

Verbundprojekt:
**Objektive Kriterien zu Erschütterungs- und
Schallemissionen durch Windenergieanlagen
im Binnenland**

Akronym/Kurzbezeichnung:
TremAc

FKZ: 0325839
Förderzeitraum: 01.02.2016 – 31.07.2019

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Zusammenfassender Schlussbericht
zum Gesamtvorhaben**

Verfasser: Dr.-Ing. Peter Kudella
Karlsruhe, Januar 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor



Universität Stuttgart



MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT
HALLE-WITTENBERG



1 Beteiligte

Projektkoordination

Organisation/Institut *Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (IBF)*

Name Projektleitung Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Theodoros Triantafyllidis

Adresse KIT-CS, Geb. 40.21, Engler-Bunte-Ring 14, 76131 Karlsruhe

Telefon 0721 / 608-42221

E-Mail Triantafyllidis@kit.edu

Verbundpartner

Organisation/Institut *Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Stahl- und Leichtbau - Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (VAKA)*

Name Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Adresse KIT-CS, Otto-Ammann-Platz 1, 76131 Karlsruhe

Telefon 0721 / 608-42215

E-Mail thomas.ummehofer@kit.edu

Organisation/Institut *Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Geophysikalisches Institut (GPI)*

Name Projektleitung Prof. Dr. Joachim Ritter

Adresse KIT-CW, Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe

Telefon 0721 / 608-44539

E-Mail Joachim.ritter@kit.edu

Organisation/Institut *Universität Stuttgart (UST), Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE)*

Name Projektleitung Prof. Dr. Po Wen Cheng

Adresse Allmandring 5b, 70569 Stuttgart

Telefon 0711 / 685-68258

E-Mail cheng@ifb.uni-stuttgart.de

Organisation/Institut *Universität Stuttgart (UST), Institut für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG)*

Name Projektleitung Dr.-Ing. Thorsten Lutz

Adresse Pfaffenwaldring 21, 70569 Stuttgart

Telefon 0711 / 685-63406
E-Mail lutz@iag.uni-stuttgart.de

Organisation/Institut Technische Universität München (TUM), Fakultät für Maschinenwesen
– Lehrstuhl für Windenergie (LWE)

Name Projektleitung Prof. Dr. Carlo Bottasso
Adresse Boltzmannstraße 15, 85748 Garching
Telefon 089 / 289-16684
E-Mail carlo.bottasso@tum.de

Organisation/Institut Universität Bielefeld (UBI), Fakultät Gesundheitswissenschaften,
Arbeitsgruppe Umwelt und Gesundheit (AG7)

Name Projektleitung Prof. Dr. Dipl.-Biol. Dipl.-Ökol. Claudia Hornberg
Adresse Postfach 10 01 31, 33501 Bielefeld
Telefon 0521 / 106-4365
E-Mail Claudia.hornberg@uni-bielefeld.de

Organisation/Institut Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU), Institut für
Psychologie, Arbeitsgruppe Gesundheits- und Umweltpsychologie

Name Projektleitung Prof. Dr. Gundula Hübner
Adresse Emil-Abderhalden-Straße 26–27, 06108 Halle (Saale)
Telefon 0345 / 552-4372
E-Mail Gundula.huebner@psych.uni-halle.de

Organisation/Institut MesH Engineering GmbH (MEG)

Name Projektleitung Stefan Hauptmann
Adresse Ulrichstraße 23, 73230 Kirchheim/Teck
Telefon 0711 / 6868818-26
E-Mail Stefan.hauptmann@mesh-engineering.de

Organisation/Institut Wobben Research and Development GmbH (WRD)

Name Projektleitung Dr.-Ing. Uli Krause
Adresse Borsigstraße 26, 26607 Aurich
E-Mail uli.krause@enercon.de

2 Aufgabenstellung, Ziele des Gesamtprojekts

Bereits das 6. Energieforschungsprogramm hatte sich zum Ziel gesetzt, „die technologischen Voraussetzungen für die Nutzung der Windenergie auf See und an Land zu verbessern“. Dieses Anliegen ist durch die eingeleitete Energiewende und die zwischenzeitlich drängender gewordene Klimaproblematik weiter verstärkt worden. Für einen noch intensiveren und vor allem verbrauchernahen Ausbau der Windenergienutzung müssen über das norddeutsche Tiefland und das Wattenmeer hinaus auch neue Standorte in den Mittelgebirgen erschlossen werden. Insbesondere Süddeutschland hat hierbei noch erheblichen Nachholbedarf. Auch das Repowering an bestehenden Standorten spielt eine wichtige Rolle.

Beide Ausbauarten finden vielerorts mangelnde Akzeptanz in der Bevölkerung, u.a. weil die Belastung von Anwohnern durch Schall, und Erschütterungen schwer abzuschätzen ist bzw. (insbesondere im niederfrequenten Bereich) unterschiedlich wahrgenommen und bewertet wird. Windenergieanlagen werden insbesondere kritisch gesehen in der Nähe von Kliniken, Erholungseinrichtungen, sensiblen Produktionsanlagen oder wissenschaftlichen Messeinrichtungen. Die fehlende Akzeptanz hat dazu geführt, dass WEA-Projekte bereits in der Planungsphase aufgegeben wurden, obwohl die Ablehnungsgründe einer strengen wissenschaftlichen Prüfung nicht standhalten. Auf andere WEA-Projekte müssen übertrieben große Abstandsregeln angewendet werden, weil zuverlässige Prognosemodelle fehlen.

