

Schlussbericht



Verbundvorhaben inVETra

Intelligente Verbindungselemente in Tragstrukturen und Antriebsstrang von Windkraftkonvertern

Teilvorhaben

Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Sensoriksystems für Verbindungselemente in Windenergiekonvertern (FKZ 03EE3042D)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Verbundvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und unter der Trägerschaft des Projektträgers Jülich gefördert.

Förderkennzeichen: 03EE3042D

Vorhaben: inVETra – Intelligente Verbindungselemente in Tragstrukturen und Antriebsstrang von Windenergiekonvertern

Laufzeit: 01.09.2021 – 31.08.2024

Ausführende Stelle: Sensorise GmbH, Fahrenheitstraße 1, 28359 Bremen

Berichtersteller: Dr. Cord Winkelmann (Projektleitung)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis..... | 3 |
| Kurzdarstellung | 5 |
| Sachbericht | 7 |
| Aufgabenstellung | 7 |
| Voraussetzungen des Vorhabens | 9 |
| Planung und Ablauf des Vorhabens..... | 11 |
| Wissenschaftlich-Technischer Stand | 12 |
| Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 15 |
| Eingehende Darstellung | 16 |
| Gesamtüberblick über die technischen Arbeiten und AP-Einordnung | 16 |
| Entwicklung der Sensortechnologie | 17 |
| Ausgangslage und erste Prototypengeneration | 17 |
| Weiterentwicklung der Sensorgeometrien | 18 |
| Elektrische Architektur und Kontaktierung | 19 |
| Schnittstellen- und Buchsendesign..... | 19 |
| Varianten des Sensorsystems | 20 |
| Fertigungsprozess, Qualitätssicherung und Reproduzierbarkeit | 21 |
| Aufbau der Fertigungskette | 21 |
| Prozessrisiken und Verbesserungsmaßnahmen | 21 |
| Auswirkungen der veränderten Produktionspartnerlandschaft..... | 22 |
| Prüfstandsvalidierung und systematische Erprobung..... | 23 |
| Vorbereitung und Kalibrierung | 23 |

| | |
|---|----|
| Prüfstand BEAT6.1 – Rotorblattlager..... | 24 |
| Skaliertes Wellenbiegeprüfstand-Setup..... | 26 |
| Langzeitversuche und dynamische Testprofile | 29 |
| Zusammenführung der technischen Ergebnisse und Ableitung von Verbesserungen | 30 |
| Ausblick und Verwertung | 31 |

Kurzdarstellung

Im Verbundprojekt inVETra wurde ein neuartiges System zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung mechanisch hochbelasteter Verbindungselemente in Windenergieanlagen entwickelt. Im Zentrum des Teilvorhabens der Sensorise GmbH stand die Entwicklung einer Sensorschraube, die auf genormten Verbindungselementen basiert und um ein miniaturisiertes, rein passives Sensorelement zur Erfassung mechanischer Lasten erweitert wurde. Das Sensorprinzip beruht auf der Erfassung von Dehnung und damit einhergehenden Querschnittsänderungen des Schraubenschafts, wobei die Messgröße über einen in den Gewindegrund eingebrachten, elektrisch leitfähigen Sensordraht oder über vollständig in die Klemmlänge integrierte Dehnungselemente ermittelt wird. Die vollständige Integration des Sensorelements in industriell gefertigte Verbindungselemente ermöglicht eine robuste und dauerhaltungs-feste Ausführung, die für reale Einsatzbedingungen in Windenergieanlagen ausgelegt ist.

Die Sensorschraube bildet die Grundlage eines übergeordneten Condition Monitoring Systems, das im Verbund mit der Ruhr-Universität Bochum, dem Fraunhofer IWES und weiteren Industriepartnern entwickelt wurde. Das Gesamtsystem umfasst die sensorische Erfassung lokaler Belastungen an zentralen Schnittstellen des Rotorblattlagers, des Antriebsstranges und weiterer tragender Strukturen sowie die Weiterleitung, Aufbereitung und Auswertung dieser Daten innerhalb eines modellbasierten CM/SHM-Ansatzes. Die Sensorschrauben ergänzen dabei bestehende SCADA-Daten und vibrationsbasierte Systeme um ortsnahe Messinformationen, mit denen sowohl lokale Vorspannungsverluste als auch komplexe Belastungskollektive im Wälzlagerumfeld rekonstruiert werden können.

Das Ziel des Teilvorhabens der Sensorise GmbH bestand in der vollständigen Überführung des Sensor-konzepts aus dem Prototypenstadium in ein produktionsfähiges System mit hoher Reproduzierbarkeit, definierter Datenqualität, industrietauglicher Robustheit und praxisgerechter Integrationsfähigkeit. Hierzu wurde das mechanische Design der Sensorelemente über mehrere Iterationsstufen weiterentwickelt, die elektrische Kontaktierung grundlegend überarbeitet und der Herstellungsprozess systematisch industrialisiert. Parallel dazu erfolgte eine umfassende Validierung des Systems auf Labor- und Großprüfständen am Fraunhofer IWES, bei der die Funktionalität, Belastbarkeit, Signalstabilität und Langzeitrobustheit des Sensorsystems unter realitätsnahen Bedingungen untersucht wurden.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Sensorschrauben sowohl statische als auch dynamische Lasten mit hoher Genauigkeit erfassen können. Ändert sich die Belastung am Prüfstand, folgt der Signalverlauf der sensorischen Schrauben reproduzierbar den aufbrachten Kräften und Momenten, wobei insbesondere die Integration des Sensorelements innerhalb der Klemmlänge zu einer signifikanten Steigerung der Messgenauigkeit führte. Durch diese konstruktive Anpassung konnte die Ausgangsempfindlichkeit von bisher etwa 0,3 mV/V auf bis zu 2 mV/V gesteigert werden. Gleichzeitig wurde die Temperaturabhängigkeit des Signals nahezu vollständig eliminiert, sodass der Einsatz kostengünstigerer 4-poliger Anschlusskabel ermöglicht wurde.

Im Laufe des Projektes hat sich gezeigt, dass eine vollständige Umsetzung des Systems in realen Windenergieanlagen aufgrund der projektübergreifenden zeitlichen Abhängigkeiten und der Notwendigkeit umfangreicher Zertifizierungsprozesse nicht im vorgesehenen Zeitraum möglich war. Stattdessen konzentrierte sich die Validierung auf umfangreiche

Labor- und Prüfstandkampagnen, die eine robuste Bewertung der Leistungsfähigkeit der Sensorik erlaubten. Die Ergebnisse bestätigen die Praxistauglichkeit des Systems und bilden eine belastbare Grundlage für weiterführende Entwicklungen nach Projektende. Darüber hinaus eröffnen sich durch die im Projektverlauf identifizierten zusätzlichen Anwendungsfälle (z. B. Pfannendrehtürme in Stahlwerken, langsam laufende Großwälzlager in Prozessindustrieanlagen) neue wirtschaftliche Perspektiven für die Technologie.

Die Sensorise GmbH konnte das Sensorkonzept erfolgreich in ein marktreifes Produkt überführen, das unter der Bezeichnung S.Bolt XP in drei Varianten zur Verfügung stehen wird. Die Varianten erlauben eine differenzierte Erfassung axialer Kräfte, Biegemomente und Torsionsbelastungen. Das Teilvorhaben stellt damit einen zentralen Beitrag zur Weiterentwicklung innovativer Zustandsüberwachungskonzepte für hochbelastete Schraubverbindungen dar und unterstützt die Zielsetzung des Energieforschungsprogramms, die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit von Windenergieanlagen und anderen industriellen Großsystemen zu erhöhen.

Sachbericht

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Teilvorhabens der Sensorise GmbH im Verbundprojekt inVETra umfasste die vollständige Entwicklung eines neuartigen Sensorsystems zur Überwachung von Schraubverbindungen in hochbelasteten Baugruppen von Windenergieanlagen. Ziel war es, eine serienfähige Sensorschraube zu entwickeln, die sowohl in Tragstrukturen als auch im Antriebsstrang als integriertes Mess- und Zustandsüberwachungselement eingesetzt werden kann. Im Gegensatz zu bestehenden Systemen, die häufig auf extern montierten Dehnmessstreifen, Beschleunigungssensoren oder komplexen Messketten basieren, sollte das Sensorsystem vollständig in eine genormte Schraubverbindung integriert werden und damit ohne Eingriff in die umgebende Struktur funktionieren. Hierdurch sollte ein Sensor entstehen, der bei identischer Form und Abmessungen die Funktion eines Verbindungselementes übernimmt und gleichzeitig als Messwandler für axial wirkende Kräfte, Biegemomente und ergänzend (in weiterentwickelten Varianten) auch Torsionslasten dient.

Die Entwicklung des Sensorsystems umfasste mehrere technische Kernaufgaben. Eine dieser Aufgaben war die konstruktive Auslegung eines Sensorelements, das vollständig in die Geometrie einer Maschinenschraube integrierbar ist, ohne die mechanische Tragfähigkeit des Verbindungselements wesentlich zu reduzieren. Dieses Sensorelement sollte Dehnungen im Bereich des Schraubenschaftes erfassen, die durch Änderungen der axialen Vorspannkraft, durch Setzprozesse, durch dynamische Belastungen oder durch äußere Lasten aus dem Betrieb einer Windenergieanlage verursacht werden. Die Sensorik musste so ausgelegt sein, dass sie sowohl quasi-statische Laständerungen (z. B. Vorspannungsverluste über lange Zeiträume), als auch hochdynamische Wechselbelastungen (z. B. Rotorblattdurchlauf, Biegemomenttransienten, turbulente Windprofile) zuverlässig erfassen kann.

Eine weitere wesentliche Aufgabe bestand darin, geeignete Fertigungsprozesse zu entwickeln, die eine reproduzierbare Herstellung der Sensorik erlauben. Die ursprünglichen, im Rahmen früherer Arbeiten entstandenen Sensorschrauben-Prototypen basierten auf weitgehend manuellen Fertigungsprozessen und wiesen Limitierungen hinsichtlich Robustheit, Reproduzierbarkeit und industrieller Tauglichkeit auf. Ziel des Vorhabens war es daher, einen industriell skalierbaren Prozess zu definieren, bei dem die mechanische Bearbeitung, die Integration des Sensordrahts oder der miniaturisierten Dehnungselemente, die elektrische Kontaktierung und die anschließende Gehäuseintegration inklusive der Anschlussbuchse kontrolliert, dokumentiert und prozesssicher durchgeführt werden können. Hierzu mussten Fertigungsparameter, Materialpaarungen, Toleranzen und Verarbeitungsfolgen detailliert untersucht und teilweise neu entwickelt werden.

Die Sensorise GmbH hatte darüber hinaus die Aufgabe, ein elektrisches Schnittstellenkonzept zu entwickeln, das die Besonderheiten des Einsatzortes berücksichtigt. Schraubverbindungen in Windenergieanlagen befinden sich häufig in beengten und schwer zugänglichen Bereichen, sind Vibrationen, Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit, Korrosion und hohen Stillstandskräften ausgesetzt. Die Kontaktierung des Sensorelements über eine Anschlussbuchse musste daher mechanisch robust, EMV-arm und langfristig stabil ausgeführt werden. Gleichzeitig sollte die Anschlussgeometrie so gewählt werden, dass

Standardkomponenten wie M12-Anschlusskabel verwendet werden können, um ein modulares, kompatibles System zu schaffen. Die Entwicklung der passenden Leiterplatten, Steckverbinder, Lötstellen und Dichtungskonzepte gehörte damit ebenfalls zur Aufgabenstellung.

Ein weiterer zentraler Aspekt des Projektes bestand darin, die Sensorschrauben für unterschiedliche Nenngrößen zu realisieren, die real in Windenergieanlagen verwendet werden. Die Aufgabenstellung umfasste daher sowohl großformatige Schrauben für Rotorblatt- und Hauptwellenanwendungen (z. B. M42 Dehnschaftbolzen) als auch kleinere Dimensionen wie M20, die in den modularen Prüfstandsstrukturen am Fraunhofer IWES eingesetzt wurden. Die konstruktive Umsetzung musste jeweils an die spezifischen Anforderungen der Schraubgeometrie angepasst werden, insbesondere im Hinblick auf Klemmlänge, statischen Querschnitt, zulässige Bohrungen, verfügbare Gewindetoleranzen und Platzverhältnisse für die Integration der Sensorik.

Zusätzlich zur mechanischen, elektrischen und fertigungstechnischen Entwicklung musste Sensorise die Signalverarbeitungskette spezifizieren. Die Sensorschrauben sollten Rohsignale über eine definierte Messelektronik bereitstellen, die eine ausreichende Abtastrate, Bandbreite und Messgenauigkeit ermöglicht. Ziel war eine Messkette, die sowohl in Prüfstandsversuchen als auch in realen Windenergieanlagen betrieben werden kann und unabhängig von der spezifischen Prüfstandselektronik skaliert. Sensorise war dafür verantwortlich, Anforderungen aus dem Condition Monitoring System (AP 3 und AP 5) zu berücksichtigen und die Sensorausgänge entsprechend auszugestalten.

