

# Förderprogramm Innovation und neue Energietechnologie

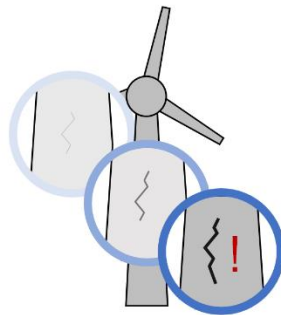
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Projekt compARe:

**Optimierung der Instandhaltung von Windenergieanlagen durch den Einsatz  
von bildverarbeitenden Verfahren auf mobilen AR-Endgeräten**



## Schlussbericht



|                     |  |
|---------------------|--|
| Zuwendungsempfänger | ROBUR Wind GmbH  |
| Kontakt             | Daniel Garleff,<br>Tel.: +49 151 40 22 51 33<br>E-Mail: daniel.garleff@spie-isw.com  |
| Verbundprojekt      | compARe  |
| Förderkennzeichen   | 03EE3034A  |
| Vorhabenbezeichnung | Optimierung der Instandhaltung von Windenergieanlagen durch den Einsatz von bildverarbeitenden Verfahren auf mobilen AR-Endgeräten |
| Laufzeit            | 42 Monate, 01.07.2020 - 31.12.2023   |
| Berichtszeitraum    | 01.07.2020 - 31.12.2023  |

***Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EE3034A gefördert.***

***Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.***

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>I</b> | <b>Kurzdarstellung</b>   |           |
| 1.1      | Aufgabenstellung.....  | 8         |
| 1.2      | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....   | 8         |
| 1.3      | Planung und Ablauf des Vorhabens .....   | 9         |
| 1.4      | Wissenschaftlicher und technischer Stand für die Entwicklung .....   | 11        |
| 1.4.1    | Sortierung historischer Bilddaten vergangener Wartungen von Windkraftanlagen .....   | 11        |
| 1.4.2    | Objektdetektion als Unterstützung für Wartungsarbeiten innerhalb einer Windkraftanlage ....  | 12        |
| 1.4.3    | Fehlerdetektion zur Abschätzung von Objektschäden an Windkraftanlagen.....   | 12        |
| 1.4.4    | Assistenzsystem für den gesamten Wartungsprozess innerhalb einer Windkraftanlage.....  | 14        |
| 1.5      | Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....  | 15        |
| <b>2</b> | <b>Eingehende Darstellung</b> .....  | <b>17</b> |
| 2.1      | Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....   | 17        |
| 2.1.1    | AP 1 – Ist-Prozess- und Anforderungsaufnahme .....   | 17        |
| 2.1.2    | AP 2 – Auswahl mobiler Hardware für Augmented Reality-Anwendungen und Bildverarbeitungsalgorithmen.....  | 18        |
| 2.1.3    | AP 3 – Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen optischen Zustandsüberwachung.....   | 20        |
| 2.1.4    | AP 4 – Entwicklung eines mobilen Augmented Reality-basierten Assistenzsystems mit Nutzung bildverarbeitender Verfahren .....   | 34        |
| 2.1.5    | AP 5 – Systemintegration.....  | 43        |
| 2.1.6    | AP 6 – Durchführung einer Evaluationsstudie des entwickelten Assistenzsystems .....  | 45        |
| 2.1.7    | AP 7 – Projektmanagement .....   | 46        |
| <b>3</b> | <b>Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....</b>   | <b>46</b> |
| <b>4</b> | <b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>5</b> | <b>Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....</b>   | <b>49</b> |
| 5.1      | Erarbeiten spezifischer Erkenntnisse zur Erhaltung der Kompetenz und des Wettbewerbsvorteils .....   | 50        |
| 5.2      | Erkenntnisse zur Gestaltung von Augmented-Reality-Assistenzsystemen für den Einsatz im Windenergie-bereich; Vorstellung auf Fachkonferenzen, Publikation in SPIE ..... | 51        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 5.3      | <i>Erkenntnisse zum Einsatz von Bildverarbeitungs-algorithmen auf mobilen Endgeräten im Windenergie-bereich; Vorstellung auf Fachkonferenzen, Publikation in SPIE .....</i> | <i>52</i> |
| 5.4      | <i>Erkenntnisse zur Verbesserung der Instandhaltungsmaßnahmen („best practice“) im Windenergiebereich; Vorstellung auf Fachkonferenzen, Publikation in SPIE .....</i>       | <i>53</i> |
| <b>6</b> | <b>Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....</b>                                 | <b>53</b> |
| <b>7</b> | <b>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....</b>  | <b>54</b> |
| 7.1      | <i>Erfolgte Veröffentlichungen.....</i>   | <i>54</i> |
| 7.2      | <i>Geplante Veröffentlichungen.....</i>   | <i>55</i> |

# Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Schematische Darstellung des Assistenzsystems.....  | 8  |
| Abbildung 2: Ergebnisse des Workshops zur Ausarbeitung von Prozessen für die Datenbrille.....  | 20 |
| Abbildung 3: Allgemeine Prozesskette der einzelnen Schritte bei Reparaturarbeiten einer Windkraftanlage.....   | 21 |
| Abbildung 4: Ausschnitt unsortierter Bilder aus historischen Datensätzen .....   | 23 |
| Abbildung 5: Ausschnitt der Cluster mit sortierten Bildern nach dem k-means Verfahren .....  | 23 |
| Abbildung 6: Ordner mit sortierten Bildern der gleichen Bildeigenschaften.....   | 24 |
| Abbildung 7: Segmentierte Kohlebürste mit dem Originalbild zum Vergleich. In Gelb das Orientierungsfeature und in Grün die Abriebfläche.....   | 26 |
| Abbildung 8: Darstellung der Ausrichtungsmethode für beliebige Kohlebürstenbilder .....  | 26 |
| Abbildung 9: Drohnenbild eines Rotorblatts mit Fehlstellenmarkierung .....   | 28 |
| Abbildung 10: Fehlerzuordnung mit links das Bild des Technikers und rechts dem schwarzweißen Bild der Fehlstelle aus dem Drohnenbild. Das rechte Bild zeigt ein angepasste schwarz-weiß Darstellung der im linken Bild markierten Niete, welche zum algorithmischen Abgleich genutzt wird..... | 29 |
| Abbildung 11: Thermografie-Aufnahmen der Seek Thermal Compact (links) und der FLIR i5 (rechts) bei simuliertem Einschluss.....   | 30 |
| Abbildung 12: Thermal Seek Compact Kamera für die Wärmebilderstellung mittels Smartphone.....  | 31 |
| Abbildung 13: a) Anmeldeprozess durch Eingabe einer IP-Adresse. b) Vom Server verarbeitetes Bild, mit Bounding Box Darstellung, für mögliche Korrekturen des Technikers. c) Vom Techniker hinzugefügtes Objekt, welches in die Segmentierungsdatenbank aufgenommen werden soll .....           | 35 |
| Abbildung 14: Gesamter Prozess für die automatische Erkennung des Abnutzungsgrads einer Kohlebürste, der mittels Adobe XD abgebildet wurde .....   | 36 |
| Abbildung 15: Auszug aus dem Design-Mockup in Adobe XD für den Kohlebürstenprozess auf dem Smartphone mit dem Workflow nur auf dem Smartphone und mit der Kombination von Smartphone und Vuzix Blade .....   | 36 |
| Abbildung 16: Auszug aus dem Design-Mockup in Adobe XD für den Kohlebürstenprozess auf der Vuzix Blade .....   | 37 |
| Abbildung 17: Auszug aus dem Design-Mockup in Adobe XD für den Kohlebürstenprozess auf dem Smartphone.....   | 37 |
| Abbildung 18: Überarbeitung des Design-Mockups in Adobe XD für den Kohlebürstenprozess auf der Vuzix Blade .....   | 38 |
| Abbildung 19: Umgesetztes Design-Mockup für den Kohlebürstenprozess in Unity3D und ausgeführt auf der Vuzix Blade .....  | 39 |
| Abbildung 20: Weitere Überarbeitung des Design-Mockups in Adobe XD, nachdem der An- und Abmeldeprozess definiert wurden .....  | 39 |
| Abbildung 21: Detaillierterer Auszug aus dem dritten Design-Mockup in Adobe XD mit dem Anmeldeprozess .....  | 40 |
| Abbildung 22: Finales Design-Mockup durch einen Unterauftrag entstanden, der beide Prozesse in Figma abdeckt .....   | 41 |

Abbildung 23: Detaillierter Auszug des finalen Design-Mockups in Figma.....41  
Abbildung 24: Umgesetztes finales Design-Mockup für den Kohlebürstenprozess in Unity3D und  
ausgeführt auf der Vuzix Blade mit einer Farbabweichung von der Programmierung zur finalen  
Darstellung .....42

## Tabellenverzeichnis

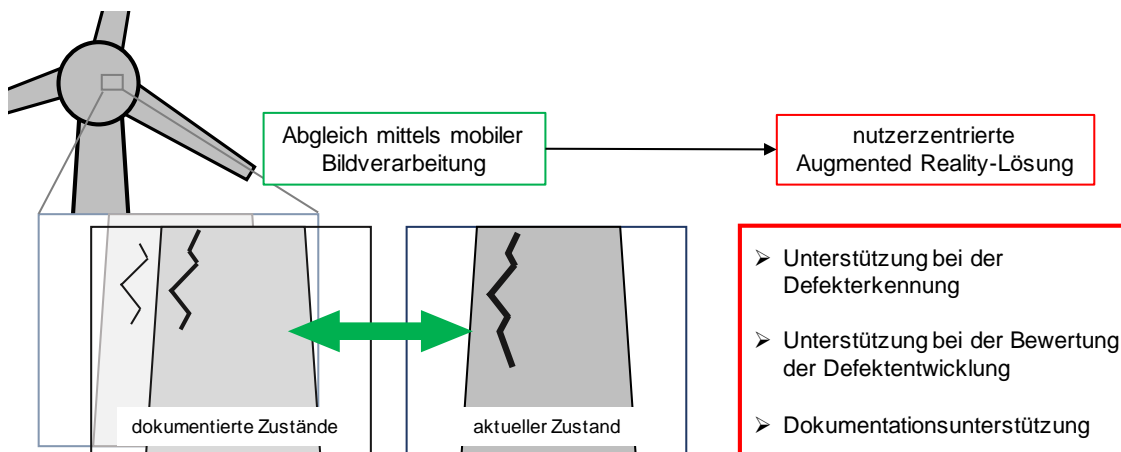
|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Ursprüngliche und angepasste Zeitplanung .....   | 10 |
| Tabelle 2: Betrachtung der AR-Device auf ihre Eigenschaften und Interaktionsmöglichkeiten .....               | 18 |
| Tabelle 3: Tabellarischer Vergleich der verwendeten Wärmebildkameras .....                                    | 32 |
| Tabelle 4: Bewertung der Seek Thermal Wärmebildkamera in Form von Vor- und Nachteilen.....                    | 32 |
| Tabelle 5: Verwertungsplan gemäß der gesamt Vorhabensbeschreibung mit zur Laufzeit umzusetzenden Punkten..... | 49 |

## I Kurzdarstellung

### 1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des Förderprojektes „compARE“ bestand in der Entwicklung eines AR-basierten technischen Assistenzsystems, das bildverarbeitende Verfahren nutzt, um Servicetechnikerinnen und Techniker bei der Wartung und Instandhaltung von Windenergieanlagen (WEA) zu unterstützen. Im Fokus standen dabei insbesondere solche Aufgabenstellungen, die eine Defekterkennung durch den Vergleich des aktuellen Zustands mit einem dokumentierten Referenzzustand oder einem definierten Soll-Zustand erfordern (siehe Abbildung 1). Durch diesen Ansatz lassen sich potenzielle Schäden an den Anlagen frühzeitig erkennen und vermeiden, was zu einer Steigerung der Effizienz und Zuverlässigkeit der Instandhaltungsmaßnahmen führt.

Für ROBUR Wind, als Partner im Projekt, ergab sich die Möglichkeit, die entwickelten Technologien direkt im Feld zu erproben und anzupassen. Die Integration des AR-Assistenzsystems in die bestehenden Serviceprozesse ermöglichte es, die Wartungsarbeiten an den WEA effizienter und sicherer zu gestalten. Durch die visuelle Unterstützung und die Bereitstellung relevanter Informationen direkt im Sichtfeld der Technikerinnen und Techniker konnten diese schneller und präziser auf Abweichungen reagieren und somit die Betriebszeiten der Anlagen optimieren. Die Zusammenarbeit mit dem Forschungspartner erlaubte es ROBUR Wind, maßgeschneiderte Lösungen zu entwickeln, die speziell auf die Bedürfnisse und Herausforderungen im Bereich der Windenergie zugeschnitten sind



**Abbildung 1: Schematische Darstellung des Assistenzsystems**

### 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Durchführung des Vorhabens „compARE“ erforderte regelmäßige Wartungen und Inspektionen von Windkraftanlagen, um deren Langlebigkeit zu sichern und Probleme frühzeitig zu identifizieren.

Diese Prozesse verlangen umfangreiches Fachwissen sowie detaillierte Prüf- und Dokumentationsarbeiten, was die Effizienz der Wartungsarbeiten herausfordert und Fehleranfälligkeit bei der Überprüfung einzelner Komponenten erhöht.

Ursprünglich wurde das Projekt in Kooperation mit der ROSCH Industrieservice GmbH (Rosch) definiert und beantragt. Nach der Insolvenz von Rosch am 30.11.2021 trat ROBUR WIND GmbH (Robur) als neuer Projektpartner ein, wodurch das Projekt erfolgreich zu Ende geführt werden konnte. Der Wechsel des Partners führte zu einer Anpassung der Arbeitspakete an die spezifischen Bedürfnisse von Robur und bedingte eine Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31.12.2023.

Ein wesentlicher Teil des Projektes fiel in die Zeit der Corona-Pandemie, was die Bedingungen für die Durchführung erschwerte. Die Besichtigung von Windkraftanlagen war nur eingeschränkt möglich und der direkte Austausch mit den Projektpartnern wurde signifikant beeinträchtigt. Für ROBUR Wind bedeutete dies, dass flexible und innovative Ansätze gefragt waren, um die Projektziele unter diesen erschwerten Umständen zu erreichen. Die Anpassungsfähigkeit und das Engagement von ROBUR Wind trugen maßgeblich dazu bei, dass trotz der pandemiebedingten Herausforderungen ein erfolgreicher Abschluss des Projektes möglich war.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des Projekts "compARE" wurden verschiedene Meilensteine definiert, die den Fortschritt und die Entwicklung des Vorhabens strukturieren sollten. Die Planung sah vor, dass diese Meilensteine in halbjährlichen Abständen erreicht werden. Die Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung des ursprünglichen Projektverlaufsplans mit dem angepassten Plan, der aufgrund von unvorhergesehenen Ereignissen und Herausforderungen im Projektverlauf aktualisiert wurde.

Die Meilensteine umfassten unter anderem die Konzeption und Entwicklung von Prototypen, die Durchführung von Tests und Analysen sowie die Auswertung der Ergebnisse. Trotz sorgfältiger Planung kam es zu Verzögerungen, die durch verschiedene Faktoren bedingt waren. Dazu zählten technische Schwierigkeiten, Verzögerungen bei der Beschaffung von Materialien und Komponenten sowie Herausforderungen bei der Integration verschiedener Systeme.

Um mit diesen Verzögerungen umzugehen, wurden Anpassungen im Projektplan vorgenommen. Diese beinhalteten die Neupriorisierung von Aufgaben, die Anpassung von Zeitplänen und die Optimierung von Arbeitsabläufen. Durch diese Maßnahmen konnte sichergestellt werden, dass das Projekt "compARE" erfolgreich fortgeführt und die gesetzten Ziele erreicht werden konnten.

Die kontinuierliche Überwachung des Projektfortschritts und die flexible Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen waren entscheidend für den Erfolg des Vorhabens. Die enge Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten, einschließlich der Partner aus der Industrie und der Forschung, trug maßgeb-

## 2 Eingehende Darstellung

lich dazu bei, dass die Meilensteine trotz der Herausforderungen erreicht werden konnten. Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus diesem Projekt fließen in zukünftige Vorhaben ein und tragen zur kontinuierlichen Verbesserung von Prozessen und Technologien bei.

**Tabelle 1: Ursprüngliche und angepasste Zeitplanung**

| Arbeitspakete (AP) | 1. Jahr |   |   |   |   |   | 2. Jahr |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 3. Jahr |    |    |    |    |    | 4. Jahr |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|--------------------|---------|---|---|---|---|---|---------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|----|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
|                    | M1      |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | M2      |    |    |    |    |    | M3      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                    | 1       | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7       | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19      | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25      | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |  |
|                    | 2020    |   |   |   |   |   | 2021    |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 2022    |    |    |    |    |    | 2023    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                    | J       | A | S | O | N | D | J       | F | M | A  | M  | J  | J  | A  | S  | O  | N  | D  | J       | F  | M  | A  | M  | J  | J       | A  | S  | O  | N  | D  | J  | F  | M  | A  | M  | J  | J  | A  | S  | O  | N  | D  |  |
| 1                  | ■       | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1.1                | ■       | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1.2                | ■       | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1.3                | ■       | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 2                  |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 2.1                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 2.2                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 2.3                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 2.4                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 3                  |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 3.1                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 3.2                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 3.3                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 3.4                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 3.5                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 3.6                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 4                  |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 4.1                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 4.2                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 4.3                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 4.4                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 4.5                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 5                  |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 5.1                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 5.2                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 5.3                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 6                  |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 6.1                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 6.2                |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 7                  |         |   |   |   |   |   |         |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |

Ursprüngliche Zeitplanung  


 Neue Zeitplanung planmäßige Bearbeitung

Im Rahmen des Projekts war zunächst die Rosch als Industriepartner involviert, was eine Beteiligung an den Arbeitspaketen (AP) 1 bis 4 zur Folge hatte. Mit Beginn des vierten Arbeitspakets übernahm ROBUR Wind die Führung der Projektarbeiten und setzte diese in den nachfolgenden Arbeitspaketen 5 und 6 fort. Der Wechsel des Partners erforderte Anpassungen der Arbeitspakete, um sie an die neuen betrieblichen Gegebenheiten von ROBUR Wind anzupassen und das Projekt effektiv weiterzuführen. Die durch den Wechsel bedingten Verzögerungen sind in Tabelle 1 detailliert aufgeführt. Diese Anpassungsphase war notwendig, um die Ziele des Projekts mit den Ressourcen und dem Fachwissen von ROBUR Wind in Einklang zu bringen und eine nahtlose Fortsetzung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu gewährleisten.

### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand für die Entwicklung

Im Rahmen des Projektes compARE wurden verschiedene Methoden eingesetzt, die auf wissenschaftlichen Quellen basieren und den aktuellen Entwicklungsstand widerspiegeln. Die Methodik umfasst technisch relevante Aspekte des Projektes und stützt sich auf grundlegende wissenschaftliche Arbeiten, die als Fundament für die angewandten Verfahren dienen.

