

Abschlussbericht AuReWi

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

Automatische Überwachungs-Messung, Regelung der Drosselungsmodi
und Optimierung des Anlagenbetriebes schallkritischer Windenergie-
Anlagen (Kürzel AuReWi)

**Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines
Beschlusses des Deutschen Bundestages.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.**

Dezibel Engineering GmbH



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ansprechpartner und Autoren
Achim Fischer (Geschäftsführer) Fon (Zentrale) +49 / (0)89 / 74 11 807 - 20 Mobil (direkt) +49 / (0)151 12 456 925 achim.fischer@dezibel.digital
Maximilian Wolf (Projektmanager) Fon +49 / (0)89 / 74 11 807 - 11 Mobil +49 / (0)176 467 947 96 maximilian.wolf@dezibel.digital

Inhalt

1	Kurze Darstellung zu	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2	Eingehende Darstellung	7
2.1	Die Verwendung der Zuwendung, die erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	7
AP 4:	Optimierungs-Algorithmus.....	7
AP 4.1:	Forschung & Entwicklung, Konzept	7
AP 4.1.1:	Die Anforderungen für den Algorithmus sowie die Schnittstellen für den späteren Betrieb werden geklärt.....	7
AP 4.1.2:	Ein detailliertes Konzept für die Funktionsweise und Implementierung des Algorithmus wird ausgearbeitet	9
AP 4.2:	Analyse und testweise Optimierung von 3 Beispiel-Windparks	11
AP 4.2.1:	Analyse der Windparks auf Besonderheiten und lokale Begebenheiten	11
AP 4.2.2	Sichten und Aufbereiten der SCADA-Daten der Windparks	17
AP 4.2.3:	Anlernen des Algorithmus mit Trainingsdatensatz und Überprüfen mit Testdatensatz	19
AP 4.3:	Optimierungs-Algorithmus: Erarbeitung des Grundsystems	19
AP 4.3.1:	Entwicklung Monitoring-System	19
AP 4.3.2:	Entwicklung Optimierungs-Algorithmus.....	19
AP 4.3.3:	Entwicklung Test-System	22
AP 4.4:	Schnittstelle zur Parksteuerung	23
AP 7:	Implementierung Optimierungs-Algorithmus in Windpark, anlernen, überprüfen, verbessern	24
AP 7.1:	Unterstützung der Anbindung an das deBAKOM System.....	24
AP 7.2:	Einsatz im 1. Windpark.....	25
AP 7.3:	Datenerhebung, Auswertung und laufende Verbesserung im 1. Windpark.....	25
AP 7.5:	Weiterentwicklung des Testsystems	28

1 Kurze Darstellung zu

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Teilvorhabens der Dezibel Engineering GmbH (DEZE) in Zusammenarbeit mit der deBAKOM Messtechnik GmbH (dBM) im Gesamtvorhaben AuReWi war es, ein System (nachfolgend genannt Noise-Watch-Dog bzw. NWD) zu entwickeln, das auf Basis einer Dauerschallmessung in Verbindung mit einer Geräuschtrennung und unter Berücksichtigung der momentanen Windverhältnisse Windparks nachts an ihr Ertragsoptimum regeln kann und dabei gleichzeitig die Richtwerteinhaltung gewährleistet.

Aufgrund niedrigerer nächtlicher Schallrichtwerte an den angrenzenden Wohnbebauungen müssen Windparks nachts oft durchgängig auf eine reduzierte Leistungskurve gedrosselt werden. Diese Drosselung basiert auf einer Prognose, welche für jeden Immissionsort den absoluten Worst-Case – beste Schallausbreitungsbedingungen und Mitwind – voraussetzt. Da Schallausbreitungsbedingungen jedoch schwanken und nie alle Immissionsorte um den Park gleichzeitig in Mitwindrichtung liegen, ist durch eine dynamische Anpassung der Schallmodi im Vergleich zur Prognose nochmal mehr Ertragspotenzial zu heben.

Gleichzeitig garantiert der NWD die Einhaltung der Immissionsrichtwerte und trägt damit wesentlich und transparent zum Anwohnerschutz bei.

Durch das System wird der Zielkonflikt zwischen mehr grüner Energie, Anwohnerschutz und Wirtschaftlichkeit gelöst. Gleichzeitig gewährleistet es einen dauerhaften Nachweis der Richtwerteinhaltung für Behörden. Der NWD erkennt zudem Tonalitäten und ermöglicht so eine schnelle Reaktion zu deren Behebung.

Als akkreditierte Messstelle ist dBM in diesem Vorhaben für die akustische Messtechnik sowie die anschließende Datenverarbeitung in Verbindung mit der Geräuschtrennung verantwortlich.

Wir von DEZE entwickeln die daran anschließende automatische und selbstlernende Optimierung des Betriebskonzeptes eines Windparks mit dem Ziel des bestmöglichen Ertrages in jeder Windsituation bei gleichzeitiger Einhaltung der Immissionsrichtwerte. Die fortlaufende Optimierung basiert auf den kontinuierlichen Leistungsdaten der Windenergie-Anlagen und den kontinuierlich übermittelten Schallimmissionspegeln.

Dieses übergeordnete Ziel wurde in aufeinander abgestimmte Teilziele gegliedert, welche sich in den folgenden Arbeitspaketen widerspiegeln:

1. AP 4: Optimierungs-Algorithmus (DEZE)

Erweiterung des einfachen statischen Algorithmus auf dynamisch und selbstlernend, ferner Anbindung an die Parkregelung. Dazu: Erarbeiten von Anforderungen und Konzept für den Algorithmus. Vorarbeiten in den 3 Beispiel-Windparks bzgl. Windpark-Besonderheiten und SCADA-Daten. Iterative Entwicklung des Algorithmus mit Parameterstudie und Anwendung auf die Beispiel-Windparks. Nachbessern und Finalisieren des Algorithmus nach der Implementierung in den Beispiel-Windparks.

2. AP 7: Implementierung Optimierungs-Algorithmus in Windpark, anlernen, überprüfen, verbessern (DEZE)

Aufbau der Workstation mit der Software für die Parkregelung basierend auf Immissions-Messdaten und dem Optimierungsalgorithmus. Begleitung der Hardware-Installation in den Beispiel-Windparks durch die Projektpartner oder externe Partner. Analyse von Funktionsfähigkeit und Effizienz der automatischen Optimierung des Betriebskonzeptes in der Praxis und laufendes Nachbessern des Algorithmus. Nach Abbau des Systems im

ersten Park wird der Algorithmus an 1-2 weiteren Windparks getestet und nachgebessert. Überprüfen der Missbrauchs-Erkennung durch unangekündigte Tests durch DEZE.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit der debakom Messtechnik GmbH durchgeführt. Voraussetzung für unsere Optimierungsalgorithmus ist die Übermittlung der Ergebnisse der Geräuschtrennung. Diese Ergebnisse werden wiederum für die Prognoserechnung des Optimierers benötigt. Da wir hier aus Gründen der Einfachheit und schnellen Umsetzbarkeit mit Raspberry Pi gearbeitet haben, hatten wir von Zeit zu Zeit Probleme mit der Datenübermittlung von dBM an uns. Für einen schnellen Prototypen ist dieses Vorgehen jedoch geeignet. Mittelfristig stellt dBM auf eine robustere Hardware um, wodurch dieses Problem behoben wird.

Neben einem geeigneten Testwindpark ist eine weitere unabdingbare Voraussetzung die Schnittstelle zur Regelung der Schallmodi sowie zur Übermittlung der Leistungsdaten an uns. Da diese seitens der Hersteller Enercon und Nordex, die Anlagenhersteller der Testparks, erst programmiert werden müsste, hierzu jedoch noch keine Kapazitäten freigegeben wurden, wurden die Regelbefehle im ersten Windpark Curslack (Nordex-Anlagen) über die Fernleitwarte an die Anlagen übermittelt. Die Anlagendaten wiederum wurden über eine API-Schnittstelle des Betriebsführungstools Bytemee abgegriffen.

Ein industriell skalierbares Softwaregrundgerüst wurde seitens unseres IT-Beraters Jonas Hahn entwickelt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Gegenüber dem geplanten Vorgehen gab es Abweichungen, bedingt v.a. durch das Fehlen einer Schnittstelle zur Steuerung der Schallmodi an den Windenergieanlagen (WEAs) der Testparks:

AP4: Der Schallprognoseteil des Optimierungsalgorithmus wurde entsprechend von einer statischen Variante, welche auf der Worst-Case-Prognose (Interimsverfahren) beruht, auf eine dynamische Variante, welche den momentan gemessenen Beurteilungspegel berücksichtigt, abgeändert. Aufgrund diverser Verzögerungen hat eine Parameterstudie und darauf aufbauend die Entwicklung eines selbstlernenden Systems noch nicht stattgefunden.

AP7: Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass der Optimierer bzw. NWD-Regler (s.u.) am besten in einer cloudbasierten IoT-Struktur integriert ist (und nicht wie anfangs gedacht auf einem Industrie-PC vor Ort im Windpark). Die Anbindung an die Cloud erfolgte im ersten Schritt über einen Raspberry-Pi. Langfristig wird hier selbstverständlich stabilere Hardware zum Einsatz kommen. Mangels Schnittstelle zu den Anlagen mussten wir unsere Regelbefehle an die Fernleitwarte von Nordex mittels automatisierter E-Mail weiterleiten. Bei der Umsetzung unsere Befehle gab es jedoch noch bisher ungeklärte Schwierigkeiten, so dass die Anlagen nicht wie von uns vorgegeben geregelt wurden.

Auch bei den Anlagen (Hersteller Enercon) des zweiten Testparks stand und steht keine Schnittstelle zur Verfügung. Der Hersteller hat viele Entwicklungsprojekte aus Kostengründen auf Eis gelegt, daher fanden in diesem Park noch keine Regelversuche statt. Der Projektpartner dBM hat hier eine mobile Messstation errichtet und eine Orientierungsmessung durchgeführt.

