellung und Prüfung wurden vollständige Sensorinseln aufgebaut, bestehend aus der kompletten Sensortechnik einschließlich IO-Link-Master, Spannungsversorgung sowie den erforderlichen Kommunikations- und

Auswerteschnittstellen. Jede Messkette wurde einzeln einer Funktionsprüfung unterzogen, um Signalqualität, Rauschverhalten, Reproduzierbarkeit und Synchronität sicherzustellen. Ergänzend wurde eine umfassende technische Dokumentation erstellt, die sämtliche Montagerichtlinien, Mindestanforderungen an den Einbau, definierte Toleranzbereiche sowie sicherheitsrelevante Aspekte beschreibt. Diese Dokumentation dient als verbindliche Grundlage sowohl für die Installation im Feld als auch für zukünftige Serienanwendungen.

## Installation Sensoren PTJ

### Montagepositionen und Aufteilung der Sensoren

#### Dehnungsmessung:

Sensoren werden in der Längsachse zur Struktur montiert

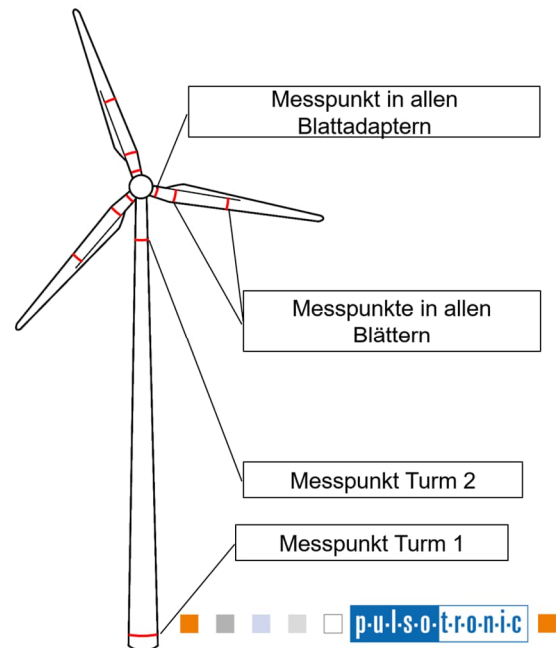
- Im Turm senkrecht, Kabelabgang nach unten
- Im Blatt zur Spitze ausgerichtet, Kabelabgang zur Nabe

#### Torsionsmessung:

Sensoren werden im  $+45^\circ$  und  $-45^\circ$  Winkel zur Längsachse montiert