Die genannten Methoden und die kontinuierliche Abstimmung innerhalb des Projektes trugen maßgeblich dazu bei, den wissenschaftlichen und technischen Stand der Entwicklung von compARE zu definieren und voranzutreiben. Durch die enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und die Integration von wissenschaftlichen Erkenntnissen konnte eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung und Anwendung der Ergebnisse geschaffen werden.

#### 1.4.1 Sortierung historischer Bilddaten vergangener Wartungen von Windkraftanlagen

Die Sortierung historischer Bilddaten ist ein wesentlicher Schritt zur effizienten Nutzung und Analyse von Wartungsdaten. Im Rahmen des compARE-Projekts wurde diese Aufgabe durch die Entwicklung und Anwendung eines k-means Algorithmus optimiert. Dieser Algorithmus ist eine etablierte Methode im Bereich des maschinellen Lernens, die sich besonders für die Segmentierung und Kategorisierung umfangreicher Datensätze eignet.

ROBUR Wind hat in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner BIBA die Anwendung dieses Algorithmus auf die Sortierung von Bilddaten aus vergangenen Wartungen von Windkraftanlagen erfolgreich umgesetzt. Die unsortierten Bilddaten, die während der Wartung zur Dokumentation der Anlagenzustände erstellt wurden, konnten so in eine strukturierte Form überführt werden. Dies ermöglicht eine objektspezifische Betrachtung und erleichtert die Schadensüberwachung bestimmter Bauteile.

Die praktische Umsetzung beinhaltete die Identifikation wartungsrelevanter Bauteile, die Erstellung von Komponentenkategorien und Bewertungsschemata sowie die Aufbereitung des vorhandenen Bildmaterials für die Clustering-Algorithmen. Durch die Zusammenarbeit mit BIBA wurden die Anforderungen an das Bildmaterial ermittelt und entsprechendes Material für manuelle und drohnenbasierte Inspektionen von Rotorblättern zusammengestellt. Die erhobenen Bilddaten wurden mit BIBA abgestimmt und die Ergebnisse an das Projektteam kommuniziert.

Die erfolgreiche Anwendung des k-means Algorithmus zur Sortierung historischer Bilddaten illustriert die Studie "Automated Sorting and Grading of Agricultural Products based on Image Processing". Diese zeigt, wie ähnliche Algorithmen zur Sortierung und Bewertung landwirtschaftlicher Produkte mittels Bildverarbeitung eingesetzt werden, was die Flexibilität und Effizienz des k-means Algorithmus unterstreicht. Die Übertragung dieser Methodik auf die Wartung von Windkraftanlagen durch ROBUR Wind

stellt einen bedeutenden Fortschritt in der Zustandsüberwachung und Instandhaltung dar und trägt zur Optimierung der Wartungsprozesse bei.

### 1.4.2 Objektdetektion als Unterstützung für Wartungsarbeiten innerhalb einer Windkraftanlage

Die Objekterkennung ist ein entscheidender Bereich der künstlichen Intelligenz, der es ermöglicht, Objekte auf Bildern oder Videos zu identifizieren und zu klassifizieren. In der Windenergiebranche, insbesondere bei der Wartung von Windkraftanlagen, spielt die Objektdetektion eine wesentliche Rolle, um die Effizienz und Sicherheit der Anlagen zu gewährleisten. Durch den Einsatz von Algorithmen und Techniken wie neuronalen Netzen, Deep Learning und Computer Vision können Merkmale von Objekten extrahiert und mit bekannten Kategorien abgeglichen werden.

Im Rahmen des compARE-Projekts wurde ein spezielles Convolutional Neural Network (CNN), das U-Net, entwickelt, welches die Segmentierung von Bildern ermöglicht. Diese Technologie erlaubt es, Objekte pixelgenau zu identifizieren und somit eine detaillierte Betrachtung einzelner Komponenten zu ermöglichen. Die Arbeit "Image Segmentation of Corrosion Damages in Industrial Inspections" demonstriert die effektive Anwendbarkeit von Bildsegmentierungstechniken zur Schadenserkennung in industriellen Kontexten und bildet eine wichtige wissenschaftliche Grundlage für die Weiterentwicklung dieser Technologie.

In der Praxis ermöglicht die Objektdetektion die frühzeitige Erkennung von Verschleißerscheinungen und potenziellen Schäden an den Komponenten einer Windkraftanlage. Durch die präzise Lokalisierung von Korrosionsschäden können Wartungsarbeiten gezielt und effizient durchgeführt werden, was zu einer Verlängerung der Lebensdauer der Anlagen und einer Reduzierung von Ausfallzeiten führt. Die Integration von U-Net in die Wartungsprozesse von ROBUR Wind bietet somit einen signifikanten Mehrwert und trägt zur nachhaltigen Leistungsfähigkeit der Windenergieinfrastruktur bei.

### 1.4.3 Fehlerdetektion zur Abschätzung von Objektschäden an Windkraftanlagen

Die Fehlerdetektion zur Abschätzung von Objektschäden an Windkraftanlagen ist ein entscheidender Aspekt im Bereich der Instandhaltung und Qualitätssicherung. Im Rahmen des compARE Projekts wurde ein innovativer Ansatz entwickelt, der die Bilderkennungstechnologie nutzt, um Schäden an Windkraftanlagen effizient und präzise zu identifizieren. Diese Technologie ermöglicht es, kleinste Defekte wie Risse, Korrosion oder Abnutzungserscheinungen zu erkennen, die mit bloßem Auge nicht sichtbar sind.

Integration von Multispektralbildern: Eine Erweiterung der Fehlerdetektion stellt die Integration von Multispektralbildern dar. Diese Technik ermöglicht es, über das sichtbare Spektrum hinausgehende Informationen zu erfassen und somit verborgene Schäden aufzudecken, die durch konventionelle RGB-Bilder nicht erkannt werden können. Die Analyse von Multispektralbildern trägt dazu bei, die Materialbeschaffenheit und strukturelle Integrität der Windkraftanlagenkomponenten umfassend zu bewerten.

Einsatz von KI-Algorithmen: Durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) und maschinellem Lernen werden Algorithmen trainiert, Muster und Anomalien in den Bildern zu erkennen, die auf potenzielle Schäden hinweisen. Diese Algorithmen sind in der Lage, große Datenmengen zu verarbeiten und kontinuierlich zu lernen, wodurch die Genauigkeit der Fehlerdetektion im Laufe der Zeit verbessert wird.

Präventive Wartung durch Wärmebildtechnik: Die Wärmebildtechnik spielt eine wichtige Rolle bei der präventiven Wartung von Windkraftanlagen. Durch die Messung der Oberflächentemperatur können ungewöhnliche Wärmeentwicklungen, die auf mechanische Probleme oder Überlastungen hindeuten, frühzeitig erkannt werden. Diese Methode ist besonders effektiv bei der Überwachung von schwer zugänglichen oder beweglichen Teilen, wie den Rotorblättern und Getrieben.

Die Optimierung der Instandhaltung von Windenergieanlagen durch den Einsatz von bildverarbeitenden Verfahren auf mobilen Endgeräten ermöglicht eine effizientere Gestaltung des Inspektions- und Wartungsprozesses. Insbesondere die Nutzung einer AR-basierten Software trägt dazu bei, die Abläufe auf der Baustelle zu optimieren und den Fokus von den Desktop-lastigen Arbeiten im Backoffice zu verlagern.

Durch die Automatisierung der Arbeitsdokumentation wird nicht nur der Kundennutzen in Bezug auf Dokumentation gesteigert, sondern auch die eigenen Interessen der ROBUR Wind GmbH wirtschaftlich realisiert. Die Entwicklung und Anpassung der Benutzerschnittstelle des mobilen Systems sowie die Bewertung und Umsetzung verschiedener Dateneingabemöglichkeiten in der EFR App und der Bilddaten App sind weitere Beispiele für den technologischen Fortschritt.

Die Integration von KI-Algorithmen und maschinellem Lernen zur Erkennung von Mustern und Anomalien in den Bildern, die auf potenzielle Schäden hinweisen, zeigt die Fähigkeit, große Datenmengen zu verarbeiten und kontinuierlich zu lernen, wodurch die Genauigkeit der Fehlerdetektion verbessert wird. Diese Entwicklungen führen zu einer erhöhten Betriebssicherheit und einer Verlängerung der Lebensdauer der Windkraftanlagen, was wiederum die Effizienz und Zuverlässigkeit der erneuerbaren Energieerzeugung steigert.

### 1.4.4 Assistenzsystem für den gesamten Wartungsprozess innerhalb einer Windkraftanlage

In der Windenergiebranche spielen Assistenzsysteme eine immer wichtigere Rolle, um den Wartungsprozess innerhalb von Windkraftanlagen zu optimieren. Ein vielversprechender Ansatz ist die Nutzung von erweiterter Realität (AR) und gemischter Realität (XR), um Arbeitsabläufe effizienter zu gestalten und die Produktivität zu steigern.

Erweiterte Realität (AR) ermöglicht es, virtuelle Informationen über die reale Welt zu legen. Dadurch können Benutzer zusätzliche Informationen, Anleitungen oder Hilfestellungen erhalten. In verschiedenen Branchen wie der Industrie, Medizin, Logistik oder im Einzelhandel werden AR-Technologien eingesetzt, um Arbeitsabläufe zu erleichtern und Probleme zu identifizieren.

Gemischte Realität (XR) kombiniert Elemente der virtuellen und realen Welt. Sie erweitert die AR-Konzepte, indem sie digitale Objekte nahtlos in die physische Umgebung einbettet. XR-Technologien werden zunehmend genutzt, um Schulungen zu verbessern und die Interaktion zwischen Mensch und Maschine zu erleichtern.

Die Integration von AR und XR in Assistenzsysteme bietet verschiedene Vorteile:

1. Optimierung der Arbeitsumgebung: Unternehmen können die Arbeitsumgebung ihrer Mitarbeiter mithilfe von AR und XR optimieren. Zusätzliche Informationen werden direkt in das Sichtfeld der Techniker eingeblendet, was die Effizienz steigert.
2. Reduzierung der Fehlerquote: Durch visuelle Anleitungen und Unterstützung bei Wartungsarbeiten können Fehler minimiert werden.
3. Verbesserung der Sicherheit: AR und XR können dazu beitragen, sicherheitsrelevante Informationen in Echtzeit bereitzustellen und somit die Sicherheit der Mitarbeiter zu erhöhen.
4. Steigerung der Effizienz: Die Integration von AR und XR ermöglicht es, Arbeitsabläufe zu beschleunigen und die Produktivität zu steigern.

Das Projekt compARE nutzt diese Konzepte, um die Interaktion zwischen Mensch und Maschine zu erleichtern. Ein wichtiges Dokument für diese Entwicklung ist "UX for XR". Dieses Dokument bietet Einblicke in die Gestaltung von Nutzererfahrungen für immersive Technologien und liefert die theoretische und praktische Grundlage für die im Rahmen des Projekts entwickelten Assistenzsysteme.

### 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Bei der Anpassung der Arbeitspakete an die neuen spezifischen Anforderungen zeigte sich die Flexibilität und das Engagement von ROBUR Wind. Die Expertise des Unternehmens in der Windenergiebranche ermöglichte es, die Schnittstellenproblematik effizient zu lösen und die Entwicklungen nahtlos in die bestehenden Systeme zu integrieren.

Die Zusammenarbeit mit verschiedenen Stellen war ein wesentlicher Bestandteil des Projekts "compARE" und trug maßgeblich zum Erfolg bei. Die anfängliche Kooperation mit Rosch ermöglichte es, die Problemstellungen präzise zu definieren und die Interessen von Rosch in die Entwicklung der Anwendungsfälle zur Sortierung historischer Daten und der automatisierten Vermessung von Kohlebürsten einfließen zu lassen. Ein umfangreicher Datensatz an Wartungsbildern, der die Dokumentationsarbeiten während der Wartung umfassend darstellt, wurde für die Sortierung der historischen Daten bereitgestellt. Für die Vermessung wurden sowohl neue als auch gebrauchte Kohlebürsten zur Verfügung gestellt, die zur Erstellung eines Datensatzes für die Segmentierung dienten.

Die SWMS Consulting GmbH spielte eine unterstützende Rolle in der Zusammenarbeit zwischen BIBA und Rosch, indem sie an der Schnittstelle zwischen den Entwicklungen beider Parteien arbeitete. Mit dem Wechsel des Partners zu Robur wurden die Arbeitspakete den Vorstellungen von Robur angepasst, wobei der Kerninhalt zur Instandhaltung von Windkraftanlagen beibehalten wurde. Durch die bereits vorhandenen Schnittstellen bei Robur wurden die Arbeiten von SWMS überflüssig, was zum Ausstieg von SWMS aus dem Projekt führte.

Im Zuge des compARE-Projekts entstand eine innovative Smartphone- und AR-Brillen-App, die die entwickelten Techniken vereint und vielfältige Interaktionsmöglichkeiten während der Wartungsarbeiten bietet. Das Design für die AR- und Smartphone-App wurde von Rahe + Rahe Design entworfen. In enger Zusammenarbeit entstand ein ansprechendes Design, das die Oberflächendarstellung, die Auswahl der Interaktionen und die Farbgebung der Applikationen harmonisch integriert. Diese Entwicklungen spiegeln das Engagement und die Expertise aller beteiligten Partner wider und zeigen die Bedeutung einer kollaborativen Herangehensweise bei der Realisierung innovativer Lösungen im Bereich der Windenergie.

Darüber hinaus spielte ROBUR Wind eine Schlüsselrolle bei der Konzeption und Implementierung der Smartphone- und AR-Brillen-App. Das technische Know-how und die praktische Erfahrung des Unternehmens trugen dazu bei, dass die App nicht nur technologisch fortschrittlich, sondern auch benutzerfreundlich und auf die Bedürfnisse der Techniker zugeschnitten ist. Die enge Zusammenarbeit mit

Rahe + Rahe Design und die konstruktive Einbringung von Ideen und Feedback führten zu einem Design, das sowohl ästhetisch ansprechend als auch funktional überzeugend ist.

## 2 Eingehende Darstellung

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

#### 2.1.1 AP 1 – Ist-Prozess- und Anforderungsaufnahme

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 (AP 1) "Ist-Prozess- und Anforderungsaufnahme" wurden im Zuge der Integration der compARE Projektarbeiten wesentliche Schnittstellen zwischen den technischen Methoden und den Wartungsprozessen von Windkraftanlagen identifiziert. Diese Schnittstellen bildeten die Grundlage für die Entwicklung von vier Use Cases, die in enger Zusammenarbeit mit unserem ersten Partner Rosch entstanden sind und später durch die Beteiligung von ROBUR Wind eine weitere Verfeinerung erfahren haben.

Use Case 1 fokussiert sich auf die Kategorisierung von Bildern, die während der Wartungsarbeiten an Windkraftanlagen entstehen. Diese Bilder dokumentieren eine Vielzahl von Objekten und Merkmalen, die für die Wartung von Bedeutung sind. Ein speziell entwickelter Algorithmus zur Bildverarbeitung ermöglicht es uns, diese Bilder nach relevanten Merkmalen zu sortieren. Diese sortierten Bilder dienen als wertvolle Ressource, um Schadensverläufe anhand vergangener Wartungen zu analysieren und zukünftige Schadensfälle besser einschätzen zu können.

Use Case 2 zielt darauf ab, die Messung der Längen von Kohlebürsten zu automatisieren. Kohlebürsten sind ein häufig verwendetes Bauteil in Windkraftanlagen, das in vielen verschiedenen Ausführungen vorkommt und regelmäßig auf Verschleiß geprüft werden muss. Durch den Einsatz von Bildverarbeitungstechniken können wir die verschiedenen Kohlebürsten in Bildern erkennen und bewerten, ob ein Austausch notwendig ist oder ob sie weiterhin betriebsfähig sind. Die Digitalisierung dieses Prozesses ermöglicht nicht nur eine präzise Vermessung, sondern auch eine automatische Dokumentation des Arbeitsschrittes, was die Planung zukünftiger Wartungen erleichtert.

Use Case 3 beschäftigt sich mit der Überwachung von Zustandsveränderungen an Bauteilen, wie beispielsweise der Entwicklung von Rissen. Ziel ist es, den Beginn und Fortschritt solcher Veränderungen genau zu verfolgen. Unterstützt wird dieser Prozess durch digitale Werkzeuge, die eine automatische Vermessung und Klassifizierung der Schadstellen ermöglichen. Die Bildverarbeitung spielt auch hier eine entscheidende Rolle bei der Auswertung der Daten.

Use Case 4 konzentriert sich auf die Optimierung der direkten Arbeitsabläufe während der Wartung. Hierbei werden Daten während der Begehung einer Anlage erfasst und analysiert. Dazu gehören Schritte wie die Anmeldung der Anlage im System, die Durchführung relevanter Arbeitsschritte und

die Festlegung ihrer Reihenfolge. Basierend auf diesen Daten wird ein Wartungsplan erstellt, der speziell für bestimmte Aufgaben, wie den Austausch von Teilen oder Reparaturen, optimiert ist.

Diese Use Cases spiegeln unser Bestreben wider, die Effizienz und Präzision der Wartungsarbeiten an Windkraftanlagen durch den Einsatz fortschrittlicher Technologien zu steigern und gleichzeitig die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Anlagen zu gewährleisten.

### 2.1.2 AP 2 – Auswahl mobiler Hardware für Augmented Reality-Anwendungen und Bildverarbeitungsalgorithmen

Im Rahmen des Forschungsprojekts “compARe” wurde eine umfassende Analyse zur Auswahl geeigneter Augmented Reality (AR)-Brillen für die Wartung von Windkraftanlagen durchgeführt. Die Untersuchung konzentrierte sich auf die zum Untersuchungszeitpunkt aktuellen und relevanten AR-Brillen, um die optimale Hardware für den Einsatz im Feld zu identifizieren.

Die Analyse berücksichtigte nicht nur die allgemeinen Spezifikationen der AR-Geräte, sondern legte auch ein besonderes Augenmerk auf die Ergonomie und die Leistungsfähigkeit der Hardware. Ziel war es, ein Gerät zu finden, das nicht nur technisch fortschrittlich ist, sondern auch den Anforderungen der Techniker im Hinblick auf Tragekomfort und Benutzerfreundlichkeit gerecht wird.