Ein Missbrauchserkennung wurde demzufolge noch nicht implementiert.

Ausblick: Zwischenzeitlich haben wir herausgefunden, dass der Anlagenhersteller Vestas bereits eine geeignete OPC-Schnittstelle zur Regelung der Schallmodi besitzt. Vor diesen Hintergrund sind wir im intensiven Kontakt bzw. in Vertragsverhandlungen mit zwei Betreibern von Vestas-Anlagen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ausgangsstand unserer Arbeiten ist die Möglichkeit zur Durchführung automatisierter Dauerschallmessungen der dBM für Windenergie und Industrie-Anwendungen. Ferner der bei DEZE intern vorliegende Optimierungs-Algorithmus.

Seit Gründung der dBM im Jahre 1980 werden Messstationen zum Dauer- oder Langzeiteinsatz entwickelt, eingesetzt und verkauft. Die komplette Messkette ist kalibrier- und eichfähig. Die wesentlichen Merkmale der Messstationen zeigen sich in der kontinuierlichen Aufnahme von Pegelverläufen und einer hochauflösenden Frequenzstruktur (2.93 Hz Bandbreite). Die Messdaten werden direkt vor Ort statistisch vorausgewertet. Somit kann während der Messung schon mit einer Beurteilung begonnen werden. Gerade durch die statistische Bewertung von hochauflösenden Frequenzstrukturen (Perzentspektren) ist eine detaillierte Geräuschbetrachtung (Geräusch- und Tonhaltigkeitserkennung) möglich. Diese Merkmale stellen bis heute ein Alleinstellungsmerkmal in der akustischen Messtechnik dar. Zur kontinuierlichen Geräuschüberwachung werden die deBAKOM Dauermessstationen bei unterschiedlichen Industriebetrieben für Immissionsmessungen in der Nachbarschaft seit Jahren eingesetzt.

Es existieren einzelne Patente zur automatischen Parkregelung wie z.B. das EP1192355B1. Dem Antragsteller ist jedoch von keiner Umsetzung einer auf Schall-Immissions-Dauermessungen basierenden automatischen Parkregelung bekannt, mit der folgenden Ausnahme:

Es gab eine erste Pilot-Anwendung der dBM im Auftrag der TED GmbH Bremerhaven im Windpark Altenbruch der Altenbruch GmbH in Cuxhaven im Jahr 2006. Die einfache Regelung zur An-Aus-Regelung der WEA erfolgte in 4 Stufen:

1. Erfassung der Messdaten (Ist-Pegel = Perzentilpegel)
2. Berechnung der Immissionspegel (Prognose-Pegel)
3. Vergleich der Ist-Pegel und der Soll-Pegel für jeden Messpunkt
4. Ab/Anschalten der WEA

Des Weiteren hält die dBM ein Patent „Vorrichtung zur Geräuscherkennung und Geräuschtrennung“ EP1092964B1 und das Gebrauchsmuster „Vorrichtung zur Geräuscherkennung und -trennung sowie Lärmüberwachung von Lärmemissionsgebieten und als Windkraftüberwachungsanlage“ Nr.: DE20016999U1

Stand der Technik zur Optimierung von Betriebskonzepten:

Es gibt Anwendungen von

A) sektoriellen Abschaltungen v.a. für das Last-Management oder auch

B) einzelne Anlagen die in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit oder -Richtung an- oder ausgeschaltet oder gedrosselt werden, um bei bestimmten Betriebsbedingungen die Schallrichtwerte einzuhalten, bei anderen mit maximalem Ertrag laufen zu können.

C) Monitoring von Windparks und Optimierung der Instandhaltungsstrategien. Anlagen, bei welchen laut Condition Monitoring System z.B. ein Getriebeschaden droht, werden nur noch mit geringen Lasten gefahren, um bis zum Ende der Förderung oder anderen Meilensteinen Kosten- / Ertragsoptimiert die Anlage betreiben zu können.

D) Eine rechnerische Optimierung ist im Rahmen der Parkplanung derzeit für die Erträge infolge Wake-Verlusten oder durch Gelände-Einflüsse allgemein verfügbar – z.B. in WindPro. Dies bezieht sich dann erneut auf das Layout in der Planungsphase, also welche Turbine wird in welchem Drosselungsmodus wo aufgebaut. Es bezieht sich jedoch nicht auf das dynamische selbstlernende Betriebskonzept, das hier entwickelt wurde.

Fazit: Die Optimierung der Betriebskonzepte findet derzeit also vor allem in der Planungs-Phase Anwendung. Im laufenden Betrieb der Windparks wird das vordefinierte Betriebskonzept dann direkt gesteuert ohne Rückkopplung durch tatsächliche Immissionswerte.

DEZE hat bereits einen einfachen Optimierungs-Algorithmus entwickelt. Durch diesen wird ein statisches Betriebskonzept definiert, mit welchem der Windpark betrieben wird. Es findet keine Rückkopplung in den Algorithmus durch die Betrachtung der tatsächlich gemessenen Immissionswerte statt, obwohl bekannt ist, dass die tatsächliche Schallausbreitung von den örtlichen Gegebenheiten wie auch den variablen meteorologischen Verhältnissen abhängt. Auch werden abweichende Windverhältnisse an einzelnen Anlagen nicht in Betracht gezogen. Der existierende Algorithmus ermittelt also ein optimiertes Betriebskonzept, bei welchem der Betriebsmodus der Anlage abhängig von Windgeschwindigkeit und -Richtung statisch bestimmt wird.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts wurde mit diversen Stellen zusammengearbeitet.

In erster Linie sind hier die Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) und das Ingenieurbüro Augustin zu nennen, welche freundlicherweise Ihren Windpark Curslack für das Projekt zur Verfügung gestellt haben.

Im Rahmen der Software-Entwicklung war uns XXX (vormals YYYY, jetzt ZZZZ) behilflich.

Der Betriebsführungssoftwarehersteller Bytmee hat seine API derart angepasst, dass wir neben den gängigen Leistungsdaten auch die momentanen Schallmodi übermittelt bekommen haben.

SCADA & More ist der Netzwerkdienstleister des Windparks Curslack. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurde ermittelt, an welchen Netzwerkpunkten wir unsere Raspberry-Agenten anschließen konnten.

In der Zusammenarbeit mit Nordex (Anlagenhersteller) wurde viel zum Thema bilaterale Datenübermittlung gesprochen. Hierbei wurde sich vor allem mit der Fernleitwarte über die zu justierenden Parameter ausgetauscht, welche wir per automatisierter E-Mail übermitteln sollten.

Im zweiten Testpark haben wir uns mit Enercon intensiv hinsichtlich der Schnittstelle ausgetauscht.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Die Verwendung der Zuwendung, die erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

AP 4: Optimierungs-Algorithmus

AP 4.1: Forschung & Entwicklung, Konzept

AP 4.1.1: Die Anforderungen für den Algorithmus sowie die Schnittstellen für den späteren Betrieb werden geklärt

Im Rahmen unserer normalen Geschäftstätigkeit verwenden wir einen Optimierungsalgorithmus, der auf intelligente Weise nach dem Evolutionsprinzip in kurzer Zeit sehr viele Varianten berechnen kann. Hierbei wird die Ertragsberechnung (je nach Situation mit SCADA-Daten oder anhand der vorgegebenen Windstatistik) mit der Schallprognose (nach Interimsverfahren) verknüpft. Bei dieser Schallprognose sind die Eingangsparameter und Ausbreitungsbedingungen nach dem Worst-Case-Prinzip fest vorgegeben.

Dieses statische Grundkonzept muss nun auf eine Live-Regelung umgemünzt werden. Dazu haben wir folgende Anforderungen ausgearbeitet:

- Einen simplifizierten Optimierungsalgorithmus für den Prototypen: Da der bisherige Optimierer aktuell noch zu viel Rechenzeit benötigt und wir erst noch Erfahrung sammeln mussten bzw. müssen, haben wir uns für eine vereinfachte Variante mit Look-up-Tables entschieden. Hierzu wurden im Vorfeld Betriebskonzepte entwickelt, die gemäß Worst-Case-Prognose (nach Interimsverfahren) die Immissionen am maßgebenden Immissionsort in Schritten von 1 dB erhöhen.
- Einer Anpassung der Schallprognose auf die momentan vorherrschenden Bedingungen (Luftfeuchtigkeit, Atmosphärensichtung, Temperaturbedingungen). Die Ausbreitungsbedingungen und damit einhergehend auch die prognostizierten Immissionspegel variieren. Diese Tatsache muss auch in der Prognose berücksichtigt werden.
- Anpassung der Schallprognose zu einer drehzahlabhängigen Vorhersage. Aktuell geht der lauteste Anlagenzustand in die Prognose ein. Da dieser erst ab ca. 10 m/s vorliegt, bedarf es auch einer Prognose bzw. Optimierung für den Teillastbereich. Da die Schallleistung der Windenergieanlage mit deren Drehzahl korreliert, ist hier die drehzahlabhängige Schallleistung in der Prognose zu anzusetzen.

Während der Arbeit an diesen Anforderungen stellte sich zudem heraus, dass das Thema „Optimierer“ bei der Planung unterschätzt worden war. Tatsächlich wird ja nicht primär ein „Optimierer“ benötigt, sondern eine Überwachungs- und Regel-Einheit für die Windenergie-Anlagen, die darüber hinaus auch den (Ertrags-) optimalen Zustand für die Schallmodi der Anlagen findet.