Das vorliegende Forschungsprogramm liegt daher im Schnittbereich der Interessen von Anlagenentwicklern, Betreibern, Anwohnern und Wissenschaftlern, die ein vitales Interesse an der Entwicklung objektiver Kriterien zur Umweltbelastung hinsichtlich Schall- und Erschütterungsschutz haben. Es betrifft die in der Förderbekanntmachung des BMWi vom 08.12.2014 benannte „Technologieentwicklung für die Windenergienutzung ... an Land sowie den umweltverträglichen und wirtschaftlichen Ausbau der Windenergie“ und beinhaltet mehrere der dort genannten Förderschwerpunkte, konkret die „Erforschung der Boden-Bauwerks-Interaktion“ (Förderschwerpunkt 3.1.4), die „Optimierung der aerodynamischen und aero-akustischen Eigenschaften“ (Förderschwerpunkt 3.1.3), die „Modellierung und Simulation von Komponenten und kompletten Windenergieanlagen“ (Förderschwerpunkt 3.1.7) sowie „die Entwicklung und Standardisierung von Methoden und Modellen, Mess- und Bewertungsverfahren, um Umweltauswirkungen der Windenergienutzung zu erfassen und Umweltrisiken beurteilen zu können“ (Förderschwerpunkt 3.1.8).

Die Ziele des Gesamtprojekts waren:

- Identifikation der Hauptparameter und Schwellwerte zu einer objektiven Bewertung der Schall- und Erschütterungsbelastung von WEA in Abhängigkeit der Anlagendaten, der Konstruktion, der Topographie und der Entfernung zum Immissionsort.
- Entwicklung von Prognose- und Simulationsmodellen für die Emission und Ausbreitung von (insbesondere tieffrequentem) Luftschall sowie von Erschütterungen (Körperschall) in Wechselwirkung mit Bauwerken, zunächst für ebenes Gelände und davon ausgehend für bergig komplexes Terrain.
- Optimierungsstrategien von WEA zur Minderung der Schall- und Erschütterungsemissionen durch angepasste Konstruktionen, z.B. bei der Lagerung des Triebstrangs oder der Turmkonstruktion sowie durch Abschirmmaßnahmen.

- Akzeptanzerhöhung und Schaffung einer fundierten umweltmedizinischen sowie umweltsychologischen Basis als Argumentationsgrundlage sowie zur Versachlichung potentieller gesundheitlicher Risiken von WEA und zur Debatte um deren Akzeptanz.

Zum Erreichen dieser Ziele haben die genannten Forschungspartner ihre Kompetenzen bezüglich der aereodynamischen und bodendynamischen Modellierung, entsprechender systematischer Messungen und umweltsychologischer bzw. -medizinischer Befragungstechniken gebündelt. Die neun ursprünglichen Partner haben ihre TVB mit den folgenden Titeln überschrieben:

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (KIT-IBF)	Wellenausbreitung und dynamische Baugrund-Bauwerks-Interaktion
Karlsruher Institut für Technologie, Stahl- und Leichtbau – Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (KIT-VAKA)	Einfluss der Tragstruktur
Karlsruher Institut für Technologie, Geophysikalisches Institut (KIT-GPI)	Akquisition, Analyse und Interpretation von Körperschallemissionen und Bodenbewegungen
Universität Stuttgart, Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (UST-SWE)	Akustische Untersuchung einer Windenergieanlage mittels Mehrkörpersimulation und Schallmessung
Universität Stuttgart, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik (UST-IAG)	Aerodynamische und aeroakustische Simulation von Lasten und Schallquellen
Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen - Lehrstuhl für Windenergie (TUM-LWE)	Untersuchung der von Windkraftanlagen ausgehenden Schallemissionen für repräsentative Betriebsbedingungen
Universität Bielefeld, Fakultät Gesundheitswissenschaften, Arbeitsgruppe Umwelt und Gesundheit (UBI-AG7)	Umweltmedizinische Analyse der Wirkungen von Windenergieanlagen (WEA) auf Gesundheit und Wohlbefinden der Anwohner
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Psychologie, Arbeitsgruppe Gesundheits- und Umweltsychologie (MLU)	Umweltsychologische Analyse der WEA-Immissionswirkungen auf Akzeptanz und Wohlbefinden der Anwohner
MesH Engineering GmbH (MEG)	Einfluss der Triebstrangdynamik auf die Emission von Erschütterungen und Infraschall

Ein Anlagenhersteller trug zu einigen dieser Teilvorhaben durch Zur-Verfügung-Stellen von Anlagendaten, durch ergänzende eigene Simulationsrechnungen sowie durch Messungen in

den Anlagen bei. Ebenso stellte er Betriebsdaten der beiden Windparks (Wilstedt, Ingersheim) im Befragungs- und Messzeitraum zur Verfügung.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt gliederte sich in sechs AP-Cluster A – F mit 26 zugeordneten Arbeitspaketen. Die in den Arbeitspaketen jeweils federführende Institution ist jeweils durch Fettdruck gekennzeichnet.

Clus-ter	AP	AP-Titel	Beteiligte Federführg.	Teil-AP	Clusterbeschreibung, Arbeitsinhalt des AP oder Titel des Teil-AP
A	Modellaufbau		Es wird ein Gesamtmodell einer WEA aufgebaut, das sowohl deren aero-akustische als auch strukturmechanische Eigenschaften mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad abbildet. Es ist in der Lage, Zeitreihen von Lasten und Verformungen für ausgewählte Anströmverhältnisse und Betriebslastfälle an allen Punkten der Anlage bereitzustellen.		
	A1	Generierung realitätsnaher Anströmungen	IAG	A1.1	Generierung eines turbulenten Strömungsfelds
			IAG	A1.2	Anströmung im komplexen Gelände
	A2	Aeroelastisches Gesamtmodell	IAG, SWE	A2.1	Erweiterung der vorhandenen Kopplung des Strömungslösers FLOWER mit dem Mehrkörpersimulationsprogramm SIMPACK
			MEG	A2.2	Modellierung der Triebstrangkomponenten der Referenz-WEA inklusive elastischer Kopplungselemente
			IAG, SWE, AH	A2.3	Aufbau eines gekoppelten aero-servo-elastischen Gesamtmodells der WEA
	A3	Berechnung der fluktuierenden mechanischen Lasten	IAG, AH	A3.1	Auswahl von Referenz-Lastfällen, Durchführung einer gekoppelten Simulation mit CFD (Detaillierte Untersuchung) und Ergebnisaufbereitung als Zeitreihen
SWE, AH			A3.2	Auswahl von Betriebs-Lastfallkollektiven, Durchführung einer gekoppelten Simulation mit BEMM und Ergebnisaufbereitung als Zeitreihen	
B	Luftschallemissionen		Für die Zeitreihen aus A werden Luftdruckfluktuationen an definierten Übergabeflächen errechnet und deren Ausbreitung als Luftschallwelle (insbesondere Infraschall) unter Einbeziehung der Wechselwirkung Luft/Boden modelliert. Akustische Messungen an der WEA und entlang des Ausbreitungswegs validieren und korrigieren die verwendeten Rechenmodelle.		
	B1	Aeroakustische Emission	IAG, AH	B1.1	Berechnung der Druckfluktuationen an definierten Übergabeflächen anhand CFD-basierter Zeitreihen
			LWE, AH	B1.2	Entwicklung eines Moduls zur Berechnung von Luftschallemissionen und Aufbau der numerischen Windkraftanlagenmodelle