#### **Tabelle 2: Betrachtung der AR-Device auf ihre Eigenschaften und Interaktionsmöglichkeiten**

| Hardware-Eigenschaften      | AR-Hardware                    |                                  |                                 |                         |   |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---|
|                             | MS HoloLens 2                  | magic leap 1                     | Google Glass 2 (Enterprise)     | Vuzix M 400             | Vuzix Blade                                     |
| <b>monokular/ binokular</b> | binokular                      | binokular                        | monokular                       | monokular               | monokular                                       |
| <b>Gewicht</b>              | 566 g                          | 316 g                            | 46g ohne Rahmen                 | 68g nur Viewer          | 94g   |
| <b>Sensoren</b>             | Kamera, Tiefenbilder, Mikrofon | Kamera, Tiefenbilder, Mikrofon   | Kamera, Mikrofon                | Kamera, Mikrofon        | Kamera, Mikrofon                                |
| <b>Steuerung</b>            | Gesten, Sprache                | Gesten, Sprache, Controller, App | Touch, Sprache                  | Touch, Sprache          | Touch, Sprache                                  |
| <b>Betriebssystem</b>       | Windows Holographic            | Lumin OS                         | Android Open Source Project 8.1 | Android 9.0 OS          | Android OS                                      |
| <b>Programmierung</b>       | C API, Unity/ Unreal           | C API, Unity/ Unreal             | Kotlin, Java                    | Kotlin, Java            | Android-spezifisch, Unity ggf. Unreal (AR Core) |
| <b>Rechenleistung</b>       | Vergleichsweise hoch           | Vergleichsweise hoch             | Vergleichsweise niedrig         | Mittlere Rechenleistung | Vergleichsweise niedrig                         |
| <b>Preis</b>                | ~ 3850 €                       | ~ 2000 €                         | ~ 1150 €                        | ~ 2.800 €               | ~ 1000 €  |

Nach sorgfältiger Prüfung verschiedener Modelle fiel die Wahl auf die Vuzix Blade. Diese AR-Brille zeichnet sich durch ihren hohen Tragekomfort aus und wurde speziell für Wartungstätigkeiten entwickelt. Obwohl sie in Bezug auf die reine Leistungsfähigkeit nicht an der Spitze steht, überzeugt sie durch ihr Design, das die Arbeitsabläufe nur minimal stört und eine lange Tragedauer ermöglicht.

Die Entscheidung für die Vuzix Blade unterstreicht das Bestreben, Technologie so in den Arbeitsalltag zu integrieren, dass sie die Effizienz steigert, ohne dabei die Arbeitsprozesse zu beeinträchtigen. Dieser Ansatz gewährleistet, dass die Techniker die Vorteile der AR-Technologie voll ausschöpfen können, während sie gleichzeitig einen hohen Komfort bei der Ausführung ihrer Wartungsaufgaben an Windkraftanlagen genießen.

Die interne Abstimmung der Anforderungen mit den Technikern war ein wesentlicher Bestandteil dieses Prozesses, um sicherzustellen, dass die ausgewählte AR-Hardware den praktischen Bedürfnissen entspricht.

Darüber hinaus wurde eine Auswahl geeigneter Bildverarbeitungsalgorithmen getroffen. Dies beinhaltet den Input zu den spezifischen Anforderungen an diese Algorithmen sowie die Recherche, Auswahl und Bereitstellung von Bilddaten zur Evaluation durch das BIBA. Die Use Cases wurden kontinuierlich weiterentwickelt, um die Möglichkeiten der Bildverarbeitung optimal zu nutzen.

Die Prüfung der Nutzung von AR-Technologie bei der Datenerfassung war ebenfalls ein wichtiger Aspekt. Es wurde erforscht, wie AR die Techniker im Arbeitsablauf unterstützen kann, und die Use Cases wurden entsprechend der AR-Möglichkeiten weiterentwickelt.

Schließlich wurde ein Assistenzsystem konzipiert, das auf der Grundlage der technologischen Machbarkeitsbewertung der Use Cases und der Erörterung ihrer Nutzbarkeit und Einsatzmöglichkeiten basiert.

### 2.1.3 AP 3 – Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen optischen Zustandsüberwachung

#### 2.1.3.1 Prozessaufnahme von Wartungsarbeiten

Es wurden verschiedene Prozesse für die Nutzung eines AR-Assistenzsystems an einer Windkraftanlage definiert. Insbesondere lag der Fokus auf dem Anmeldeprozess vor Besichtigung oder Reparaturarbeiten an einer Windkraftanlage sowie dem rückwärtigen Prozess, der die Abmeldung nach solchen Arbeiten umfasst. Die Prozessschritte sind klar strukturiert und bauen aufeinander auf. Je nach Anlage, Betreiber und den zu erledigenden Aufgaben kann sich der Prozess leicht ändern.

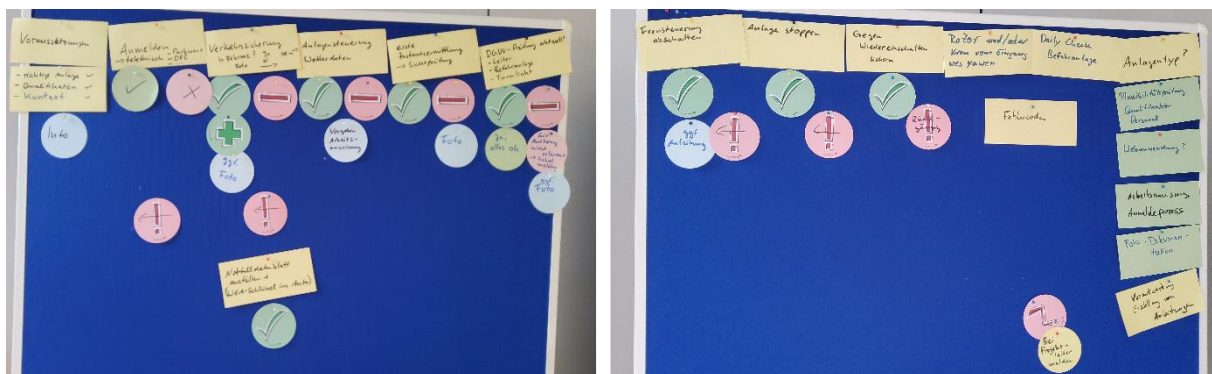
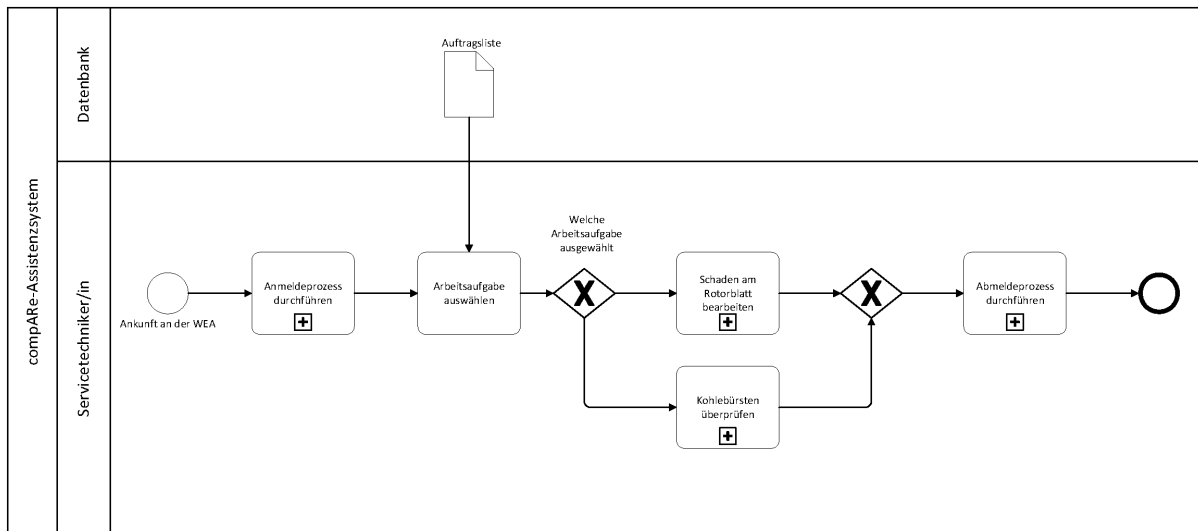


Abbildung 2: Ergebnisse des Workshops zur Ausarbeitung von Prozessen für die Datenbrille

Während der Prozessaufnahme wurde diskutiert, welche Prozessschritte bildlich dokumentiert werden müssen, da diese für den späteren Verlauf relevant sein könnten. Zudem wurden Abbruchkriterien festgelegt. Neben dem An- und Abmeldeprozess wurde auch ein verallgemeinerter Prozess für Repa-

raturarbeiten an einer Windkraftanlage definiert. Dieser Reparaturprozess setzt sich aus den Subprozessen des An- und Abmeldeprozesses sowie der eigentlichen Reparaturarbeiten zusammen. **(Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.)**



**Abbildung 3: Allgemeine Prozesskette der einzelnen Schritte bei Reparaturarbeiten einer Windkraftanlage**

Die Identifikation der wartungsrelevanten Bauteile einer Windenergieanlage (WEA) ist ein grundlegender Schritt, um die Effizienz von Wartungsprozessen zu maximieren. In diesem Abschnitt wurden alle Bauteile ermittelt, die im Kontext von Wartungsarbeiten relevant sind. Diese Identifikation ist entscheidend, um gezielte und effektive Wartungsstrategien entwickeln zu können. Eine präzise Kenntnis der wartungsrelevanten Komponenten ermöglicht es, Ressourcen optimal zu nutzen und Ausfall- und Wartezeiten zu minimieren.

Zur Strukturierung der wartungsrelevanten Bauteile wurden diese in spezifische Kategorien eingeteilt. Diese Kategorisierung schafft eine klare Übersicht und erleichtert die Priorisierung der Wartungsaufgaben. Zusätzlich wurde ein Bewertungsschema entwickelt, welches die Dringlichkeit und Wichtigkeit der Reparaturarbeiten bewertet. Dies ermöglicht eine systematische und priorisierte Planung der Wartungsmaßnahmen und stellt sicher, dass kritische Bauteile bevorzugt behandelt werden.

Um die Analyse- und Wartungsprozesse weiter zu unterstützen, wurde eine umfassende Recherche relevanter Bilddaten durchgeführt. Diese Bilddaten wurden anschließend dem Projektpartner BIBA zur Verfügung gestellt. Die Bereitstellung dieser Daten ist entscheidend, um die Analysewerkzeuge des Projektpartners mit ausreichend und qualitativ hochwertigem Material zu versorgen.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem BIBA wurde kontinuierlich Feedback zu den eingesetzten Clustering-Algorithmen gegeben. Dieses Feedback zielte darauf ab, die Effektivität der Bildanalyse zu verbessern. Durch die Rückmeldungen konnten Anpassungen und Optimierungen an den Algorithmen vorgenommen werden, um eine präzisere und effizientere Bildauswertung zu gewährleisten.

Bestehendes Bildmaterial wurde sorgfältig aufbereitet, um es optimal für die Clustering-Algorithmen nutzbar zu machen. Diese Aufbereitung umfasste die Verbesserung der Bildqualität und die Anpassung der Datenformate. Durch diese Maßnahmen konnte die Genauigkeit der Algorithmen verbessert und die Analyseergebnisse verfeinert werden.

Im Zuge der Arbeiten wurden spezifische Anforderungen an das benötigte Bildmaterial definiert. Diese Anforderungen sind essenziell, um die Qualität der Bildanalyse zu sichern. Sie umfassen Parameter wie Auflösung, Perspektive und Beleuchtung der Bilder, um eine konsistente und zuverlässige Auswertung zu ermöglichen.

Für die manuellen Inspektionen von Rotorblättern wurden relevante Bildmaterialien zusammengestellt. Diese Zusammenstellung stellt sicher, dass die Inspektoren über die notwendigen visuellen Informationen verfügen, um eine gründliche und genaue Überprüfung der Rotorblätter durchzuführen.

Neben den manuellen Inspektionen wurden auch für drohnenbasierte Inspektionen spezifische Bildmaterialien zusammengestellt.

Die gesammelten Bilddaten wurden umfassend mit dem Projektpartner BIBA besprochen und übergeben. In diesen Meetings wurden die Daten detailliert durchgegangen, um sicherzustellen, dass alle relevanten Informationen berücksichtigt wurden und die Daten den Anforderungen des BIBA entsprechen.

Die im Rahmen der Analyse und Bilddatennutzung erzielten Ergebnisse wurden kontinuierlich im Projektteam abgestimmt und kommuniziert. Diese Abstimmungen und die transparente Kommunikation sind entscheidend, um den Prozess kontinuierlich zu verbessern und sicherzustellen, dass alle Teammitglieder auf dem gleichen Stand sind. Durch den regelmäßigen Austausch konnten Erkenntnisse geteilt und die Effektivität der Wartungsstrategien erhöht werden.

### *2.1.3.2 Sortierung historischer Daten*

Wir haben ein Clustering-Verfahren ausgewählt, das auf der Basis von Feature-Erkennung mittels Convolutional Neural Networks (CNN) agiert. Dieses Verfahren ermöglicht die automatische Extraktion von Bildeigenschaften wie Farbe, Form und anderen Merkmalen. Das CNN erlernt dabei Muster und Strukturen in den Bildern und kann diese zuverlässig identifizieren.

Die extrahierten Merkmale werden mittels eines k-means Algorithmus in k verschiedene Klassen sortiert. Das k steht dabei für die Anzahl der jeweils erkannten Objekte. Die erkannten Objekte können vielfältig sein: von Bauteilen wie Schrauben und Muttern bis hin zu sicherheitsrelevanten Elementen wie Feuerlöschern oder Notausgängen.

Abbildung 2, Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen Beispiele für die erkannten Objekte. Die automatische Klassifizierung ermöglicht eine effiziente Sortierung der Bilder und erleichtert die spätere Suche nach spezifischen Objekten.

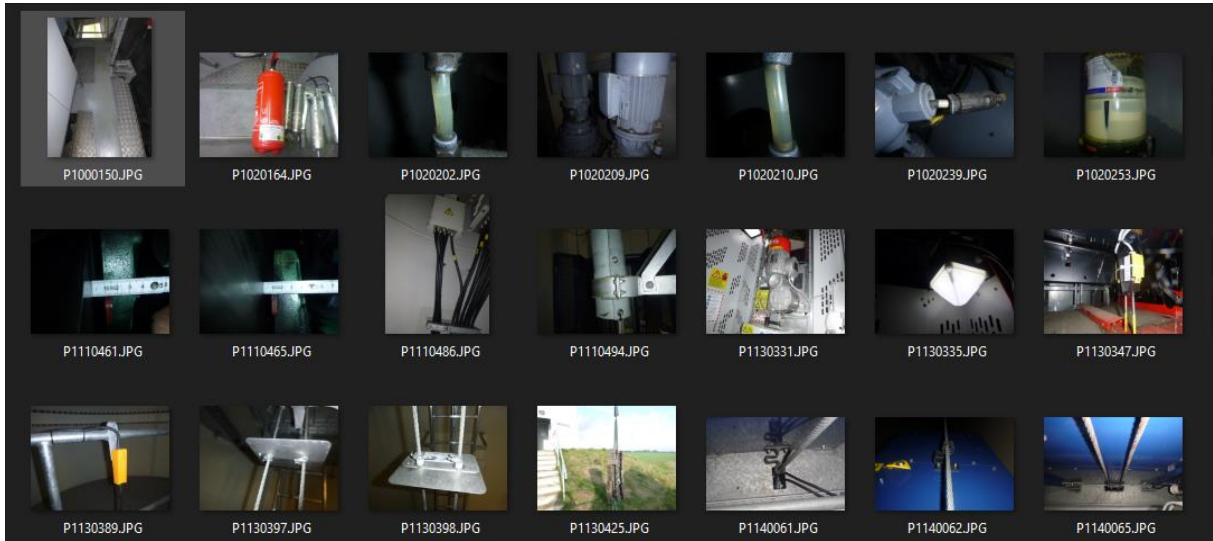
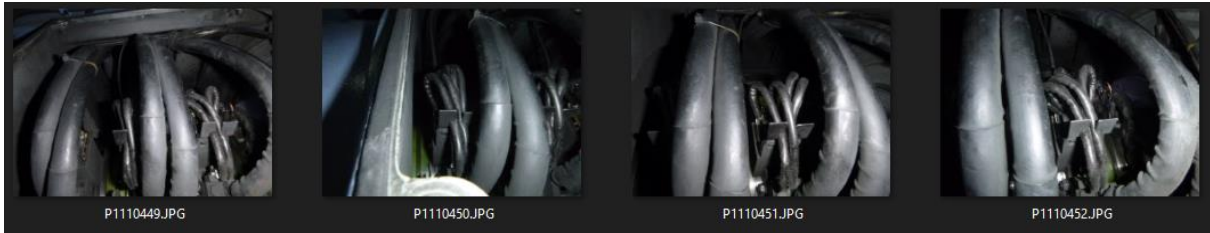


Abbildung 4: Ausschnitt unsortierter Bilder aus historischen Datensätzen

|           |                  |             |
|-----------|------------------|-------------|
| cluster0  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster1  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster2  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster3  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster4  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster5  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster6  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster7  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster8  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster9  | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster10 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster11 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster12 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster13 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster14 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster15 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster16 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster17 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster18 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster19 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster20 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |
| cluster21 | 16.12.2020 14:37 | Dateiordner |

Abbildung 5: Ausschnitt der Cluster mit sortierten Bildern nach dem k-means Verfahren



**Abbildung 6: Ordner mit sortierten Bildern der gleichen Bildeigenschaften**

Eine erfolgreiche Sortierung teilt Objekte mit ähnlichen Eigenschaften in einen Ordner ein. So werden zum Beispiel alle Bilder von Feuerlöschern in einen speziellen Ordner einsortiert. Dies ermöglicht eine gezielte Überprüfung der Prüfmarken der Feuerlöscher. Durch die automatisierte Objekterkennung und Sortierung können wir effizienter arbeiten und die Sicherheit unserer Anlagen gewährleisten.

Für die Objekterkennung wurden verschiedene Typen und Modelle von Kohlebürsten gesammelt. Diese Sammlung umfasste sowohl neue als auch gebrauchte Bürsten, um ein breites Spektrum an Zuständen und Verschleißmustern zu dokumentieren. Die Auswahl erfolgte in enger Abstimmung mit den Anforderungen des BIBA, um eine repräsentative Datenbasis zu schaffen.

Zur Unterstützung des BIBA wurde umfangreiches Bildmaterial von den gesammelten Kohlebürsten erstellt. Diese Bilder wurden unter kontrollierten Bedingungen aufgenommen, um eine hohe Qualität und Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Bilder wurden in einer zentralen Datenbank organisiert und mit detaillierten Metadaten versehen, um die Nachvollziehbarkeit und Weiterverarbeitung zu erleichtern.

Die bereitgestellten Kohlebürsten und das Bildmaterial wurden intensiv durch das BIBA evaluiert. In regelmäßigen Workshops und Meetings fand ein fortlaufender Austausch statt, bei dem das BIBA Feedback zur Bildqualität, den erkannten Objekten und der Anwendbarkeit der Bilder in verschiedenen Szenarien gab. Diese Rückmeldungen waren essentiell, um die Bildaufnahmetechniken und die Datenbankstruktur kontinuierlich zu verbessern.

Neben den Kohlebürsten wurden auch Rotorblätter als relevante Bauteile für die Analyse identifiziert. Diese Bauteile sind entscheidend für die Funktionsfähigkeit von Windenergieanlagen und erfordern eine regelmäßige Wartung und Inspektion. Durch die Identifikation der Rotorblätter als Untersuchungsobjekte konnte das Projekt um eine weitere wichtige Komponente erweitert werden.