Diese Überwachungs- und Regel-Einheit wurde „Noise-Watchdog Regeleinheit“ oder kurz „NWD-Regler“ getauft. Sie muss die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Anbindung an die Cloud: Nach der Erfahrung unseres externen IT-Beraters ist der NWD-Regler für eine IoT-Anwendung geeignet. Dazu wurde dieser in einer Cloudstruktur implementiert. Über sogenannte Agents verbinden wir uns mit den relevanten Schnittstellen zur bilateralen Datenübermittlung (siehe Abbildung 1).
- Schnittstelle zu den Anlagen:
 - o zum Abgreifen der Anlagendaten (Drehzahl, Windrichtung, Leistung, Windgeschwindigkeit etc.).
 - o Zum Übermitteln der Regelbefehle für die Schallmodi
- Einer Schnittstelle zur Übermittlung der aufbereiteten Messdaten von dBm an DEZE

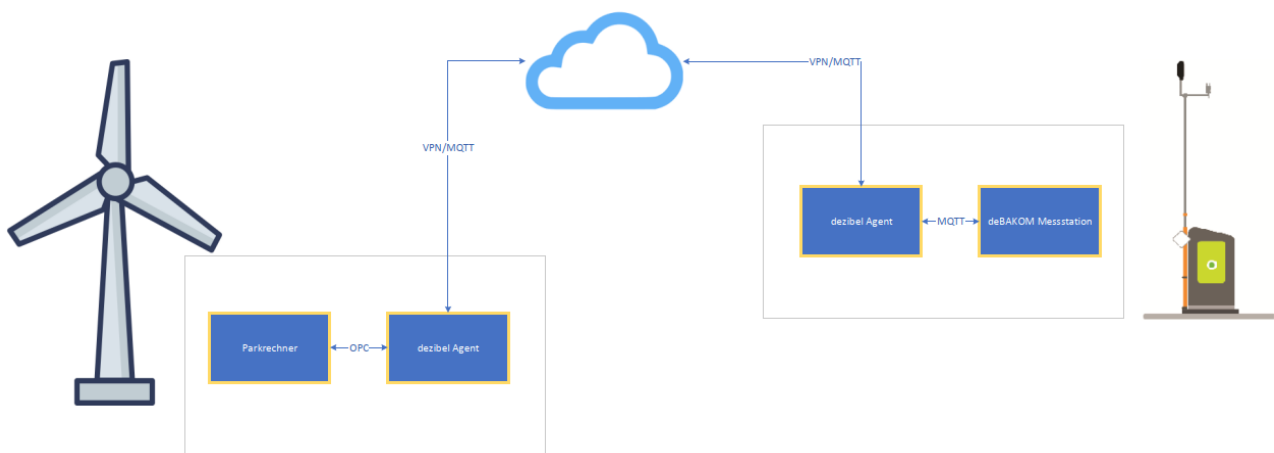


Abbildung 1: IoT-Struktur der cloudbasierten Noise-Watchdog-Regeleinheit

Hinweis: Nach langer und intensiver Diskussion mit dem Anlagenhersteller Nordex, kam heraus, dass die erforderliche Schnittstelle zu den Anlagen-Daten in den Windenergieanlagen des Testparks Curslack noch nicht vorliegt und aufgrund von Kapazitätsproblemen auch nicht zeitnah implementiert werden kann. Aufgrund dessen musste zum Abgreifen der Anlagendaten die API des Betriebsführungstools Bytemee angezapft werden. Zur Übermittlung unseres optimierten Betriebskonzepts an die Anlagen wiederum, haben wir automatisierte Mails an die Fernleitwarten von Nordex übermittelt, welche nach Erhalt die Modi entsprechend einstellen sollte.

Neben der Programmierung der Schnittstelle zur API von Bytemee hat vor allem die Entwicklung der automatisierten E-Mail-Weiterleitung zu dem deutlichen Mehraufwand geführt. Eine Anbindung an eine standardisierte OPC-Schnittstelle wäre vergleichsweise leicht zu implementieren gewesen. Sehr zeitintensiv war hier die richtige Abstimmung des Formates und das Einrichten der Weiterleitung. Zudem mussten wir gemeinsam mit der Hersteller Nordex die richtigen Parameter zur Regelung der Schallmodi ausfindig machen, was bei einer derartigen Parametermenge ein sehr komplexes und langwieriges Unterfangen war.

AP 4.1.2: Ein detailliertes Konzept für die Funktionsweise und Implementierung des Algorithmus wird ausgearbeitet

Der aufwändigere Optimierer besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten. Dem eigentlichen Optimierer und einer modifizierten Schallprognose, welche eine realistische Vorhersage des Messwertes für den optimierten Betrieb geben soll. Im Rahmen des Projekts haben wir jedoch erstmal eine schlankere Variante (NWD-Regler genannt) entwickelt, welche keine modifizierte Prognose benötigt. Der Vollständigkeit sei diese aber im Folgenden erklärt.

Modifizierte Schallprognose:

Dazu haben wir den Prognoseteil derart angepasst, dass wir eine realistische Abschätzung des neuen Messwerts nach dem Regeleingriff bekommen. Dabei sind wir wie folgt vorgegangen:

1. Prognostizierte Immissionspegeldifferenz zwischen optimierten und momentanen Betriebskonzept:

Hier werden gemäß Interimsverfahren [2] die Beurteilungspegel von IST-Konzept und optimierten Konzept bestimmt und hiervon die Differenz gebildet.

Beispiel:

IST-Konzept = 40 dB(A)

Optimiertes Konzept = 41 dB(A)

Optimiertes Konzept – IST-Konzept = 1 dB(A)

Da diese Differenz nach dem Interimsverfahren bestimmt wurde, stellt sie einen Worst-Case dar. Daher wir uns hier im ersten Schritt vorsichtig herantasten und Erfahrung gewinnen wollen, ist dieses Vorgehen adäquat und transparent. Nach dem wir ausreichend Daten haben, wird die Prognose gegebenenfalls nochmals angepasst.

2. Addition der Pegeldifferenz aus 1. auf den gemessenen Beurteilungspegel:

Im Rahmen einer Messwertprognose müssten wir eigentlich die schalltechnischen Ausbreitungsbedingungen berücksichtigen. Diese Rechnung ist jedoch sehr komplex und fehlerbehaftet. In einer ersten Version der Prognose wird nun der momentan gemessene Beurteilungspegel verwendet und die zuvor ermittelte prognostische Pegeldifferenz hinzuaddiert. In dem gemessenen Beurteilungspegel sind die Ausbreitungsbedingungen bereits enthalten und die Pegeldifferenz wird mit der Worst-Case-Prognose bestimmt, was wiederum ein konservativer Ansatz ist.

Beispiel:

Aktueller Messwert = 39 dB(A)

Pegeldifferenz aus 1.) = 1 dB(A)

Prognostizierter Messwert = 39 dB(A) + 1 dB(A) = 40 dB(A)

Wir gehen nun davon aus, dass wir nach der Umstellung einen Beurteilungspegel von maximal 40 dB(A) messen werden.

Diese modifizierte Prognose ist erst sinnvoll, sobald wir flexibel die Anlagen regeln können. Für den Testwindpark mussten wir mangels Schnittstelle einen schlankeren NWD-Regler entwickeln. Dazu wurden im Vorhinein Betriebskonzepte am PC konzipiert, die den Beurteilungspegel am kritischen Immissionsort schrittweise um 1dB erhöhen. Es wird in diesem Rahmen nur zwischen diesen vorgefertigten Betriebskonzepten geregelt. Durch dieses Vorgehen stellen wir sicher, dass der gerundete Richtwert nie überschritten wird. Eine Schallprognose findet zur Vorhersage des Beurteilungspegels in diesem System nicht statt.

NWD-Regler:

Für den NWD-Regler haben wir ein Konzept in intensiver Abstimmung mit dBM ausgearbeitet, welches sich am besten anhand dem Fließbild XXX erklärt.

Es gibt im Grunde 3 Zustände:

1. Der Beurteilungspegel des TA-Lärm-relevanten Gesamtgeräusches ist messbar und liegt auf Richtwert: Hier darf nicht geregelt werden
2. Der Beurteilungspegel des TA-Lärm-relevanten Gesamtgeräusches ist messbar und liegt unter Richtwert: Hier darf der Park an den Richtwert herangeregelt werden
3. Der Beurteilungspegel des TA-Lärm-relevanten Gesamtgeräusches ist aufgrund der ständig vorherrschenden Fremdgeräusches nicht messbar und dessen Grundgeräuschpegel ist größer oder gleich dem Richtwert: Hier darf der Park an den Grundgeräuschpegel herangeregelt werden

Der hier gelöschte Abschnitt wurde wegen Vertraulichkeit nicht veröffentlicht

Dieser erste Prototyp dient dem Proof-of-Concept. In einem nächsten (hier nicht verwirklichten) Schritt soll der Optimierer nicht mehr mit vorgefertigten Konzepten arbeiten, sondern auf Basis der momentanen Windverhältnisse (Geschwindigkeit und Richtung) das beste Betriebskonzept einstellen (also eine echte Live-Optimierung durchführen). Diese Entwicklung verlangt jedoch eine stabil funktionierende Schnittstelle zu den Anlagen.