	B2	Modellierung der Luftschallausbreitung	IBF	B2.1	Entwicklung eines Berechnungstools für die akustische Wellenausbreitung mittels Randelementmethode
			IBF	B2.2	Modellierung der Wechselwirkung Luft/Boden
			IBF	B2.3	Modellierung der Wechselwirkung Luft/Bauwerk
	B3	Luftschallmessungen und Modellvalidierung	SWE, AH	B3.1	Erprobung und Entwicklung neuer Verfahren zur Messung von Infraschall
			SWE, AH	B3.2	Durchführung der Luftschallmessung im Infraschallbereich
			IAG, SWE, LWE, IBF, AH	B3.3	Validierung der Simulationsmodelle untereinander und mit Daten der Messkampagne
C	Körperschallemissionen		Die aus den Zeitreihen von A resultierenden Anlagenschwingungen für verschiedene Turmkonstruktionen werden untersucht sowie deren Ausbreitung als Körperschallwellen unter Einbeziehung der Wechselwirkung Fundament-Baugrund-Gebäude und einer komplexen Topographie modelliert. Seismische Messungen an der WEA, entlang des Ausbreitungswegs im Baugrund und an Immissionsgebäuden validieren und korrigieren die verwendeten Rechenmodelle.		
	C1	Interaktion Fundament-Baugrund	IBF		Identifikation der Parameter der Baugrundsteifigkeit
	C2	Einfluss der Tragstrukturen	VAKA		Konzeption verschiedener Tragstrukturen unter Berücksichtigung von Beanspruchung und Geometrie
	C3	Ermittlung der dynamischen Einwirkung	IBF	C3.1	Verbesserung der Baugrundsteifigkeit infolge Gesamtdynamik
			VAKA	C3.2	Strukturbemessung und Ermittlung von Auflagerreaktion-Zeitreihen
	C4	Modellierung der Erschütterungsausbreitung	IBF	C4.1	Berechnung der Erschütterungsausbreitung mittels Randelementmethode
			IBF	C4.2	Berechnung der Wechselwirkung WEA-Baugrund-Fundament
	C5	Erweiterung der Simulation auf komplexes Terrain	IBF		Erweiterung der Prognosemodelle zur Wellenausbreitung auf 3D-Gelände
	C6	Schwingungsmessungen an der WEA	GPI, AH	C6.1	Messung der Körperschallemission an WEA-Fundament und im Turm
			SWE, AH	C6.2	Messung der Körperschallemission an Turm, Gondel und Blatt
	C7	Seismische Messungen	GPI	C7.1	Array-Messung des emittierten Wellenfeldes
			IBF	C7.2	Kurz- und Langzeitmessungen an/in Gebäuden