Die Aufgabenstellung umfasste außerdem die Bereitstellung von Sensorschrauben für verschiedene Prüfsumgebungen beim Fraunhofer IWES. Diese Schrauben dienten als zentrales Messmittel für die Validierung des Gesamtsystems und mussten mechanisch und elektrisch einsatzbereit geliefert werden. Für die Prüfstandskampagnen wurden mehrere Generationen von Schrauben entwickelt, gefertigt und iterativ verbessert, um sowohl die Anforderungen aus den numerischen Modellen als auch die Beobachtungen aus den realen Messungen zu berücksichtigen. Dies beinhaltete die Unterstützung bei Montage, Inbetriebnahme, Fehlersuche und Anpassung der Sensorik während der Versuchsphasen.

Schließlich bestand ein wesentlicher Teil der Aufgabenstellung darin, die Ergebnisse der Sensorentwicklung so aufzubereiten, dass sie in ein marktnahes Produkt überführt werden können. Dazu gehörte die Entwicklung der späteren Produktvarianten S.Bolt XA, XAB und XAT, die unterschiedliche Lastarten erfassen können. Die Aufgabenstellung beinhaltete deshalb auch die Definition der mechanischen Belastungsgrenzen, die Kalibrierverfahren, die Spezifikation der Anschlusskabel, die Bewertung möglicher Halbleiterkomponenten, die Schnittstelle zu externen CMS-Systemen, die Vorbereitung der Serienfertigung und die Identifikation geeigneter Anwendungsfelder über die Windenergie hinaus.

Voraussetzungen des Vorhabens

Das Teilvorhaben der Sensorise GmbH im Verbundprojekt inVETra baute auf mehreren technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen auf, die sowohl den Projektverlauf als auch die Zieldefinition maßgeblich beeinflusst haben. Ausgangspunkt war ein bereits im Rahmen früherer Arbeiten entwickeltes Sensorkonzept, bei dem genormte Schrauben als Sensorträger dienen und ein passives Sensorelement zur Erfassung der Dehnung im Gewinde- bzw. Schaftbereich integriert wird. Dieses Konzept war durch ein Patent geschützt, für das Sensorise eine Lizenz hält, und lag zu Projektbeginn in Form handgefertigter Prototypen vor, die in begrenztem Umfang unter Laborbedingungen getestet worden waren.

Zum Start des Verbundvorhabens am 01.09.2021 war die Sensorschraube damit zwar prinzipiell funktionsfähig, erfüllte jedoch noch nicht die Anforderungen an eine seriennahe, industrietaugliche Lösung für den Einsatz in Windenergieanlagen. Insbesondere fehlten robuste, dokumentierte Herstellprozesse mit reproduzierbarer Qualität, qualifizierte Nachweise zur Dauerfestigkeit unter praxisnahen Lasten, validierte Kalibrier- und Prüfmethode sowie eine systematische Bewertung der Messgenauigkeit unter realitätsnahen Umgebungsbedingungen. Die elektrische Kontaktierung, bestehend aus Sensordraht, Lötstellen, Leiterplattenlayout und Anschlussbuchse, beruhte auf prototypischen Aufbauten und war nicht für wiederholte Montage- und Wartungsvorgänge im rauen Einsatzumfeld einer Windenergieanlage ausgelegt.

Organisatorisch war das Vorhaben in ein Verbundprojekt mit mehreren Industrie- und Forschungspartnern eingebettet. Die Ruhr-Universität Bochum (RUB), Institut für Energiesystemtechnik und Leistungselektronik, übernahm die Konsortialführung und verantwortete die Konzeptionierung und Umsetzung des Condition Monitoring Systems sowie die Entwicklung modellbasierter Verfahren zur Systemzustandsdiagnose und prädiktiven Instandhaltung. Das Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES stellte Großprüfstände, insbesondere den Blattlagerprüfstand BEAT6.1 und einen skalierten Wellenbiegeprüfstand, für die Integration, Erprobung und Validierung der Sensorschrauben zur Verfügung und erarbeitete in enger Abstimmung mit den Partnern einen Anforderungskatalog an die intelligenten Verbindungselemente. PEINER Umformtechnik GmbH brachte ihre Expertise in der Schraubenfertigung ein; Sensorise war im Konsortium verantwortlich für die Entwicklung, Fertigung und Weiterentwicklung der sensorischen Schrauben einschließlich der zugehörigen Messkette.

Für Sensorise als kleines Unternehmen mit begrenzten F&E-Ressourcen ergab sich daraus eine spezifische Ausgangssituation: Einerseits bestand bereits tiefgehendes Know-how in der Integration passiver Sensorelemente in hochfeste Stähle, in der Auslegung und Auswertung von Dehnungsmessungen und in der Datenübertragung an nachgelagerte Systeme. Dieses Know-how war unter anderem durch die Entwicklung sensorischer Schrauben für chemische Anker entstanden, bei denen ein im Gewindegrund eingebetteter Draht zur Überwachung des Verbundes zwischen Schraube und Epoxidharz genutzt wird. Andererseits waren die Anforderungen an eine sensorische Schraube für Windenergieanlagen deutlich höher als in bisherigen Anwendungen. Es mussten neben der Messfunktion vor allem die mechanische Tragfähigkeit entsprechend einschlägiger Normen, die Korrosionsbeständigkeit, die Eignung für Offshore- und Onshore-Bedingungen, die EMV-Verträglichkeit und die Kompatibilität mit vorhandenen Montageverfahren (Drehmoment- und Streckverfahren) erfüllt werden.

Eine weitere Voraussetzung ergab sich aus der geplanten Validierungsstrategie im Verbund. Die Prüfstandsversuche am Fraunhofer IWES basieren auf großskaligen, realitätsnahen Lastkollektiven, bei denen Rotorblattlager und Hauptwellen mit komplexen Kombinationen aus Axial-, Radialkräften und Biegemomenten beaufschlagt werden. Dies setzte voraus, dass Sensorise Sensorschrauben in den für diese Prüfstände relevanten Abmessungen bereitstellen konnte, insbesondere M42-Dehnschaftbolzen für die Blattlagerflansche sowie M20-Schrauben und Stehbolzen für Flanschverbindungen im skalierten Wellenbiegeprüfstand. Die Gewindegeometrien, Flanschabmessungen und Klemmlängen waren zu Projektbeginn durch bestehende Prüfstandsaufbauten weitgehend vorgegeben und ließen nur begrenzte Freiheiten für zusätzliche Bohrungen, Freistiche oder vergrößerte Kopfabmessungen. Die Sensorelemente mussten daher so integriert werden, dass Kerbwirkungen minimiert, die Spannungsquerschnitte erhalten und die normgerechten Festigkeitswerte der Verbindungselemente eingehalten werden.

Auf der infrastrukturellen Seite standen Sensorise zum Projektstart ein eigener Laborbereich für Sensorintegration und Elektronikmontage, Messplätze für elektrische Charakterisierung, grundlegende mechanische Prüfmöglichkeiten sowie Software-Werkzeuge für Datenerfassung und -auswertung zur Verfügung. Hochbelastbare mechanische Prüfungen unter Voll-Lastkollektiven, Lebensdauertests und komplexe Validierungsszenarien waren hingegen bewusst in die Verantwortung der Forschungspartner verlagert worden, um deren Prüftechnik und Systemwissen gezielt zu nutzen. Dadurch ergab sich eine arbeitsteilige Voraussetzung: Sensorise konzentriert sich auf Design, Aufbau, Fertigung, Kalibrierung und erste Funktionsnachweise der Sensorschrauben, während robuste Validierungen unter Betriebsbedingungen mit bekannten Schnittlasten und ergänzender Sensorik (z. B. DMS-Referenzschrauben, zusätzliche Lager- und Strukturmessungen) an den Prüfständen von Fraunhofer IWES und RUB durchgeführt werden.

Rahmengebend für das Vorhaben waren darüber hinaus die förderrechtlichen und programmatischen Voraussetzungen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung und der Nebenbestimmungen NKBF 98 des BMWK. Das Teilvorhaben musste innerhalb des vorgegebenen Bewilligungszeitraums von 01.09.2021 bis 31.08.2024 durchgeführt werden, die Zuwendung war zweckgebunden auf die Entwicklung der Sensorschraube vom Prototyp zum marktnahen Produkt ausgerichtet und die Verwertung der Ergebnisse war im vorab eingereichten Verwertungsplan zu skizzieren und im Projektverlauf fortzuschreiben. Dies definierte die zeitlichen, budgetären und inhaltlichen Randbedingungen, innerhalb derer die technischen Entwicklungsarbeiten von Sensorise zu planen und abzustimmen waren.

Schließlich war die Ausgangslage im Marktumfeld ein weiterer bestimmender Faktor. Zum Projektstart befanden sich Condition-Monitoring-Systeme für Windenergieanlagen zwar bereits im breiten Einsatz, fokussierten jedoch überwiegend auf vibrationsbasierte Methoden und SCADA-gestützte Zustandsüberwachung. Spezifische Lösungen zur direkten, hochdynamischen Überwachung von Vorspannkräften und Lastkollektiven in Schraubverbindungen von Blattlagern und Antriebsstrangkomponenten waren nur in Ansätzen verfügbar. Gleichzeitig war absehbar, dass steigende Anlagenleistungen, zunehmende Offshore-Installationen, verlängerte Betriebsdauern und ein wachsender Kostendruck auf Betrieb und Instandhaltung den Bedarf an robusten, integrierten Messlösungen erhöhen würden. Diese Kombination aus vorhandenem Prototypenkonzept, etablierten Prüfstands- und Modellierungsressourcen im Verbund sowie einem klar erkennbaren Bedarf im Markt bildete die inhaltliche Voraussetzung und Motivation für das hier beschriebene Teilvorhaben von Sensorise.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und der Ablauf des Teilvorhabens der Sensorise GmbH im Verbundprojekt inVETra waren eng an die Struktur des Gesamtprojekts und seine Arbeitspakete angelehnt. Die Projektdauer betrug 36 Monate, beginnend am 01.09.2021 und endend am 31.08.2024. In dieser Zeit sollte die Sensorschraube ausgehend von einem funktionsfähigen Prototypen zu einem technisch belastbaren, reproduzierbarem und für den Einsatz in Windenergieanlagen geeigneten System weiterentwickelt werden. Die Projektplanung war damit bewusst iterativ aufgebaut: Entwicklungsphasen, mechanische Anpassungen, Fertigungsversuche und elektrische Optimierungen sollten jeweils durch Validierungsschritte an Labor- und Großprüfständen begleitet werden, um den Entwicklungsfortschritt kontinuierlich an realitätsnahen Einsatzbedingungen zu spiegeln.

Zu Beginn des Vorhabens wurden die grundlegenden Anforderungen an die Sensorschraube und ihre Messfunktionalität strukturiert erfasst. Dazu gehörten die mechanischen Randbedingungen der vorgesehenen Schraubengrößen, die im Projekt relevant waren: M42-Dehnschaftbolzen für den Einsatz im Rotorblattlager und M20-Schrauben bzw. Stehbolzen für die Flansche im skalierten Wellenbiegeprüfstand. Diese Anforderungen wurden auf Basis der Vorhabenbeschreibung und in Abstimmung mit den Prüfungen des Fraunhofer IWES festgelegt.

Der erste Projektabschnitt konzentrierte sich auf die Weiterentwicklung der bestehenden Sensorschrauben-Prototypen. Entscheidende Arbeitsschritte waren die konstruktive Überarbeitung der Schraubengeometrie zur Integration des Sensorelements, die Definition eines Bearbeitungs- und Montageprozesses sowie die Entwicklung eines elektrischen Anschlusskonzepts, das unter mechanisch anspruchsvollen Einsatzbedingungen robust funktioniert. Hierzu gehörte auch die Umstellung von M9- auf M12-Buchsenschnittstellen, was eine höhere mechanische Robustheit und eine größere Auswahl industrietauglicher Kabel ermöglichte. Dieser Entwicklungsschritt wurde bereits früh im Projekt vollzogen, nachdem erste Tests zeigten, dass die bisherigen M9-Steckverbinder gegenüber mechanischen Einflüssen, insbesondere bei Montage und Betrieb, empfindlich waren.

Parallel zur mechanischen und elektrischen Entwicklung wurde ein halbautomatisierter Fertigungsprozess entworfen, dokumentiert und in einer prototypischen Prozesskette umgesetzt. Dieser umfasste die sensorische Vorbereitung der Schraubenrohlinge, die Montage des Sensorelements, die Integration der Anschlussbuchse, das Verkleben oder Vergießen der Sensorkomponenten sowie die abschließende Kalibrierung und Prüfung der Schrauben. Obwohl die vollständige Automatisierung aufgrund externer Faktoren (u. a. Produktionsstilllegung der Peiner Umformtechnik GmbH als vorgesehenem Fertigungspartner) nicht umgesetzt werden konnte, entstand ein detailliertes Fertigungskonzept, das eine zuverlässige manuelle oder teilautomatisierte Herstellung erlaubte.