AP 4.2: Analyse und testweise Optimierung von 3 Beispiel-Windparks

AP 4.2.1: Analyse der Windparks auf Besonderheiten und lokale Begebenheiten

Bevor wir mit der eigentlichen Forschung beginnen konnten, war erst einmal ein geeigneter Park bzw. Betreiber erforderlich. Dazu wurden im ersten Schritt Mindestanforderungen an den Park definiert:

- 1) Es existieren nachts gedrosselte / abgeschaltete Anlage(n) des Betreibers, damit es überhaupt Sinn macht etwas zu optimieren
- 2) Die Inbetriebnahme liegt mindestens 1 Jahr zurück, höchstens ca. 12 Jahre: genügend Datenbasis für die Entwicklung der Optimierung und genügend Restlaufzeit für Nutzen der Optimierung
- 3) Keine Klagen und offenen Gerichtsverfahren

Anschließend wurde beim IWR-Pressverteiler eine Pressmeldung mit unserem Parkgesuch aufgegeben (<https://www.iwrpressedienst.de/energie-themen/pm-7173-mehr-ertrag-im-schallreduzierten-betrieb-durch-ki-und-echtzeit-schallmessung-windparks-fuer-pilotprojekte-gesucht>). Daraufhin erhielten wir ca. 10 Anfragen von Windparkbetreibern, die im Folgenden auf ihre Eignung analysiert wurden. Als Ergebnis wurde der Windpark Curslack ausgewählt. Über Kontakte zu Firma Enercon stießen wir nach Prüfung weiterer Kandidaten auf den Windpark Emden-Ost. Aus eigener weiterer Recherche bei technischen Betriebsführern wurde schließlich noch ein dritter Park (WP Wanlo) identifiziert.

1. Windpark Curslack

Auf den o.g. Artikel haben sich mehrere interessierte Betreiber gemeldet, deren Parks wir im Rahmen einer Voranalyse auf Eignung überprüft haben. Als besonders geeignet erwies sich hierbei der Windpark Curslack in Hamburg-Bergedorf (siehe *Abbildung 2*). Dieser Park gehört teils dem Ingenieurbüro Augustin und der Hochschule Hamburg (HAW), die den Park ebenfalls für Forschungszwecke nutzt, und zu einem geringen Teil den Hamburger Elektrizitätswerken.

Der Park besteht aus 5 Nordex N117 mit 120 m Nabenhöhe, die nachts alle im niedrigsten Schallmodus laufen. Das theoretische Mehrertragspotenzial durch Schalloptimierung beträgt ca. **X** MWh pro Jahr.

Der Park hat einen kritischen Immissionsort (IO05), welcher als allgemeines Wohngebiet mit einem Richtwert nachts von 40 dB(A) eingestuft ist.

Nördlich der Windenergieanlagen befinden sich mehrere Gewerbegebiete (u.a. beiderseits des Curslackers Neuen Deiches, südlich Brookdeich).

Südlich der Windenergieanlagen, Auf der Böge 28B, befindet sich das Fabrikgelände der Unternehmensgruppe Deiters und Florin.

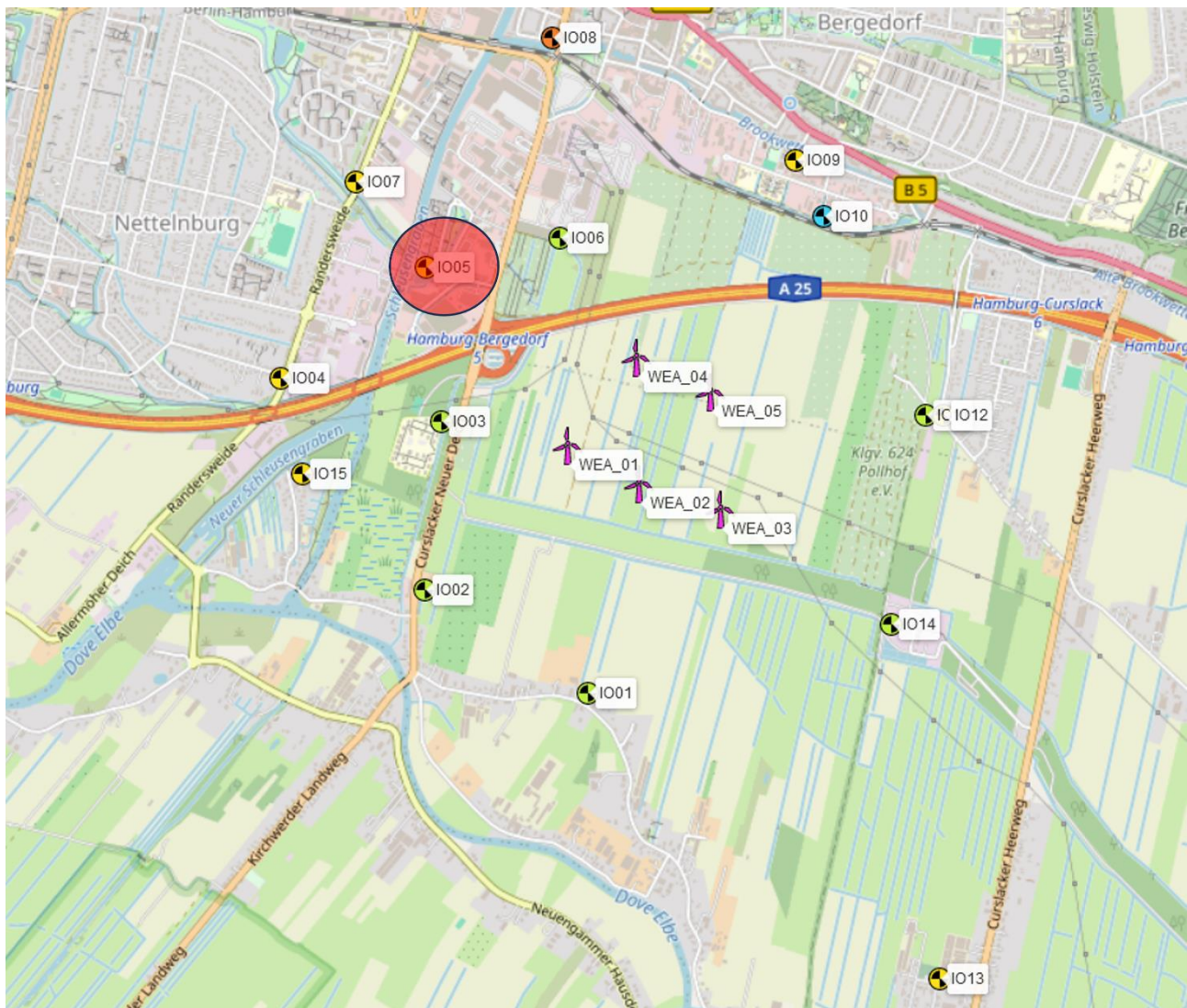


Abbildung 2: Windpark Curslack mit Immissionsorten (IO05 ist der maßgebende Immissionsort)

Tabelle 1: Übersicht WEA und nächtliche Drosselungen

Anlage	Typ	Tag / Nacht-Modus	Rechtswert	Hochwert	HÜNN
WEA_01	N117 / 3000, 120 m	Mode 0.a3 (107,00 dB) / Mode 07 (102,00 dB)	580.331 m	5.925.387 m	1 m
WEA_02	N117 / 2400 ohne Serrations, 120 m	Mode 0 (105,62 dB) / Mode 05 (101,90 dB)	580.592 m	5.925.253 m	1 m
WEA_03	N117 / 2400 mit Serrations, 120 m	Mode 00 (103,40 dB) / Mode 05 (99,00 dB)	580.886 m	5.925.166 m	1 m
WEA_04	N117 / 2400 ohne Serrations, 120 m	Mode 0 (105,62 dB) / Mode 05 (101,90 dB)	580.573 m	5.925.712 m	1 m
WEA_05	N117 / 2400 ohne Serrations, 120 m	Mode 0 (105,62 dB) / Mode 05 (101,90 dB)	580.843 m	5.925.592 m	2 m

Tabelle 2: Immissionsorte mit dem jeweiligen Einfluss der gewerblichen Vorbelastung

ID	Adresse	Gebiets-einstufung	Rechtswert	Hochwert	HÜNN	Aufpunkthöhe	Einfluss der gewerblichen Vorbelastung
IO01	Curslack Deich 316; BS-Plan Bergedorf	KDM (60 dB/45 dB)	580.416 m	5.924.565 m	2 m	5 m	--- dB

IO02	Curslacke Neuer Deich 169; BS-Plan Bergedorf	KDM (60 dB/45 dB)	579.819 m	5.924.930 m	2 m	6 m	--- dB
IO03	Curslacke Neuer Deich 78f; BS-Plan Bergedorf	KDM (60 dB/45 dB)	579.869 m	5.925.539 m	4 m	5 m	28,90 dB
IO04	In der Hörn 1; B-Plan Bergedorf 68 Blatt 4	WA (55 dB/40 dB)	579.284 m	5.925.683 m	2 m	5 m	--- dB
IO05	Am Schleusengraben; B-Plan Bergedorf 104 / Curslack 19	WA (55 dB/40 dB)	579.803 m	5.926.096 m	4 m	5 m	38,30 dB
IO06	Curslacke Neuer Deich 57e; B-Plan Bergedorf 77	KDM (60 dB/45 dB)	580.286 m	5.926.209 m	4 m	5 m	38,90 dB
IO07	Weidenbaumschweg 136; BS-Plan Bergedorf	WA (55 dB/40 dB)	579.545 m	5.926.400 m	3 m	7 m	--- dB
IO08	Am Hohen Stege 2; B-Plan Bergedorf 69	WR (50 dB/35 dB)	580.247 m	5.926.935 m	4 m	5 m	32,50 dB
IO09	Brookdeich 100/100a; B-Plan Bergedorf 29	WA (55 dB/40 dB)	581.140 m	5.926.504 m	3 m	5 m	34,50 dB
IO10	Brookkehre 36; B-Plan Bergedorf 29	G (65 dB/50 dB)	581.245 m	5.926.303 m	2 m	5 m	--- dB
IO11	Achterschlag 2; BS-Plan Bergedorf	KDM (60 dB/45 dB)	581.624 m	5.925.590 m	3 m	7 m	--- dB
IO12	Pollhof 59; B-Plan Bergedorf 73	WA (55 dB/40 dB)	581.690 m	5.925.592 m	3 m	5 m	22,40 dB
IO13	Grashofweg 10; B-Plan Curslack 12	WA (55 dB/40 dB)	581.710 m	5.923.553 m	2 m	5 m	--- dB
IO14	Curslacke Heerweg 137; BS-Plan Bergedorf	KDM (60 dB/45 dB)	581.515 m	5.924.833 m	3 m	5 m	--- dB
IO15	Schleusenhörm 40; BS-Plan Bergedorf	WA (55 dB/40 dB)	579.365 m	5.925.342 m	2 m	5 m	--- dB

Wie aus *Abbildung 2* ersichtlich liegt zwischen Park und dem kritischen Immissionsort IO05 eine Autobahn, die jedoch in der Prognose gemäß TA-Lärm bzw. DIN ISO 9613 – 2 nicht berücksichtigt wird. Straßenverkehr wird in Deutschland nach einer anderen Richtlinie beurteilt. Obwohl also eine dominante Autobahn vorliegt, müssen die Windenergieanlagen nachts gedrosselt werden.