Zur besseren Vergleichbarkeit und Bewertung von Wartungsbedarfen wurden typische Schadensmuster dokumentiert. Diese Muster umfassten unter anderem strukturelle Schäden, Risse und Blitzschäden an den Rotorblättern. Die systematische Erfassung und Kategorisierung dieser Schäden ermöglicht es, Wartungsbedarfe gezielt zu identifizieren und priorisieren.

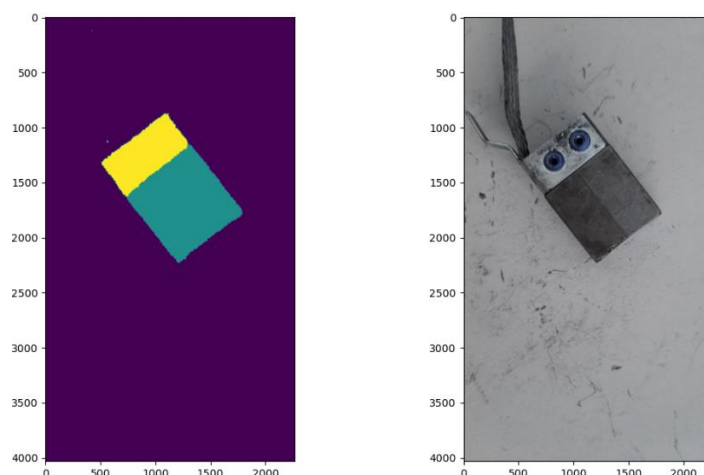
Im Rahmen der Evaluation wurden spezifische Beispiele struktureller Schäden an Rotorblättern untersucht. Diese umfassten sowohl Risse als auch Blitzschäden, die detailliert dokumentiert und analysiert wurden. Durch die genaue Analyse dieser Beispiele konnten wichtige Erkenntnisse über die Entstehung und Entwicklung solcher Schäden gewonnen werden, die für zukünftige Wartungsstrategien von großer Bedeutung sind.

Abschließend wurde eine perspektivische Ausrichtung zur Erweiterung und Zukunftssicherheit der abgestimmten Use-Cases entwickelt. Ziel ist es, die gewonnenen Erkenntnisse und die entwickelte Methodik kontinuierlich weiterzuentwickeln und an zukünftige Anforderungen anzupassen. Dies umfasst die Erweiterung der Datenbasis, die Optimierung der Bildaufnahmetechniken sowie die Integration neuer Technologien und Analysemethoden.

Die Sammlung und Bereitstellung von Kohlebürsten und Rotorblättern sowie die detaillierte Dokumentation und Analyse von Schadensmustern stellen wesentliche Bausteine für die Optimierung der bildbasierten Objekterkennung und Wartungsplanung dar. Durch den intensiven Austausch mit dem BIBA konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen und praxisrelevante Lösungen entwickelt werden, die zur Zukunftssicherheit der betrachteten Use-Cases beitragen.

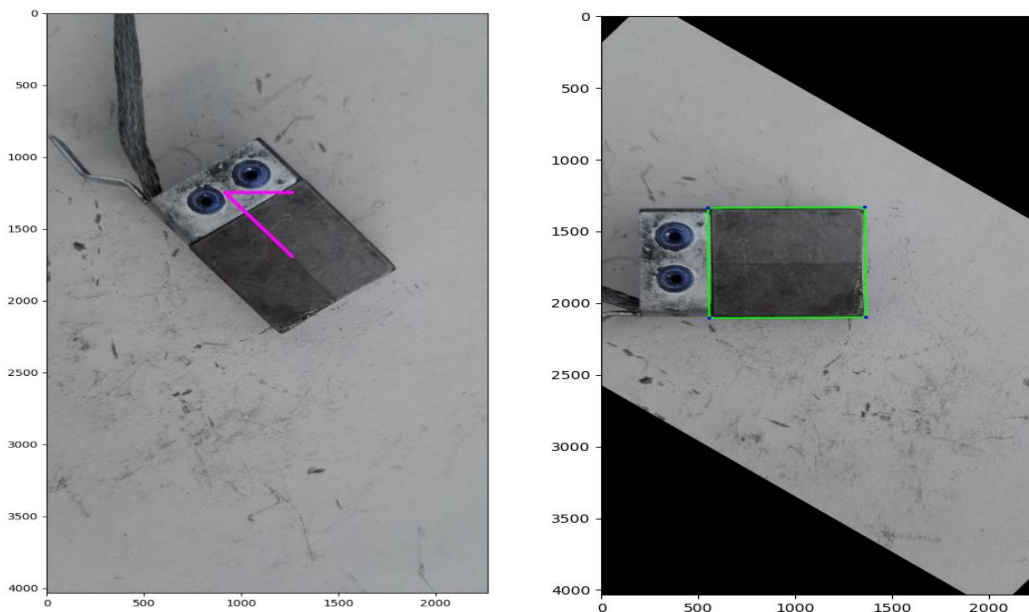
### 2.1.3.3 Segmentierung von Kohlebürsten zur bildlichen Vermessung

Im speziellen Fall der Kohlebürste haben wir eine Aufteilung in Abriebfläche und Orientierungsmerkmal vorgenommen. Das Orientierungsmerkmal dient dazu, das Bild der Kohlebürste so auszurichten, dass eine effektive Vermessung möglich ist (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 7: Segmentierte Kohlebürste mit dem Originalbild zum Vergleich. In Gelb das Orientierungsfeature und in Grün die Abriebfläche**

Durch die virtuelle Neuausrichtung der Kohlebürste können wir die Länge und Breite der Bürste bestimmen, um daraus ein Maß für den Abrieb abzuleiten. Mithilfe des Orientierungsfeatures und der Abriebfläche erstellen wir eine Linie, die mit einer horizontalen Linie abgeglichen wird, um den Liegewinkel der Kohlebürste zu ermitteln. Über diesen Winkel kann die Kohlebürste rotiert werden, um die bildliche Breite und Länge der Abriebfläche zu bestimmen. Dadurch können wir ein Verhältnis zwischen Breite und Länge berechnen und eine Abschätzung des Abriebs vornehmen. Diese Informationen sind entscheidend für die Empfehlung zum Austausch der Kohlebürste.



**Abbildung 8: Darstellung der Ausrichtungsmethode für beliebige Kohlebürstenbilder**

In der heutigen Industrie sind Kohlebürsten ein kritischer Bestandteil vieler elektrischer Maschinen. Ihre zuverlässige Funktion ist entscheidend für den reibungslosen Betrieb der Geräte. Die Implementierung moderner Technologien zur Überwachung und Wartung dieser Komponenten kann die Effizienz und Lebensdauer von Maschinen erheblich verbessern. In diesem Zusammenhang wird die Rolle von Convolutional Neural Networks (CNNs), automatisierter Bildverarbeitung, Augmented Reality (AR) sowie datenbasierter Entscheidungsfindung in der Wartung von Kohlebürsten untersucht. Darüber hinaus wird auf Maßnahmen zur Minimierung von Konzeptionsfehlern und die langfristige Zukunftssicherheit der eingesetzten Technologien eingegangen.

Die präzise Zustandserfassung von Kohlebürsten ist von zentraler Bedeutung, um den optimalen Zeitpunkt für Wartungsarbeiten zu bestimmen und Ausfallzeiten zu minimieren. Convolutional Neural Networks (CNNs) bieten hier erhebliche Vorteile. CNNs sind in der Lage, komplexe Muster und Anomalien

in Bilddaten zu erkennen, was eine genaue Überwachung des Zustands der Kohlebürsten ermöglicht. Durch die Analyse von Bilddaten können Verschleiß, Schäden und andere Abnutzungserscheinungen frühzeitig identifiziert werden. Dies trägt dazu bei, präventive Wartungsmaßnahmen rechtzeitig zu planen und durchzuführen, was wiederum die Betriebssicherheit und Effizienz erhöht.

Die Automatisierung der Bildverarbeitung und die Integration von Augmented Reality (AR) in den Wartungsprozess bieten erhebliche Vorteile. Automatisierte Bildverarbeitungssysteme können kontinuierlich Bilddaten erfassen und analysieren, wodurch menschliche Fehler reduziert und die Genauigkeit der Inspektionen erhöht werden. AR-Technologien ermöglichen es Technikern vor Ort, detaillierte Informationen und Anweisungen direkt im Sichtfeld zu erhalten, was die Effizienz und Geschwindigkeit der Wartungsarbeiten steigert. Durch die Kombination dieser Technologien können Arbeitsabläufe optimiert und die Ausfallzeiten der Maschinen weiter reduziert werden.

Die Sammlung und Analyse von Bilddaten spielt eine entscheidende Rolle bei der datenbasierten Entscheidungsfindung. Durch die Auswertung der gesammelten Daten können fundierte Entscheidungen über den Zustand und die Wartungsbedürftigkeit von Kohlebürsten getroffen werden. Statistische Analysen und Machine-Learning-Algorithmen können Muster und Trends in den Daten identifizieren, die auf bevorstehende Wartungsbedarfe hinweisen. Dies ermöglicht eine proaktive und vorausschauende Wartungsstrategie, die die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Maschinen erhöht.

Regelmäßige Abstimmungen und das kontinuierliche Hinterfragen von Entscheidungen sind essenziell, um Software-Konzeptionsfehler zu minimieren und die Informationssicherheit zu gewährleisten. Durch eine iterative Entwicklungs- und Überprüfungsstrategie können potenzielle Fehler frühzeitig erkannt und behoben werden. Dies trägt dazu bei, die Qualität und Zuverlässigkeit der eingesetzten Software und Systeme zu verbessern. Zudem wird durch regelmäßige Schulungen und Sicherheitsüberprüfungen sichergestellt, dass die Mitarbeiter stets auf dem neuesten Stand der Technik und Sicherheitsanforderungen sind.

### *2.1.3.4 Abgleich von Schadensfällen an Rotorblättern*

Im Rahmen des Use-Case 4 haben wir bei ROBUR Wind die Untersuchung von Fehlstellen an Windkraftanlagen neu strukturiert, um eine präzisere Analyse und effizientere Wartungsprozesse zu ermöglichen. Die Identifikation von Schäden an Rotorblättern erfolgt durch den Einsatz von Drohnen, die hochauflösende Bilder liefern. Unsere erfahrenen Techniker analysieren diese Bilder und markieren die erkannten Fehlstellen, was eine wichtige Grundlage für die weitere Bearbeitung darstellt.

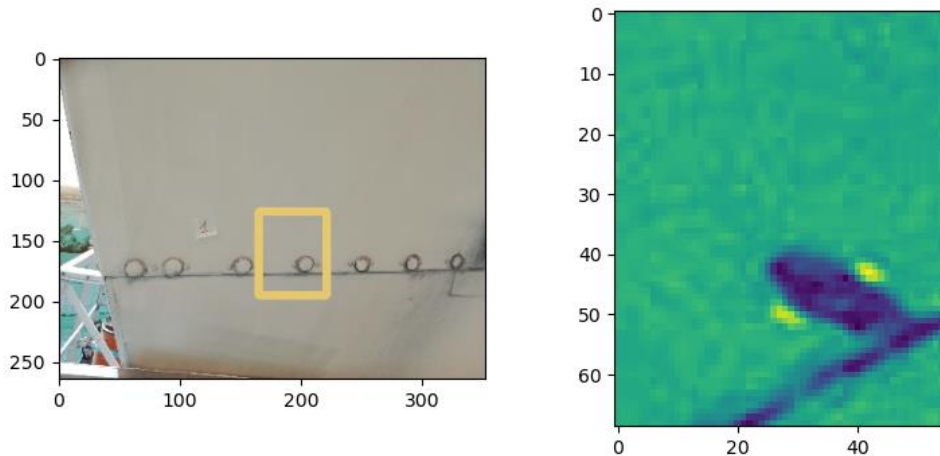
Die manuelle Auswertung, obwohl sie dem aktuellen Stand der Technik entspricht, weist Limitationen auf, die wir durch die Entwicklung einer innovativen Anwendung zur automatischen Zuordnung von Fehlstellen überwinden. Diese Anwendung ermöglicht es, die von den Technikern vor Ort aufgenommenen Bilder zu analysieren und mit bereits erkannten Fehlern abzugleichen. Durch diesen Prozess wird eine effiziente Verknüpfung von Bildern und Fehlstellen erreicht, was die Dokumentation und Nachverfolgung erheblich vereinfacht.



**Abbildung 9: Drohnenbild eines Rotorblatts mit Fehlstellenmarkierung**

Die Herausforderung bei der automatischen Zuordnung liegt in den variierenden Perspektiven und Auflösungen der Bilder, die zu Fehlinterpretationen führen können. Um dies zu vermeiden, setzen wir fortschrittliche Algorithmen ein, die Wahrscheinlichkeiten für die Positionierung von Schäden berechnen und die genaueste Übereinstimmung auswählen. Wir haben festgestellt, dass das Verfahren

besonders bei kleineren und deutlich sichtbaren Fehlstellen zuverlässig funktioniert, während größere Schäden eine spezifischere Herangehensweise erfordern.



**Abbildung 10: Fehlerzuordnung mit links das Bild des Technikers und rechts dem schwarzweißen Bild der Fehlstelle aus dem Drohnenbild. Das rechte Bild zeigt ein angepasste schwarz-weiß Darstellung der im linken Bild markierten Niete, welche zum algorithmischen Abgleich genutzt wird.**

Unsere Bemühungen konzentrieren sich darauf, die Genauigkeit der Zuordnung kontinuierlich zu verbessern und die Anwendung auf eine breitere Palette von Schadensarten auszuweiten. Die Zusammenarbeit mit dem Bremer Institut für Produktion und Logistik (BIBA) und die Integration von Feedback von ROBUR haben wesentlich zur Optimierung der Nutzerführung und zur Entwicklung eines mobilen Augmented Reality-basierten Assistenzsystems beigetragen. Dieses System unterstützt unsere Techniker bei der Verwaltung von Serviceeinsätzen und ermöglicht eine präzisere Erkennung und Dokumentation von Fehlstellen. Durch die Kombination von manuellen und automatisierten Prozessen streben wir danach, die Wartung von Rotorblättern effizienter und genauer zu gestalten, um die Langlebigkeit und Leistungsfähigkeit von Windkraftanlagen zu sichern.

Im Zeitraum von Juni bis November 2021 konzentrierte sich das technische Arbeitspaket (TAP) 3.3 auf die Erkennung und Analyse von Abweichungen im Inspektions- und Wartungsprozess für Rotorblätter. Die Identifikation von Automatisierungsmöglichkeiten und der Vergleich von manuellen und automatisiert erhobenen Bildmaterialien führten zur Ergebnisübergabe an das Bremer Institut für Produktion und Logistik (BIBA). TAP 3.5, an dem RoSch/ROBUR nicht beteiligt war, befasste sich mit dem Abgleich historischer Daten. TAP 3.6, gestartet im Januar 2022, zielte auf die Unterstützung der Dokumentation ab, wobei die Anpassung auf Fehlererkennung und -bearbeitung sowie die Optimierung der Nutzerführung durch Feedback von ROBUR im Vordergrund standen. Die Diskussion von Design-Vorschlägen hinsichtlich Nutzbarkeit und Einsatzmöglichkeiten war ebenfalls Teil dieses Pakets. Schließlich führte

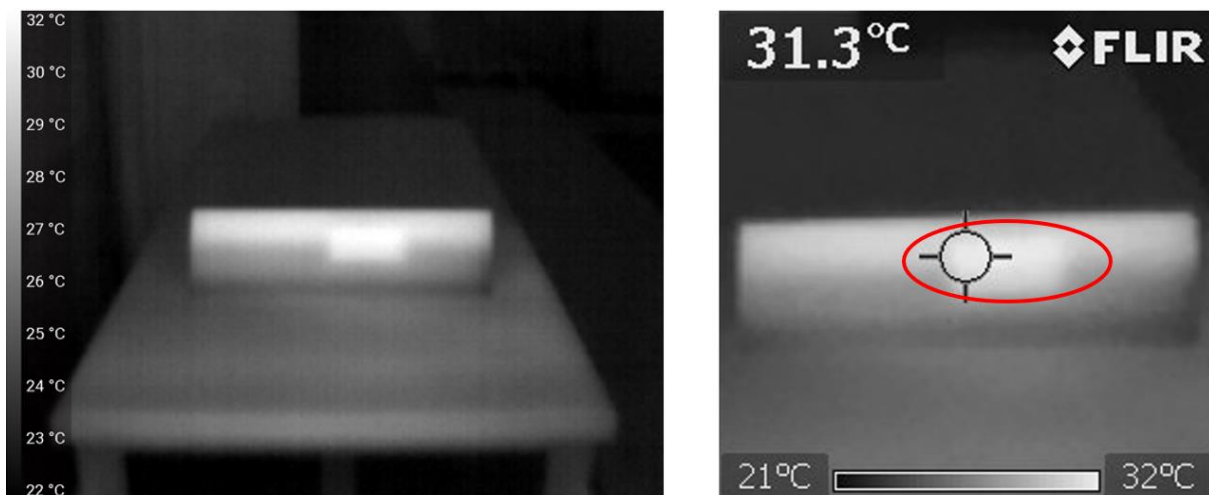
TAP 4 zur Entwicklung eines mobilen Augmented Reality-basierten Assistenzsystems, das die Verwaltung von Serviceeinsätzen erleichtert und durch KI-gestützte Algorithmen für bildverarbeitende Verfahren unterstützt wird.

Die durchgeführten technischen Arbeitspakete können maßgeblich zur Verbesserung der Inspektions- und Wartungsprozesse von Rotorblättern beigetragen. Durch die Einführung von Automatisierung und die Nutzung von KI in der Bildverarbeitung konnte die Effizienz gesteigert und die Genauigkeit der Fehlererkennung erhöht werden. Die enge Zusammenarbeit mit Instituten und die Integration von Nutzerfeedback sind entscheidend für die kontinuierliche Optimierung der Prozesse und die Entwicklung zukunftsweisender Technologien in der Windenergiebranche.

### 2.1.3.5 Einsatz von Wärmebildtechnik zur Wartung von Windkraftanlagen

ROBUR Wind hat dazu beigetragen, die Anwendung von Wärmebildtechniken zur Zustandsüberwachung von Windkraftanlagenkomponenten eingehend zu untersuchen. Die klassische Bildverarbeitung wurde dabei um die innovative Thermografie ergänzt, um verborgene Mängel wie eingeschlossenes Wasser in Bauteilen zu identifizieren.

Die Seek Thermal Compact Kamera, ein mobiles Gerät, das sich leicht an ein Smartphone anschließen lässt, stand im Mittelpunkt unserer Untersuchungen. Mit einer speziellen Applikation konnten wir direkt vor Ort Wärmebilder erstellen und analysieren. Diese Flexibilität ermöglichte es uns, die Kamera unter realen Bedingungen zu testen – von Laborversuchen bis hin zu Feldexperimenten an demontierten Windrädern. (Abbildung 11).