Ein zentraler Bestandteil des Projektverlaufs war die schrittweise Validierung an verschiedenen Prüfständen des Fraunhofer IWES. Für diese Validierung wurden Sensorschrauben in mehreren Ausbaustufen gefertigt und iterativ verbessert. Die erste Serie von M42-Dehnschaftbolzen wurde am BEAT6.1 Prüfstand in eine realitätsnahe Blattlagerflanschverbindung integriert. Dort wurden Axial- und Biegemomentversuche durchgeführt, die grundlegende Erkenntnisse zur Signalqualität, zum Einfluss der Vorspannkraft, zur Drift des Messsignals und zur mechanischen Integrität der sensorischen

Schrauben lieferten. Die Ergebnisse führten direkt zu Optimierungen der Steckverbinder, der Kabelabschirmung und der Sensorelementpositionierung.

Da der ursprünglich geplante vollmaßstäbliche Wellenprüfstand aufgrund eines Schadens an der Hauptwelle nicht zur Verfügung stand, wurde im Projektverlauf eine alternative Prüfstrategie entwickelt. Stattdessen wurde ein skaliertes Wellenbiegeprüfstand eingesetzt, der es ermöglichte, die Sensorschrauben unter rotationsinduzierten Belastungen und dynamischen Biegemomenten zu testen. Hierfür wurden M20-Schrauben einer überarbeiteten Sensorgeometrie gefertigt, wobei sich zeigte, dass kleinere Schraubendimensionen besondere Anforderungen an die Isolation und Kontaktierung des Sensordrahts stellen. Die Versuche am skalierten Prüfstand lieferten wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der Sensorgeometrie, insbesondere hinsichtlich der Robustheit der Leiterführung und der geeigneten Positionierung des Sensorelements.

Die kontinuierliche Abstimmung mit den Partnern RUB und IWES war dabei ein wesentlicher Bestandteil des Ablaufplans. Die Anforderungen der CMS-Entwicklung der RUB mussten mit der verfügbaren Sensorcharakteristik abgeglichen werden, während die Validierung am IWES realitätsnahe Rückmeldungen zu Messqualität, Signaldrift und mechanischer Stabilität lieferte. Die Schnittstellen zwischen den Arbeitspaketen waren so definiert, dass Messdaten, Modellierungsanforderungen und mechanische Anpassungen zyklisch in den Entwicklungsprozess zurückgeführt werden konnten.

Gegen Ende des Vorhabens wurden die finalen Sensorgeometrien in mehreren Varianten (axial, axial plus Biegung, axial plus Torsion) konsolidiert. Die validierten Sensorschrauben wurden abschließend als Grundlage für die spätere Produktlinie S.Bolt XP definiert und für die weitere Verwertung außerhalb des Projekts vorbereitet.

Wissenschaftlich-Technischer Stand

Condition Monitoring Systeme zur Überwachung von Windenergieanlagen sind seit vielen Jahren Gegenstand intensiver Forschung und werden in der Praxis in unterschiedlichsten Ausprägungen eingesetzt. Im Antriebsstrang großer On- und Offshore-Anlagen gehören vibrationsbasierte Systeme und SCADA-gestützte Auswertungen inzwischen zum etablierten Stand der Technik. Üblicherweise werden an Getrieben, Lagern und Generatoren Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt, deren Signale im Frequenzbereich analysiert werden, um charakteristische Schädigungsmuster, Unwuchten, Lagerdefekte oder Getriebebeschäden frühzeitig zu erkennen. Ergänzend kommen Temperatur- und Ölanalysen zum Einsatz, um Schmierzustände, Partikelgehalte und Alterungserscheinungen der Schmierstoffe zu bewerten. Diese Systeme haben sich insbesondere bei Großanlagen und im Offshore-Bereich bewährt, sind aber auf bestimmte Komponenten fokussiert und liefern meist keine direkte Information über die Lastverteilung in tragenden Schraubverbindungen und Großlagern.

Im Bereich der Tragstrukturen und Rotorblattlager wird der Begriff Structural Health Monitoring verwendet, um Zustandsüberwachungskonzepte zu beschreiben, die auf die Erfassung von Dehnungen, Beschleunigungen, Schwingformen oder Verlagerungen abzielen. Hier kommen beispielsweise Dehnungsmessstreifen an ausgewählten Strukturpunkten, faseroptische Sensoren zur Dehnungsmessung über größere Längen, Inklinometer, Wegaufnehmer oder optische Verfahren zum Einsatz. Ziel ist es, Veränderungen der Steifigkeit, Rissbildung oder Setzvorgänge in Turm, Rotorblättern oder

Lagerstrukturen zu detektieren und daraus Rückschlüsse auf den Zustand und die Restlebensdauer abzuleiten. Trotz signifikanter Fortschritte erschweren die komplexen Lastpfade, wechselnde Umweltbedingungen und die hohe Variabilität der Betriebssituationen eine eindeutige Interpretation der Signale. Zudem erfordert die Installation solcher Systeme häufig zusätzliche Komponenten, Verkabelung und bauliche Anpassungen, die Aufwand und Kosten erhöhen.

SCADA-Systeme stellen eine weitere wichtige Datenquelle für die Zustandsüberwachung dar. Sie erfassen kontinuierlich Betriebsgrößen wie elektrische Leistung, Drehzahl, Pitch-Winkel, Generatorströme, Spannungen, Temperaturen sowie Windgeschwindigkeit und Richtung. Diese Daten werden in der Regel in Zeitscheiben von 10 Minuten gemittelt und zur Trendanalyse verwendet. Aus dem zeitlichen Verlauf dieser Signale lassen sich Anomalien und langfristige Veränderungen erkennen, die auf Schädigungsprozesse hindeuten können. Aufgrund der niedrigen zeitlichen Auflösung und der Mittelung über variable Betriebszustände ist die Aussagekraft von SCADA-Daten für die direkte Abbildung schnell wechselnder mechanischer Belastungen und lokaler Versagensmechanismen begrenzt. SCADA-Daten eignen sich vor allem zur Ergänzung höher aufgelöster Sensorsignale im Rahmen von Data Fusion-Ansätzen, bei denen Informationen aus mehreren Quellen kombiniert werden.

Auf dem Markt existiert mittlerweile eine Vielzahl kommerzieller Condition-Monitoring- und SHM-Systeme für Windenergieanlagen. Dazu zählen Lösungen zur Rotorblattüberwachung, Retrofit-Pakete für Antriebsstränge sowie mobile Diagnosesysteme für Kurzzeitmessungen. Verschiedene Hersteller bieten Systeme an, die speziell auf die Überwachung von Blattlagern oder Turmstrukturen ausgerichtet sind. Die eingesetzten Technologien reichen von klassischen Dehnungsmessstreifen über faseroptische Sensorik bis hin zu akustischen Emissionssystemen und thermografischen Verfahren. Die Systeme unterscheiden sich in ihrer Integrationskomplexität, der erforderlichen Infrastruktur, den Kosten und der Eignung für Neu- oder Bestandsanlagen. Gemeinsam ist ihnen, dass sie üblicherweise zusätzliche Sensorik an Struktur oder Komponenten anbringen und nicht die ohnehin vorhandenen Verbindungselemente als Sensorträger nutzen.

Speziell für Schraubverbindungen existieren bereits verschiedene Ansätze zur Zustandsüberwachung, beispielsweise Systeme zur Überwachung des Anzugsdrehmoments, Sensorik zur Detektion von Bolzenbrüchen oder Lösungen zur Messung von Klemmkraftveränderungen über externe Dehnungsmessstreifen. Einige Hersteller bieten Schrauben mit integrierten Dehnungsmessstreifen an, bei denen Sensoren auf dem Schaft oder unter dem Schraubenkopf appliziert werden. Typischerweise erfordern diese Lösungen jedoch spezielle Schraubengeometrien, zusätzliche Verkapselungen oder bieten nur eingeschränkte Möglichkeiten zur Integration in bestehende Serienkomponenten. Patentrecherchen im Vorfeld des Projekts zeigten zwar eine Reihe von Schutzrechten im Bereich Condition Monitoring und Structural Health Monitoring von Windenergieanlagen, aber keine Anmeldung, die den Ansatz verfolgt, genormte Schrauben in ihrer Geometrie weitgehend unverändert als Träger eines integrierten Sensorelements zu nutzen und diese im Rahmen eines übergreifenden CMS/SHM-Konzeptes systematisch auszuwerten.

Ein etablierter Schwerpunkt aktueller Forschung ist die modellbasierte Zustandsdiagnose, bei der Messdaten aus der Anlage mit Simulationsmodellen verknüpft werden, um Lasten, Zustände oder Schäden zu rekonstruieren. Hierzu werden Finite-Elemente-Modelle, Mehrkörpersimulationen und reduzierte Ordnungsmodelle eingesetzt, um aus gemessenen Verformungen, Beschleunigungen oder Schnittlasten auf nicht direkt messbare Größen wie

Lagerkontaktkräfte, Spannungsverteilungen oder Rissfortschritt zu schließen. Das Fraunhofer IWES und andere Forschungseinrichtungen haben in diesem Kontext umfassende FE-Modelle von Blattlagern, Hauptwellen und Flanschverbindungen entwickelt, die eine quantitative Analyse der Lastverteilungen und der resultierenden Schraubenkräfte erlauben. In Kombination mit realitätsnahen Prüfstandsversuchen lassen sich damit Korrelationen zwischen äußeren Lasten, internen Lagerlasten und Schraubenkraftverläufen untersuchen.

Vor diesem Hintergrund setzt das im Rahmen von inVETra entwickelte Sensorschraubensystem an einer Lücke zwischen bestehenden CMS/SHM-Lösungen und den Anforderungen an eine direkte, ortsnahe Erfassung von Vorspannkraft- und Laständerungen in Verbindungselementen an. Die Kernidee besteht darin, Schraubverbindungen als ohnehin vorhandene, lasttragende Elemente als Messpunkte zu instrumentieren, ohne die umgebende Struktur wesentlich zu modifizieren. Dadurch kann die Sensorschraube als standardkonforme, normgerechte Verbindung eingesetzt werden, die zusätzlich hochauflösende Messdaten zur Verfügung stellt. In Verbindung mit den modellbasierten Ansätzen im Verbundprojekt können die gemessenen Schraubenkräfte zur Rekonstruktion von Schnittlasten am Blattlager, zur Bewertung von Lastkollektiven und für die Abschätzung der Lebensdauer verwendet werden.

Die ursprünglich von Sensorise entwickelte Sensorschraube nutzte einen in den Gewindegrund eingelegten, elektrisch leitfähigen Draht, dessen Widerstandsänderung mit der Dehnung der Schraube korreliert. Im Rahmen von inVETra wurde dieses Prinzip weiterentwickelt und durch neue Sensorgeometrien ergänzt, bei denen das Sensorelement vollständig innerhalb der Klemmlänge angeordnet wird. Hierdurch konnte die Empfindlichkeit deutlich erhöht und gleichzeitig eine nahezu vollständige Temperaturkompensation erreicht werden. Die Signalverstärkung von etwa 0,3 mV/V auf bis zu 2 mV/V und die reduzierte Abhängigkeit von Umgebungstemperaturen stellen gegenüber dem ursprünglichen Konzept einen signifikanten Fortschritt dar und erleichtern sowohl die Integration in Prüfumgebungen als auch die spätere Nutzung im Feld.

In Kombination mit den Großprüfständen BEAT6.1 und dem skalierten Wellenbiegeprüfstand ergeben sich damit neue Möglichkeiten, Schraubkräfte unter realitätsnahen Lastkollektiven experimentell zu untersuchen. Die im Projekt erarbeiteten FE-Modelle und Prüfstandsszenarien zeigen, dass Schraubenkraftverläufe nicht nur von den aufgebracht Lasten, sondern auch wesentlich von der Steifigkeit der umgebenden Struktur, der Lagergeometrie und der Schraubenanordnung im Lochkreis beeinflusst werden. Die Sensorschrauben liefern dabei direkte Messdaten, die mit Simulationsresultaten verglichen werden können und somit zur Validierung der Modelle beitragen. Gleichzeitig demonstrieren die Versuche, dass sich zyklische Biegemomente und Vorspannungsverluste grundsätzlich über Schraubendehnungen erfassen lassen, auch wenn Signaldrift, Kontaktierungsqualität und Messkettenstabilität noch weiter optimiert werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der wissenschaftlich-technische Stand zum Projektbeginn durch etablierte CMS-Systeme, vielfältige SHM-Ansätze, umfangreiche Modellierungsaktivitäten und erste Schraubensensorlösungen geprägt war. Eine seriennahe, in genormte Schrauben integrierte Sensorik zur Erfassung von Vorspannkraft- und Laständerungen als Bestandteil eines übergeordneten CMS/SHM-Konzepts war zum Zeitpunkt des Projektstarts jedoch nicht verfügbar. Genau an dieser Stelle setzt das Entwicklungsvorhaben der Sensorise GmbH im Rahmen von inVETra an.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wie in der Vorhabenbeschreibung vorgesehen, fanden regelmäßige Konsortialtreffen zwischen allen Projektpartnern (assoziierte- und Forschungspartner) statt, um eine intensive Zusammenarbeit zu ermöglichen. Zusätzlich erfolgte ein Wissens- und Informationsaustausch durch die Teilnahme an internationalen Konferenzen. Sensorise hat in diesem Projekt hauptsächlich mit dem Fraunhofer IWES zusammengearbeitet.