Die TA-Lärm bietet hier jedoch die Möglichkeit dieses ständig vorherrschende Fremdgeräusch der Autobahn auszunutzen:

„Die Genehmigung darf wegen einer Überschreitung der Immissionsrichtwerte nicht versagt werden, wenn infolge ständig vorherrschender Fremdgeräusche keine zusätzlichen schädlichen Umwelteinwirkungen durch die zu beurteilende Anlage zu befürchten sind. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn für die Beurteilung der Geräuschimmissionen der Anlage weder Zuschläge gemäß dem Anhang für Ton- und Informationshaltigkeit oder Impulshaltigkeit noch eine Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche nach Nummer 7.3 erforderlich sind und der Schalldruckpegel LAF(t) der Fremdgeräusche in mehr als 95 % der Betriebszeit der Anlage in der jeweiligen Beurteilungszeit nach Nummer 6.4 höher als der Mittelungspegel LAeq der Anlage ist. Durch Nebenbestimmungen zum Genehmigungsbescheid oder durch nachträgliche Anordnung ist sicherzustellen, dass die zu beurteilende Anlage im Falle einer späteren Verminderung der Fremdgeräusche nicht relevant zu schädlichen Umwelteinwirkungen beiträgt.“ [1]

Dies heißt konkret, dass die Anlagen an den Grundgeräuschpegel heran geregelt werden dürfen, der in 95% der Zeit nicht überschritten wird. Diese Regelung kommt vor allem dann zum Tragen, wenn der Grundgeräuschpegel über dem Richtwert liegt.

Die theoretische Vorprüfung hat also gezeigt, dass der Park für das Forschungsprojekt geeignet ist.

Parallel dazu wurde mit dem Anlagenhersteller Nordex Kontakt aufgenommen, eine grundsätzliche Machbarkeit abgefragt und die Bereitschaft zur Zusammenarbeit vereinbart. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf die Umsetzung der Schnittstelle zur bilateralen Datenübermittlung.

Daraufhin wurde ein Letter-of-Intent (LoI) mit dem Betreiber und Nordex unterzeichnet, um die Zusammenarbeit auf eine formale Grundlage zu stellen.

Im nächsten Schritt hat unser Projektpartner dBM eine Orientierungsmessung über mehrere Wochen in der Nähe des kritischen Immissionsortes durchgeführt. Diese Messung hat nochmal ein genaueres Bild über die Schallsituation vermittelt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Autobahn die meiste Zeit die Schallsituation vor Ort dominiert. Vereinzelt gibt es auch Zeiträume, in denen das Anlagengeräusch wahrnehmbar unter Richtwert liegt. Die genauen Ergebnisse der Messdatenauswertung ist dem Bericht des Projektpartners dBM zu entnehmen.

Die Messdatenanalyse hat unsere Entscheidung, mit dem Park fortzufahren, verfestigt.

Als letztes sind wir mit dem Konzept auf die Hamburger Immissionsschutzbehörde (BUKEA) zugegangen und haben es in großer Runde im Rahmen eines Onlinetermins vorgestellt. Das NWD-System hat – wie bereits erwähnt – dank der Dauerüberwachungsmessung Vorteile für die Behörde, da diese im Falle von Anwohnerbeschwerden einen dauerhaften Nachweis hat, dass die Richtwerte eingehalten sind. Wir konnten die Behörde überzeugen, so dass sie uns einen einjährigen Probetrieb gewährt hat.

2. Windpark Emden-Ost

Der zweite Windpark bei Emden kam über einen Kontakt des Anlageherstellers Enercon zustande. Der Park besteht aus Enercon-Anlagen mit folgenden Eckdaten:

Anlage	Typ	nächtlicher Schallmodus	Rechtswert	Hochwert
WEA01	E126-EP4-4.2 STE NH135,0 m	BM I s (106,20 dB)	386.446,000 m	5.915.306,000 m
WEA02	E115-3000 STE NH135,0 m	BM 2000 kW s (102,90 dB)	385.953,000 m	5.914.675,000 m
WEA03	E115-3000 STE NH135,0 m	BM 2000 kW s (102,90 dB)	385.415,000 m	5.914.368,000 m

Die theoretische Vorprüfung hat also gezeigt, dass der Park für das Forschungsprojekt geeignet ist.

Gleichzeitig wurde mit Enercon Näheres bzgl. der Schnittstelle zu den Anlagen besprochen. Hierbei hat sich herausgestellt, dass diese erst programmiert werden müsste. Dies wurde uns für die nahe Zukunft zugesagt.

Ein Lol mit dem Betreiber und Enercon wurde unterzeichnet, um die Zusammenarbeit auf eine formale Grundlage zu stellen.

Im nächsten Schritt hat unser Projektpartner dBM eine Orientierungsmessung über mehrere Monate in der Nähe des kritischen Immissionsortes durchgeführt. Diese Messung hat nochmal ein genaueres Bild über die Schallsituation vermittelt. Im Rahmen der Energiesicherungsmaßnahmen aufgrund der Gasmangellage durften die betrachteten Anlagen nachts während der Messkampagne vorübergehend offen laufen. Die Analyse der Schallimmissionsmessungen während dieser Zeit des erhöhten Betriebes hat ergeben, dass teils Richtwertüberschreitungen bis zu XXX dB vorlagen. Dies zeigt, dass man mit einer Dauerüberwachung und Regelung des Parks den Anwohnerschutz hier gewährleisten und nur zu gegebener Zeit die Anlagen entsprechend entdrosseln und mehr Energie produzieren könnte.

Parallel dazu wurde das Konzept dem Verantwortlichen der Behörde vorgestellt, welcher ebenfalls wie in Curslack einen einjährigen Probetrieb nach §15-BImSchG gewährt hat.

3. Windpark Wanlo

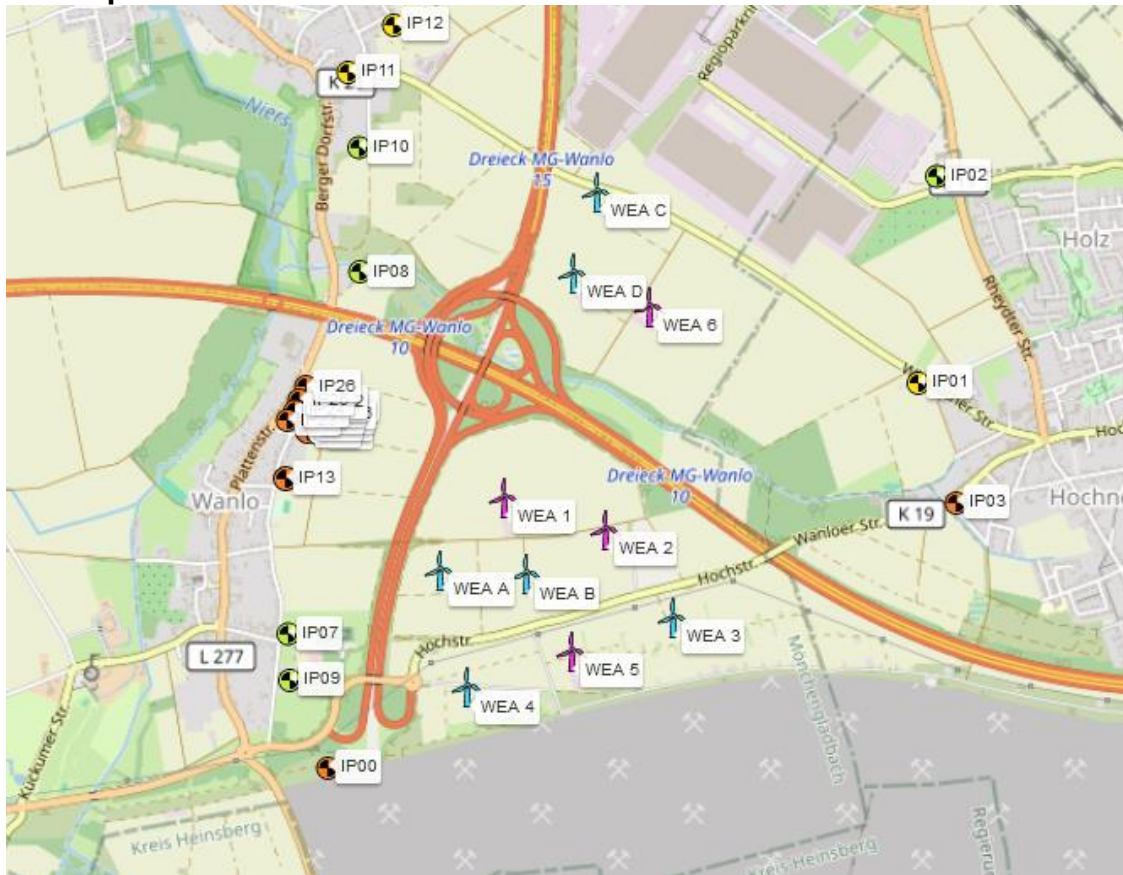


Abbildung 4: Windpark Wanlo (Nah- und Fernaufnahme)

Der dritte Kandidat war der Windpark Wanlo.