#### Structural noise Messung:

Sensoren werden mit Kabelabgang nach unten montiert



Frank Wagner, 13.09.2023

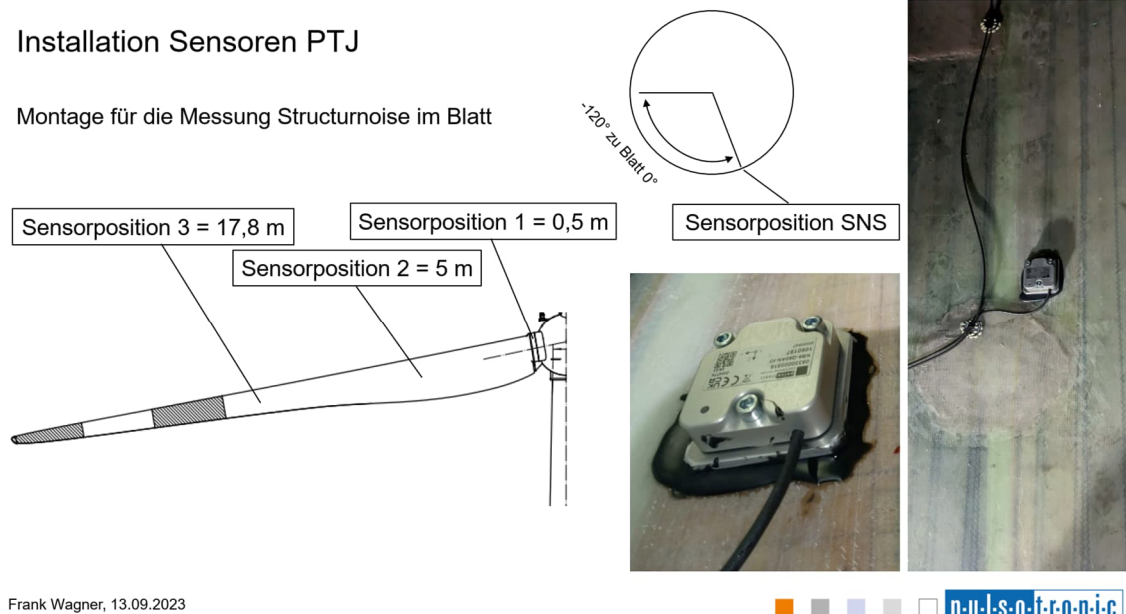
Abbildung 3 Messpunkte Anlage Gera

Im Anschluss erfolgten Installation und Kalibrierung der Sensorik an Turm und Rotorblatt. Dabei wurde besonderer Wert auf die präzise Positionierung der Sensoren gelegt, da die Messqualität maßgeblich von der geometrischen Genauigkeit und dem festen Kraftschluss der Montage abhängt. Zusätzlich wurden Plausibilitätsmessungen durchgeführt, bei denen das Verhalten der Messketten überprüft wurde. Dieser Schritt gewährleistet, dass spätere Auswertungen eindeutig auf reale Strukturlasten und Betriebszustände zurückgeführt werden können.

In der Nabe sowie in den Blattadaptern und Rotorblättern werden weitere Dehnungs- und SNS-Sensoren an definierten Radialpositionen angebracht, sodass eine zusammenhängende Beobachtung der Lastübertragungskette Blatt–Adapter–Nabe–Turm möglich wird

## Installation Sensoren PTJ

Montage für die Messung Structurnoise im Blatt



Frank Wagner, 13.09.2023

Abbildung 4 Structural Noise Montage Positionen Blatt

Die anschließenden Messkampagnen starteten standortabhängig zu unterschiedlichen Zeitpunkten: Bereits seit Oktober 2023 erfolgt eine kontinuierliche Datenerfassung an der Anlage in Gera, während der Messbetrieb in Jever im März 2024 aufgenommen wurde. Die Daten werden vor Ort zunächst lokal gesichert, um maximale Ausfallsicherheit und zeitnahe Verfügbarkeit für Analysen zu gewährleisten. Eine automatisierte Datenübertragung in zentrale Auswertungssysteme wird sukzessive integriert, um langfristig eine vollständig digitalisierte Verarbeitung, einheitliche Datenstände sowie die Möglichkeit nahezu Echtzeit-fähiger Monitoring-Prozesse zu ermöglichen. Die gewonnenen Messdaten bilden damit eine tragfähige Grundlage für die Validierung der Sensorik und die Ableitung weiterführender Erkenntnisse zur Systemoptimierung.

### 2.3 AP3.1 Daten-Handling

Das zentrale Ziel des Datenmanagementkonzepts besteht darin, ein zukunftsfähiges und skalierbares System zu schaffen, das den langfristigen Anforderungen großer, kontinuierlich wachsender Sensordatensätze gerecht wird. Im Fokus steht dabei eine Architektur, die sowohl hohe Datenvolumina zuverlässig speichert als auch einen strukturierten, nachvollziehbaren Zugriff für interne wie externe Partner ermöglicht. Durch die klare Trennung von Rohdaten und synchron aufbereiteten Messdaten wird eine flexible Basis geschaffen, die unterschiedliche Anwendungsfälle – von reinen Archivierungsaufgaben bis hin zu fortgeschrittenen Analyse- und Forschungszwecken – unterstützt.

Die technische Architektur sieht vor, dass unbehandelte Rohdaten zunächst in Cloud-Buckets abgelegt werden. Diese Speicherbereiche bieten hohe Skalierbarkeit, redundante Datenhaltung und die Möglichkeit, große Datenmengen effizient zu versionieren. Parallel dazu werden zeitsynchronisierte und vorverarbeitete Messdaten in spezialisierten Zeitreihendatenbanken abgelegt. Diese Datenbanken sind für hohe Schreiblast optimiert und ermöglichen schnelle Abfragen, die insbesondere für Analytik, Trendanalysen und modellbasierte Auswertungen erforderlich sind. Verbundpartner erhalten über klar definierte, abgesicherte Endpunkte Zugriff auf die jeweils freigegebenen Datenbereiche, wodurch ein kontrollierter und revisionssicherer Informationsfluss sichergestellt wird.