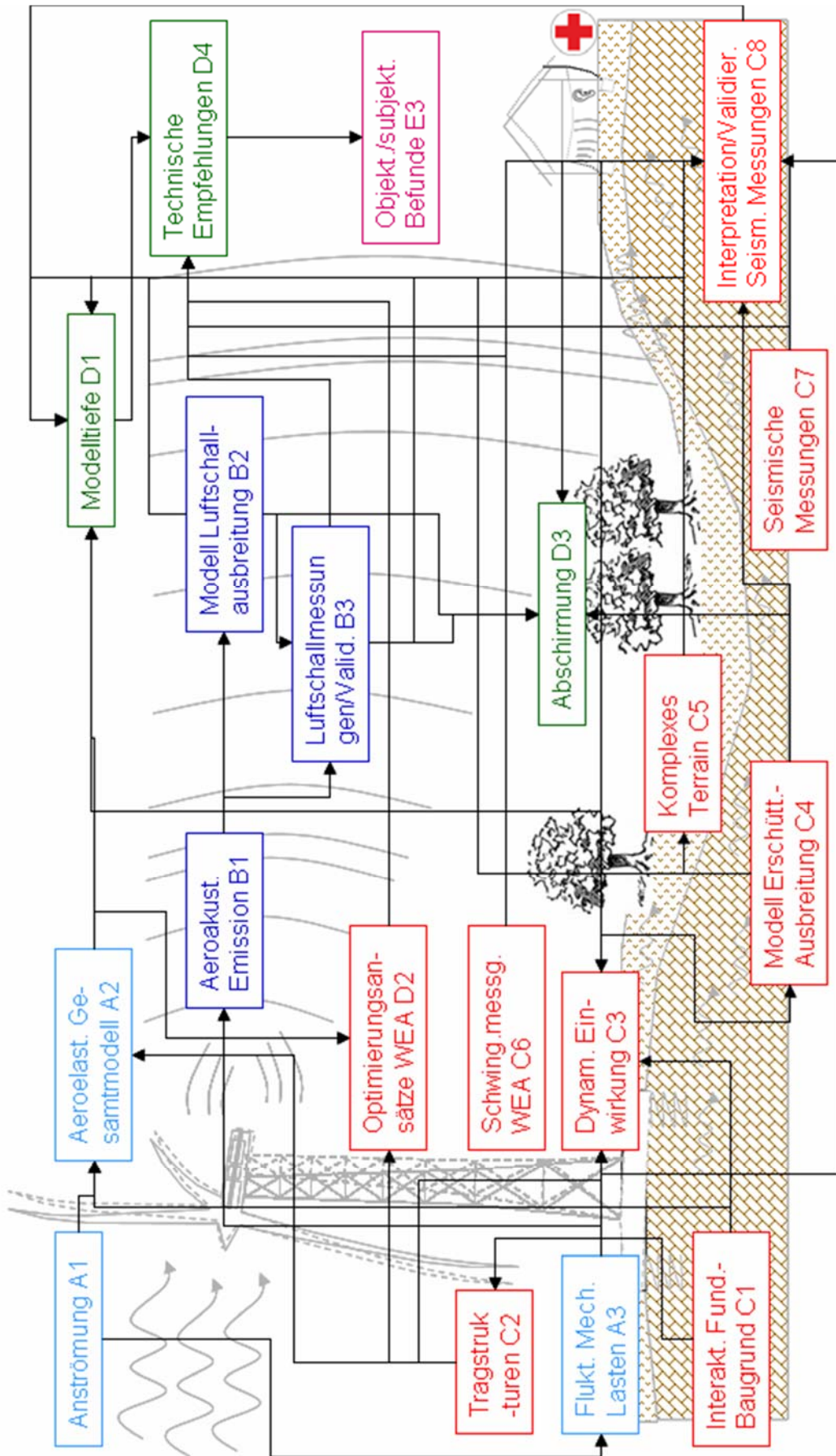
	C8	Interpretation der seismischen Messungen und Modellvalidierung	GPI	C8.1	Auswertung der Array- und Langzeitmessungen
			GPI	C8.2	Eigenschaften des Wellenfeldes
			GPI	C8.3	Elastische Eigenschaften des Untergrunds
			IBF, SWE, VAKA, AH	C8.4	Plausibilisierung der Simulationsmodelle
D	Optimierung von Modellen, Bauteilen sowie Empfehlungen		Die Rechenmodelle von A - C werden durch Variation ihres Detaillierungsgrades praxistauglicher gemacht, für infrage kommende WEA-Komponenten werden Ansätze zur Emissionsminderung entwickelt und zusätzliche Abschirmmaßnahmen diskutiert. Aus den Messungen, Simulationen und Optimierungsansätzen werden zusammenfassende Empfehlungen aus technischer Sicht abgeleitet.		
	D1	Modelltiefe	IAG	D1.1	Schrittweise Reduktion des Detaillierungsgrads bei verformbaren Komponenten im CFD-Modell
			SWE	D1.2	Schrittweise Reduktion des Detaillierungsgrads beim BEMM- und MKS-Modell
			MEG	D1.3	Variation des Detaillierungsgrads bei Komponenten und Lagerung des Triebstrangs
			IBF	D1.4	Reduzierung des Detaillierungsgrads der Ausbreitungsmodelle
	D2	Optimierungsansätze für WEA-Komponenten	VAKA	D2.1	Untersuchungen zur Optimierung der Tragstruktur in Hinblick auf eine Reduktion der Erschütterungen
			MEG	D2.2	Optimierung der Triebstrang-Lagerung
	D3	Abschirmung	IBF		Abschirmtechnologien Gründung und Laufweg
	D4	Abschließende technische Empfehlungen	Alle (IBF)		Schwellwerte, Monitoringempfehlungen, Modellierungs- und Auslegungshinweise
	E	Anwohnermonitoring: Wohlbefinden und Akzeptanz		In der Umgebung mindestens eines Windparks erfolgt eine fragebogen-basierte Querschnittsstudie. Neben dem Gesundheitsstatus werden sowohl psychische und körperliche Symptome erfragt als auch die psychischen Prozesse analysiert, die die Akzeptanz sowie Stresswirkung von WEA bestimmen. Die Befunde werden mit Erschütterungs- und Schallmessungen verglichen und aus Sicht des vorsorgenden Gesundheitsschutzes weiterführend bewertet. Aus der Gesamtschau der Befunde werden Empfehlungen für den vorsorgenden Gesundheitsschutz sowie die Akzeptanz abgeleitet.	
E1		Forschungsdesign und Fragebogenentwicklung	MLU	E1.1	Psychologischer Fragebogen
			UBI	E1.2	Medizinischer Fragebogen
E2		Anwohnerbefragung	MLU	E2.1	Befragung und psychologische Auswertung
			UBI	E2.2	Medizinische Befragungsauswertung

	E3	Datenauswertung, objektive und subjektive Befunde	MLU, UBI, IBF, GPI, AH		Vergleich der Messungen mit den Befragungsergebnissen
	E4	Empfehlungen zu Akzeptanz und Gesundheitsschutz	MLU, UBI		Empfehlungen im Hinblick auf Akzeptanz und Gesundheitsschutz
F	Wissenstransfer		Die während des Vorhabens erstellten objektiven Emissionskriterien werden zusammen mit einer Bewertung an die Öffentlichkeit herangetragen, mit Behörden der Länder oder des Bundes ausgetauscht und in die Lehre eingebunden.		
	F1	Öffentlichkeitsarbeit	Alle (SWE)		Publikationen und Kommunikation der Erkenntnisse in der Öffentlichkeit
	F2	Austausch und Kooperation	Alle (IBF)		Publikationen und Kommunikation der Erkenntnisse mit Wissenschaft und Behörden
	F3	Aus, Fort- und Weiterbildung	Alle (IBF)		Entwicklung von Abschlussarbeiten, Lehreinheiten und Graduiertenkolleg
	F4	Verbundkoordination	IBF		Organisation von Workshops und Plattformen zum Datenaustausch

Die in den Clustern A – D verwendeten Rechenmodelle der ingenieurwissenschaftlichen Partner überschneiden sich zumeist in ihrem räumlichen Gültigkeitsbereich; sie bilden aber entsprechend der jeweiligen Kernkompetenz nur jeweils einen „Kernbereich“ detailliert ab, während Nachbarbereiche nur mit Vereinfachungen modelliert sind. Die Unterteilung der Arbeitsaufgaben in Cluster hatte in der Bearbeitungsphase keine große Bedeutung. Insbesondere zwischen Cluster B und C war keine klare Trennung möglich, da sowohl die Modelle zur Generierung der Emission als auch das Propagationsmodell immer Luft- und Körperschall gemeinsam betrachteten.