**Abbildung 11: Thermografie-Aufnahmen der Seek Thermal Compact (links) und der FLIR i5 (rechts) bei simuliertem Einschluss**

Unsere Vergleichsstudien mit drei weiteren hochwertigen Wärmebildkameras zeigten, dass die Seek Thermal Compact Kamera trotz ihrer geringeren technischen Spezifikationen, insbesondere in Bezug auf Auflösung und Temperaturbereich, wertvolle Dienste leisten kann. Die Ergebnisse der Versuchsaufbauten und die daraus resultierende Analyse der Einflussfaktoren bestätigten die Eignung der mobilen Kamera für bestimmte Inspektionsaufgaben.



**Abbildung 12: Thermal Seek Compact Kamera für die Wärmebilderstellung mittels Smartphone**

Die Seek Thermal Compact Kamera überzeugte durch ihren attraktiven Preis und ihre einfache Handhabung. Obwohl sie technisch hinter ihren Konkurrenten zurückbleibt, erwies sie sich als nützlich für vorläufige Bewertungen und spezifische Anwendungen im Wartungsbereich. Diese Einschätzung wurde auch von unserem Projektpartner Rosch bestätigt.

Tabelle 3: Tabellarischer Vergleich der verwendeten Wärmebildkameras

| Spezifikation              | Seek Thermal Compact          | FLIR T530                  | FLIR i5                    | FLUKE Ti25                        |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Detektorprinzip            | Ungekühltes Mikrobolometer    | Ungekühltes Mikrobolometer | Ungekühltes Mikrobolometer | Ungekühltes Mikrobolometer        |
| Spektralbereich            | 7,2 – 13 $\mu m$              | 7,5 – 14,0 $\mu m$         | 7,5 – 13,0 $\mu m$         | 7,5 – 14,0 $\mu m$                |
| Auflösung                  | 206 x 156 Pixel               | 320 x 246 Pixel            | 80 x 80 Pixel              | 160 x 120 Pixel                   |
| Messbereich Temperatur     | –40 bis +330°C                | –20 bis +120°C             | 0 bis +250°C               | –30 bis +350°C                    |
| Thermische Empfindlichkeit | $\leq 100 mK$                 | $\leq 30 mK$               | $\leq 100 mK$              | $\leq 100 mK$                     |
| Temperaturanzeige          | Fahrenheit oder Celsius       | Fahrenheit oder Celsius    | Fahrenheit oder Celsius    | Fahrenheit oder Celsius           |
| Spannungsversorgung        | Über Endgerät (Akkubetrieb)   | Akkubetrieb                | Akkubetrieb                | Akkubetrieb                       |
| Gewicht                    | $\approx 14g$                 | $\approx 1.300g$           | $\approx 340g$             | $\approx 1.100g$                  |
| Preis                      | $\approx 250 - 300 \text{ €}$ | $\approx 11.000 \text{ €}$ | $\approx 1.500 \text{ €}$  | $\approx 4.500 - 6.500 \text{ €}$ |

Weiterhin stand die ROBUR Wind für Experteninterviews zur Verfügung, um den mobilen Einsatz der Wärmebildtechnik zu bewerten. Die Interviews enthüllten ein beträchtliches Potenzial für die Inspektion elektrischer Systeme und Getriebekomponenten. Sollten sich diese Erkenntnisse in weiteren Versuchen bestätigen, die sich nicht ausschließlich auf Rotorblätter konzentrieren, könnte dies die Integration des Sensors in die Standardausrüstung von Serviceteams rechtfertigen. Ein wichtiger Aspekt, der in den Interviews hervorgehoben wurde, ist die Tatsache, dass High-End-Thermografiegeräte aufgrund von Exportkontrollen als Dual-Use-Güter eingestuft werden könnten, was bei der Seek Thermal Compact Kamera weniger wahrscheinlich ist.

Tabelle 4: Bewertung der Seek Thermal Wärmebildkamera in Form von Vor- und Nachteilen

| Vorteile   | Nachteile   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr gute Sichtbarkeit folgender Schadensbilder: Fremdkörper- und Flüssigkeitseinschlüsse</li> <li>• Preisvorteil gegenüber anderen Wärmebildkameras</li> <li>• Einfache Bedienbarkeit</li> <li>• Weniger Probleme bezüglich Export Control als bei High-End-Wärmebildkameras</li> <li>• Geringes Gewicht im Vergleich zu anderen Handheld-Kameras</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergleichsweise geringe Auflösung zu High-End-Wärmebildkameras</li> <li>• Fehlstellen in Laminat und Sandwichbereichen eher schlecht zu erkennen (bei dünnwandigen Profilen)</li> <li>• Geringe thermische Empfindlichkeit</li> <li>• Geringe Robustheit</li> <li>• Manuelle Fokussierung</li> <li>• Aufnahmen können fehlinterpretiert werden, wenn keine genaueren Kenntnisse über Rotorblatt bzw. Komponenten vorhanden sind</li> </ul> |

Die Thermografie, ein nicht-invasives Diagnoseverfahren, hat sich als unverzichtbares Werkzeug für die Wartung und Instandhaltung von Windkraftanlagen etabliert. Durch die berührungslose Erfassung thermischer Signaturen ermöglicht sie eine präzise Zustandsbewertung kritischer Komponenten. Die Fähigkeit, unregelmäßige Wärmemuster zu erkennen, die auf Lager- und Getriebeschäden, Korrosion in elektrischen Verbindungen oder strukturelle Beeinträchtigungen in Rotorblättern hinweisen, ist von unschätzbarem Wert.

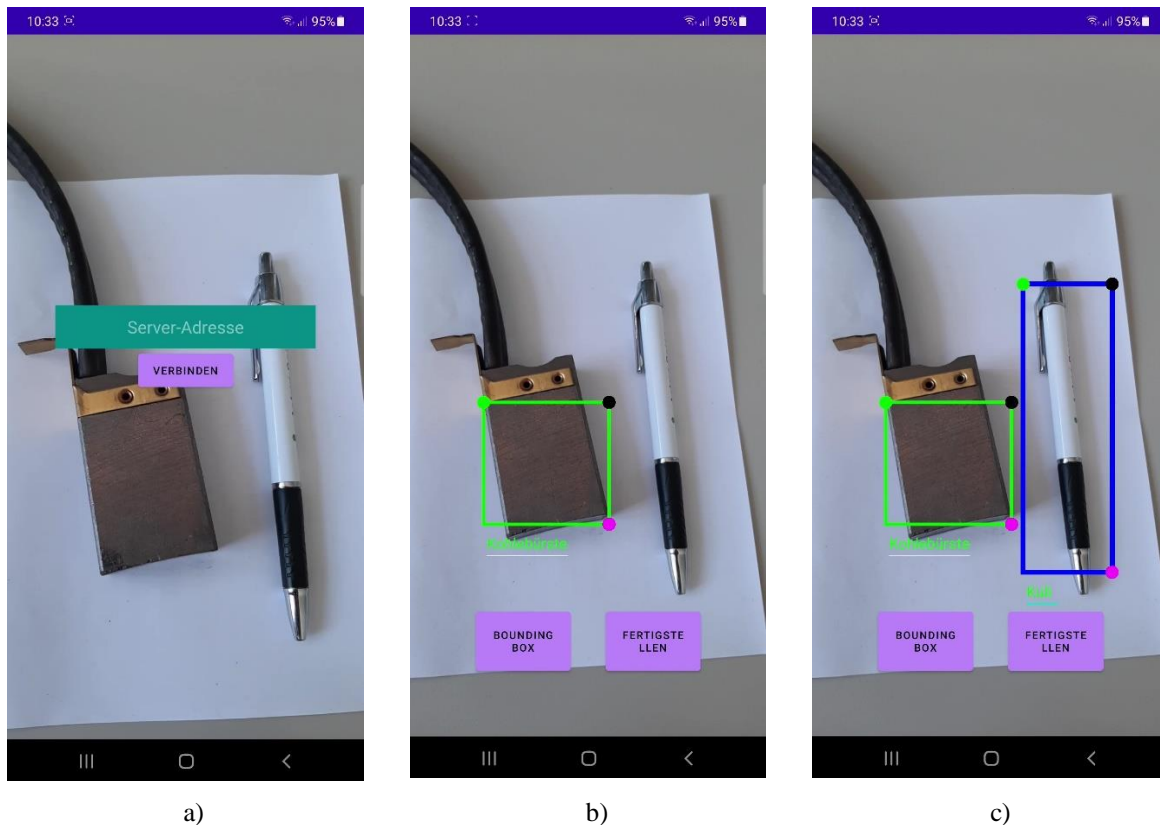
Die Vorteile der Wärmebildtechnik liegen auf der Hand: Sie fördert eine präventive Wartungsstrategie, die Ausfallzeiten und Kosten reduziert, erhöht die Sicherheit des Wartungspersonals durch Fernmessungen und steigert die Effizienz, da Inspektionen ohne bzw. mit geringer Betriebsunterbrechung durchgeführt werden können. Diese Technologie trägt maßgeblich zur Leistungssteigerung und Verlängerung der Lebensdauer von Windkraftanlagen bei.

Die Integration der Wärmebildtechnik in die Wartungsprozesse von Windkraftanlagen bietet eine Reihe von Vorteilen, die sowohl die Betriebssicherheit als auch die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflussen. Ihre Fähigkeit, frühzeitig auf Wartungsbedarf hinzuweisen, kann sie fallbezogen und prozessual integriert zu einem Bestandteil für die zukunftsorientierte Instandhaltung in der Windenergiebranche machen.

### 2.1.4 AP 4 – Entwicklung eines mobilen Augmented Reality-basierten Assistenzsystems mit Nutzung bildverarbeitender Verfahren

Zum Einsatz des Demonstrators wurde ein lokaler Server über die Python Bibliothek flask aufgesetzt, der diverse Befehle und Daten zur Verarbeitung empfangen kann. Die mobile Serverlösung dient der schnellen Verarbeitung von Bilddaten während der Wartung, weil hierzu die Rechenkapazität der Vuzix Blade bzw. des Smartphones/Tablets nicht ausreicht. Ein Internetzugriff wird dadurch nicht benötigt, weil dieser aufgrund der teilweise entlegenen WEA-Standorte auch nicht immer gegeben ist. Hinter dem Server steht zum einen ein leistungsfähiger Computer, welcher Bilddaten schnell und effizient verarbeiten kann und ein mobiler Server, welcher eine geringere Leistung aufweist aber eine Verbindung an Orten ohne direkten Internetzugang ermöglicht. Der mobile Server besteht aus einer Nvidia Jetson Nx mit zusätzlichem Akku, wodurch diese bis zu vier Stunden mobil genutzt werden kann.

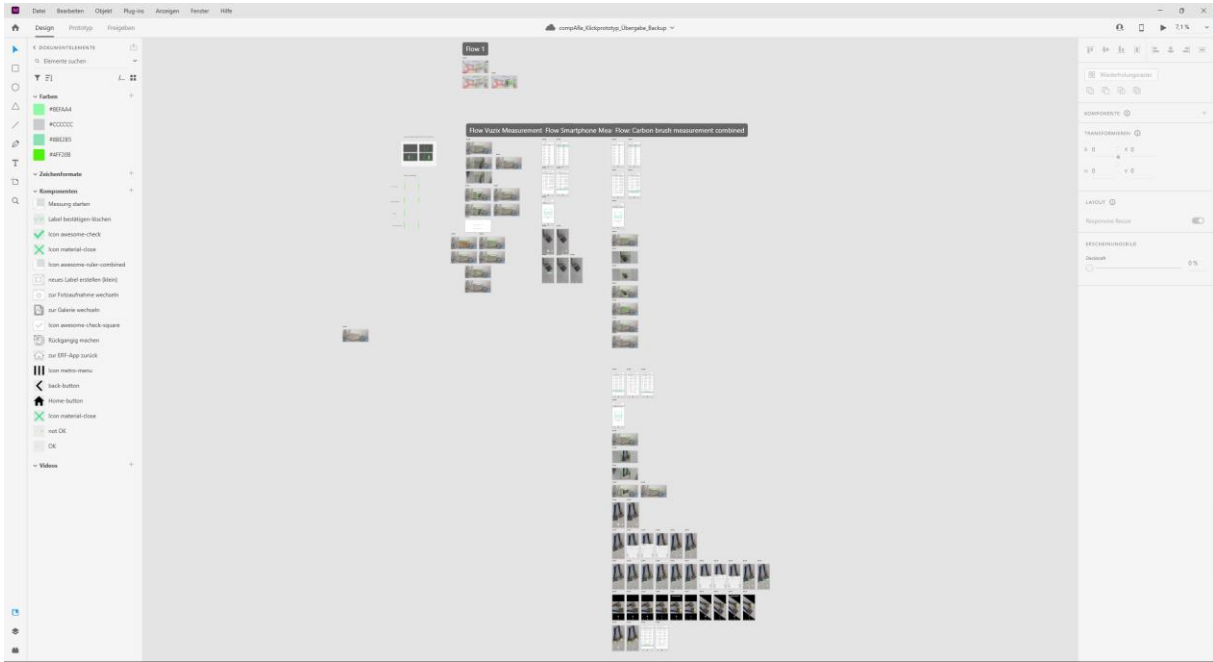
Die während der Wartung einer Windkraftanlage anfallenden Verarbeitungsdaten, werden digital mit dem Smartphone über die compARE-App erstellt. Mit der compARE-App ist es möglich, sich mit dem compARE Server zu verbinden und im Anschluss Bilder von relevanten Bauteilen zu erstellen und an den Server zu schicken. Auf dem Server werden die Bilddaten mit den entsprechenden Algorithmen verarbeitet und eine Abschätzung zum Bauteil wird ausgegeben. Aufgrund fehlender Referenzen in den Bilddaten und variierender Bildauflösungen kann bei Bauteilen nur eine Abschätzung der Schäden stattfinden, da z.B. die Abriebfläche der Kohlebürsten nur anhand von Pixellängen bestimmt werden kann, ohne Längenreferenzen von den einzelnen Pixeln. Die Abschätzungen werden im Bildformat zurück an das Smartphone geschickt und dort für den Techniker dargestellt. Dabei wird ein Bounding Box Format verwendet, welches vom Techniker nachbearbeitet werden kann, um das Objekt zu markieren. Die Bounding Boxen werden in Rot für fehlerhaft oder Grün für nutzbar abgebildet. Die Bounding Boxen können auch vom Nutzer in der Größe und Form angepasst, mit einem entsprechenden Label versehen oder entfernt werden. Außerdem ist es möglich weitere Objekte mit Bounding Boxen zu versehen, um die Datenbank in Zukunft zu erweitern. Ein beispielhafter Ablauf der Applikation ist in der Abbildung 13 aufgezeigt. Zu erwähnen ist noch, dass bei der Kohlebürste lediglich der Bürstenbereich betrachtet wird.



**Abbildung 13: a) Anmeldeprozess durch Eingabe einer IP-Adresse. b) Vom Server verarbeitete Bild, mit Bounding Box Darstellung, für mögliche Korrekturen des Technikers. c) Vom Techniker hinzugefügtes Objekt, welches in die Segmentierungsdatenbank aufgenommen werden soll**

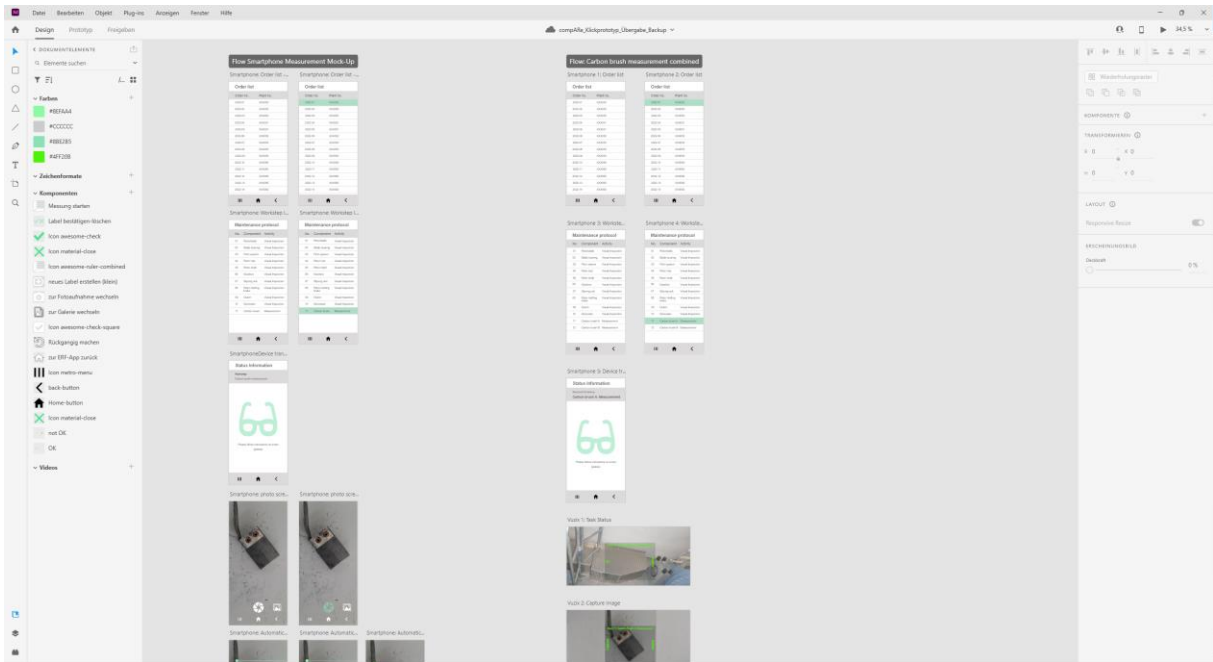
Die Integration der AR-Technologie in den Anmeldeprozess ermöglicht es den Technikern von ROBUR Wind, mit einer neuen Ebene der Interaktivität und Informationsdarstellung zu arbeiten. Dies führt zu einer verbesserten Effizienz und Genauigkeit bei der Wartung und Überwachung der Windenergieanlagen. Die Vuzix Blade bietet dabei eine hands-free Erfahrung, die es den Technikern erlaubt, gleichzeitig auf relevante Daten zuzugreifen und physische Aufgaben auszuführen. (Abbildung 14).

## 2 Eingehende Darstellung



**Abbildung 14: Gesamter Prozess für die automatische Erkennung des Abnutzungsgrads einer Kohlebürste, der mittels Adobe XD abgebildet wurde**

Das Smartphone fungiert in der Prozesskette als Hauptsteuergerät, worüber alle Aufgaben getätigt oder an die Vuzix Blade weitergeleitet werden. So kann die Aufgabe zur Betrachtung von Kohlebürsten an die Vuzix Blade ausgelagert werden, die im Anschluss die Aufgabe ausführen kann (Abbildung 15).