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

Das Projekt wurde daher nicht weiterverfolgt.

AP 4.2.2 Sichten und Aufbereiten der SCADA-Daten der Windparks

(1 PM geplant, 1 PM benötigt)

1. Windpark Curslack

Im Folgenden werden die 10min-SCADA-Daten der Anlagen anhand der Anlage WEA05 ausgewertet und erläutert.

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

Abbildung 5: Scatter-Plot der Leistung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit für Tag und Nacht der WEA05 (gestrichelt ist die Herstellerleistungskurve)

Abbildung 5 zeigt den Scatter-Plot der Tag- und Nachtleistungskurven als Funktion der Windgeschwindigkeit am Beispiel der WEA05. Der Plot zeigt, dass die 10min-Leistungswerte immer gleichförmig um die Herstellerleistungskurven streuen. Dies ist ein sehr typisches und normales Phänomen.

Abbildung 6 illustriert die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit differenziert nach Tag und Nacht. Es ist hier in der Nacht eine deutliche Verschiebung hin zu höheren Windgeschwindigkeiten zu erkennen. Dies ist ebenfalls normal, da nachts bekanntlich höhere Windgeschwindigkeiten vorliegen.

Abbildung 7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung. Hierbei ist ebenfalls das für Deutschland typische Bild zu erkennen. Die Hauptwindrichtung ist Süd-West. Hierbei wird die Windrichtungsverteilung des Ertragsgutachtens sehr gut getroffen.

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit der WEA05

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

Abbildung 7: Windrose - Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen der WEA05 im Vergleich zur Windrose des Ertragsgutachtens

Der berechnete Mehrertrag aus den SCADA-Daten beträgt ca. **X** MWh/a und entspricht in etwa den ausgewiesenen Schallverlusten des Ertragsgutachtens.

Die SCADA-Daten sind somit sehr plausibel und können als Datenquelle für unsere Forschungsanwendung verwendet werden.

2. Windpark Emden-Ost

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

Abbildung 8: SCADA-Daten der WEA03

Die SCADA-Daten der WEA03 im Windpark Emden-Ost zeigen, dass die Kurven (Punkteschar) im Vergleich zu den Herstellerkennlinien (gestrichelt) scharf bei der jeweiligen Maximalleistung abschneiden (siehe (Inhalt gelöscht, da vertraulich!))

Abbildung 8). Die Hersteller Leistungskurven weisen noch einen gewissen Transitionsbereich vom ansteigenden zum horizontalen Teil auf, der so in Wirklichkeit nicht vorliegt.

Des Weiteren sehen wir hier auch Kurvenverläufe abseits des vorgegeben Betriebskonzepts. Diese sind Redispatch-bedingt. Redispatch findet an wind- und sonnenreichen Tagen zur Entlastung der Netze statt, falls diese in der Region noch nicht entsprechend für hohe Strommengen ausgelegt sind.

Diese Umstände gilt es bei der Optimierung zu berücksichtigen.

Abbildung 9 zeigt die Windrose der WEA03. Hierbei ist zu erkennen, dass die meiste Zeit aus der Hauptwindrichtung Süd-West kommt. Aufgrund seiner küstennahen Lage, kommt auch sehr viel Wind aus West und Norden.

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

Abbildung 9: Windrose der WEA03 im Windpark Emden-Ost

AP 4.2.3: Anlernen des Algorithmus mit Trainingsdatensatz und Überprüfen mit Testdatensatz

Dieses Arbeitspaket wurde mangels eines ausreichend langen Testeinsatzes nicht bearbeitet. Die Zeit wurde teils in AP 4.2.1 und teils im AP 4.1 genutzt.

AP 4.3: Optimierungs-Algorithmus: Erarbeitung des Grundsystems

AP 4.3.1: Entwicklung Monitoring-System

Zur Auswertung, Plausibilisierung und Überwachung unserer Regelbefehle wurde eine eigene Software entwickelt, welche automatisiert die Anlagendaten sowie die Messdaten herunterlädt und wunschgemäß in dreidimensionalen Plots aufträgt. Details hierzu siehe AP 7.2: Einsatz im 1. Windpark.

Da sich bei der Anwendung des Tools jedoch herausgestellt hat, dass eine Live-Überwachung hiermit etwas unhandlich ist, hat unser IT-Berater uns auf das Online Tool ImPLY-Polaris hingewiesen und hier ein erstes Test-Dashboard entwickelt. Diese cloudbasierte Software holt sich automatisiert die relevanten Daten und trägt sie in übersichtlichen Plots auf, so dass alles auf einen Blick verfügbar ist und wir die Parks und unsere Regelvorgänge damit sehr gut überwachen und plausibilisieren können.

Da wir aktuell noch keine Live-Regelungen durchführen können, haben wir aus Kostengründen dieses Tool noch nicht abonniert. Sobald wir jedoch in den Live-Betrieb gehen, werden wir dieses oder ein ähnliches Tool verwenden.

AP 4.3.2: Entwicklung Optimierungs-Algorithmus

Wie im AP 4.1.1 bereits erwähnt, haben wir im Laufe des Projektes dazugelernt und die Ausgabenstellung hat sich demzufolge etwas verändert:

Dies betraf vor allem die 2 folgenden Punkte:

- A) Es musste das Basis-System des NWD-Reglers als technische Voraussetzung des Live-Optimierers erst entwickelt werden: Das Ziel ging also von der reinen Optimierung hin zu einem Überwachungs- und Regelsystem, das auch eine Optimierung der einzustellenden Schallmodi beherrschen kann. Dieses Regelsystem wurde im ersten Teil dieses APs entwickelt

B) System zur automatischen Bestimmung der Fremd- und Anlagengeräusche

Zu A, das Regelsystem für die Schallmodi der Windenergie-Anlagen:

Das hier zu entwickelnde System greift direkt in die Steuerung der Schallmodi ein und damit in die Steuerung der WEA. Entsprechend groß ist die Verantwortung gegenüber dem Eigentümer der WEA, ein solches System auch nur stundenweise live zu betreiben. Daher haben wir uns zum Beginn der Arbeiten entschlossen, diese Software mit intensiver externer Unterstützung (durch XXXXX) zu erstellen in einem professionellen Entwicklungsprozess und in einer professionellen Architektur. Eine „Bastel-Lösung“ erscheint uns als zu riskant für dieses hohe Anforderungsniveau.

Die folgende Zusammenfassung beschreibt die hinter dieser Architektur stehenden Komponenten und deren Funktionen.

Systemarchitektur:

Die entwickelte Systemarchitektur (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11) besteht aus mehreren Komponenten, die in zwei Phasen implementiert wurden:

1. Phase 1: Proof of Concept (PoC)

- Noise Watchdog Agent: Extrahiert Daten von verschiedenen Systemen und sendet sie in die Cloud. Jeder Agent ist für einen spezifischen Endgerätetyp zuständig (Messstationen, Windenergieanbieter etc.).
- Nebula Lighthouse (VPN Endpoint): Verbindet die Agenten über ein VPN.
- Noise Watchdog MQTT: Zentraler MQTT-Server, an den die Agenten ihre Daten senden.
- MQTT-to-Kafka Connector: Konsumiert MQTT-Daten und produziert sie für Apache Kafka.
- Noise Watchdog Agent Stream Processor: Verarbeitet die Rohdaten der Agenten, berechnet Durchschnittswerte und erstellt neue Kafka-Nachrichten.
- Noise Watchdog Optimizer: Echtzeit-Anwendung zur Berechnung des optimalen Betriebsmodus basierend auf verschiedenen Eingangsdaten.

2. Phase 2: High Availability (HA) Production Setup

- Noise Watchdog Decider: Der Decider sammelt die Optimierungsergebnisse von verschiedenen Optimierern, die auf unterschiedlichen Strategien basieren. Diese Ergebnisse werden über Kafka-Nachrichten empfangen. Er bewertet die verschiedenen Optimierungsvorschläge anhand vordefinierter Kriterien, um die beste Konfiguration für die WEAs auszuwählen. Kriterien können beispielsweise die maximale Energieausbeute und andere betriebliche Parameter wie Lastwechsel sein. Der Decider sorgt dafür, dass die

ausgewählten Betriebsmodi keine Konflikte verursachen, indem er sicherstellt, dass alle Optimierungsvorschläge kompatibel sind und gemeinsam angewendet werden können.

- Noise Watchdog Coordinator: Dieser ist eine zentrale Komponente in der Softwarearchitektur, die dafür verantwortlich ist, die Optimierungsergebnisse in konkrete Handlungen an den Windenergieanlagen (WEAs) umzusetzen. Nachdem die Befehle an die WEAs gesendet wurden, überwacht der Coordinator den Status der Implementierung. Er verifiziert, ob die gewünschten Betriebszustände tatsächlich erreicht wurden.

- Noise Watchdog WEA Controller: Kontaktiert die WEA-Einheiten (Windenergieanlagen) und setzt direkt die Betriebsprofile. Der Controller überwacht kontinuierlich den Status der WEAs und meldet diesen zurück an den Coordinator. Er informiert über den Fortschritt der Implementierung der Befehle und den aktuellen Betriebszustand der WEAs. Er führt grundlegende Überprüfungen durch, um sicherzustellen, dass die Befehle korrekt und vollständig umgesetzt wurden. Bei Problemen oder Abweichungen meldet er diese an den Coordinator, der dann entsprechende Maßnahmen einleiten kann.

Abbildung 10 zeigt das Fließbild zur Basis-Architektur unseres Systems. Abbildung 11 zeigt die vereinfachte Variante für den Prototyp im Windpark Curslack.