Eingehende Darstellung

Gesamtüberblick über die technischen Arbeiten und AP-Einordnung

Das Teilvorhaben der Sensorise GmbH im Verbundprojekt inVETra umfasste die vollständige Entwicklung, konstruktive Ausgestaltung und prototypische Realisierung eines neuartigen Sensorsystems zur Überwachung mechanisch hochbelasteter Schraubverbindungen in Windenergieanlagen. Die Arbeiten erstreckten sich über mehrere Projektphasen und deckten die gesamte Prozesskette ab: von der Sensorgeometrieentwicklung über die Auslegung der elektrischen Messkette, die Herstellung und Optimierung der Prototypenserien bis zur Bereitstellung und Unterstützung der Prüfstandstests beim Fraunhofer IWES. Die Sensorise-Arbeiten sind inhaltlich insbesondere den Arbeitspaketen AP2 (Entwicklung intelligenter Verbindungselemente) und AP4 (Identifikation und Auslegung geeigneter Messstellen) zuzuordnen, wobei für die Validierung eine enge Zusammenarbeit im Rahmen von AP7 (Validierung an Großprüfständen) und AP8 (Vorbereitung der Feldvalidierung) erfolgte.

Die zentrale Aufgabe von Sensorise bestand in der Entwicklung einer Sensorschraube, die Messinformationen direkt aus dem tragenden Verbindungselement selbst gewinnt, ohne dass externe Sensorik angebracht werden muss. Dies erforderte die vollständige Integration eines passiven Sensorelements in die Geometrie genormter Schrauben sowie die Entwicklung einer geeigneten Kontaktierungs- und Anschlussstruktur, die sowohl mechanisch belastbar als auch langfristig stabil ist. Wesentliche Entwicklungsziele waren die Serienfähigkeit, die Robustheit gegenüber rauen Umgebungsbedingungen, eine erhöhte Messgenauigkeit gegenüber früheren Prototypen sowie die Möglichkeit, verschiedene mechanische Lastkomponenten wie Axialkräfte, Biegemomente und Torsionsbelastungen erfassen zu können. Die damit verbundene technologische Weiterentwicklung umfasste mehrere Iterationsschritte der mechanischen und elektrischen Sensorgeometrie, die Auslegung neuer Anschlussbuchsen, umfassende Optimierungen der Kontaktierungstechnik sowie die Erarbeitung eines detaillierten Fertigungsprozesses mit dokumentierbaren Qualitätsparametern.

Parallel zur Entwicklung der Sensorschrauben definierte Sensorise die Anforderungen an die Messstellen in enger Abstimmung mit den research- und anwendungsorientierten Teilen des Konsortiums. Während Sensorise für das Design, die Fertigung sowie die mechanische und elektrische Ausgestaltung der Schrauben verantwortlich war, lag die Verantwortung für die experimentelle Integration, Kalibrierung und Validierung der Schrauben am Rotorblattlager- und Wellenprüfstand beim Fraunhofer IWES. Das IWES führte sämtliche Prüfstandversuche durch und stellte die realitätsnahen Testumgebungen bereit, einschließlich der hochbelastbaren Hydrauliksysteme, der zustandsbasierten Einspannung der Prüfkörper und der hochaufgelösten Datenerfassungssysteme. Sensorise unterstützte diese Versuchsphasen durch die Bereitstellung der Sensorschrauben, die Vorbereitung der Anschlusskabel, die Begleitung der Montage sowie die Analyse und Interpretation der Messergebnisse aus Sicht des Sensordesigns und der elektrischen Signalübertragung.

Während das IWES die Prüfstandskampagnen durchführte und dabei die mechanischen Lastprofile auf die Flanschverbindungen einleitete, bestand der wesentliche Beitrag von Sensorise darin, die Sensorschrauben in mehreren Evolutionsstufen so zu gestalten, dass

sie den während der Tests gewonnenen Erkenntnissen gerecht wurden. Rückmeldungen zu Signaldrift, Übergangswiderständen, Störeinflüssen durch Schirmung, Kontaktierungsproblemen oder mechanischen Einschränkungen beim Einbau flossen unmittelbar in die konstruktive Weiterentwicklung ein. Dies führte unter anderem zur Neugestaltung der Anschlussbuchse, zur Optimierung des Sensorelements und zur späteren vollständigen Integration des Sensors in die Klemmlänge. Damit bildete das Zusammenspiel aus Entwicklungsarbeiten bei Sensorise und Validierungsarbeiten beim IWES einen geschlossenen iterativen Zyklus, der den technischen Reifegrad der Sensorschrauben deutlich erhöhte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Arbeiten der Sensorise GmbH im Projekt sowohl die technologische Grundlage als auch die konstruktive Umsetzung des Sensorsystems für intelligente Verbindungselemente geschaffen haben. Die Prüfstände des Fraunhofer IWES dienten dabei primär der systematischen Erprobung und Validierung unter realitätsnahen Belastungsbedingungen. Die technische Verantwortung für Design, Fertigung, Optimierung und Funktionssicherheit der Sensorschrauben lag vollständig bei Sensorise, während das IWES die Rolle des unabhängigen Validierungspartners übernahm und entscheidende Erkenntnisse zur Messqualität und Belastbarkeit der entwickelten Sensorik lieferte.

Entwicklung der Sensortechnologie

Die Entwicklung der Sensortechnologie im Teilvorhaben von Sensorise baute auf einem bereits patentierten Grundkonzept auf, bei dem ein elektrisch leitfähiger Draht im Gewindegrund einer Schraube als Sensorelement dient. Über die Änderung des elektrischen Widerstandes dieses Drahtes infolge von Dehnung wird die mechanische Beanspruchung der Schraube erfasst. Ursprünglich wurde dieses Prinzip zur Überwachung von chemischen Ankern entwickelt und in ersten, handgefertigten Prototypen auf Schraubverbindungen übertragen. Diese frühen Prototypen waren funktional, aber weder hinsichtlich Reproduzierbarkeit noch hinsichtlich industrieller Robustheit ausreichend für den Einsatz in Windenergieanlagen. Die Aufgabenstellung im Projekt inVETra bestand darin, dieses Konzept zu einer für Serienanwendungen geeigneten Sensorschraube weiterzuentwickeln, die in kritischen Verbindungselementen von Rotorblattlagern und Antriebsstrangkomponenten eingesetzt werden kann.

Ausgangslage und erste Prototypengeneration

Zu Beginn des Projekts lagen Sensorschrauben vor, bei denen der Sensordraht in den Gewindegrund eingelegt und im Gewindebereich zwischen Mutter und Gewindeauslauf mit der Schraube verklebt war. Die Dehnung des Schraubenschaftes führte zu einer Verringerung des Umfangs, wodurch der Sensordraht radial zusammengedrückt und damit sein Widerstand verändert wurde. Diese Konfiguration war prinzipiell in der Lage, statische Vorspannungen und dynamische Belastungen abzubilden. Für den Einsatz in Windenergieanlagen ergaben sich jedoch mehrere Einschränkungen: Die Fertigung erfolgte manuell, die Kontaktierung des Sensordrahtes war fehleranfällig, die Sensitivität war begrenzt und die Temperaturabhängigkeit des Signals war ausgeprägt. Darüber hinaus war die mechanische Robustheit der Drahtisolierung im rauen Montage- und Betriebsumfeld begrenzt.

Neben den rein sensorischen Aspekten zeigte sich, dass die ursprüngliche Verteilung des Sensorelements über die gesamte Gewindelänge problematisch war. Die effektive Sensitivität hing stark von der Klemmlänge ab, also von der Länge des Gewindebereichs, der tatsächlich innerhalb der verspannten Teile liegt. Bei unterschiedlichen Klemmlängen verschieben sich die Verhältnisse zwischen sensorisch wirksamem und effektiv belastetem Gewindeabschnitt, was zu schwer interpretierbaren Signalverläufen führte. Gleichzeitig war eine vollständige Temperaturkompensation in dieser Konfiguration nur eingeschränkt möglich, da sich Temperaturgradienten und mechanische Dehnungen über die Länge des Gewindes überlagern. Diese Erkenntnisse machten klar, dass sowohl die geometrische Anordnung des Sensorelements als auch die elektrische Auswertung grundlegend überarbeitet werden mussten.

Weiterentwicklung der Sensorgeometrien

Im Rahmen von AP2 wurden die Sensorgeometrien in mehreren Iterationsschritten weiterentwickelt. Ein zentraler Entwicklungsschritt bestand in der Verlagerung des Sensorelements vollständig in die Klemmlänge der Schraube. Anstatt den Sensordraht über die gesamte Gewindelänge zu führen, wird das eigentliche Sensorelement in einen definierten Abschnitt eingebettet, dessen Lage sich vollständig innerhalb des verspannten Bereichs befindet. Die Zuleitungen werden weiterhin im Gewindegrund geführt, tragen aber keine messrelevante Dehnung, sondern dienen ausschließlich der elektrischen Anbindung. Durch diese Entkopplung von Sensorelement und Zuleitung konnte die Empfindlichkeit deutlich erhöht und gleichzeitig der Einfluss der Klemmlänge auf die Messcharakteristik reduziert werden.

Diese neue Sensorelementanordnung führte zu einer Steigerung der Ausgangsempfindlichkeit von etwa 0,3 mV/V auf etwa 2 mV/V. Die höhere Empfindlichkeit resultiert aus der Konzentration der Dehnungserfassung in einem definierten Bereich und der optimierten mechanischen Kopplung zwischen Schraubenschaft und Sensorelement. Gleichzeitig wurde die Temperaturkompensation verbessert: Durch eine geeignete Auslegung der Brückenschaltung und die geometrische Konfiguration ist die Messgröße weitgehend temperaturunabhängig, sodass keine separate Temperaturmessung zur Kompensation erforderlich ist. Dies reduziert die Komplexität der Messkette und erlaubt den Einsatz einfacher 4-poliger Anschlusskabel anstelle von 8-poligen Leitungen.

Die Weiterentwicklung der Sensorgeometrie umfasste unterschiedliche Schraubendimensionen. Auf Basis von M42-Dehnschaftbolzen wurden zunächst Varianten für den Einsatz am Rotorblattlagerprüfstand BEAT6.1 entwickelt. Hier stand vor allem die Frage im Vordergrund, wie sich die Sensorgeometrie in die vorhandene Dehnschaftgeometrie integrieren lässt, ohne die Festigkeit zu beeinträchtigen. In einem zweiten Schritt wurden Sensorelemente in kleineren Schrauben, insbesondere M20, umgesetzt, um sie in Flanschverbindungen des skalierten Wellenbiegeprüfstands zu testen. Die geringe verfügbare Materialstärke im Kopf- und Gewindebereich stellte bei M20-Schrauben eine besondere Herausforderung dar, da sowohl die mechanische Integrität als auch die Isolationsstrecken eingehalten werden mussten. Die Erfahrungen aus den M20-Versuchen führten zu weiteren Anpassungen der Sensorgeometrie, insbesondere hinsichtlich der Isolation und der Führung der Zuleitungen.

Elektrische Architektur und Kontaktierung

Parallel zur mechanischen Auslegung wurde die elektrische Architektur der Sensorschraube konsequent weiterentwickelt. Ausgangspunkt war eine vergleichsweise einfache Kontaktierung des Sensordrahtes, bei der die Lötstellen und Leiterbahnen hinsichtlich Geometrie und Prozessführung noch nicht optimiert waren. In mehreren Iterationsschleifen wurden Leiterplattenlayouts entwickelt, die eine flexible Nutzung des Sensorelements in unterschiedlichen Brückenkonfigurationen erlauben. Die Kontaktplatte wurde so ausgelegt, dass sowohl Halb-, Viertel- als auch Vollbrückenschaltungen realisiert werden können, jeweils mit optionalen Vorwiderständen zur Anpassung an unterschiedliche Schraubentypen und Messbereiche. Dies ermöglicht eine Anpassung der elektrischen Sensitivität und des Signalniveaus an die jeweilige Anwendung und erleichtert die Integration in unterschiedliche Messsysteme.