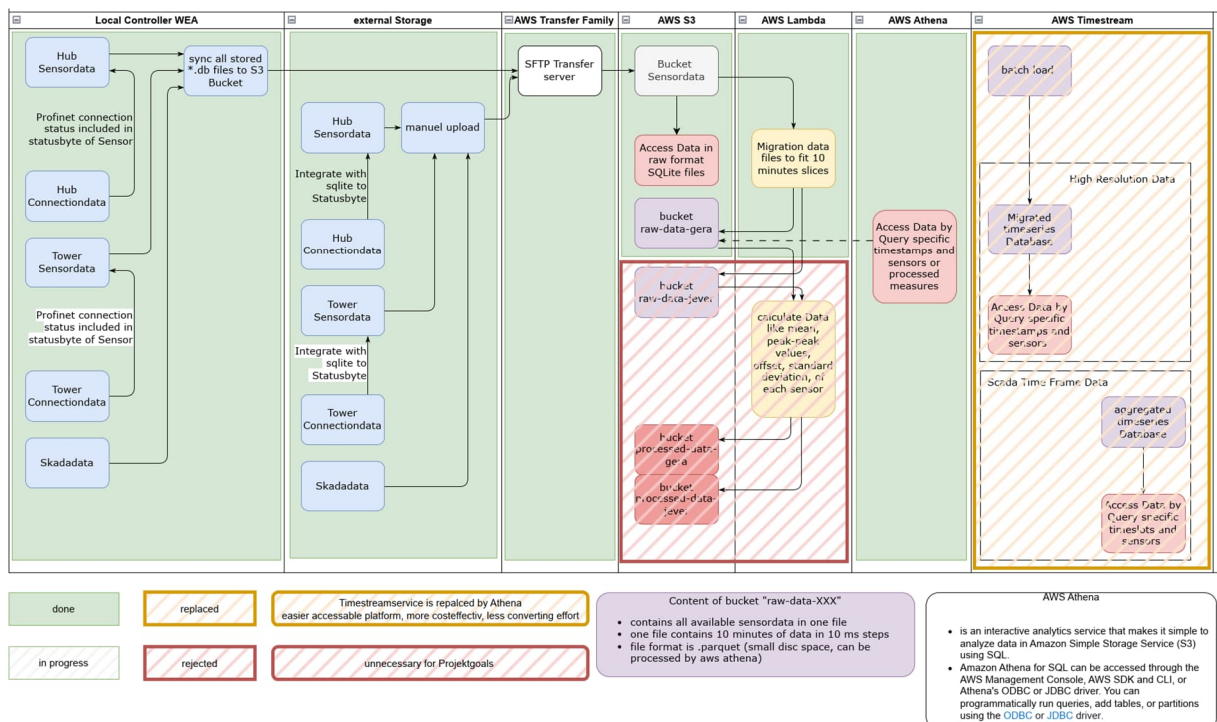


Abbildung 5 Software Architektur

Um die Datenpipeline möglichst robust und wartungsarm zu gestalten, spielen automatisierte Prozesse eine zentrale Rolle. Upload-Mechanismen sorgen dafür, dass lokal erfasste Sensordaten ohne manuelle Eingriffe in die Cloud übertragen werden. Synchronisationsprozesse gleichen unterschiedliche Erfassungszeitpunkte und Pufferstände zwischen lokaler Infrastruktur und Cloud-Umgebung ab, sodass konsistente, zeitlich korrekte Datensätze entstehen. Ergänzend dazu überwachen automatisierte Analyseprozesse kontinuierlich die Datenintegrität. Sie prüfen beispielsweise auf Übertragungsfehler, Zeitstempel-Abweichungen oder fehlende Pakete und gewährleisten damit, dass die gespeicherten Daten vollständig, korrekt und eindeutig referenzierbar bleiben.

Durch diese Kombination aus skalierbarer Cloud-Speicherung, spezialisierter Zeitreihenarchitektur, standardisierten Zugriffsschnittstellen und durchgängig automatisierten Abläufen entsteht ein leistungsfähiges Datenmanagementsystem. Es bildet die Grundlage für langfristige Auswertungen, KI-gestützte Modelle, condition-monitoring-Anwendungen sowie die effiziente Zusammenarbeit mit Verbundpartnern im Rahmen komplexer Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

## 2.4 AP4.1 Unsicherheiten der direkten Lebensdauerermittlung

### 2.4.1 Identifikation der Unsicherheitsquellen

Für die zuverlässige Nutzung der Messdaten in der späteren Lebensdaueranalyse wurden alle relevanten Unsicherheitsbeiträge entlang der Messkette systematisch identifiziert und bewertet. Die Analyse umfasst sowohl intrinsische als auch extrinsische sowie systemische Einflüsse.