Teil-AP waren dort definiert, wo sich die Arbeiten mehrerer Partner in einem AP inhaltlich unterscheiden lassen. Die Mehrzahl der Arbeitspakete bzw. Teil-AP wurden von einem Partner allein bearbeitet. Lediglich in wenigen Fällen trugen mehrere Partner durch identische Arbeitsschritte zu einem gemeinsamen Arbeitsziel bei. Die folgende Grafik stellt die vielfältigen Abhängigkeiten (Input – Output) zwischen den AP dar:

Vernetzung der Arbeitspakete untereinander (ohne F)



4 Koordination, Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit in diesem Verbund erfolgte ohne formellen Zusammenschluss der Forschungspartner auf der Basis eines Kooperationsvertrags.

Am 01.03.2016 fanden ein Auftakt-Workshop und am 23.07.2019 ein Abschlussworkshop statt, dazwischen insgesamt fünf eintägige Fortschrittsworkshops in halbjährlichem Rhythmus. Es wurden von allen Verbundpartnern jeweils Kurzvorträge zum Stand der Arbeiten gehalten und die Weiterarbeit diskutiert. Ein/e Vertreter/in des UBA nahm an den Fortschritts-Workshops regelmäßig teil. Wir bewerten dies als sehr bereichernd, da der UBA-Vertreter an den Zwischenergebnissen nicht nur großes Interesse gezeigt, sondern die wissenschaftliche Sichtweise immer wieder mit den aktuellen Vorschriften verglichen und die Ergebnisse eigener und fremder Untersuchungen eingebracht hat. Dazwischen gab es zwischen den Partnern Besprechungen und Telefonkonferenzen im Hinblick auf Simulationsaufgaben, Messkampagnen sowie zum Vergleich subjektiver und objektiver Mess- und Befragungsdaten.

Ab Juni 2017 wirkte ein namhafter Anlagenhersteller im Verbund mit. Kontakte mit ihm waren bereits 2015 mit der Einreichung des Antrags geknüpft worden, u.a. ausgelöst durch einen Vorschlag des Ministeriums, einen bestimmten Windpark mit Anlagen des oben genannten Herstellers in Ostfriesland zu untersuchen. Dieser Windpark-Betreiber hatte jedoch dann überraschend seine Kooperationsbereitschaft zurückgezogen.

Mit dem Anlagenhersteller wurden in der Folgezeit andere Windparkstandorte diskutiert sowie die Bedingungen einer Zusammenarbeit und eines Datenaustauschs fachlich und juristisch erörtert. Diese Verhandlungen mündeten 2017 in einen erweiterten Kooperationsvertrag. Die Simulationsrechnungen an der realen Multimegawatt-Anlage wurden durch Mitarbeiter von UST-IG im Hause des Anlagenherstellers durchgeführt.

Etwa zeitgleich konnte nach langer ergebnisloser Suche an zwei Standorten in Wilstedt (Lkr. Rotenburg a.d. Wümme, Niedersachsen) und Ingersheim (Lkr. Ludwigsburg, Baden-Württemberg) zwei kooperationsbereite Windparkbetreiber gefunden werden, die mit identischen Multimegawatt-Anlagen bestückt sind, sich aber wegen unterschiedlicher Randbedingungen (Windpark mit 9 WEA im Flachland, weicher Untergrund, 108 m Nabenhöhe – Einzelanlage im Bergland, harter Untergrund, 135 m Nabenhöhe) sehr gut ergänzen.

Durch die Messungen an der WEA entstand ein regelmäßiger Austausch mit der Energiegenossenschaft Ingersheim EG sowie zur Kommune Ingersheim. Der Verbund bekam Gelegenheit, das Forschungsprojekt zweimal öffentlich auf Generalversammlungen der EG vorzustellen. Eine ähnlich konstruktive Zusammenarbeit entstand mit den Verantwortlichen des Betreibers WPD wie auch der Kommune Wilstedt. An beiden Standorten gab es Bürgerversammlungen sowohl zur Information über die geplanten Messungen sowie anschließend zur Erläuterung der Ergebnisse. Im Umfeld beider Standorte gibt es eine Reihe engagierter Anwohner, z.T. mit ingenieurmäßigem Hintergrund, die wegen ihrer Ortskenntnis und langjährigen Erfahrungen seit Errichtung der WEA von großem Nutzen waren.

Bereits vor Antragsabgabe wurden Sondierungsgespräche mit dem FHG-Institut für Chemische Technik (ICT) in Pfinztal (bei Karlsruhe) aufgenommen. ICT plante im Rahmen seiner Forschungen zur Redox-Batterie eine 2MW-Forschungs-WEA. Partner KIT-GPI führte bei ICT vor und nach Errichtung der WEA vergleichende Erschütterungsmessungen, unterstützt durch Simulationen (KIT-VAKA), durch. KIT-GPI möchte den Standort in

Folgevorhaben weiterbearbeiten, da hier Anlagendaten besonders unbürokratisch zur Verfügung gestellt werden.

KIT-IBF kooperierte mit der Forschergruppe BEM S&S an der Universität Patras im Blick auf das für seine Modellierungen verwendete Randlelement-Programm IsoBEM (später „PYTHIA“). Der Austausch erfolgte im Rahmen von zwei Internationalen Workshops an der Universität Patras/Griechenland 2018 und 2019.

KIT-GPI arbeitet u.a. mit dem Institut für Geophysik der Universität Leipzig zusammen. Für TremAc konnte auf diese Weise ein umfangreiches Messexperiment (SMARTIE1, s.u.) an der WEA Pfinztal (FHG-ICT, s.o.) durchgeführt werden. Prof. Dr. Joachim Ritter vom KIT-GPI leitet seit 2017 einen nationalen Arbeitskreis „Auswertung seismologischer Signale von Windenergie-Anlagen“ der deutschen Seismologen für das FKPE (www.leibniz-liag.de/fkpe).