Ein besonderer Fokus lag auf der Reduktion von Fertigungsfehlern bei der Kontaktierung des Sensordrahtes. In den frühen Projektphasen traten fehlerhafte Lötstellen in einem nennenswerten Anteil der gefertigten Schrauben auf. Durch eine Überarbeitung des Lötprozesses, eine Anpassung der Padgeometrien und eine verbesserte Prozessführung konnte die Fehlerquote deutlich reduziert werden. Zusätzlich wurden Maßnahmen ergriffen, um die Kontaktierung für zukünftige automatisierte oder teilautomatisierte Fertigungsschritte vorzubereiten, etwa durch die Auslegung der Lötstellen für reproduzierbare Steck- oder Crimpverbindungen. Diese Optimierungen wurden größtenteils von Sensorise im eigenen Fertigungsumfeld umgesetzt; das IWES war hier nicht direkt involviert, sondern hat die resultierenden Sensorschrauben in den Prüfstandsumgebungen erprobt und Nutzerfeedback zur Signalqualität gegeben, das wiederum in die Auslegung der elektrischen Architektur zurückfloss.

Schnittstellen- und Buchsendedesign

in wesentlicher Entwicklungsschritt betraf das Buchsendedesign am Schraubenkopf. In den ersten Projektphasen wurden M9-Anschlussbuchsen verwendet. Prüfstandserfahrungen am Fraunhofer IWES zeigten jedoch, dass diese Buchsen hinsichtlich mechanischer Robustheit und Handhabung im Montagebetrieb nicht ausreichend waren. Insbesondere kam es zu Beschädigungen der Steckverbinder, die zu Kurzschlüssen, Signaldrift und instabilen Messwerten führten. In der Folge entwickelte Sensorise ein neues Buchsendedesign auf Basis von M12-Anschlussbuchsen, einem in der Automatisierungstechnik weit verbreiteten Standard für Sensor- und Aktorkabel.

Das neue Design umfasst eine zweistufige Bohrung im Schraubenkopf mit einem in den Schraubkörper eingeschnittenen M12-Gewinde. Eine Stufe in der Bohrung dient als mechanischer Anschlag für die Kontaktplatte, was die Montage vereinfacht und die Positionierung des Steckereinsatzes stabilisiert. Der aktive Buchseneinsatz ist gegenüber der Stirnfläche leicht zurückgesetzt, um ihn vor mechanischen Beschädigungen, etwa durch Anschlagen oder Fallenlassen der Schraube, zu schützen. Gleichzeitig reduziert die Ausführung mit eingeschnittenem Gewinde anstelle eines separaten Einsatzes die Anzahl der Materialpaarungen und damit das Risiko korrosiver Effekte, was insbesondere für Anwendungen unter Offshore-Bedingungen relevant ist. Die Abdichtung des Stecksystems entspricht einem IP67-Schutzkonzept, sodass die Sensorschraube gegen Feuchtigkeit und Schmutz geschützt ist.

Mit dem Wechsel von M9 auf M12 wurden die Anforderungen an das elektrische Anschlusskabel deutlich entschärft. M12-Kabel stehen von mehreren Herstellern zur Verfügung, sind industriell etabliert und kostengünstig verfügbar. Dadurch wird die Abhängigkeit von spezifischen Kabel- und Steckerkombinationen reduziert und die Integration in bestehende Automatisierungsumgebungen erleichtert. Sensorise hat dieses Buchsendesign in mehreren Schraubendimensionen (u. a. M36, M42, M20) umgesetzt und die Varianten in den Prüfstandsumgebungen validiert. Das IWES hat hierbei die Funktionalität des Systems unter realitätsnahen Lasten erprobt und Hinweise zur Zugänglichkeit, zum Verhalten der Steckverbindungen bei dynamischer Belastung sowie zur Signalqualität geliefert.

Ergänzend wurde von Sensorise ein Konzept entwickelt, bei dem die Zuleitung nicht im Gewindegrund, sondern über eine Tieflochbohrung im Inneren der Schraube geführt wird. Diese Variante erhöht die Robustheit der Zuleitung gegenüber mechanischen Einwirkungen beim Verschrauben, da die Leiter nicht mehr im direkten Kontakt mit Werkzeugen oder Muttern stehen. Im Gegenzug reduziert die Bohrung im Schraubenschaft die effektive Querschnittsfläche und damit die maximal zulässige mechanische Belastung. Die Entscheidung für oder gegen diese Variante muss daher im Einzelfall anhand der geforderten Festigkeitsklasse und der zulässigen Spannungsspitzen getroffen werden.

Varianten des Sensorsystems

Auf Basis der entwickelten Sensorgeometrien und der elektrischen Architektur hat Sensorise die Sensorschrauben in Produktvarianten überführt, die unterschiedliche Messaufgaben adressieren. Die Variante S.Bolt XA ist auf die Messung axialer Kräfte fokussiert und eignet sich insbesondere zur Überwachung von Vorspannungsänderungen und axialen Zusatzlasten in Schraubverbindungen. S.Bolt XAB erweitert das Messprinzip um die Erfassung von Biegemomenten, indem mehrere Sensorelemente oder entsprechend orientierte Dehnungszonen genutzt werden, um die Asymmetrie der Dehnungsverteilung erfassen zu können. S.Bolt XAT ist darauf ausgelegt, zusätzlich Torsionsbelastungen zu erfassen, beispielsweise zur Bewertung des tatsächlich aufgetragenen Montage-Drehmoments und des verbleibenden Torsionsanteils im Betrieb.

Diese Variantenbildung erfolgt auf Basis der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und ist ein Ergebnis der konsequenten Weiterentwicklung des Sensorsystems. Während die eigentlichen Prüfstandversuche zur Bewertung der Eignung für Condition-Monitoring- und Lastmonitoring-Aufgaben am Fraunhofer IWES durchgeführt wurden, liegen Konzeption, Geometrieauslegung, Sensorkonfiguration und die Definition der Produktvarianten vollständig in der Verantwortung von Sensorise. Die Rückmeldungen des IWES betreffen vor allem die beobachteten Signalcharakteristika unter realen Belastungen, die Eignung der Sensorschrauben zur Rekonstruktion von Lasten und die Grenzen der Messkettenstabilität, die wiederum als Feedback in die Auslegung der Sensortechnologie eingeflossen sind.

Insgesamt zeigt die Entwicklung der Sensortechnologie im Teilvorhaben von Sensorise eine klare Evolution von handgefertigten Prototypen mit begrenzter Robustheit hin zu industriell ausgerichteten Sensorschrauben mit definierter Geometrie, verbesserter Empfindlichkeit, weitgehend temperaturkompensiertem Verhalten und robusten elektrischen Schnittstellen. Die Prüfstandsergebnisse am Fraunhofer IWES haben diese Entwicklung begleitet und die Eignung der Sensortechnologie unter realitätsnahen Betriebsbedingungen bestätigt, gleichzeitig aber auch aufgezeigt, an welchen Stellen weitere Optimierungen in Hardware und Fertigung notwendig sind.

Fertigungsprozess, Qualitätssicherung und Reproduzierbarkeit

Die Entwicklung der Sensorschraube im Projekt inVETra erforderte neben der konstruktiven Ausgestaltung des Sensorelements auch den Aufbau eines reproduzierbaren und qualitätsgesicherten Fertigungsprozesses. Ziel war es, die wesentlichen Schritte der sensorischen Integration, der Kontaktierung und der Endprüfung so zu gestalten, dass eine gleichbleibend hohe Produktqualität erreicht wird und spätere Automatisierungen prinzipiell möglich werden. Die Verantwortung für den gesamten Fertigungsprozess lag vollständig bei Sensorise, während das Fraunhofer IWES ausschließlich die Prüfstandsvalidierungen durchführte und nur indirekt über Rückmeldungen zur Signalstabilität, zu Kontaktierungsproblemen oder zur Messkettengüte Einfluss auf die Prozessentwicklung nahm.

Aufbau der Fertigungskette

Zu Beginn des Projekts existierten keine standardisierten Fertigungsabläufe für die sensorische Integration in Schraubverbindungen. Die früheren Prototypen wurden manuell gefertigt, was zu erheblichen Schwankungen in Signalqualität, elektrischer Kontaktierung und mechanischer Belastbarkeit führte. Im Rahmen des Teilvorhabens entwickelte Sensorise eine systematische Prozesskette, die die einzelnen Fertigungsschritte definierte, dokumentierte und in eine wiederholbare Reihenfolge überführte. Dazu gehörten die mechanische Vorbearbeitung der Schraubenrohlinge, das Einbringen der Bohrungen für die Anschlussbuchse, das Fräsen der Stufenbohrung für die Kontaktplatte, das Einlegen und Fixieren des Sensordrahtes beziehungsweise der Sensorelemente und anschließend die elektrische Kontaktierung.

Für jeden dieser Arbeitsschritte wurden Parameter festgelegt, die sicherstellen, dass die geometrischen Toleranzen und die elektrische Funktionsfähigkeit eingehalten werden können. Sensorise richtete ein internes Dokumentationssystem ein, das eine fortlaufende Erfassung der wesentlichen Prozessschritte beinhaltet. Dazu zählen unter anderem die Erfassung der relevanten Abmessungen, das Dokumentieren der Lötvorgänge, die Kontrolle des elektrischen Widerstandes nach jedem Teilschritt sowie die abschließende Eingangs- und Ausgangskontrolle jeder Sensorschraube. Dieses Dokumentationssystem bildet die Grundlage für spätere Optimierungen und war insbesondere für frühe Prototypsätze essenziell, um Korrelationen zwischen Prozessparametern und später auftretenden Signalabweichungen identifizieren zu können.

Prozessrisiken und Verbesserungsmaßnahmen

Im Verlauf der Fertigungsarbeiten wurden verschiedene Fehlerquellen identifiziert, die sowohl die mechanische Integrität als auch die elektrische Signalqualität der Sensorschrauben beeinträchtigen konnten. Eine der häufigsten Fehlerquellen war die Kontaktierung des Sensordrahtes auf der Leiterplatte. In den ersten Projektphasen führten fehlerhafte Lötstellen zu unzureichenden elektrischen Übergängen oder intermittierenden Kontakten, die in den Prüfstandstests durch erhöhte Signaldrift oder plötzlich auftretende Signalversätze auffielen. Durch eine Überarbeitung der Padgeometrien, die Einführung standardisierter Lötzeiten und -temperaturen sowie einer verbesserten Fixierung des Sensordrahtes während des Lötvorgangs konnte diese Fehlerquote deutlich reduziert

werden. Ergänzend wurden alternative Kontaktierungsverfahren evaluiert, die prinzipiell eine spätere teilautomatisierte Fertigung ermöglichen.

Ein weiteres Risiko betraf die Integration der Anschlussbuchse. Die frühe Variante mit M9-Buchseneinsatz erwies sich als empfindlich gegenüber mechanischen Beanspruchungen, insbesondere bei der Montage am Prüfstand oder beim Handling während des Fertigungsprozesses. Sensorise identifizierte hierbei zwei wesentliche Schwachstellen: zum einen die geometrische Instabilität des eingesetzten Zinkdruckguss-Inserts, zum anderen die fehlende definierte Positionierung der Kontaktplatte im Schraubenkopf. Das überarbeitete M12-Buchsendesign mit eingeschnittenem Gewinde, mechanischem Anschlag und zurückgesetztem Buchseneinsatz adressierte beide Probleme und führte zu einer deutlichen Stabilisierung der Verbindung. Die Prüfstände des IWES bestätigten diese Verbesserung, indem Probleme mit Steckern und Signalabbrüchen deutlich seltener auftraten.

Darüber hinaus wurden im Projektverlauf elektrische Effekte untersucht, die durch unzureichende Schirmung der Anschlussleitungen, Übergangswiderstände an den Steckverbindern oder lose Kabelkennungen verursacht wurden. Einige dieser Effekte äußerten sich in Form von Signaldrift, die insbesondere in den Langzeitversuchen am BEAT6.1 und am Wellenbiegeprüfstand sichtbar wurde. Sensorise führte daraufhin zusätzliche Prüfungen der Übergangswiderstände, der Potenzialdifferenzen und der Schirmkonzepte durch und ergänzte den Fertigungsprozess um Einzeltests der Anschlusskabel. Diese Maßnahmen verbesserten die Messkettenstabilität erheblich, auch wenn in einzelnen Fällen, insbesondere bei sehr langen Dauerlastprofilen, noch Driftverhalten beobachtet wurde, das durch zukünftige Optimierungen weiter reduziert werden kann.