Table 2: Relevant uncertainties for the PTJ Project Structural Noise Sensors

Uncertainty	Type	Impact	Compensation
Linearity Deviation	Intrinsic	0,1 %	Not possible
Temperature Influence	Intrinsic	TBD	
Hysteresis	Intrinsic	0,01 %	
ADC Accuracy	Intrinsic	negligible	
Electronic Noise	Intrinsic	negligible	
Offset	Intrinsic	1 $\mu\text{m}/\text{m}$	
Tilt of Sensor Mounting	Extrinsic	TBD	Can be canceled out for ACC
Temperature Influence Mounting Materials	Extrinsic	TBD	Should be quasi static and therefore compensation possible
Cables	Extrinsic	TBD, motion of cable introduces mechanical noise	
Connection points	Extrinsic	negligible, IO Link Communication	

Intrinsische Unsicherheiten betreffen das Sensorelement selbst, darunter Linearitätsabweichungen, temperaturabhängige Drifts, hysteresartige Materialeffekte, Offsetverschiebungen sowie Quantisierungs- und Rauschanteile der Elektronik. Montagebedingte Unsicherheiten entstehen durch die Einbindung des Sensors in die Struktur, beispielsweise durch Klebparameter, Ausrichtungsfehler, montagebedingte Vorspannungen, thermisch induzierte Dehnungen oder Kontaktwiderstände in

Steckverbindern.

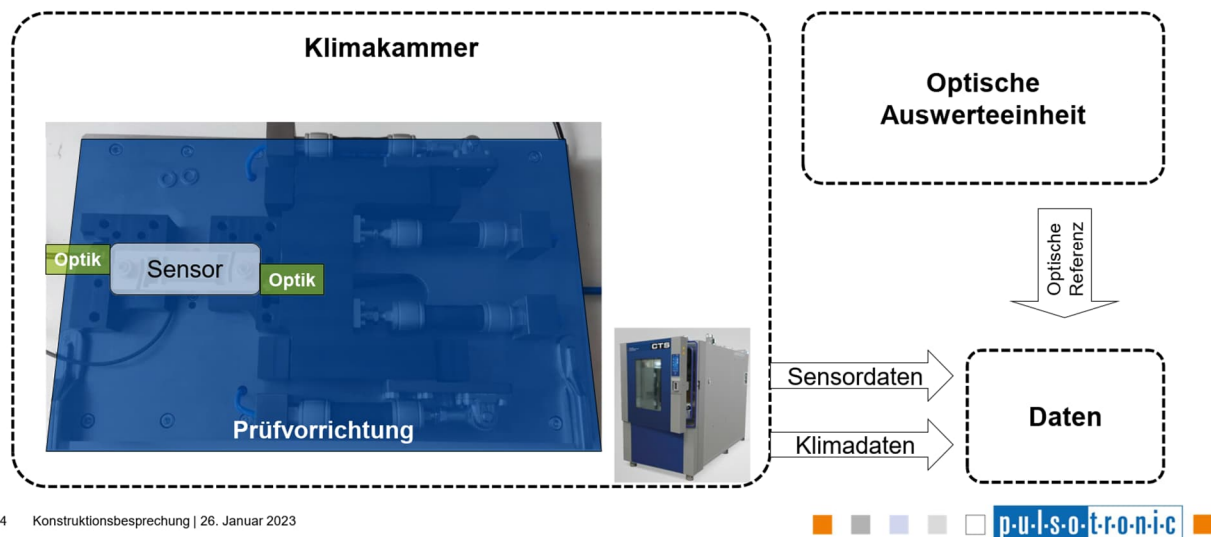
Systemische Einflüsse umfassen Effekte der Signalverarbeitung, wie Abtast- und Synchronisationsfehler, Filterverzerrungen oder Unterschiede in der zeitlichen Zuordnung der Kanäle.

Durch die strukturierte Klassifikation dieser Einflussgrößen wurde die Grundlage geschaffen, die Messkette robust, reproduzierbar und langfristig stabil ausulegen.