Verschiedentlich kam es zur Vorstellung des Forschungsvorhabens bei Behörden (u.a. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, LUBW), in Fachkreisen (10. Rheiner Windenergie-Forum der Kötter-Ingenieure) und mit Vertretern des Forschungsvorhabens „WEA Akzeptanz“ an der Leibniz-Universität Hannover.

5 Untersuchungsmethodik und Ergebnisse

5.1 Simulationsrechnungen

Für die Auslegung von Anlagen sowie Emissionsprognosen werden normalerweise Entstehung und Propagation von Schall- und Erschütterungsemissionen mit Modellen beschrieben, die die physikalischen Zusammenhänge grob vereinfachen (müssen) und/oder auf empirischen Betrachtungen beruhen. Die Entwicklung hinreichend genauer und damit realitätsnaher Simulationsrechnungen auf der Basis geometrietreuer aerodynamischer und mechanischer Gesamtmodelle von WEA (sog. High fidelity Modelle) ist sehr zeitaufwändig. Die unterschiedlichen Berechnungsmodelle stellen daher den mit Abstand größten Teil der geleisteten Arbeit dar und nehmen auch im Schlussbericht entsprechend großen Raum ein.

UST-IAG und UST-SWE haben die Kopplung eines CFD-Lösers (FLOWER) mit einem dynamischen Mehrkörpersimulationsprogramm (SIMPACT) genutzt, um die Dynamik des Turms, Fundaments und des Maschinenhauses noch detaillierter zu erfassen. Die Entwicklung aller Rechenschritte erfolgte zunächst ebenfalls an der generischen NREL 5MW Anlage in einer im Rahmen des OFFWINDTECH Projekts erstellten leicht modifizierten Version, da kommerzielle WEA-Standorte zu Projektbeginn noch nicht verfügbar waren. Später wurde zum Vergleich mit Messungen auch eine kommerzielle WEA berechnet.

TUM-LWE verwendete für seine Berechnungen die Entwicklungsumgebung cp-lambda, die die Blade Element Momentum Methode (BEM) mit einem Ffowcs-Williams-Hawkings-Löser (FWH) kombiniert. Dabei handelt es sich um ein Werkzeug mit geringerem Detailgrad, das eine ökonomische Variation vieler Betriebszustände erlaubt. Erstellt wurde damit ein generisches Modell, das der betrachteten kommerziellen WEA relativ nahe kam.

5.1.1 Generierung der Anströmung

Aufgrund der Entscheidung zwei WEA zu betrachten, eine generische und eine kommerzielle, mussten (in AP A1.1) zwei Strömungsfelder generiert werden, eines gemäß den IEC Richtlinien für die generische Anlage und eines entsprechend der Messergebnisse aus AP

B3.2 für die kommerzielle WEA. Die atmosphärische Bodengrenzschicht lässt sich durch die Superposition eines zeitunabhängigen, höhenabhängigen Geschwindigkeitsprofils und eines turbulenten Schwankungsanteils, generiert mit dem Mann-Modell, darstellen. Für die Simulation der WEA wurden die Fälle homogene Anströmung und Anströmung mit Geschwindigkeitsprofil, ohne und mit überlagerter Turbulenz, betrachtet. Letzterer bildet die reale bodennahe Atmosphäregrenzschicht am besten ab. Zur Interpretation der auftretenden Effekte sind jedoch die beiden Anströmfälle mit reduzierter Komplexität teilweise besser geeignet.

Es wurden Kriterien für die Erstellung des CFD-Hintergrundgitters und der Randbedingungen erarbeitet, um den numerischen Einfluss auf die Lösung zu reduzieren. Z.B. dürfen für die Akustikauswertung keine Störungen, die von den Rändern des Rechengebiets ausgehen, im Feld vorhanden sein. Hierzu wurden die seitlichen Randbedingungen als reibungsfreie Wände definiert, zur Eliminierung von Druckstörungen, die an den Rändern reflektiert wurden besonders großer Initialisierungs-Zeitschritte verwendet, und die Turbulenz nur noch in einem rechteckigen Bereich stromauf der Anlage eingespeist, in dem auch die Gitterauflösung hoch genug ist, um sie propagieren. Außerdem wurden zusätzliche, allgemeine Untersuchungen zur Einspeisung des Turbulenzfeldes unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Akustik durchgeführt.

Feldmessungen in Kombination mit einem numerischen Modell einer kommerziellen WEA bieten in diesem Forschungsprojekt einzigartige Möglichkeiten zur Verfahrensvalidierung. Voraussetzung ist jedoch, dass die Anströmung der Anlage während der Feldmessungen möglichst gut in der Simulation abgebildet wird. Da Langzeitmessungen an den erst spät identifizierten Anlagenstandorten nicht vorlagen, wurde ein standortspezifisches turbulentes Strömungsfeld für die Simulation der kommerziellen WEA erst erzeugt, nachdem die Messkampagne im Februar 2019 (AP B3.2) abgeschlossen war.

Die Auslegungs-Windklasse der kommerziellen Anlagen ist IIA und der Standort Ingersheim wird mit Geländekategorie II angesetzt. Diese Kategorien wurden auch für die generischen WEA angenommen und eine neutrale Schichtung unterstellt. Dass Anwohnerbefragungen zufolge in Ingersheim Beschwerdesituationen insbesondere bei moderatem Wind aus Nordost bei stabiler Schichtung auftraten, und die WEA in diesem Fall aus Richtung einer Hochebene angeströmt wird, macht einen starken Einfluss der Orografie, insbesondere bei stabiler Schichtung, unwahrscheinlich. Daher erschien ein Mehraufwand für die Aufbereitung der Geländedaten und eine Vernetzung des komplexen Geländes sowie der dadurch erhöhte Rechenaufwand (AP A1.2) nicht gerechtfertigt und unterblieb.