Auswirkungen der veränderten Produktionspartnerlandschaft

Ein Teil der ursprünglichen Projektplanung sah vor, dass die Peiner Umformtechnik GmbH die sensorisch vorbereiteten Schraubenrohlinge für Pilotserien produziert und perspektivisch an der Automatisierung der Fertigung beteiligt ist. Durch die Insolvenz der Peiner Umformtechnik und deren Betriebsschließung war diese Option im Verlauf des Projekts nicht mehr verfügbar. Dies hatte Auswirkungen auf die Umsetzung der geplanten teilautomatisierten Fertigung und erforderte eine Anpassung der Fertigungsstrategie.

Sensorise reagierte darauf, indem die gesamte Fertigung und sensorische Integration intern durchgeführt und die Prozesse so gestaltet wurden, dass sie auch in einer manuellen oder teilautomatisierten Werkstattumgebung reproduzierbar sind. Für die industriellen Schraubengrößen (insbesondere M42 und M20) wurden alternative Lieferanten für mechanisch vorbearbeitete Rohlinge identifiziert, während die sensorische Bearbeitung vollständig in der eigenen Fertigung erfolgte. Dieser organisatorische Wechsel führte nicht zu einem inhaltlichen Verlust im Projekt, ermöglichte aber eine höhere Flexibilität bei der Durchführung von Iterationen, da Anpassungen an Sensorgeometrie und Kontaktierung kurzfristig umgesetzt werden konnten, ohne dass externe Lieferketten angepasst werden mussten.

Zusammenfassend zeigt die Entwicklung der Fertigungskette, dass Sensorise trotz der beschriebenen Herausforderungen einen stabilen, nachvollziehbaren und erweiterbaren Fertigungsprozess implementiert hat. Die Qualitätssicherungsmaßnahmen und analytischen Rückkopplungen zwischen Fertigung und Prüfstandsergebnissen führten zu einer

kontinuierlichen Verbesserung der Sensorschrauben und bereiteten den Weg für eine spätere Industrialisierung der Technologie.

Prüfstandsvalidierung und systematische Erprobung

Die Prüfstandsvalidierungen bildeten das zentrale Bindeglied zwischen der Sensortechnologieentwicklung bei Sensorise und der anwendungsorientierten Bewertung der Messschrauben unter realitätsnahen Einsatzbedingungen. Während das Fraunhofer IWES für die Durchführung der Prüfstandstests, die Bereitstellung der Testinfrastruktur und die Auswertung der globalen Anlagenlasten verantwortlich war, lag der Schwerpunkt der Arbeiten von Sensorise in der Bereitstellung der Sensorschrauben, der Vorbereitung der Messketten, der Kalibrierung der Sensorik sowie der Analyse der sensorseitigen Signalverläufe. Die Validierungen erfolgten hauptsächlich an zwei Prüfständen: dem realmaßstäblichen Blattlagerprüfstand BEAT6.1 und einem skalierten Wellenbiegeprüfstand, der eine Hauptwellenflanschverbindung abbildet.

Vorbereitung und Kalibrierung

Die Vorbereitung der Prüfstandstests begann mit der Fertigung und sensorischen Ausstattung der jeweils benötigten Schraubenserien. Für die Versuche am Blattlagerprüfstand BEAT6.1 stellte Sensorise sensorisch ausgestattete M42-Dehnschaftbolzen bereit, die in die Schraubenverbindungen zwischen Blattlager und angrenzenden Adapterbauteilen integriert wurden. Die Auswahl der Schraubenpositionen erfolgte in Abstimmung mit dem Fraunhofer IWES, das auf Basis seiner FE-Modelle und Lastanalysen geeignete Messstellen im Schraubenlochkreis identifizierte. Sensorise fertigte zunächst eine Serie von acht M42-Sensorschrauben, die als Prototypen für die ersten Tests dienten, und erweiterte die Anzahl später in mehreren Iterationsschritten.

Vor dem Einbau der Sensorschrauben in den Prüfstand wurden die sensorischen Eigenschaften im Labor charakterisiert. Dies umfasste die Prüfung der Brückensignale, die Kontrolle des Nullpunktes, die Ermittlung des nominalen Verstärkungsfaktors (mV/V pro kN) sowie Funktionsprüfungen der Anschlussleitungen und Buchsen. Bei ausgewählten Schrauben führte Sensorise Kalibrierungen unter kontrollierten Zugbelastungen durch, indem die Schraube in einem Prüfrahmen schrittweise mit einer steigenden axialen Last beaufschlagt und das Sensorsignal aufgezeichnet wurde. In diesen Versuchen zeigte sich das erwartete lineare Verhalten im elastischen Bereich der Schraube; bei weiteren Drehmomentsteigerungen in HV-Garnituren konnte der Übergang in den plastischen Bereich und das damit verbundene Ablösen der Verklebung in frühen Designs nachgewiesen werden. Diese Erkenntnisse flossen direkt in die Auslegung robusterer Sensorelementgeometrien ein.

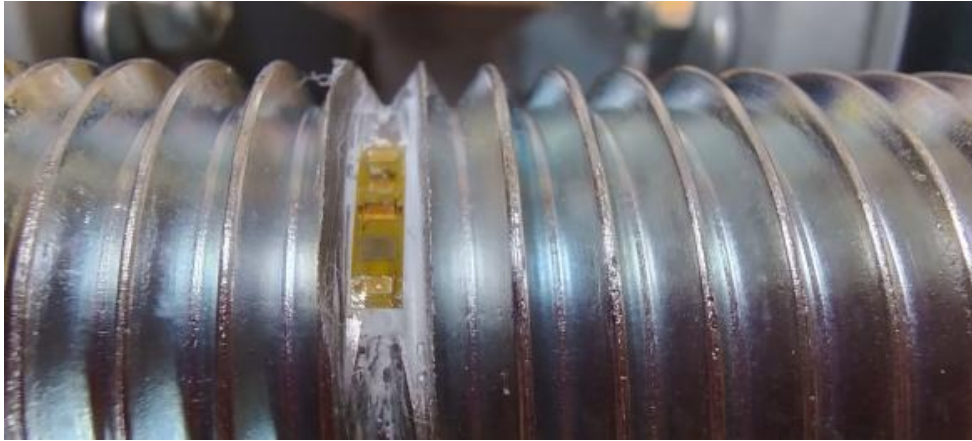


Abbildung 1: Miniatur-DMS in Gewindegrund einer M30-Schraube.

Für den skalierten Wellenbiegeprüfstand lieferte Sensorise M20-Sensorschrauben, die in einer Flanschverbindung der Hauptwelle eingesetzt wurden. Die Hauptaufgabe von Sensorise bestand darin, trotz der sehr begrenzten Geometrie im Kopf- und Gewindebereich eine zuverlässige Sensorelementintegration zu realisieren. Vor der Montage am Prüfstand wurden die M20-Schrauben ebenfalls im Labor kalibriert. Hierzu wurde jede Schraube über eine 4-polige Kabelverbindung mit einem Messsystem verbunden und in einer Prüfvorrichtung bis zu einer Last von 15 kN axial belastet. Die Ergebnisse zeigten – im elastischen Bereich – eine lineare Korrelation zwischen Last und Sensorsignal, die als Grundlage für die spätere Umrechnung der Prüfstandsdaten in Kraftgrößen diente.

Die eigentliche Justage der Vorspannkräfte in den Prüfstandaufbauten lag in der Verantwortung des Fraunhofer IWES. Sensorise stellte jedoch die notwendigen Informationen zur Sensitivität und zur zulässigen Überlastung der Sensorelemente bereit, um sicherzustellen, dass die sensorische Ausstattung bei der Verschraubung nicht beschädigt wurde. Insbesondere bei den M20-Schrauben wurde ein Konzept mit doppelendigen Stehbolzen und Spannmuttern gewählt, um eine kontrollierte Vorspannung aufzubringen, ohne die eigentliche Sensorgeometrie durch Drehbewegungen des Schraubenkopfes zu beeinträchtigen.

Prüfstand BEAT6.1 – Rotorblattlager

Der Prüfstand BEAT6.1 des Fraunhofer IWES dient der Prüfung von Rotorblattlagern unter realitätsnahen Betriebsbedingungen. Der ausgewählte Testaufbau im Rahmen von inVETra umfasste zwei verschiedene Blattlagervarianten, darunter ein T-Solid-Lager und ein doppelreihiges Vierpunktlager, die in eine Prüfstruktur mit Adapterbauteilen eingebettet waren. Die Verbindung zwischen Blattlager und Nabenadapter erfolgte über eine Flanschverbindung mit 120 M42-Dehnschaftbolzen. In diese Flanschverbindung wurden die von Sensorise entwickelten Sensorschrauben integriert, zunächst am Außenring, später auch an weiteren Positionen, einschließlich des Innenrings.

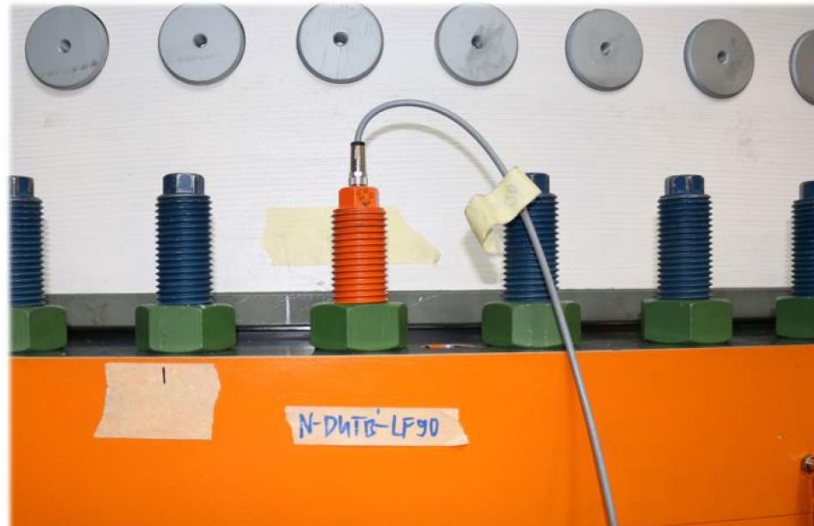


Abbildung 2: Montierte Sensorschraube am Großlagerprüfstand BEAT6.1.

Aus Sicht von Sensorise lag der Fokus in diesem Arbeitsschritt zunächst auf der mechanisch und elektrisch robusten Integration der Sensorschrauben in die hochbelastete Torsions- und Biegeverbindung. Dazu wurden M42-Dehnschaftbolzen so modifiziert, dass das Sensorelement in der Klemmlänge integriert und die Anschlussbuchse im Schraubenkopf untergebracht werden konnte. Der Einbau in den Prüfstand erfolgte in enger Abstimmung mit dem IWES, wobei Sensorise insbesondere die korrekte Vorbehandlung der Gewinde (Reinigung, Schmierstoffauswahl), die Zuführung der Anschlusskabel und die Sicherstellung der Zugänglichkeit der Buchsen verantwortete.

Die am BEAT6.1 durchgeführten Versuche umfassten zunächst einfache Lastkonfigurationen wie reine Axialkräfte und umlaufende Biegemomente. Die globalen Schnittlasten an der Blattlagerposition wurden über die Prüfstandshydraulik aufgebracht und vom IWES messtechnisch erfasst, während die Sensorschrauben von Sensorise ihre lokalen Dehnungs- und damit Kraftinformationen lieferten. In dieser Phase war die Aufgabe von Sensorise, die Messergebnisse hinsichtlich Plausibilität, Linearität und Rauschverhalten zu bewerten und eventuelle Auffälligkeiten (zum Beispiel Sprünge durch Steckerkontaktprobleme oder Driftvorgänge) auf ihre sensorische Ursache zurückzuführen. Die Auswertungen zeigten, dass die Sensorschrauben im elastischen Bereich des Schraubenkörpers das Lastniveau qualitativ korrekt abbilden und insbesondere bei Axialbelastungen eine gute Übereinstimmung mit den aus den FE-Modellen abgeleiteten Schraubenkraftverläufen aufweisen.

Bei komplexeren Lastfällen, insbesondere bei dynamischen Biegemomenten und Mehrfreiheitsgradtests, traten zusätzliche Effekte zutage, die für die Weiterentwicklung der Sensortechnologie relevant waren. So zeigte sich, dass sowohl das Verformungsverhalten des Wälzlagers als auch die lokalen Steifigkeitsunterschiede in den Adapterbauteilen einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Schraubenkraftänderungen haben. Die Sensorschrauben registrierten nicht nur die globalen Biegemomentänderungen, sondern auch lokale Effekte, die aus inhomogenen Steifigkeitsverteilungen resultierten. Diese Beobachtungen waren für Sensorise insofern wichtig, als sie die Interpretation der Messsignale im Kontext eines geplanten Load-Monitorings präzisierten: Ein Messwert repräsentiert nicht nur die aufgeprägte globale Last, sondern stets die Kombination aus globaler Belastung, Lagercharakteristik und lokaler Struktursteifigkeit am Montageort der Schraube.