**Abbildung 15: Auszug aus dem Design-Mockup in Adobe XD für den Kohlebürstenprozess auf dem Smartphone mit dem Workflow nur auf dem Smartphone und mit der Kombination von Smartphone und Vuzix Blade**

## 2 Eingehende Darstellung

Sollte die Qualität der von der Vuzix Blade aufgenommenen Fotos, zum Beispiel aufgrund von schlechten Lichtverhältnissen, nicht ausreichen, ist es möglich, direkt von der Vuzix Blade wieder zum Smartphone zu wechseln (Abbildung 16). Somit kann der Prozess flexibel auf einem der jeweiligen Geräte durchgeführt und der Situation entsprechend angepasst werden.

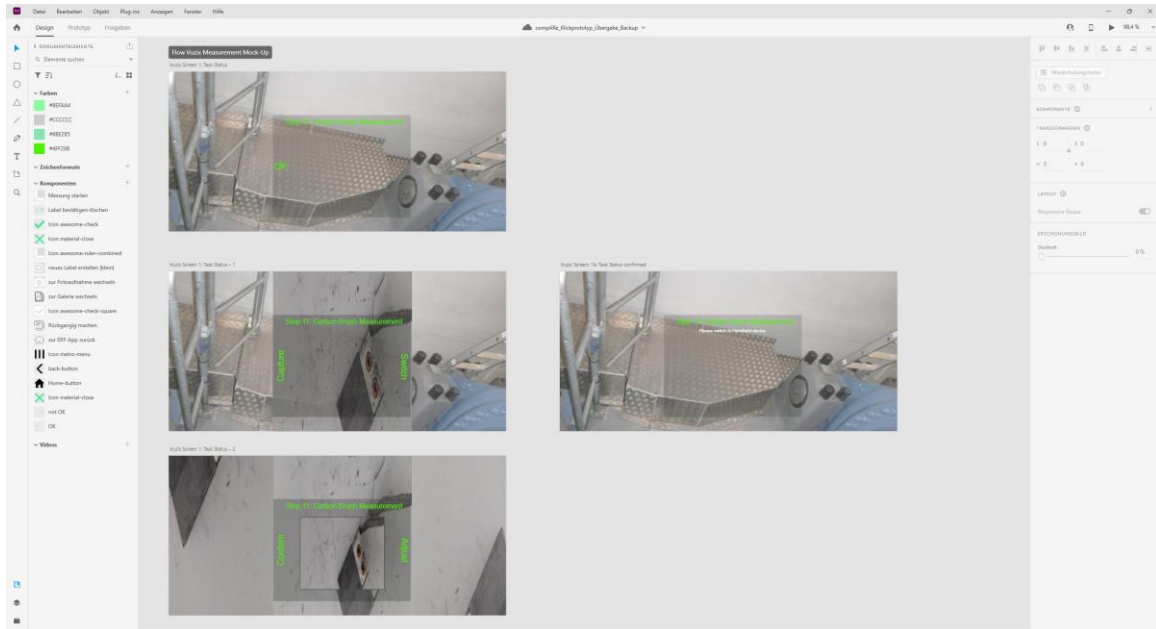


Abbildung 16: Auszug aus dem Design-Mockup in Adobe XD für den Kohlebürstenprozess auf der Vuzix Blade

Alternativ wurde noch eine Durchführung nur auf dem Smartphone berücksichtigt und ebenfalls in dem Design-Mockup umgesetzt (Abbildung 17).

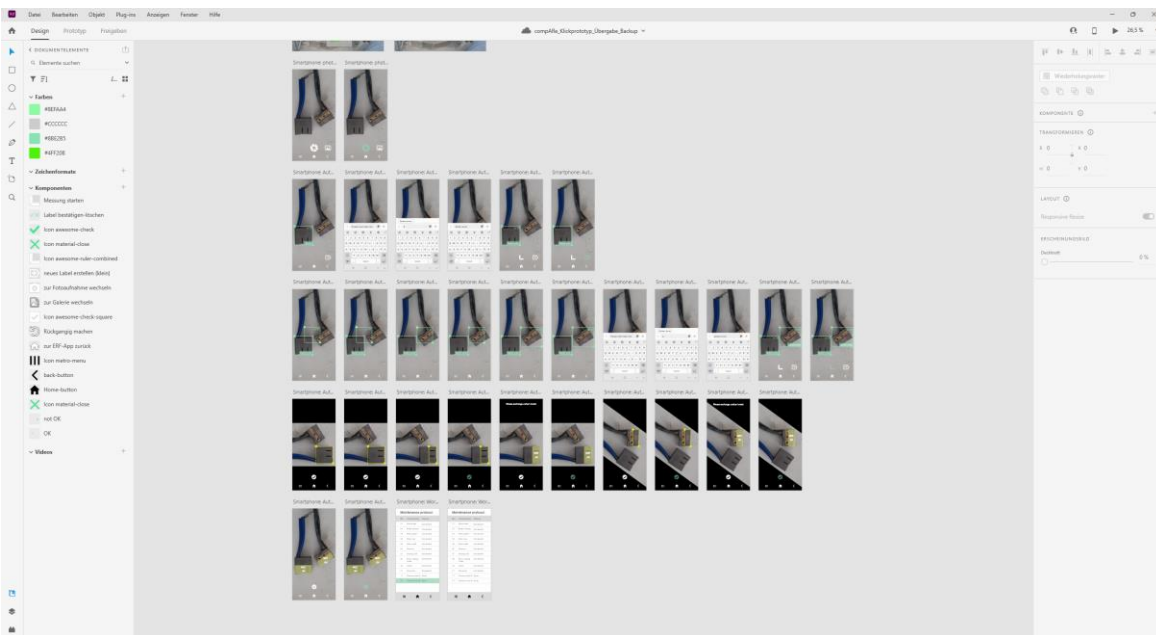
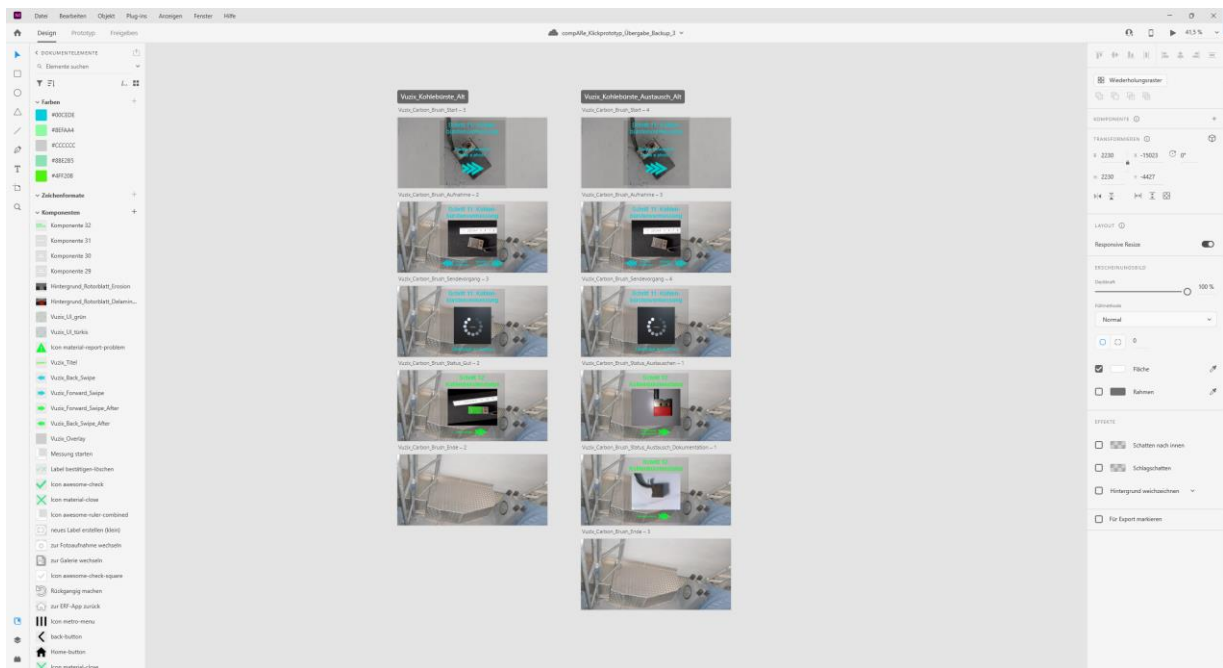


Abbildung 17: Auszug aus dem Design-Mockup in Adobe XD für den Kohlebürstenprozess auf dem Smartphone

Das gesamte Design-Mockup wurde in einer Nutzerstudie getestet. Diese Nutzerstudie konnte direkt mit Adobe XD durchgeführt werden und durch die Teilnehmenden der Studie konnte Verbesserungsvorschläge eingeholt werden. Daraufhin wurde das Mockup überarbeitet und erneut mit Adobe XD getestet. Hierbei stellte sich unter anderem heraus, dass die Navigationselemente im ersten Mockup zu klein ausgefallen sind und sich so auf der Vuzix Blade nicht ordentlich darstellen lassen. Der neue Entwurf hat daraufhin eine größere Schrift und Pfeile für die Navigation erfolgreich integriert (Abbildung 18).



**Abbildung 18: Überarbeitung des Design-Mockups in Adobe XD für den Kohlebürstenprozess auf der Vuzix Blade**

Im Anschluss an die Nutzerevaluierungen wurde der Anwendungsfall der Kohlebürsten mittels Unity3D in eine auf der Vuzix Blade ausführbare Anwendung überführt. Hierbei wurden nur die beiden vorwärts und rückwärts Interaktionen durch Wischen mit einem Finger auf dem Touchpad der Vuzix Blade umgesetzt (Abbildung 19), was für den Kohlebürstenprozess zu diesem Zeitpunkt als ausreichend erschien. Diese Entscheidung basierte ebenfalls auf dem Bedürfnis einer möglichst kurzen Anlernzeit mit der Vuzix Blade und keiner Überforderung durch zu viele Interaktionsmöglichkeiten innerhalb eines Prozesses. Zeitgleich wurde mit Hilfe von Android Studio die Anwendung für das Smartphone entwickelt.

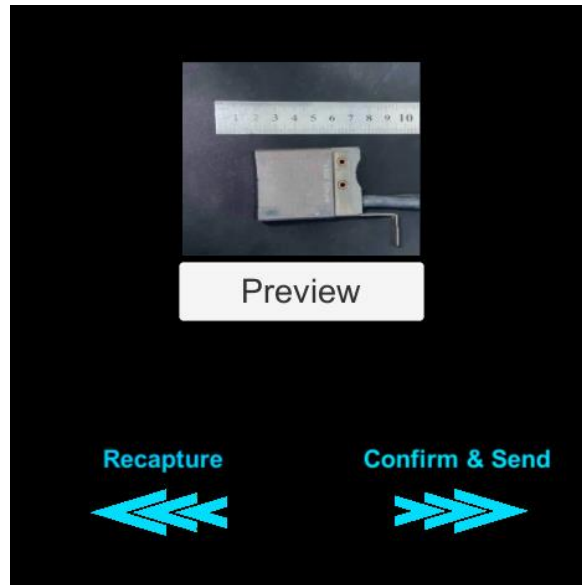


Abbildung 19: Umgesetztes Design-Mockup für den Kohlebürstenprozess in Unity3D und ausgeführt auf der Vuzix Blade

Beide Anwendungen wurden wieder getestet und Feedback zu dem Design und der Interaktion eingeholt. Ebenfalls wurden die An- und Abmeldeprozesse berücksichtigt, bei denen sich herausstellte, dass die beiden vorab definierten Interaktionsmöglichkeiten nicht ausreichend sind. Daraufhin wurde neben der Standardinteraktion noch das Hoch- und Runterwischen mit einem Finger auf dem Touchpad der Vuzix Blade eingebaut. Da es wenig Feedback zu der Smartphone-Interaktion gab, wurde im Folgenden nur das Design des Vuzix Blade Interfaces angepasst (Abbildung 20).

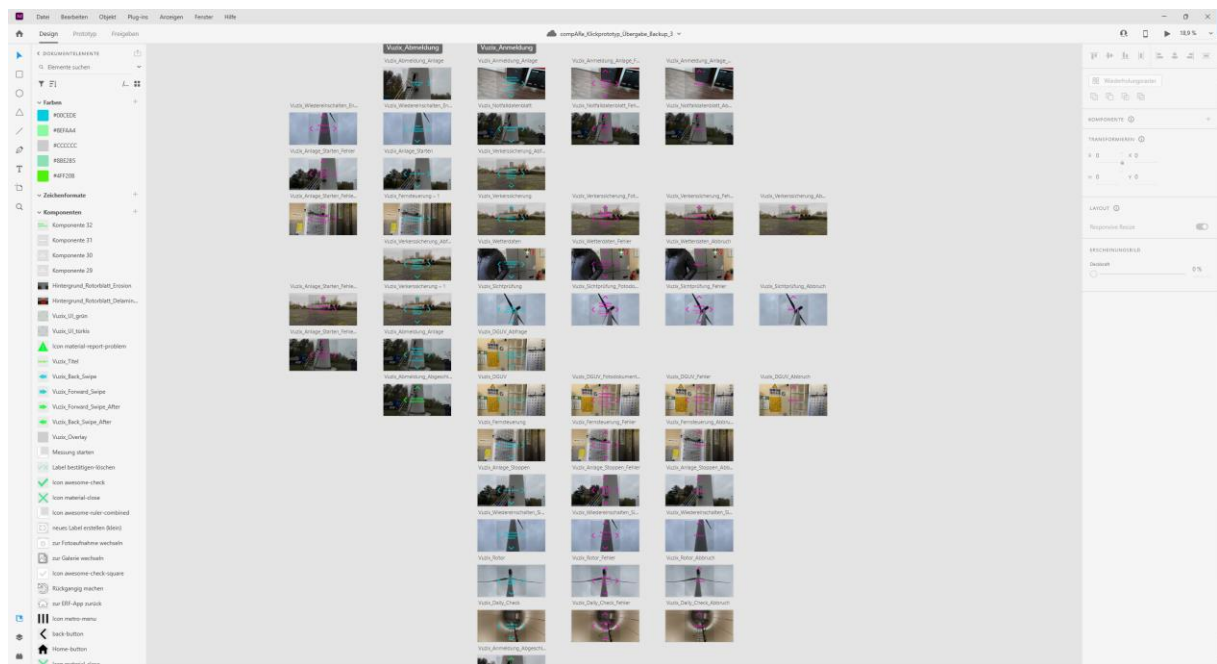


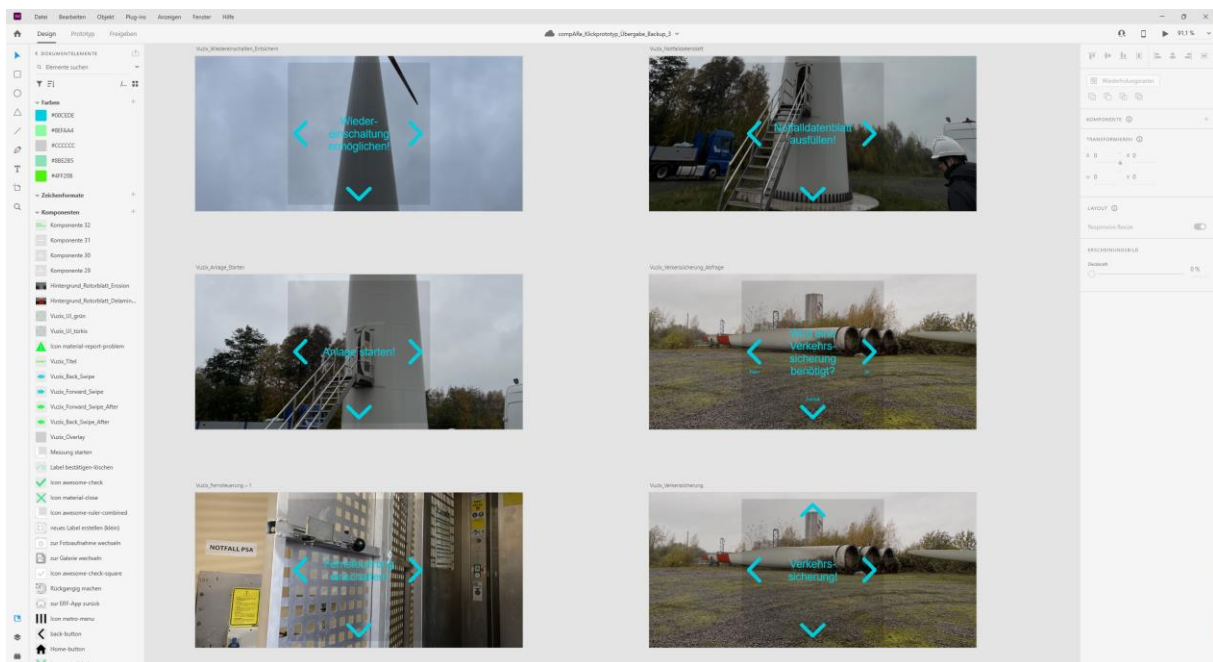
Abbildung 20: Weitere Überarbeitung des Design-Mockups in Adobe XD, nachdem der An- und Abmeldeprozess definiert wurden

## 2 Eingehende Darstellung

Das neue Design für die Vuzix Blade wurde ebenfalls in Adobe XD umgesetzt, wobei in diesem Fall der Hauptfokus auf dem An- und Abmeldeprozess lag, da dieser mehr Interaktionsmöglichkeiten benötigten. So wurde neben der Beschreibung der Prozessschritte auch die möglichen Interaktionen durch zwei bis vier Pfeile dargestellt. Dabei wurden folgende Standardinteraktionen definiert:

- Vorwärtswischen: ein Schritt vorwärts
- Rückwärtswischen: ein Schritt zurück
- Runterwischen: Ein Problem ist aufgetreten
- Hochwischen: Sonderaktion

Wenn in einem Prozessschritt von diesen Standardinteraktionen eine Abweichung stattfindet, gibt es eine zusätzliche Beschriftung an den jeweiligen Pfeilen (Abbildung 21).