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

Abbildung 10: Basis-Architektur (für den Windpark Curslack wurde eine vereinfachte Architektur verwendet)

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

Abbildung 11: Simplifizierte Architektur für den Prototypen im Windpark Curslack

Wichtige Komponenten des Systems:

- Nebula VPN: Zertifikat-basiertes VPN, das eine einfache und sichere Kommunikation der Agents ermöglicht.
- MQTT: Netzwerkprotokoll, für den Einsatz in Internet-of-Things (IoT)-Anwendungen
- Apache Kafka ist eine Streaming-Plattform, die hauptsächlich für die Verarbeitung und Speicherung von Echtzeitdatenströmen verwendet wird. Sie dient als Hauptdatenbus und ermöglicht die zuverlässige und skalierbare Datenübertragung sowie Speicherung.

Automatisierung und Code-Qualität

Zur Verbesserung der Code-Qualität und zur Automatisierung des Roll-Outs neuer Versionen wurden folgende Maßnahmen ergriffen:

- Automatisierte Deployments: Über GitHub Actions wird der Code automatisch in Pip-Repositories bereitgestellt und Docker-Images werden gebaut.
- Getrennte Entwicklungs- und Produktionsumgebungen: Durch die Nutzung eines zentralisierten Infrastruktur-Repositories und Flux werden Deployments automatisiert.
- Test-Driven Development (TDD): Um eine hohe Code-Qualität sicherzustellen, haben wir Tests zur systematischen Fehleridentifikation geschrieben

Diese beschriebenen Systeme wurden z.T. lokal auf einem RasPi (Nebula VPN, MQTT, Apache Kafka, NWD-Coordinator und NWD Controller) implementiert. Die Cloud, wo der Optimierungsteil und der „NWD-Decider“ läuft, wurde auf Hetzner-Servern umgesetzt.

Anmerkung: Die bereits jetzt vorhandene industriell skalierbare und robuste Softwarearchitektur hatte im Rahmen der Entwicklung leider den Nachteil, dass vor der Programmierarbeit jedes Mal sehr viel Zeit in die Vorbereitung fließen musste. Rückwirkend betrachtet hätten wir mit einer etwas schlankeren Architektur (in dem oben beschriebenen professionellen Prozess) starten sollen.

Die hier gezeigte Struktur wurde mit dem Umfang der Phase 1 aufgebaut (die Komponenten der Phase 2 wurden nur als rudimentäre Lösungen dort wo nötig implementiert), getestet und für den probeweisen Live-Betrieb an den Nordex-Anlagen mit einem Tool zur Email-Kommunikation mit der Nordex-Leitwarte ausgestattet (siehe AP 4.4), um auch ohne OPC-Schnittstelle zur Anlagensteuerung einfache Testläufe zu ermöglichen.

Zu B / Automatische Bestimmung der Fremd- und Anlagengeräusche:

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

AP 4.3.3: Entwicklung Test-System

Im Rahmen unseres Projekts zur aktiven Regelung der Schallmodi von Windenergieanlagen ist ein robustes Test-System von entscheidender Bedeutung. Es gewährleistet die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Optimierungsalgorithmen. Die folgenden 13 Testfälle wurden entwickelt, um verschiedene Szenarien und Bedingungen zu überprüfen, unter denen der Algorithmus arbeiten muss:

1. Validierung der Optimierung bei gültigen Eingaben
2. Erhöhung der Windparkleistung bei höherem L95-Wert
3. Fehlschlagen bei fehlenden Daten
4. Nicht fehlschlagen bei teilweise fehlenden Daten
5. Nicht fehlschlagen bei nahezu allen fehlenden Daten
6. Keine Änderung bei nicht übereinstimmenden Umweltsensoren

7. Validierung bei ungültigem Geräuschmodus der Turbine 1
8. Keine Änderung bei niedriger Windgeschwindigkeit
9. Fehlschlagen bei fehlendem Geräuschmodus in der Lookup-Tabelle
10. Erhöhung der Windparkleistung bei niedrigem Laeq-Rohwert
11. Keine Änderung bei maximaler Windparkleistung
12. Keine Änderung bei minimaler Windparkleistung
13. Keine Änderung bei Geräuschpegeln im Durchschnittsbereich

Diese Tests helfen dabei, Fehler frühzeitig zu erkennen und sicherzustellen, dass die Windenergieanlagen effizient und den Vorschriften entsprechend betrieben werden.

AP 4.4: Schnittstelle zur Parksteuerung

Zu Beginn des Projektes war geplant, unseren Algorithmus auf einem Industrie-PC laufen zu lassen. Im Projektverlauf hat sich jedoch gezeigt, dass die Optimierung am besten in einer cloudbasierten IoT-Struktur integriert ist – also nicht vor Ort im Windpark, sondern auf einem Cloud-Server. Diese Struktur birgt diverse Vorteile hinsichtlich Softwarewartung, Fehler- und Datenanalyse. Die Anbindung an die Cloud erfolgte im Rahmen der Prototypentwicklung über Raspberry-Pis. Langfristig wird hier selbstverständlich stabilere Hardware zum Einsatz kommen.

Zur Regelung der Schallmodi bedarf es einer entsprechend konfigurierten und standardisierten OPC-Schnittstelle, welche es zum einen ermöglicht, dass Daten von den Anlagen zu uns übermittelt werden und zum anderen unsere Befehle zur Regelung der Modi an die Anlagen gesendet werden. Diese Schnittstelle hätte seitens der Hersteller erst entsprechend programmiert werden müssen, was aufgrund von Kapazitätsproblemen bisher nicht geschehen ist.

Mangels dieser Schnittstelle zu den Anlagen mussten wir unsere Regelbefehle an die Fernleitwarte von Nordex mittels automatisierter E-Mail weiterleiten. Sehr zeitintensiv war hierbei die Abstimmung des E-Mail-Formates sowie das Ermitteln der relevanten Anlagenparameter zur Regelung der Schallmodi. Als Beispiel für die Komplexität sei der folgende Vorgang aufgezeigt: Im Rahmen längerer Abstimmungen mit Nordex zeigt sich, dass für die Änderung eines Schallmodus nicht etwa ein, sondern mehrere Parameter umgestellt werden müssen. Und zwar sowohl der Parameter **XXXX**, welcher den Schallmodus charakterisiert, als auch Parameter **YYYY**, welcher diverse Betriebsbeschränkungen und Verlustarten (Einspeisemanagement, Sektorregelung etc.) beschreibt entsprechend einstellen müssen. Dies herauszufinden, dauerte wiederum mehrere Anläufe und Versuche.

(Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

Abbildung 12: Beispiel für automatisierte E-Mail and die Leitwarte von Nordex

AP 7: Implementierung Optimierungs-Algorithmus in Windpark, anlernen, überprüfen, verbessern

AP 7.1: Unterstützung der Anbindung an das deBAKOM System

Das deBAKOM System ist ein System, das Umweltdaten, insbesondere Schallpegel, erfasst und an unsere zentrale Plattform übermittelt. Um diese Integration zu ermöglichen, wurde eine Python Bridge entwickelt, die als Schnittstelle zwischen den deBAKOM-Messstationen und unserer Architektur dient.

1. Verbindung zu deBAKOM Stationen:

- Die Python Bridge stellt eine Verbindung zu den deBAKOM Stationen her
- Die Kommunikation erfolgt über ein definiertes Protokoll, das sicherstellt, dass alle relevanten Messdaten (z.B. Schallpegel, Wetterdaten) in Echtzeit übertragen werden.

2. Datenverarbeitung und Normalisierung:

- Die empfangenen Daten werden in einem ersten Schritt in ein einheitliches Format konvertiert. Dies umfasst die Umwandlung von Rohdaten in ein strukturiertes JSON-Format.
- Die Bridge berechnet Durchschnittswerte und andere relevante Statistiken über definierte Zeiträume (z.B. 1-Minuten-Durchschnitt), um die Daten für die Optimierungsalgorithmen nutzbar zu machen.

3. Datenübermittlung an den MQTT-Server:

- Die normalisierten Daten werden an unseren zentralen MQTT-Server gesendet. Hierfür wird die `Paho MQTT` Bibliothek verwendet, die eine einfache und zuverlässige Veröffentlichung der Daten ermöglicht.
- Der MQTT-Server fungiert als Zwischenstation, bevor die Daten in die Kafka-Infrastruktur überführt werden.

Beispiel für den Datenfluss:

1. Datenabholung: Eine deBAKOM Station misst den aktuellen Schallpegel und sendet diese Daten an die Python Bridge.
2. Verarbeitung: Die Python Bridge empfängt die Daten, normalisiert sie und berechnet den Durchschnittswert über die letzte Minute.
3. Übermittlung: Die normalisierten Daten werden an den zentralen MQTT-Server gesendet.

Zu beachten:

In der Praxis gab es an dieser Stelle sehr oft Probleme in der Verbindung zwischen der debakom-Messstation und der Python-Bridge. Diese Probleme waren Hardware-bedingt, da debakom im Rahmen des Projekts für Forschungszwecke auf ihre bestehenden Messstationen zurückgegriffen hat. Sobald die Hardware abgestürzt ist, mussten wir uns gemeinsam mit debakom auf Fehlersuch begeben, was sehr zeitintensiv war. Sobald wir den Proof-of-Concept haben, wird auf eine aufwändigere und stabilere Hardware umgestellt.

Ein weiterer Punkt für den Mehraufwand in diesem Arbeitspaket war die Software-Programmierung an sich. Diese war mit einem PM zu Projektbeginn deutlich unterschätzt worden. Aufgrund der instabilen Hardware mussten hier viele Behelfslösungen zusätzlich entwickelt werden, um einen gewissen Robustheitsgrad zu erreichen.