Großlagerprüfstand BEAT6.1

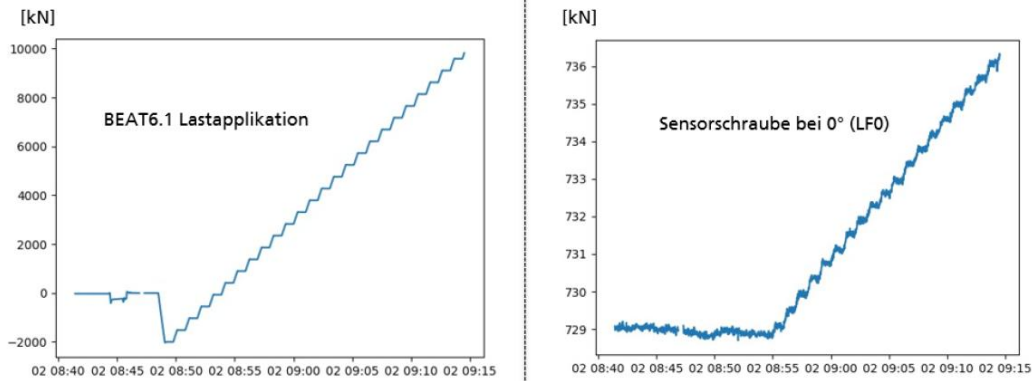


Abbildung 3: Signalantwort (Rechts) bei steigender Lastapplikation auf dem Prüfstand (Links).

Ein weiterer wichtiger Aspekt waren Signaldrift und absolute Signaloffsets während längerer Prüfstandskampagnen. In einem 13,7-stündigen Testprofil, das realitätsnahe Betriebsbedingungen einer 7,5-MW-Referenzanlage nachbildete, wurde beobachtet, dass sich die Ausgangssignale einzelner Sensorschrauben im Verlauf der Zeit langsam verschoben. Die gleiche Lastsituation zu Beginn und am Ende des Tests führte zu unterschiedlich hohen, teilweise deutlich verschobenen Schraubenkraftwerten. Mechanische Ursachen – etwa anhaltende Setzvorgänge in den Flanschverbindungen – konnten im gegebenen Kontext weitgehend ausgeschlossen werden, da die Vorspannkräfte schon zuvor lange stabil waren. Die Drift wurde daher überwiegend auf elektrische Effekte in den Steckverbindern, Übergangswiderstandsänderungen und die Grenzen der Messkettenstabilität zurückgeführt. Für Sensorise bedeutete dies, dass die Kontaktierungs- und Schirmkonzepte weiter zu optimieren sind, wenn die Sensorschrauben zukünftig für absolutes Load-Monitoring eingesetzt werden sollen.

Der Vergleich zwischen den Sensorschrauben von Sensorise und den vom IWES eingesetzten konventionellen DMS-Schrauben zeigte, dass qualitativ vergleichbare Lastverläufe erfasst werden können, insbesondere bei reinen Axial- oder definierten Biegebelastungen. Quantitative Unterschiede ergaben sich teilweise aus der Messkettenkonfiguration und aus Limitierungen der Prüfstandsmesskarten im Zusammenspiel mit den Sensorschrauben. Aus Sicht von Sensorise war dieser Vergleich zentral, da er den Nachweis erbrachte, dass das integrierte Sensorkonzept grundsätzlich in der Lage ist, die relevanten Lastanteile zu erfassen und damit als Basis für ein Condition- und Load-Monitoring eingesetzt werden kann.

Skaliertes Wellenbiegeprüfstand-Setup

Parallel zu den Versuchen am BEAT6.1 wurden die Sensorschrauben am skalierten Wellenbiegeprüfstand des Fraunhofer IWES getestet. Dieser Prüfstand bildet eine Flanschverbindung einer Hauptwelle ab und erlaubt die Einleitung definierter Kombinationen von Querkräften und Biegemomenten. Da der ursprünglich vorgesehene Großprüfstand aufgrund eines Wellenbruchs nicht zur Verfügung stand, wurde dieser skalierten Variante besondere Bedeutung beigemessen. Sensorise entwickelte und fertigte hierfür M20-Sensorschrauben, die an einer Flanschverbindung zwischen zwei Sektionen der Welle eingesetzt wurden. Die Flanschverbindung wurde mit acht M20-Schrauben aufgebaut, von denen vier mit Sensorik ausgestattet waren.



Abbildung 4: Sensorisch ausgestattete Schrauben der Größe M20.

Die konstruktiven Randbedingungen bei M20-Schrauben waren deutlich anspruchsvoller als bei M42-Dehnschaftbolzen, da der verfügbare Querschnitt für Bohrungen und Sensorelementintegration deutlich kleiner ist. Sensorise musste die Sensorgeometrie so anpassen, dass das Sensorelement und die Zuleitungen sicher isoliert und mechanisch geschützt untergebracht werden konnten, ohne die Festigkeit der Schraube unzulässig zu reduzieren. In einer frühen Ausbaustufe kam es bei der Montage zu Problemen mit der Isolation im Gewindegrund, sodass es zu Schleifkontakten und erhöhtem Rauschen im Messsignal kam. Diese Effekte wurden in enger Abstimmung mit dem IWES analysiert und führten zu weiteren Anpassungen in der Sensorgeometrie und in der Art der Isolation.

Aus Sicht des IWES wurden am Wellenbiegeprüfstand definierte Lastfälle untersucht, in denen Biegemomente und Querkräfte in verschiedenen Kombinationen auf die Flanschverbindung aufgeprägt wurden. Für Sensorise war dabei entscheidend, dass die Messdaten aus den Sensorschrauben eine ausreichende Korrelation zu den bekannten Biegemomenten aufwiesen. Die Auswertung zeigte, dass die Sensorschrauben im Wesentlichen das erwartete Verhalten abbilden: Bei ansteigendem Biegemoment steigen die gemessenen zyklischen Schraubenkraftamplituden, während reine Querkräfte ohne Moment keinen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Dehnungssignale haben. Diese Ergebnisse bestätigten, dass die Sensorik prinzipiell geeignet ist, Biegemomentänderungen im Flanschquerschnitt über die Schraubendehnung abzuleiten.

Die Messungen am Wellenbiegeprüfstand ermöglichten darüber hinaus eine Bewertung der Einflussfaktoren auf die Vorspannung und deren Variation zwischen den einzelnen Schrauben. Die Ausgangsvorspannung der sensorisch ausgestatteten Schrauben lag, abhängig vom Montageprozess und den benachbarten, nichtsensorischen Schrauben, in einem Bereich von etwa 56 bis 72 kN. Diese Streuung machte deutlich, dass die Qualität und Reproduzierbarkeit des Vorspannzustandes einen wesentlichen Einfluss auf die Interpretation der Messsignale hat. Für Sensorise unterstrich dies die Notwendigkeit, Montagerichtlinien und Kalibrierverfahren so auszugestalten, dass die initiale Vorspannung der Sensorschrauben möglichst eng toleriert ist, um eindeutige Aussagen über zusätzliche Betriebslasten treffen zu können.

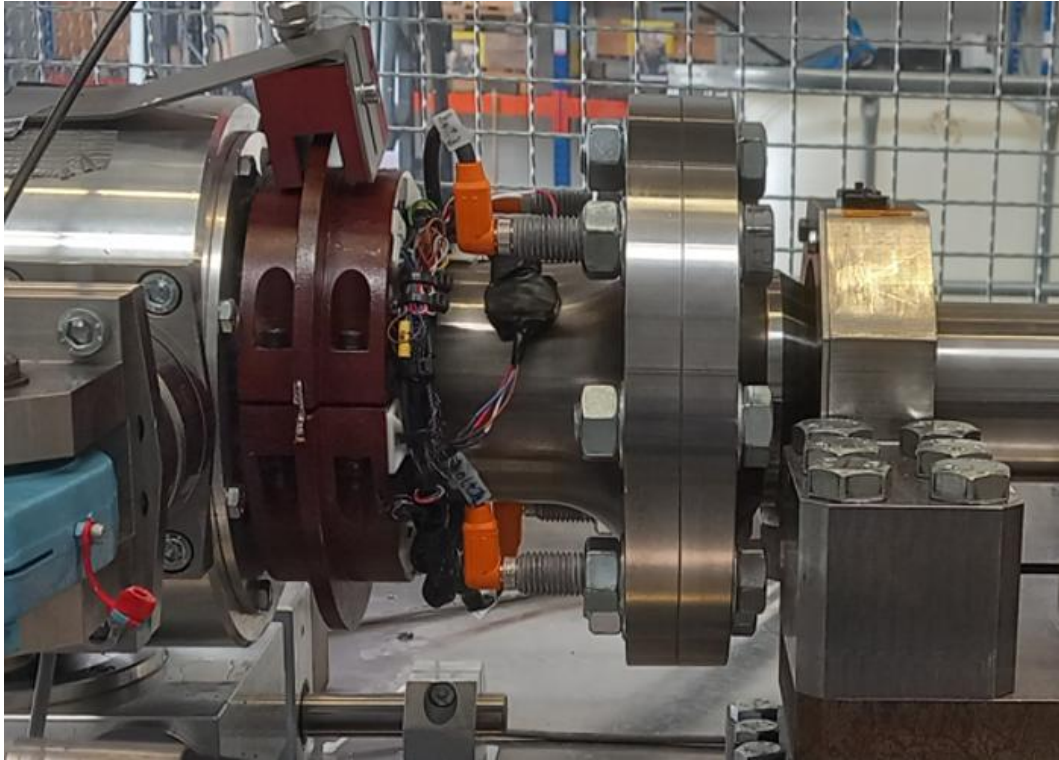


Abbildung 5: Biegewellenprüfstand mit verbauten M20-Sensorschrauben.

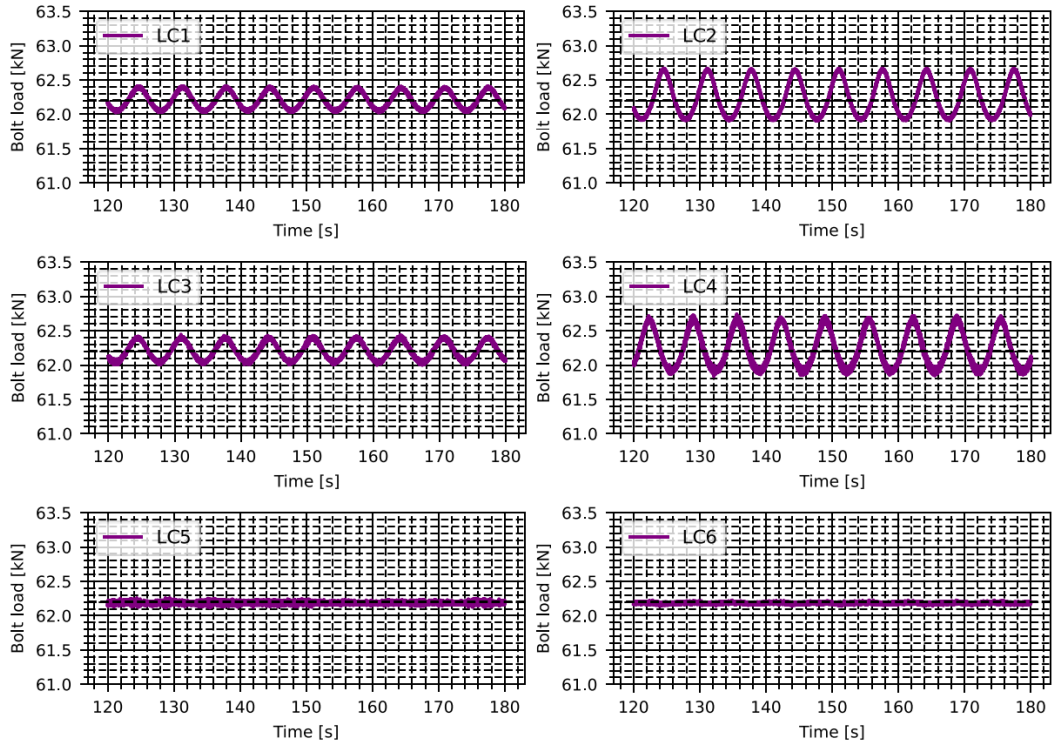


Abbildung 6: Messergebnisse unter dynamischer Biegebelastung.

Langzeitversuche und dynamische Testprofile

Ein wesentlicher Bestandteil der Validierungsarbeiten war die Durchführung von Langzeit- und dynamischen Profiltests am BEAT6.1, bei denen die Sensorschrauben über längere Zeiträume unter wechselnden Lastbedingungen betrieben wurden. Das Fraunhofer IWES nutzte hierzu ein Testprofil, das den Betrieb einer 7,5-MW-Referenzanlage über etwa 13,7 Stunden nachbildet und in dem komplexe Kombinationen aus Axial-, Radialkräften und Biegemomenten auf die Blattlagerstruktur aufgeprägt werden. Die Sensorschrauben zeichneten während dieser Tests kontinuierlich Schraubenkraftverläufe auf, die von Sensorise im Anschluss hinsichtlich Drift, Rauschverhalten und Sensitivität analysiert wurden.