### 2.4.2 Experimentelle Untersuchungen

Zur quantitativen Bestimmung der identifizierten Unsicherheiten wurde ein kombiniertes experimentelles Vorgehen realisiert. Ein neu entwickelter Prüfstand erzeugte reproduzierbare Dehnungszustände, die durch ein optisches Referenzsystem unabhängig verifiziert wurden. Ergänzend erfolgten umfangreiche Klima- und Belastungsversuche im Temperaturbereich von  $-20\text{ °C}$  bis  $+55\text{ °C}$ , um thermo-mechanische Einflüsse, Nullpunktverschiebungen und mögliche Langzeitdriften isoliert zu untersuchen. Die Versuchsreihen ermöglichten es, temperaturempfindliche Effekte, Driftverhalten und Hysterese eindeutig voneinander zu trennen. Die Auswertungen zeigen, dass nach geeigneter Kompensationstechniken – darunter temperaturabhängige Korrekturmodelle, zyklusbasierte Driftkompensation und optimierte Montageprozesse – die verbleibenden Abweichungen auf etwa 1 % reduziert werden konnten. Damit steht ein belastbares empirisches Fundament zur Verfügung, das die Verwendung der Messkette für Lebensdauerabschätzungen mit hinreichender Genauigkeit absichert.

## Messaufbau



4 Konstruktionsbesprechung | 26. Januar 2023

Abbildung 6 Prüfstand für Belastung und klimatische Einflüsse

### 2.4.3 Konsequenzen für Systementwurf und Auswertung

Die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse beeinflussen sowohl den Systementwurf als auch die Auswerteprozesse. Auf Sensorebene führen sie zu optimierten Parametrisierungen, etwa durch verbesserte Temperaturkompensationen und abgestimmte Filtereinstellungen. Für die Installation ergeben sich präzisere Anforderungen an Klebprozesse, Ausrichtung und Qualitätssicherung, um montagebedingte Abweichungen zu minimieren.

Auf Systemebene fließen die Erkenntnisse in die Datenaufbereitung der Messkette ein, beispielsweise in die Gestaltung von Filterstrategien, die Behandlung von Ausreißern oder in Synchronisationsmechanismen des Gesamtsystems. Darüber hinaus unterstützen die quantifizierten Unsicherheiten die Verbundpartner bei der Interpretation der Messgrößen in Reanalyse- und Lebensdauermodellen.

Insgesamt belegt die Untersuchung, dass die Kombination aus geeigneter Sensorik, sorgfältiger Installation, präziser Systemarchitektur und datenbasierter Kompensation eine Messgenauigkeit bereitstellt, die den Anforderungen der geplanten Online-Lebensdauerermittlung vollumfänglich entspricht.

## 3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im abgeschlossenen Teilvorhaben ergeben sich die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises vor allem aus der Verteilung der eingesetzten Personalressourcen sowie den tatsächlich verbrauchten Sachmitteln. Bei den Personalkosten zeigt sich, dass sich der überwiegende Aufwand auf die Kernarbeiten der Sensor- und Messkettenentwicklung, die Validierung am Prüfstand und die Installation an den beiden realen Windenergieanlagen konzentrierte. Ein relevanter Anteil entfiel zudem auf die Unsicherheitsanalyse und die darauf basierende Ableitung von Kompensationsstrategien. Durch den Wegfall der ursprünglich geplanten dritten Validierungsanlage sowie prozessbedingte Effizienzgewinne konnte ein Teil des zunächst vorgesehenen Aufwands reduziert werden, sodass sich die geleisteten Stunden über die Arbeitspakete verteilt niedriger darstellten als ursprünglich kalkuliert – ohne Einschränkungen im technischen Ergebnis.

Bei den Materialkosten zeigt der Abschluss des Projekts einen deutlichen Abstand zur kalkulierten Obergrenze. Von den geplanten ca. 112.000 € wurden lediglich rund 50.000 € tatsächlich verbaut. Dieser Betrag umfasst insbesondere Sensorik, IO-Link-Module, Elektronikbaugruppen, vergossene Messinseln, Klebe- und Montagematerialien sowie Prüfstands- und Prototypenkomponenten. Der verbleibende Restbedarf lag zum Projektende nur noch bei etwa 5.000 €, beispielsweise für kleinere Ergänzungen oder

Ersatzmaterialien, die im Validierungsprozess notwendig wurden. Kosten für zusätzliche Infrastruktur wie Cloud- oder Mobilfunkdienste wurden nicht abgerechnet und sind daher im Nachweis nicht enthalten.