AP 7.2: Einsatz im 1. Windpark

Es wurden im Rahmen dieses APs laufend die Wetter- bzw. Winddaten überprüft, um für den Test geeignete Windbedingungen deutlich über 6 m/s auf Nabenhöhe zu haben. In den Sommer- und Herbstmonaten war dies letztes Jahr selten der Fall.

Da die Anlagen aufgrund der Gasmangellage in diesem Zeitraum 4 dB lauter laufen durften als normal, liefen die Anlagen bereits im zweithöchsten Modus. Für die Testnächte (ab 22 bis 6 Uhr) haben wir vereinbart, dass die Anlagen vom niedrigsten Schallmodus aus beginnen, so dass mehr Optimierungspotenzial vorlag.

Anschließend wurden, wie oben bereits geschildert, automatisierte Emails mit den optimierten Betriebskonzepten an die Leitwertwarte versendet.

Nach mehreren Fehlversuchen und anschließender langwieriger Fehlersuche haben wir festgestellt, dass (Inhalt gelöscht, da vertraulich!)

AP 7.3: Datenerhebung, Auswertung und laufende Verbesserung im 1. Windpark

Mangels einer direkten Schnittstelle zu den Anlagen und der Tatsache, dass die Regelung per automatisierter E-Mail an die Leitwarte aufgrund eines unbekannten Fehlers in der Übertragungskette fehlschlug, haben wir stattdessen Trockenübungen – also ohne aktiven Regeleingriff – durchgeführt, wobei wir im 10-min-Takt überprüft haben, ob die Anlagen bei den vorherrschenden Bedingungen geregelt hätten. Aus den Herstellerangaben geht hervor, dass die Leistungskurven sich erst ab ca. 6 m/s spreizen. D.h., dass unterhalb von 6 m/s eine Regelung nicht sinnvoll wäre.

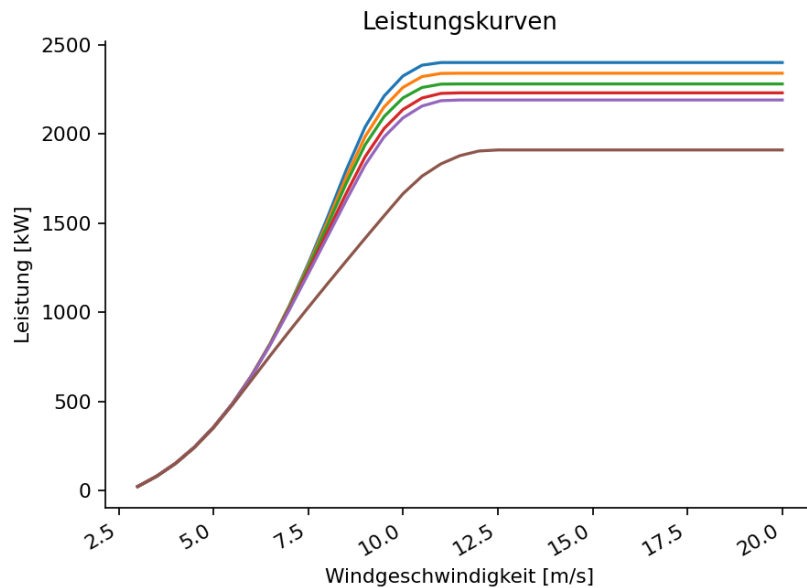


Abbildung 13: Leistungskurve N117 - 2400

Die beiden Schaltbedingungen lauten:

1. Grundgeräuschpegel des Gesamtgeräusches L_{95_1h} muss größer sein als der (Worst-Case-)Prognosewert + 3dB:
 Gesamtgeräusch setzt sich aus WEA und Fremdgeräuschen zusammen. Die +3dB entsprechen dann dem Grund-Fremdgeräuschpegel L_{95_FG} an den man wieder heranregeln darf
 Beispiel: Ist-Zustand: $\text{Prognose} + 3\text{dB} = 40,3 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = 43,3 \text{ dB}$. Sobald dieser Wert überschritten wird und $v > 6\text{m/s}$ startet der NWD-Regler

oder

2. Der äquivalente Dauerschalldruckpegel über eine Stunde gemittelt (L_{Aeq}) liegt unter Richtwert

Plausibilitätsprüfung:

Zu 1.:

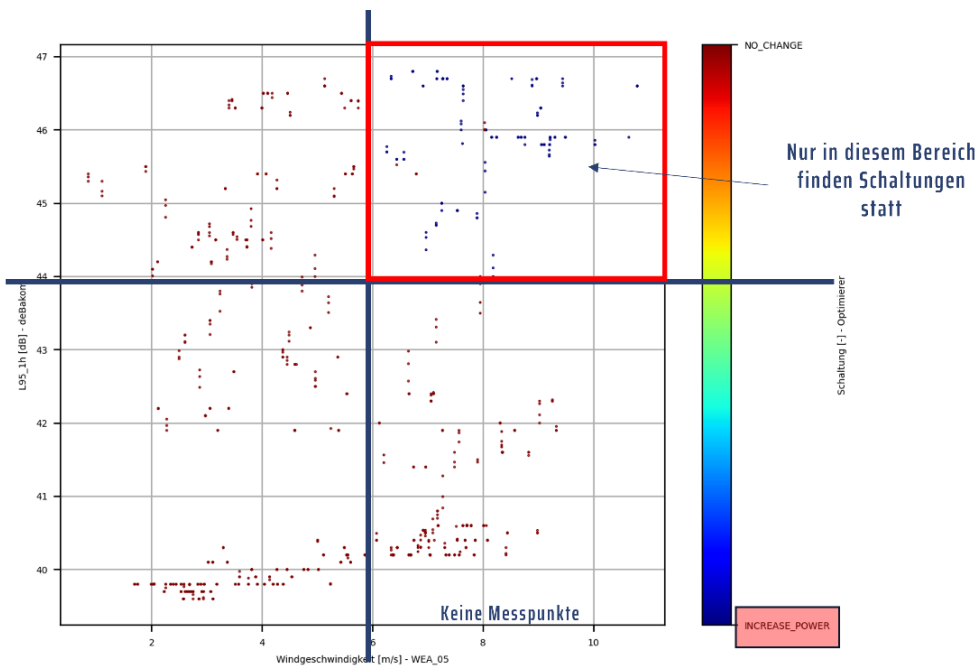


Abbildung 14: Plausibilitätsprüfung – Schaltung wegen Unterschreitung des Grundgeräuschpegels

In Abbildung 14 sieht man in dem rot eingerahmten Bereich sehr schön die Schaltvorgänge zur Entdrosselung der Anlagen (blaue Punkte). Da nicht real geschaltet wurde, sieht man auch keine Drosselungsvorgänge. Außerhalb des roten Rahmens finden keine Schaltvorgänge (rote Punkte – no Change) statt.

Zu 2.:

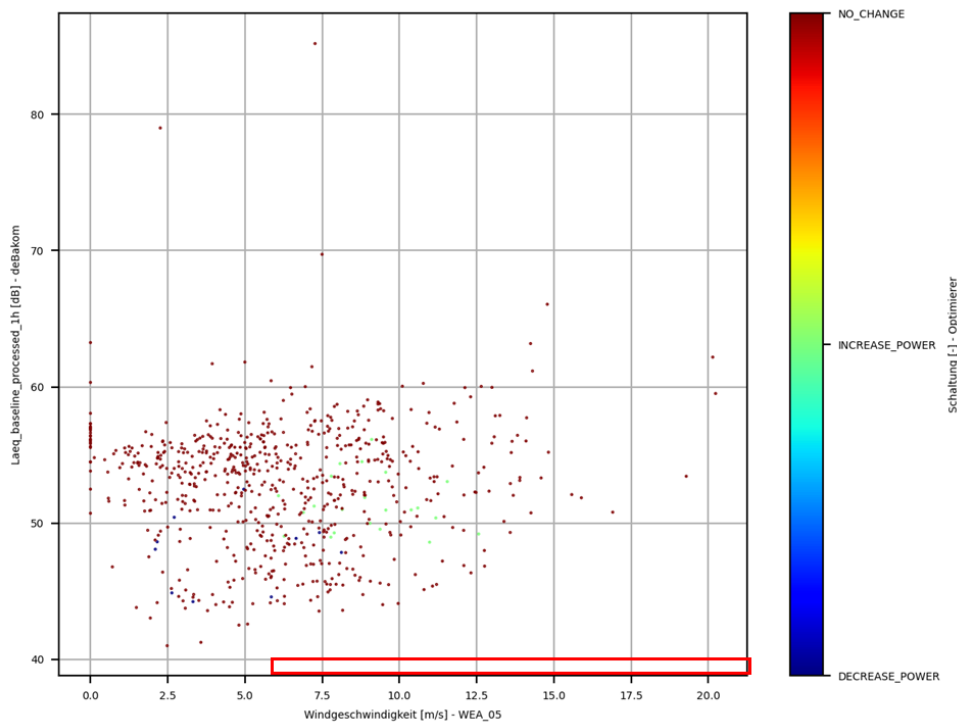


Abbildung 15: Plausibilitätsprüfung – Schaltung wegen Unterschreitung des Richtwertes

In dem betrachteten Zeitraum lag der LAeq leider nie unter Richtwert und der Wind über 6 m/s, so dass hier keine Schaltungen zu verzeichnen waren.

AP 7.4: Datenerhebung, Auswertung und laufende Verbesserung im 2. und 3. WP

Da wir auch im zweiten und dritten Park mangels Schnittstelle zu den Anlagen nicht regeln konnten, hatten wir hier keine Daten zur Auswertung zu Verfügung. Lediglich deBAKOM hat hier eine Orientierungsmessung durchgeführt.

AP 7.5: Weiterentwicklung des Testsystems

Dieses Teilarbeitspaket wurde nicht bearbeitet.