**Abbildung 21: Detaillierterer Auszug aus dem dritten Design-Mockup in Adobe XD mit dem Anmeldeprozess**

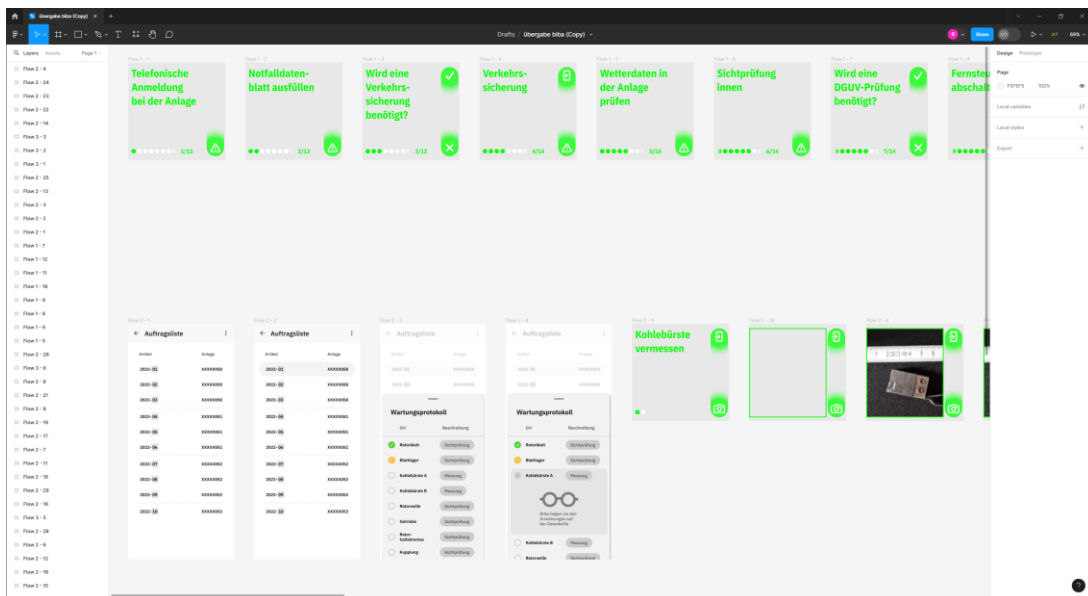
Mit dem überarbeiteten Mockup, welches durch die Nutzertests seinen aktuellen Stand erhalten hatte, wurde ein Unterauftrag zur finalen Überarbeitung des Designs an die Designfirma Rahe + Rahe Design übergeben. Diese testeten die Benutzeroberfläche und Handhabung der Vuzix Blade, um unter anderem deren Interaktions- und Gestaltungsmöglichkeiten auszuprobieren. Daraufhin entstand ein neues Design, in welches die vorherigen Designideen integriert sind und welches die Standardinteraktionen Vorwärts- und Rückwärtswischen auf dem Vuzix Blade Touchpad als feste Vorgabe definierten. Da diese Interaktionen vorab definiert werden, sind diese beim Anlernen klar definiert und ändern sich nie. Dadurch ergab sich ein größerer Gestaltungsspielraum für die Darstellung der Prozessschritte und

## 2 Eingehende Darstellung

den zusätzlichen Interaktionsmöglichkeiten. So wurden die beiden anderen Standardinteraktionen und deren Funktion durch Symbole angedeutet. Dies wiederum macht eine Umsetzung des Workflows für internationale Mitarbeiter verständlicher. Zusätzlich wurde ein Fortschrittsbalken eingeführt, welcher bei Gestaltungsgrundlagen für Interaktionssysteme durchaus als nutzerfreundlich aufgeführt wird (Abbildung 22 & Abbildung 23).



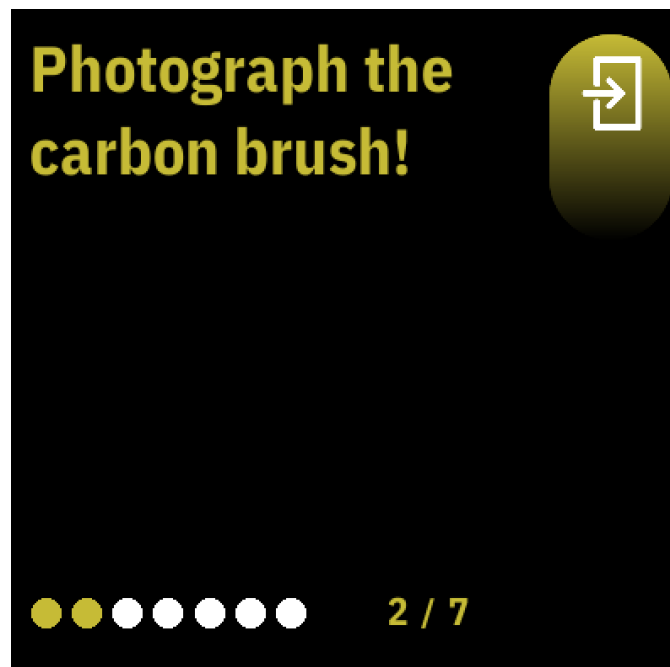
**Abbildung 22: Finales Design-Mockup durch einen Unterauftrag entstanden, der beide Prozesse in Figma abdeckt**



**Abbildung 23: Detaillierter Auszug des finalen Design-Mockups in Figma**

Neben dem Mockup für die Vuzix Blade wurde auch das Design für das Smartphone überarbeitet und eine einheitliche Farbkodierung und Schriftart vorgeschlagen. Diese Gestaltungsbeispiele wurden auf alle Anwendungsfälle des Smartphones und der Vuzix Blade übertragen.

Im letzten Schritt wurden die Anwendungen für die Vuzix Blade in Unity3D umgesetzt und auf der Vuzix Blade getestet. Dabei stellte sich heraus, dass die gewünschte Farbkodierung nicht wie gewollt umgesetzt werden konnte und ein anderer Grünton genutzt werden musste, welcher wiederum auf der Vuzix Blade wie im finalen Design-Mockup dargestellt wird (Abbildung 24). Sowohl der An- und Abmeldeprozess, als auch der Kohlebürstenprozess wurden auf die Vuzix Blade übertragen und vor Ort in einer Windkraftanlage von einem Techniker getestet.



**Abbildung 24: Umgesetztes finales Design-Mockup für den Kohlebürstenprozess in Unity3D und ausgeführt auf der Vuzix Blade mit einer Farbabweichung von der Programmierung zur finalen Darstellung**

ROBUR Wind definierte präzise Anforderungen an die Bildverarbeitungsalgorithmik, um eine optimale Auswahl an Algorithmen zu treffen, die den spezifischen Bedürfnissen der Windenergieanlagen gerecht werden. Durch die sorgfältige Recherche und Auswahl von Bilddaten konnte das Unternehmen eine umfassende Evaluation der Algorithmen durchführen. Die Weiterentwicklung der Use Cases hinsichtlich der Bildverarbeitungsmöglichkeiten führte zu einer verbesserten Diagnose und Wartung der Anlagen.

Die Arbeit von ROBUR Wind zeigte auf, wie Augmented Reality-Technologie die Techniker im Arbeitsablauf unterstützen kann, indem sie ihnen ermöglicht, Informationen in Echtzeit zu visualisieren und

zu interagieren. Die Weiterentwicklung der Use Cases im Hinblick auf die AR-Möglichkeiten resultierte in einer effizienteren Datenerfassung und -verarbeitung.

Die Machbarkeitsbewertung der Use Cases aus technologischer Sicht war ein entscheidender Schritt, um die Konzeption des Assistenzsystems voranzutreiben. ROBUR Wind spielte eine Schlüsselrolle bei der Identifizierung von Prozessverbesserungen, die durch das Assistenzsystem realisiert werden konnten.

Die Entwicklung eines mobilen Systems zur Verwaltung von Serviceeinsätzen durch ROBUR Wind ermöglichte eine effizientere Koordination und Durchführung von Wartungsarbeiten. Die Implementierung von KI-gestützten Algorithmen verbesserte die Entscheidungsfindung und Prozessoptimierung.

### 2.1.5 AP 5 – Systemintegration

Im Zuge der Systemintegration bei ROBUR Wind wurde eine umfassende Zusammenführung der Teilsysteme realisiert, die eine nahtlose Kommunikation und Interaktion zwischen der Vuzix Applikation, der Smartphone Applikation und dem Server ermöglicht. Die Entwicklung expliziter Schnittstellen auf dem Server war ein entscheidender Schritt, um einen effizienten Datenaustausch zwischen den Geräten zu gewährleisten. Das Smartphone übernimmt dabei eine zentrale Rolle als Hauptsteuergerät, von dem aus sowohl der Vuzix-Prozess als auch der direkte Aufnahmeprozess initiiert werden.

Die Etablierung einer Verbindung zum Server über die IP-Adresse bildet den Ausgangspunkt für den Einsatz der Smartphone Applikation. Nach erfolgreicher Verbindung bietet sich dem Nutzer die Möglichkeit, zur Vuzix-Applikation zu wechseln, welche den Anmeldevorgang an der Windkraftanlage einleitet oder direkt in den Wartungsprozess übergeht. Während des Wartungsprozesses ist es möglich, dass sowohl die Vuzix Blade als auch das Smartphone Bilder an den Server senden, die dort verarbeitet und anschließend an die entsprechenden Endgeräte zurückgesendet werden. Der Vuzix-Prozess kann jederzeit über das Smartphone beendet werden, um die Arbeit nahtlos am Smartphone fortzusetzen.

Die Dokumentation und das Festhalten der Daten erfolgen im JSON-Format, welches eine effiziente Speicherung von Bildern in komprimierter Form mit zusätzlichen Informationen wie Bounding Box-Daten und Labels ermöglicht. Dieses Format zeichnet sich durch seine breite Kompatibilität aus und lässt sich zukünftig in das System von ROBUR Wind integrieren. Die generierten JSON-Dateien enthalten neben dem Dateinamen und dem Zeitpunkt der Erstellung auch die Bounding Box-Daten der identifizierten oder zusätzlich markierten Objekte sowie das entsprechende Bild. Um eine zeitgemäße Übertragung der Daten zu gewährleisten, wird das Bild in das Base64-Format konvertiert, was eine Komprimierung von etwa 80% ermöglicht und somit die Übertragung von Dateien im Kilobyte-Bereich statt im Megabyte-Bereich erlaubt.

Die Integration dieser Technologien in die Arbeitsabläufe von ROBUR Wind kann maßgeblich zur Effizienzsteigerung und Qualitätssicherung bei der Wartung und Instandhaltung von Windenergieanlagen bei. Durch die fortlaufende Optimierung der Systemkomponenten und die Anpassung an die spezifischen Anforderungen des Unternehmens wird eine hohe Benutzerfreundlichkeit und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems sichergestellt.

Die Grenzen der Systemintegration bei ROBUR Wind ergeben sich aus verschiedenen technischen und organisatorischen Herausforderungen. Technologisch betrachtet, ist die Auswahl der geeigneten Hardware, wie die Entscheidung für die AR-Hardware in Abstimmung mit dem BIBA, ein kritischer Faktor. Die Kompatibilität und Leistungsfähigkeit der gewählten Geräte müssen den Anforderungen des Assistenzsystems entsprechen, um eine effektive Integration zu ermöglichen.

Ein weiterer limitierender Aspekt ist die Auswahl und Anpassung der Bildverarbeitungsalgorithmen. Diese müssen präzise genug sein, um die für die Use Cases relevanten Daten zu erfassen und zu verarbeiten. Die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich sind entscheidend, um die Funktionalität des Gesamtsystems zu gewährleisten.

Organisatorisch stellt die Harmonisierung der Prozessabläufe eine Herausforderung dar. Die Neuausrichtung von ROBUR Wind als international agierendes Unternehmen erfordert die Anpassung von Prozessabläufen für die Nutzerführung bei An- und Abmeldung von Tätigkeiten an Windenergieanlagen. Die Identifikation und Aufbereitung notwendiger Schnittstellen und Informationen sind dabei essenziell für den Erfolg des Prozesses.

Die Integration der Forschungsergebnisse in das bestehende System ist ebenfalls ein kritischer Punkt. Die Abstimmung der Anforderungen innerhalb des Projekts und die Sicherstellung einer zentralen Ablage von Informationen sind notwendig, um Konzeptionsfehler zu minimieren und die Dokumentation zu gewährleisten.

Ein möglicher Weg der Systemintegration bei ROBUR Wind könnte folgendermaßen aussehen:

1. Anforderungsanalyse: Zunächst erfolgt eine detaillierte Analyse der Anforderungen an das Gesamtsystem. Dies umfasst die Identifikation der notwendigen Funktionen, Schnittstellen und Leistungsmerkmale.
2. Auswahl der Technologie: Basierend auf den Anforderungen wird die passende Technologie ausgewählt. Dies beinhaltet die Entscheidung für geeignete Hardwarekomponenten und Softwarelösungen.

3. Entwicklung von Schnittstellen: Die Entwicklung von Schnittstellen ist entscheidend, um eine reibungslose Kommunikation zwischen den Teilsystemen zu ermöglichen. Hierbei werden Protokolle und Formate festgelegt, die den Austausch von Daten gewährleisten.
4. Integration der Teilsysteme: Die einzelnen Teilsysteme werden schrittweise zu einem Gesamtsystem zusammengeführt. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Kompatibilität und Interoperabilität der Komponenten gelegt.
5. Test und Validierung: Nach der Integration erfolgen umfangreiche Tests, um die Funktionalität des Gesamtsystems zu überprüfen. Dies schließt sowohl Einzel- als auch Integrationstests ein.
6. Dokumentation: Parallel zur Entwicklung und Integration wird eine umfassende Dokumentation erstellt, die alle relevanten Informationen zum System und dessen Betrieb enthält.
7. Schulung der Mitarbeiter: Die Mitarbeiter werden in der Handhabung des neuen Systems geschult, um eine effiziente Nutzung zu gewährleisten.
8. Inbetriebnahme: Nach erfolgreicher Testphase und Schulung der Mitarbeiter wird das System in Betrieb genommen und in die bestehenden Arbeitsabläufe integriert.
9. Kontinuierliche Verbesserung: Nach der Inbetriebnahme wird das System kontinuierlich überwacht und optimiert, um die Leistungsfähigkeit und Benutzerfreundlichkeit zu steigern.

Dieser Prozess erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen allen beteiligten Abteilungen und Partnern, um eine erfolgreiche Systemintegration zu gewährleisten. Die Berücksichtigung von Feedback und die Anpassung an sich ändernde Anforderungen sind dabei von zentraler Bedeutung.

### 2.1.6 AP 6 – Durchführung einer Evaluationsstudie des entwickelten Assistenzsystems

Die Evaluationsstudie, die von ROBUR Wind durchgeführt wurde, zielte darauf ab, die Funktionalität und Effizienz des entwickelten Assistenzsystems in verschiedenen Umgebungen und unter unterschiedlichen Bedingungen zu testen. Die Laborversuche, die hauptsächlich am Bremer Institut für Produktion und Logistik (BIBA) stattfanden, konzentrierten sich auf die Verbindung zwischen den Applikationen und dem Server, da dies für die Datenverarbeitung entscheidend ist. Die Tests wurden sowohl in Innen- als auch in Außenbereichen durchgeführt, um die Bedingungen in der Nähe von Windenergieanlagen zu simulieren. Dabei wurden verschiedene Internetverbindungen und Lichtverhältnisse berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine WLAN-Verbindung im BIBA-Netzwerk oder eine stabile Mobilfunkverbindung einen schnellen Datenaustausch ermöglichte, während schlechtere Verbindungen zu längeren Sende- und Empfangszeiten führten. Bei der Objekterkennung unter verschiedenen Lichtver-

hältnissen wurde festgestellt, dass helle Bedingungen eine gute Erkennungsrate ermöglichten, während dunkle Umgebungen zusätzliche Lichtquellen erforderten, um eine zuverlässige Detektion zu gewährleisten.

Die Feldtests, die an Windenergieanlagen durchgeführt wurden, bestätigten die Funktionsfähigkeit der Applikationen im realen Einsatz. Techniker von ROBUR Wind testeten die Vuzix- und Smartphone-Applikationen sowie den mobilen Server vor Ort. Die Techniker nahmen die Applikationen positiv auf, wiesen jedoch darauf hin, dass der Dokumentationsaspekt verbessert werden sollte, um Zeit zu sparen und die Effizienz zu steigern. Die Integration von Sprach-zu-Text-Funktionen könnte hierbei hilfreich sein.

Zusätzlich wurden während der Anlagenbegehung Drohnenbilder zur Rotorblattinspektion erstellt und analysiert. Die Labor- und Feldtests bezogen sich auf diese Bilder sowie auf weitere Daten einer anderen Anlage. Obwohl nur ein geringer Prozentsatz der Drohnenbilder eindeutig den Reparaturbildern zugeordnet werden konnte, zeigte sich, dass ein größerer Datensatz die Erkennungsrate verbessern könnte, indem mehr Merkmale der Schäden identifiziert werden.

Insgesamt lieferte die Evaluationsstudie wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des Assistenzsystems und zeigte Potenziale für zukünftige Verbesserungen auf. Die gewonnenen Daten und Rückmeldungen werden genutzt, um das System weiter an die Bedürfnisse der Techniker anzupassen und seine Integration in die Wartungsprozesse von Windenergieanlagen zu optimieren.

#### 2.1.7 AP 7 – Projektmanagement

Das Projektmanagement fand parallel zu den gesamten Arbeiten des compARE Projektes statt. Sämtliche Ausarbeitung und Recherchen sind schriftlich niedergelegt und mündeten in die jeweiligen Zwischenberichte und abschließend in den Abschlussbericht zum Projekt compARE.

## 3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Position des zahlenmäßigen Nachweises für die ROBUR Wind stellen die Personalkosten dar. Der personelle Aufwand beinhaltet Zeiten von bis zu neun Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im parallelen Einsatz. Durch die tiefe Integration der erforschten Lösung in die Prozesslandschaft war ein Einsatz von Experten aus den Bereichen Innovation, HSEQ, Operations, HR und der Geschäftsführung notwendig. Weiterhin wurden die Mittel für das Consulting durch SWMS eingesetzt, die bis zur Übernahme des Projekts durch die ROBUR Wind durch die RoSch beauftragt wurden.

## 4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung und des Einsatzes innovativer Technologien in der Produktionstechnik, steht ROBUR Wind vor der Herausforderung, neue Wege in der Instandhaltung von Windenergieanlagen zu beschreiten. Die Integration von Neuronalen Netzwerken und Augmented Reality (AR)-Brillen in den Wartungsprozess ist ein ambitioniertes Unterfangen, das ohne die Expertise eines Forschungspartners kaum realisierbar wäre.

Die Verwendung von Neuronalen Netzwerken zur Validierung von Bauteilen während der Instandhaltung ist ein komplexes Vorhaben, das eine sorgfältige Auswahl und Bewertung verschiedener Methoden erfordert. Durch die Zusammenarbeit mit dem BIBA konnten wir im Rahmen des compARE Projekts das leistungsstarke Verfahren der Bildsegmentierung mittels U-Net identifizieren und implementieren. Diese Technologie ermöglicht es uns, Bauteile präzise zu analysieren und deren Zustand effektiv zu beurteilen.

Ebenso war die Sortierung und Analyse historischer Daten mittels eines k-means Algorithmus, ergänzt durch die Feature-Gewinnung durch ein Convolutional Neural Network (CNN), ein entscheidender Schritt, um Muster und Trends in den Daten zu erkennen und die Instandhaltungsprozesse zu optimieren.

Ein weiterer Meilenstein des Forschungsprojekts war die Untersuchung der Machbarkeit eines Datenaustauschs zwischen einem Server, einem Smartphone und einer AR-Brille. Diese Prüfung hat gezeigt, dass ein solcher Austausch eine valide Methode für Instandhaltungsmaßnahmen innerhalb einer Windkraftanlage darstellt. Ohne das compARE Projekt wäre es für ROBUR Wind eine zeit- und kostenintensive Herausforderung gewesen, diese Technologien eigenständig zu erforschen und zu testen.