## 4. Notwendigkeit und Angemessenheit

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um eine realitätsnahe und zugleich robuste Sensoriklösung zu entwickeln, die den Anforderungen komplexer Betriebsbedingungen standhält. Durch die umfassende Absicherung der gesamten Messkette unter realen Einsatzbedingungen konnten sowohl strukturelle als auch umgebungsbedingte Einflussgrößen präzise bewertet werden. Gleichzeitig ermöglichte die systematische Quantifizierung aller relevanten Unsicherheitsbeiträge – von sensorinternen Effekten über montagebedingte Einflüsse bis hin zu systemtechnischen Faktoren – eine belastbare Einschätzung der Messgenauigkeit und Stabilität. Auf dieser Grundlage entsteht eine solide Basis für industrielle Anwendungen, da die erzielten Erkenntnisse unmittelbar in robuste Kalibrier-, Kompensations- und Integrationsstrategien überführt werden können. Damit tragen die Arbeiten entscheidend dazu bei, eine verwertbare, industrietaugliche Gesamtlösung zu schaffen, die sowohl technisch skalierbar als auch langfristig zuverlässig betreibbar ist.

## 5. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung

### 5.1 Technischer Nutzen

Das Teilvorhaben liefert einen substantziellen technischen Beitrag zur Lebensdauerüberwachung von Windenergieanlagen. Mit den entwickelten und im Feld erprobten Sensor- und Installationskonzepten stehen robuste, industrietaugliche Lösungen zur Messung von Dehnung, Torsion und strukturellem Rauschen zur Verfügung. Die durchgängige IO-Link-Messkette erlaubt eine standardisierte, fehlerresiliente und skalierbare Datenerfassung, die sich unmittelbar in unterschiedliche Turbinenplattformen übertragen lässt. Ergänzt wird dies durch belastbare, experimentell validierte Unsicherheitsmodelle, welche die Qualität der Messgrößen quantifizierbar machen und damit eine zentrale Voraussetzung für die Online-Lebensdauerermittlung schaffen. Diese Ergebnisse sind technisch einsatzbereit und bilden eine valide Grundlage für zukünftige Monitoring- und Lebensdauerbewertungssysteme im industriellen Umfeld.

## 5.2 Wirtschaftliche Verwertung

Für die wirtschaftliche Nutzung ergeben sich mehrere Ansatzpunkte: Auf Produktebene stehen erprobte Dehnungs- und Strukturschallsensoren bereit, die die Anforderungen an Genauigkeit, Temperaturverhalten und Langzeitstabilität erfüllen. Diese Sensoren bilden die Basis für potenzielle Serienprodukte und können als Module in OEM-Plattformen oder Retrofit-Lösungen für Bestandsanlagen integriert werden. Die im Projekt entstandene Systemarchitektur – bestehend aus Sensorik, IO-Link-Komponenten, Steuerungstechnik und Datenauswertung – ist modular angelegt und ermöglicht skalierbare Monitoringlösungen, die sowohl Betreiber als auch Hersteller direkt nutzen können.

Darüber hinaus eröffnet das Teilvorhaben die Möglichkeit, vollständige Dienstleistungen für Betreiber bereitzustellen, die von der Installation der Sensorik über die Datenerfassung bis hin zur Analyse und Visualisierung reichen. Die im Verbund generierten Messdaten leisten zudem einen wichtigen Beitrag zur Validierung von Reanalyse-, Modellbildungs- und Simulationsverfahren und stärken damit die wissenschaftliche und wirtschaftliche Grundlage zukünftiger Lebensdaueroptimierungsstrategien. Damit trägt das Teilvorhaben sowohl zur Verlängerung der Restlebensdauer bestehender Anlagen als auch zur Entwicklung neuer, datengestützter Geschäftsmodelle im Umfeld der Windenergiendiagnostik bei.

## 6. Fortschritt bei anderen Stellen

Es wurden keine externen Entwicklungen bekannt, die die Zielsetzung verändert hätten. Das Thema Lebensdauerüberwachung wird weiterhin bestätigt.

## 7. Veröffentlichungen

Die Ergebnisse wurden im Verbund intern kommuniziert (Workshops, Präsentationen, Berichte). Externe Veröffentlichungen sind nicht geplant.

## Anlagenverzeichnis

### 1. Umfirmierung