5.1.2 BEM-FWH-Emissionsmodell

Die Arbeiten der TUM verbanden verschiedene bekannte aeroakustische Modelle innerhalb des Windkraftanlagen-Designframeworks Cp-Max. Der aeroservoelastische Windkraftanlagensimulator Cp-Lambda wurde hier zur Vorhersage der akustischen Schallspektren unter Verwendung einer „Blade Element Momentum“ (BEM) Formulierung verwendet. Hiermit wird das Ffowcs Williams-Hawkings Modell (FWH) verknüpft, das auf akustischen Analogien basiert und der Berechnung der Schallausbreitung aus Nahfelddaten dient (Zeitbereichsmethode). Im vorliegenden Fall konzentrierte sich die Kopplung (AP B1) auf die Vorhersage der Schallemission durch den Rotor einer Windkraftanlage, die dem niederfrequenten Spektrum des sogenannten turbulenten Anströmgeräusches entspricht.

Frequenzbereichsmethoden sind semi-empirische Modelle, die verschiedene Schallmechanismen beschreiben, typischerweise gruppiert in „self-noise“ und „turbulent inflow noise“ (TI). Self-noise entsteht durch das Zusammenwirken eines Profils mit seiner Grenzschicht und der Hinterkante bzw des Nachlaufs, welche vom Profil "selbst erzeugt" werden. Dabei wird zwischen „turbulent boundary layer - trailing edge (TBL-TE)“, „laminar boundary layer - vortex shedding“, „trailing edge bluntness, separation-stall“ und „tip noise“ unterschieden. Es wurden drei verschiedene Modelle von TBL-TE implementiert. Turbulent inflow noise entsteht durch Druckschwankungen infolge einfallender Windturbulenzen. Hier wurden vier verschiedenen Modellansätze implementiert:

Beim Vergleich berechneter Schalldruckpegeln (Sound Pressure Level, SPL) der generischen Windkraftanlage für verschiedene durchschnittliche Windgeschwindigkeiten und einen Beobachter auf dem Boden in Windrichtung in 179 m Entfernung (nach IEC 61400-11) zeigten sich beachtliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Methoden. Bezüglich TBL-TE Schallemissionen lieferte das Modell TBL-TE-DTU die beste Übereinstimmung mit öffentlich zugänglichen Daten, bezüglich TI wurde das TI Moriarty Modell empfohlen. Auf dieser Basis wurde mit Hilfe des Tools Cp-Max (AP B1) ein generisches Modell aufgebaut, das der Referenz- Multimegawattanlage möglichst nahe kommt.

Da bis Projektende (Laufzeit TUM bis 31.01.2019) nicht genügend Feldmessungen zur vollständigen Modellvalidierung zur Verfügung standen (AP B3), wurden die Modelle im Frequenz- und Zeitbereich durch einen Code-zu-Code-Vergleich validiert. Das Frequenzbereichsmodell für die Referenz- Multimegawattanlage wurde mit Cp-Max direkt beim Anlagenhersteller rekonstruiert. Die Ergebnisse der Simulation (Vergleich in Bezug auf den A weighted sound power level) stimmten mit denen des Anlageherstellers bis auf 5dB überein.

Das Zeitbereichsmodell wurde mit dem CFD-Modell von UST-IAG verglichen. Hierbei waren lediglich die Trends qualitativ ähnlich. Oberwellen in den Spektren sind in den CFD-Simulationen deutlich zu erkennen, die mit dem FWH-Modell nicht erfasst werden. Dieses berechnet die Druckverteilung nur am Rotorblatt und nicht am Turm, weshalb die fehlende Schallemission der Rotor-Turm-Interaktion für die Abweichung verantwortlich sein dürfte.

5.1.3 CFD-MKS-Emissionsmodell

Die am UST-IAG und UST-SWE bereits vorhandene Schnittstelle zwischen dem DLR Strömungslöser FLOWer und dem kommerziellen Mehrkörper-Simulationsprogramm SIMPACK war begrenzt auf eine Kopplung der Rotorblätter (Elastizität und Pitchverstellung), hatte eine restriktive Gitterstruktur und keine Wiederaufnahmefähigkeit (restart) von gekoppelten Rechnungen. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurde im Rahmen von AP A2.1 eine partitionierte Strömungs-Struktur-Kopplung zwischen dem Strömungslöser FLOWer und dem MKS-Löser SIMPACK entwickelt.

Die Fluid-Struktur Kopplung wurde von UST-IAG dahingehend erweitert, dass beliebige aufeinander aufbauende Festkörperbewegungen und Verformungen diskretisierter Balken im Strömungslöser berücksichtigt werden und die resultierenden Lasten an den Strukturlöser übertragen werden können. Für den konkreten Anwendungsfall bedeutet dies, dass z.B. die Bewegung der gesamten WEA, die sich aus der Strukturmechanik des Turmes und des Fundaments ergeben, in der Strömungssimulation berücksichtigt werden können.

Vom UST-SWE wurde dazu eine erweiterte Schnittstelle zum Strukturlöser SIMPACK bereitgestellt. Für den Datenaustausch von FLOWer und SIMPACK wurden von UST-IAG drei unterschiedliche Kopplungsschemata implementiert. Im Regelfall verwendet wurde ein implizit-explizites Schema erster Ordnung: SIMPACK berechnet (explizit) die Verformungen zum Zeitpunkt $t+\Delta t$ mit den Lasten, die es zum Zeitpunkt t von FLOWer erhalten hat. Anschließend werden diese Verformungen an FLOWer übergeben und FLOWer berechnet (implizit) die aerodynamischen Lasten zum Zeitpunkt $t+\Delta t$. Ein zweites Verfahren mit einer implizit-impliziten Kopplung wurde zwar implementiert, kam aber nur testweise zum Einsatz, da es wesentlich längere Rechenzeiten erfordert. Ein Kommunikationsskript für die vorliegende Kopplung wurde in MS Powershell neu entwickelt.