Aus der Perspektive von ROBUR Wind war die Forschung in den genannten Bereichen von entscheidender Bedeutung, um innovative Lösungen für die Instandhaltung von Windenergieanlagen zu entwickeln und zu implementieren:

Entwicklung eines mobilen Augmented Reality-basierten Assistenzsystems: Die Forschung in diesem Bereich war für uns unerlässlich, um die Serviceeinsätze und Wartungsarbeiten zu optimieren. Mit Augmented Reality können wir uns in die Lage versetzen, nicht nur die Prozesse auf der Baustelle optimieren, sondern auch die Arbeitsdokumentation zu automatisieren. Dies führt zu einer signifikanten Steigerung der Kundenzufriedenheit und bringt wirtschaftliche Vorteile, indem es uns ermöglichte, schneller und präziser zu arbeiten und gleichzeitig die Fehlerquote zu reduzieren.

Entwicklung des mobilen Systems zur Verwaltung von Serviceeinsätzen: Die Anpassung des Systems an die mobilen Anforderungen war ein kritischer Faktor für den Erfolg unseres Vorhabens. Die sorgfältige Bewertung und Auswahl der Dateneingabemöglichkeiten sowie deren Integration in die EFR App und die Bilddaten App waren der ursprüngliche Ansatz, um eine hohe Nutzerfreundlichkeit und Effizienz des Systems zu gewährleisten.

Im Rahmen der Übernahme des Projekts durch ROBUR Wind haben wir die Entwicklung der EFR App nicht weiterverfolgt. Stattdessen haben wir die Ausrichtung des mobilen Systems zur Verwaltung von Serviceeinsätzen angepasst, um eine nahtlose Integration der Forschungsergebnisse in unsere bestehende Systemlandschaft zu gewährleisten. Diese strategische Entscheidung ermöglichte es uns, die Vorteile der Forschungsergebnisse voll auszuschöpfen und gleichzeitig die Kompatibilität mit unseren internen Prozessen und Systemen sicherzustellen.

Die Evaluierung der Integration umfasste eine umfassende Prüfung der technischen Machbarkeit, der Benutzerfreundlichkeit und der Auswirkungen auf die bestehenden Arbeitsabläufe. Durch die enge Zusammenarbeit mit den Entwicklern und Technikern konnten wir sicherstellen, dass die neuen Funktionen und Technologien den Anforderungen und Erwartungen unserer Mitarbeiter entsprechen und einen echten Mehrwert für unsere Serviceeinsätze bieten.

Die Anpassung der Forschungsergebnisse an unsere Systemlandschaft beinhaltete auch die Diskussion neuer Schnittstellen und die Optimierung der Datenübertragung, um eine reibungslose Kommunikation zwischen den verschiedenen Komponenten des Systems zu gewährleisten. Dies war ein entscheidender Schritt, um die Effizienz und Zuverlässigkeit unserer Instandhaltungsprozesse zu steigern und die Vorteile der digitalen Transformation in der Windenergiebranche vollständig zu realisieren.

Durch die Übernahme der ROBUR Wind durch die SPIE sind wir jetzt in der Lage, die Ergebnisse im Kontext der neuen Möglichkeiten zu bewerten.

Entwicklung der Benutzerschnittstelle: Die Neugestaltung der Benutzerschnittstelle war ein wesentlicher Schritt, um die Interaktion mit dem mobilen System intuitiv und benutzerfreundlich zu gestalten. Die Entwicklung eines Sketch-Up und die enge Abstimmung mit den Nutzern während des Entwicklungsprozesses ermöglichten es uns, eine Schnittstelle zu schaffen, die den Anforderungen der Techniker vor Ort gerecht wird.

Nutzerorientierte Interaktion: Die Zusammenarbeit mit dem BIBA war entscheidend, um die Arbeitsanweisungen so zu gestalten, dass sie eine nutzerorientierte Interaktion fördern. Dies war notwendig,

um die Akzeptanz des Systems bei den Technikern zu erhöhen und sicherzustellen, dass es effektiv in ihren Arbeitsalltag integriert wird.

Insgesamt hat die Forschung es ROBUR Wind ermöglicht, der Spitze der technologischen Entwicklung näher zu kommen und gleichzeitig die Sicherheit und Effizienz unserer Instandhaltungsprozesse zu hinterfragen. Diese Fortschritte sind ein klares Zeugnis für die Notwendigkeit und den Wert der Forschung in der Entwicklung zukunftsweisender Technologien in der Windenergiebranche.

## 5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Zuge des compARe-Projekts hat ROBUR Wind die Digitalisierung von Wartungsarbeiten an Windkraftanlagen umfassend untersucht und innovative Lösungen entwickelt. Die Digitalisierung der Dokumentationstechniken hat zu einer erheblichen Vereinfachung und Effizienzsteigerung geführt.

Das Projekt dient als Vorlage für die technische Realisierung digitaler Instandhaltungsprozesse. Es wurden zahlreiche Methoden prototypisch in verschiedenen Anwendungsfällen umgesetzt, die mit einem angemessenen Transferaufwand in die Praxis übertragen werden können. Besonders hervorzuheben sind die mobilen Anwendungen für Smartphones und AR-Brillen, die einen flexiblen Mehrwert bieten und es ermöglichen, Leistungen an jedem Ort bereitzustellen. Diese zukunftsorientierten Arbeitsweisen fördern die Effizienz und Flexibilität der Wartungsteams.

Die Entwicklung auf unterschiedlichen Hardwareplattformen gewährleistet eine hohe Modularität, die es ROBUR Wind ermöglicht, die Applikationen individuell anzupassen und bei Bedarf um zusätzliche Methoden zu erweitern. Der mobile Rechnerserver bietet eine autarke Lösung, die den Einsatz in abgelegenen Gebieten ohne Internetverbindung ermöglicht und somit die Reichweite der Wartungsdienstleistungen erweitert.

Der Verwertungsplan des Projekts, dargestellt in Tabelle 5, gibt einen Überblick über die während der Projektlaufzeit realisierten Verwertungen. Die Bewertung weiterer Verwertungsmöglichkeiten obliegt dem neuen Projektpartner ROBUR, der die internen Potenziale und Marktchancen analysiert und entsprechende Strategien entwickelt.

Tabelle 5: Verwertungsplan gemäß der gesamt Vorhabensbeschreibung mit zur Laufzeit umzusetzenden Punkten

5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

|   | <b>Lfd. Nr.</b> | <b>Bezeichnung</b>  | <b>Zeithorizont</b>                           |
|---|-----------------|---|---|
| Wissenschaftliche/technische Verwertungs-/Erfolgsaussichten | 1               | Erarbeiten spezifischer Erkenntnisse zur Erhaltung der Kompetenz und des Wettbewerbsvorteils  | während Projektlaufzeit                       |
|   | 2               | Erkenntnisse zur Gestaltung von Augmented-Reality-Assistenzsystemen für den Einsatz im Windenergie-bereich; Vorstellung auf Fachkonferenzen, Publikation in Fachzeitschriften | während Projektlaufzeit und nach Laufzeitende |
|   | 3               | Erkenntnisse zum Einsatz von Bildverarbeitungs-algorithmen auf mobilen Endgeräten im Windenergie-bereich; Vorstellung auf Fachkonferenzen, Publikation in Fachzeitschriften   | während Projektlaufzeit und nach Laufzeitende |
|   | 4               | Erkenntnisse zur Verbesserung der Instandhaltungsmaßnahmen („best practice“) im Windenergiebereich; Vorstellung auf Fachkonferenzen, Publikation in Fachzeitschriften         | während Projektlaufzeit und nach Laufzeitende |

Die einzelnen Punkte werden nun im individuell betrachtet und im Rahmen der Verwertung beschrieben.

### 5.1 Erarbeiten spezifischer Erkenntnisse zur Erhaltung der Kompetenz und des Wettbewerbsvorteils

Die Erarbeitung spezifischer Erkenntnisse zur Erhaltung der Kompetenz und des Wettbewerbsvorteils ist ein zentraler Bestandteil der Verwertungsstrategie von ROBUR Wind im Rahmen des compARE-Projekts. Durch die kontinuierliche Analyse und Verbesserung der Wartungsprozesse an Windkraftanlagen konnten wir unser Fachwissen vertiefen und unsere Position im Markt stärken.

Unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeit hat zu innovativen Lösungen geführt, die nicht nur die Effizienz und Sicherheit der Wartungsarbeiten erhöhen, sondern auch die Lebensdauer der Anlagen verlängern. Durch die Implementierung digitaler Werkzeuge und Methoden, wie beispielsweise die Nutzung von AR-Brillen für Inspektionen und Reparaturen, haben wir unsere Servicequalität verbessert und können unseren Kunden maßgeschneiderte Wartungslösungen anbieten.

Die Investition in Forschung und Entwicklung sowie die Schulung unserer Mitarbeiter sind Schlüsselemente, um unsere technologische Führungsposition zu behaupten und auszubauen. Die Ergebnisse des compARE-Projekts ermöglichen es uns, unsere Dienstleistungen kontinuierlich zu verbessern und innovative Ansätze in der Windenergiebranche voranzutreiben.

Durch die gezielte Verwertung der Projektergebnisse und die Anpassung an die spezifischen Bedürfnisse des Marktes sichern wir langfristig unsere Wettbewerbsfähigkeit und tragen zur nachhaltigen Entwicklung der erneuerbaren Energien bei.

## 5.2 Erkenntnisse zur Gestaltung von Augmented-Reality-Assistenzsystemen für den Einsatz im Windenergie-bereich; Vorstellung auf Fachkonferenzen, Publikation in SPIE

Die Gestaltung von Augmented-Reality-Assistenzsystemen für den Einsatz im Windenergiebereich ist ein innovatives Feld, das im Rahmen des compARE-Projekts von ROBUR Wind intensiv erforscht wurde. Unsere Erkenntnisse haben gezeigt, dass AR-Systeme das Potenzial haben, die Effizienz und Sicherheit von Wartungsarbeiten signifikant zu verbessern.

Wir haben benutzerfreundliche Schnittstellen entwickelt, die Techniker bei der Inspektion und Reparatur von Windkraftanlagen unterstützen, indem sie wichtige Informationen in Echtzeit überlagern. Diese Systeme ermöglichen es den Technikern, ihre Hände frei zu halten und gleichzeitig auf technische Daten und Anleitungen zuzugreifen, was die Arbeitsabläufe optimiert und die Fehlerquote reduziert.

Die Ergebnisse unserer Forschung wurden auf verschiedenen Fachkonferenzen vorgestellt, um die Diskussion und Weiterentwicklung dieser Technologien innerhalb der Branche anzuregen

Durch die aktive Teilnahme an der Fachgemeinschaft tragen wir dazu bei, die Entwicklung von AR-Assistenzsystemen im Windenergiebereich voranzutreiben und unsere führende Rolle in diesem Bereich zu festigen. Diese Aktivitäten sind ein wesentlicher Bestandteil unserer Verwertungsstrategie, da

sie nicht nur unsere Expertise demonstrieren, sondern auch neue Kooperationen und Geschäftsmöglichkeiten eröffnen.

### 5.3 Erkenntnisse zum Einsatz von Bildverarbeitungs-algorithmen auf mobilen Endgeräten im Windenergie-bereich; Vorstellung auf Fachkonferenzen, Publikation in SPIE

Die Erforschung und Anwendung von Bildverarbeitungs-algorithmen auf mobilen Endgeräten stellt einen bedeutenden Fortschritt im Bereich der Windenergie dar. Im Rahmen des compARE-Projekts haben wir uns intensiv mit dieser Thematik auseinandergesetzt und konnten wertvolle Erkenntnisse gewinnen, die die Wartung und Inspektion von Windkraftanlagen revolutionieren.

Unsere Entwicklungen ermöglichen es, komplexe Bildverarbeitungsaufgaben direkt vor Ort auf mobilen Geräten durchzuführen. Dies führt zu einer erheblichen Zeitersparnis und Effizienzsteigerung, da die Daten nicht erst an einen zentralen Server gesendet werden müssen. Die Algorithmen sind in der Lage, Schäden oder Abnutzungserscheinungen an den Anlagen zu erkennen und den Technikern umgehend Rückmeldung zu geben. Dies erhöht die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Instandhaltung und trägt zur Verlängerung der Lebensdauer der Anlagen bei.

Die Ergebnisse unserer Forschung werden auf Fachkonferenzen präsentiert, um die neuesten Entwicklungen mit Experten aus der Branche zu teilen und Feedback zu erhalten. Zudem haben wir vor, unsere Erkenntnisse mit verschiedenen Spezialisten der Digitalisierung innerhalb der SPIE zu teilen, um die wissenschaftliche Gemeinschaft über unsere Fortschritte zu informieren und zur Weiterentwicklung des Feldes beizutragen.

Diese Aktivitäten sind ein wesentlicher Teil unserer Verwertungsstrategie, da sie nicht nur die Sichtbarkeit unserer Innovationen erhöhen, sondern auch die Grundlage für zukünftige Kooperationen und Geschäftsmöglichkeiten schaffen. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung unserer Bildverarbeitungstechnologien sichern wir unseren Vorsprung im Wettbewerb und leisten einen wichtigen Beitrag zur technologischen Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien.

#### 5.4 Erkenntnisse zur Verbesserung der Instandhaltungsmaßnahmen („best practice“) im Windenergiebereich; Vorstellung auf Fachkonferenzen, Publikation in SPIE

Die Verbesserung der Instandhaltungsmaßnahmen im Windenergiebereich ist ein wesentlicher Aspekt, um die Effizienz und Langlebigkeit von Windkraftanlagen zu gewährleisten. Im Rahmen des comPARE-Projekts haben wir uns intensiv mit der Identifizierung und Etablierung von Best-Practice-Methoden beschäftigt, um die Wartungsprozesse zu optimieren.

Unsere Forschung hat zu einer Reihe von Erkenntnissen geführt, die die Grundlage für verbesserte Instandhaltungsstrategien bilden. Diese umfassen unter anderem die Entwicklung von präventiven Wartungsplänen, die Nutzung von Zustandsüberwachungssystemen zur frühzeitigen Fehlererkennung und die Implementierung von standardisierten Verfahren für häufig auftretende Wartungsaufgaben.

Die Ergebnisse unserer Arbeit wurden auf Fachkonferenzen vorgestellt, um den Austausch mit anderen Experten im Bereich der Windenergie zu fördern und von deren Erfahrungen zu profitieren. Zudem haben wir unsere Erkenntnisse innerhalb der SPIE publiziert, um einen breiten Diskurs anzuregen und die Sichtbarkeit unserer Forschung zu erhöhen.

Diese Aktivitäten sind ein wichtiger Teil unserer Verwertungsstrategie, da sie es uns ermöglichen, unsere Expertise zu demonstrieren und die Qualität unserer Dienstleistungen kontinuierlich zu verbessern. Durch die Verbreitung unserer Best-Practice-Erkenntnisse tragen wir zur Weiterentwicklung der Instandhaltungsstandards im Windenergiebereich bei und stärken unsere Position als führender Anbieter von Wartungsdienstleistungen.

## 6 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit sind folgende Veröffentlichungen im Rahmen der Digitalisierung von Instandhaltungsmaßnahmen an Windkraftanlagen entstanden:

- Lutz, M.; Walgern, J.; Beckh, K.; Schneider J.; Faulstich S.; Pfaffel, S.: Digitalization Workflow for Automated Structuring and Standardization of Maintenance Information of Wind Turbines into Domain Standard as a Basis for Reliability KPI Calculation. In Journal of Physics: Conference Series, 2022

- Clifton, A.; Barber, S.; Bray, A.; Enevoldsen, P.; Fields, J.; Sempreviva, A. M.; Williams, L.; Quick, J.; Purdue, M.; Totaro, P.; Ding, Y.: Grand challenges in the digitalisation of wind energy. In *Wind Energy Science*, 2023, pp. 947-974
- Yang, C.; Jia, J.; He, K.; Xue, L.; Jiang, C.; Liu, S.; Zhao, B.; Wu, M.; Cui, H. Comprehensive Analysis and Evaluation of the Operation and Maintenance of Offshore Wind Power Systems: A Survey. *Energies* **2023**, *16*, 5562. <https://doi.org/10.3390/en16145562>
- Vidal, Y. Artificial Intelligence for Wind Turbine Condition Monitoring. *Energies* **2023**, *16*, 1632. <https://doi.org/10.3390/en16041632>
- J. Nilsson and L. Bertling, "Maintenance Management of Wind Power Systems Using Condition Monitoring Systems—Life Cycle Cost Analysis for Two Case Studies," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 223-229, March 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.889623
- Garan, M.; Tidriri, K.; Kovalenko, I. A Data-Centric Machine Learning Methodology: Application on Predictive Maintenance of Wind Turbines. *Energies* **2022**, *15*, 826. <https://doi.org/10.3390/en15030826>
- Chen, X.; Eder, M.A.; Shihavuddin, A.; Zheng, D. A Human-Cyber-Physical System toward Intelligent Wind Turbine Operation and Maintenance. *Sustainability* **2021**, *13*, 561. <https://doi.org/10.3390/su13020561>
- Simon, J.; Gogolák, L.; Sárosi, J.; Fürstner, I. Augmented Reality Based Distant Maintenance Approach. *Actuators* **2023**, *12*, 302. <https://doi.org/10.3390/act12070302>

## 7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

### 7.1 Erfolgte Veröffentlichungen

Quandt, M.; Freitag, M.: A Systematic Review of User Acceptance in Industrial Augmented Reality. In: *Frontiers in Education*, 6(2021)1, pp. 498

Quandt, M.; Stern, H.; Zeitler, W.; Freitag, M.: Human-Centered Design of Cognitive Assistance Systems for Industrial Work. In: *Procedia CIRP* 107(2022). Proc. of CIRP CMS 2022. Elsevier, Amsterdam, 2022, pp. 233-238

Zeitler, W.; Quandt, M.; Stern, H.; Freitag, M.: Web based maintenance work support by neural networks – Detection and wear estimation of components in wind energy turbines. In: Teti, R.; D'Addona, D. (eds.): *Procedia CIRP* 118. Elsevier B.V, Amsterdam, Netherlands, 2023, pp. 1126-1131

## 7.2 Geplante Veröffentlichungen

Zum Projekt compARE sind noch zwei weitere Veröffentlichungen geplant: Zum einen wird eine technische Veröffentlichung angestrebt, welche verschiedene Segmentierungs-Möglichkeiten für die Detektion von Objekten während der Wartung vergleicht. Zum anderen ist eine Veröffentlichung mit dem gesamten Forschungsinhalt des Projektes vorgesehen, welche eine mögliche Blaupause für Wartungsarbeiten an Windkraftanlagen darstellen soll.

Das technischen Paper zur Detektion von Objekten in Windkraftanlagen soll in der Konferenz IFAC/INSTICC IN4PL 2024 (<https://in4pl.scitevents.org/Home.aspx>) eingereicht werden.

Der gesamte Forschungsinhalt zum Projekt compARE soll in der Industrie Management 4.0 (<https://www.industrie-management.de/view/industriehome>) eingereicht werden.