Die Auswertung zeigte, dass die Sensorschrauben zu Beginn des Testprofils die Lastverläufe gut abbilden und insbesondere bei definierten Rampenlasten eine klare Korrelation zwischen Biegemoment und gemessener Zusatzkraft aufweisen. Gegen Ende des Langzeittests wurde jedoch deutlich, dass sich die Ausgangssignale einzelner Schrauben in ihrem absoluten Wert verändert hatten, obwohl die globalen Lastbedingungen des Prüfstands vergleichbar waren. Diese Drift war nicht auf einen fortlaufenden Setzprozess der Schrauben zurückzuführen, da die Flanschverbindung bereits davor lange unter Last gestanden hatte. Eine detaillierte Analyse der Messketten legte nahe, dass thermische Effekte, Übergangswiderstandsänderungen an Steckverbindern sowie mögliche mikromechanische Effekte an den Kontaktstellen einen Einfluss auf den Signaloffset hatten.

Für Sensorise war die Beobachtung dieser Drifteffekte ein wichtiger Hinweis auf die Grenzen der Messkettenstabilität über lange Zeiträume. Sie zeigen, dass für ein absolutes Load-Monitoring über lange Betriebszeiten entweder zusätzliche Maßnahmen zur Signalstabilisierung erforderlich sind oder das Monitoring-Konzept primär auf relative Änderungen und Mustererkennung fokussiert werden sollte. In der Weiterentwicklung der Sensorschrauben nach Projektende werden diese Erkenntnisse in Form verbesserter Kontaktierungsstrategien, optimierter Schirmung und möglicher Redundanzkonzepte berücksichtigt.

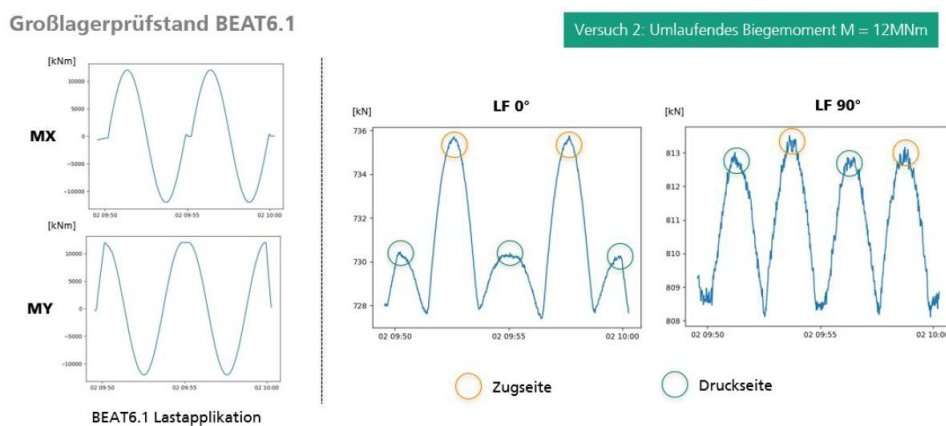


Abbildung 7: Lastapplikation des Prüfstands (Links) und vom Montageort abhängige Signalantwort der Sensorschrauben (Mitte, rechts).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Prüfstandsversuche am BEAT6.1 und am skalierten Wellenbiegeprüfstand den Nachweis erbracht haben, dass die von Sensorise entwickelten Sensorschrauben die relevanten Lasten qualitativ korrekt erfassen können und damit als Sensorbasis für Condition- und Load-Monitoring-Konzepte geeignet sind. Gleichzeitig haben die Ergebnisse die wesentlichen Einflussgrößen auf Signalqualität, Driftverhalten und Vorspannungsabhängigkeit identifiziert und damit klare Ansatzpunkte für weitere Optimierungen der Sensortechnologie und des Messkettenaufbaus aufgezeigt.

Zusammenführung der technischen Ergebnisse und Ableitung von Verbesserungen

Die im Projektverlauf durchgeführten Entwicklungs- und Validierungsarbeiten zeigen, dass die Sensorschrauben die wesentlichen Messgrößen des Schraubenzustands zuverlässig erfassen können und damit grundsätzlich für Anwendungen in hochbelasteten Flanschverbindungen geeignet sind. Die wichtigsten technischen Fortschritte liegen in der deutlichen Steigerung der Empfindlichkeit, der verbesserten Temperaturunabhängigkeit sowie in der erhöhten mechanischen und elektrischen Robustheit der Sensorgeometrie. Die vollständige Integration des Sensorelements in die Klemmlänge, die optimierte Kontaktierung und das neue M12-Buchsendesign haben zu einer stabileren und reproduzierbareren Signalbereitstellung geführt.

Gleichzeitig haben die Prüfstandsversuche gezeigt, dass die Aussagekraft der Messsignale wesentlich von der Qualität der elektrischen Kontaktierung, der Stabilität der Anschlussverbindungen und der Streuung der Ausgangsvorspannung beeinflusst wird. Anhaltende Driftvorgänge über lange Testdauer und Unterschiede in absoluten Signalniveaus zwischen einzelnen Schrauben sind weniger auf das Sensorelement selbst zurückzuführen als auf Übergangswiderstände in Kabeln, Steckern und Kontaktstellen sowie auf montageseitige Variationen. Für Sensorise ergibt sich daraus die klare Konsequenz, zukünftige Optimierungen stärker auf Messkettenstabilität, Steckerkonzepte und kontrollierte Vorspannbedingungen auszurichten.

Auf Basis der Ergebnisse lässt sich festhalten, dass die Sensorschrauben vor allem dann ein hohes Nutzenpotenzial entfalten, wenn sie primär zur Detektion relativer Laständerungen eingesetzt werden. Anwendungen wie Vorspannungsüberwachung, Überwachung zyklischer Belastungen, Erkennung ungewöhnlicher Lastzustände und Ergänzung konventioneller Sensorik in Condition-Monitoring-Systemen gehören zu den realistischen Einsatzfeldern. Für absolute Belastungsrekonstruktionen über sehr lange Zeiträume werden zusätzliche Stabilisierungskonzepte, verbesserte Kontaktierung und eine engere Integration mit modellbasierten Verfahren erforderlich sein.

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine klare Grundlage für die Weiterentwicklung der Sensorschrauben in Richtung Serienreife. Die technischen Verbesserungen, die im Projekt realisiert wurden, fließen bereits in die geplanten Produktvarianten S.Bolt XA, XAB und XAT ein, welche spezifisch auf die Messung axialer Kräfte, kombinierter Biegebeanspruchungen oder zusätzlicher Torsionsanteile ausgelegt sind. Damit steht ein technologisch ausgereiftes und modular erweiterbares Fundament zur Verfügung, das einen breiten Einsatz der Sensorschrauben in Windenergieanlagen und anderen industriellen Anwendungen ermöglicht und zugleich Ansatzpunkte für zukünftige Optimierungen klar definiert.

Ausblick und Verwertung

Die im Projekt inVETra entwickelten Sensorschrauben bilden die technologische Grundlage der Produktfamilie S.Bolt XP, die nach Projektende als marktfähiges System weiterentwickelt und in der Industrie eingeführt wurde. Kern der Verwertung ist der Übergang von einer projektinternen Prototypentechnologie hin zu einem normgerechten, flexibel einsetzbaren Sensor-Befestiger, der bereits ab M24 eingesetzt werden kann und ohne mechanische Schwächung des Schraubenelementes die Vorspannkraft und dynamische Lasten misst. Die technischen und konstruktiven Fortschritte des Projekts sind in die nachfolgenden Produktunterlagen eingeflossen und dokumentieren den erreichten Reifegrad des Systems.

Die Produktlinie S.Bolt XP umfasst mehrere Varianten, die spezifisch für unterschiedliche Kombinationen mechanischer Lasten ausgelegt sind. Die Ausführungen S.Bolt XA, XB/AB und XT/AT ermöglichen die Messung axialer Kräfte, Biegemomente und Torsionsanteile. Die Varianten sind als vollständig passive Systeme realisiert, die keine aktiven elektronischen Komponenten im Schraubenkörper enthalten und damit den Anforderungen sicherheitskritischer Anwendungen entsprechen. Durch die Integration der Sensorik im Gewindegrund bleibt die mechanische Tragfähigkeit der Schraube voll erhalten, wodurch eine Verwendung in hochbelasteten Verbindungen wie Großwälzlagern, Flanschverbindungen im Antriebsstrang oder anspruchsvollen Anlagen der Prozessindustrie möglich ist.

Die Vermarktungsaktivitäten nach Projektende konzentrierten sich zunächst auf zwei wesentliche Branchen: die Windenergie und den industriellen Maschinen- und Anlagenbau. In der Windenergie liegt der Fokus auf der Überwachung von Rotorblattlagern, Blattbolzen, Turmflanschverbindungen und Komponenten des Antriebsstrangs. Insbesondere bei älteren Offshore-Anlagen und Onshore-Anlagen mit verlängerter Betriebsdauer steigt der Druck, Vorspannkraft- und Lastverläufe transparent zu überwachen, um ungeplante Stillstände und Folgeschäden zu vermeiden. Die im Projekt gewonnenen Daten zeigten zudem, dass lokale Messdaten in Schraubverbindungen für die Identifikation ungewöhnlicher Lastzustände und die Ergänzung bestehender CMS-Daten von erheblichem Nutzen sind. Die im Produktblatt dokumentierten Schnittstellen (4-polige und 8-polige M12-A-Steckverbinder) erleichtern die Integration in bestehende Feldbus-Systeme oder in sensorise-eigene Lösungen wie Sensorise Insights.

Parallel zur Windindustrie ergeben sich aus den mechanischen Eigenschaften des S.Bolt XP weitere Anwendungsfelder. Die erstellte Produktbroschüre zeigt Einsatzmöglichkeiten im Stahlbau, in hydromechanischen Anlagen, im Maschinen- und Anlagenbau sowie im Bereich der geotechnischen Sicherung. Besonders vorteilhaft ist der Einsatz in langsam laufenden, hochbelasteten Lagerungen wie Pfannendrehtürmen, Rundkühlern oder Prozessanlagen der Metallindustrie, in denen Schraubverbindungen durch hohe thermische und mechanische Lasten beansprucht werden. Durch die Fähigkeit, Vorspannkraftverluste und zyklische Belastungen in Echtzeit zu erfassen, können Betriebssicherheit und Lebensdauer solcher Anlagen signifikant verbessert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Verwertung liegt in der Integration der Sensorschrauben in digitale Überwachungs- und Analysesysteme. Sensorise bietet hierfür mit Sensorise Insights eine cloudbasierte Lösung zur Visualisierung, Speicherung und Analyse von Schraubendaten an. Diese ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung, die Erkennung von Trendänderungen und die Kopplung der Schraubensignale mit bestehenden Anlagen- und

Betriebsdaten. Darüber hinaus können S.Bolt-Systeme über Feldbusschnittstellen direkt in industrielle Steuerungen eingebunden werden, wodurch eine hochauflösende Echtzeitüberwachung möglich ist. Dies eröffnet insbesondere für Betreiber sicherheitskritischer Anlagen die Möglichkeit, Zustandsinformationen unmittelbar in Betriebsstrategien und Wartungsentscheidungen einfließen zu lassen.

Aus Perspektive der wirtschaftlichen Verwertung ist festzustellen, dass der Markt für intelligente Verbindungselemente aktuell wächst. Der zunehmende Bedarf an Life-Time-Extension, Condition Monitoring, Retrofit-Fähigkeit und zustandsbasierter Instandhaltung schafft einen klaren Anwendungsdruck. Sensorise positioniert den S.Bolt XP als Premiumprodukt für anspruchsvolle Verschraubungen, bei denen konventionelle Überwachungssysteme an ihre Grenzen stoßen. Der modulare Aufbau, die Passivität des Sensorsystems und die einfache Nachrüstbarkeit bieten einen deutlichen Wettbewerbsvorteil gegenüber externen Dehnungsmesssystemen oder funkbasierten Lösungen, die höhere Wartungsanforderungen und geringere Signalstabilität aufweisen.

Insgesamt zeigt der Projektverlauf, dass die im BMWK-Projekt entwickelten Sensorschrauben nicht nur technologisch funktionsfähig sind, sondern bereits als marktfähiges Produkt genutzt werden. Die Verwertung erfolgt entlang zweier strategischer Linien: der industriellen Nutzung in Windenergie und Maschinenbau sowie der Erweiterung des Anwendungsportfolios über neue Märkte und Branchen. Die fundierte Dokumentation in den beiden Produktunterlagen und die klare technologische Positionierung im Bereich „intelligenter Verbindungselemente“ bilden die Grundlage für eine nachhaltige wirtschaftliche Nutzung nach Projektende.