Lasten und Verformungen werden nur an diskreten Positionen des Modells berechnet. Diese Positionen werden im Strukturmodell mit sogenannten Kommunikationsmarkern festgelegt. Jeder Position werden drei Marker im Strukturmodell zugeordnet (mitbewegt, Referenzsystem, unverformt). In SIMPACK werden die aus FLOWer resultierenden aerodynamischen Lasten an den Positionen der bewegten Marker auf die Struktur aufgeprägt. Sie setzen sich aus wandnormalen Druckkräften und wandtangentialen Reibungskräften zusammen. Für die Kopplung mit SIMPACK werden die Oberflächen durch Ebenen zerteilt und die Lasten der resultierenden Teilflächen einzeln berechnet und aufsummiert. Mittels einer reduzierten Übertragungsmatrix wird die Gitterverformung des Volumengitters dem verformten Oberflächengitter laufend angepasst.

Nachdem die Funktionalität prinzipiell sicher gestellt war, wurde die Prozesskette der FLOWer-SIMPACK Kopplung weiter optimiert. Dies betrifft einerseits die Interpolation der Deformationen der verformten CFD-Oberfläche. Dies wird nun über eine Spline-Interpolation realisiert, sodass im Vergleich zur linearen Interpolation eine gleichmäßigere und damit realistischere deformierte Oberfläche entsteht. Des Weiteren wurde die „Restart“-Funktion erweitert und bietet nun die Möglichkeit einer Fortsetzung der Simulation mit veränderten Modellparametern. Durch zeitweilige Anpassung der Dämpfung sollten in Zukunft kürzere Einschwingvorgänge der Struktur und speziell des Turms möglich sein. Durch eine weitere Implementierung im Strömungslöser FLOWer wurde die Konvergenz der Strömungslösung bei Deformation rotierten Oberflächen wesentlich verbessert. Dazu werden die Geschwindigkeitsvektoren des Strömungsfeldes zu Beginn jedes Zeitschrittes entsprechend der Deformation rotiert. Dadurch sind Struktur-gekoppelte Simulationen mit zeitlich veränderlicher Drehzahl möglich.

UST-SWE hat i.R. von AP A2.1 ein generisches Turbinenmodell verwendet, welches in seinen Dimensionen und Leistungscharakteristik der kommerziellen WEA angenähert ist. Dieses Modell wurde mit Hilfe des multi-objective optimization Codes cp-max der TUM im Detail parametrisiert. Das Modell dient zur Plausibilisierung gegenüber Messdaten, zur Identifikation schallrelevanter Effekte und zur Integration unterschiedlich detaillierter Subkomponenten. Zu diesem Zweck muss das Modell in SIMPACK überführt werden. Benötigt werden dazu die detaillierten Strukturparameter, die aerodynamischen Blatteigenschaften sowie die Leistungscharakteristik.

In AP 2.3 wurde die Modellkopplung zunächst auf das generische Windenergieanlagenmodell der OFFWINDTECH WEA in Onshore-Konfiguration angewendet. Sie wurde dahingehend erweitert, dass neben der Rotorblattaeroelastik auch die Turmaeroelastik sowie die daraus resultierenden Bewegungen von Gondel und Nabe berücksichtigt werden können. Bewegungen, die durch ein elastisches Fundament entstehen, können ebenfalls berücksichtigt

werden. Beim Einsatz eines Reglers ist außerdem die Torsionsverformung des Triebstrangs berücksichtigt. Die Netze und das CFD Setup mussten dafür entsprechend angepasst werden.

Als Blattgeometrie wird im Innenbereich des Rotors ein sogenanntes Flatback-Profil der FX77-Serie verwendet, während im Außenbereich DU-Profile zum Einsatz kommen. Zusätzlich zu dem Stahlurm des Basismodells wurden zwei weitere Turmkonfigurationen von KIT-VAKA entworfen und zur Verfügung gestellt. Bei diesen Türmen handelt es sich einerseits um einen Hybridturm, bestehend aus einem unteren Betonanteil und einem darauf montierten Stahlteil, sowie einem sogenannten „BSS“-Turm (Bolted Steel Shell Tower). Beide Modelle liegen sowohl als Balkenelement als auch als Schalenelement-Modelle vor.

Zur Untersuchung von Getriebevibrationen wurde das Modell fiktiv mit einem MEG (MesH Engineering Team) Getriebe und einem eigens entwickelten Regler ausgestattet. Dieses hat eine Gesamtübersetzung von 97, welche über drei Stufen (eine Planetenstufe, zwei Stirnradstufen) realisiert wird. Das Getriebe wird über eine Dreipunktlagerung auf einem zunächst starren Maschinenträger befestigt. Ein nabennahes Hauptlager trägt die Hauptlast aus Rotorschub und Gewichtskraft des Rotors. Die resultierenden Momente werden über den Planetenträger in die erste Getriebestufe eingebracht und über das Hohlrad und das starre Gehäuse auf den Maschinenträger übertragen. Zwischen Getriebegehäuse und Maschinenträger sind flexible Kraffelemente (sogenannte Pendelstützen) modelliert.

Zur Untersuchung des Fundament/Boden-Einflusses wurde von KIT-IBF ein generisches Fundamentmodell mit frequenzabhängigem Übertragungsverhalten entworfen. Zur vereinfachten Betrachtung wurde in einem ersten Schritt die Frequenzabhängigkeit vernachlässigt. Um stationäre Parameterkennwerte zu erhalten, wurden stattdessen sowohl die Steifigkeitswerte als auch die Dämpfungswerte zwischen 0,5 Hz und 10 Hz gemittelt.

Nach Abschluss der methodischen Erweiterung der gekoppelten Simulationstools konnten die numerischen Setups der generischen sowie der kommerziellen Anlage erstellt werden und die Simulationen durchgeführt werden. Es handelt sich dabei um eine Turbine der Klasse IEC 2A mit einer Turmhöhe von 138 m. Der Rotordurchmesser beträgt 82 m und die Nennleistung 2 MW. Die Turbine ist als Direktantriebs-Variante konzipiert, also initial ohne Getriebeübersetzung.

Die Betriebsführung der kommerziellen WEA weist einen relativ großen Teillastbereich auf, d.h. die Nennleistung wird erst bei einer sehr hohen Windgeschwindigkeit von 15 m/s erreicht. Die Nennzahl des Synchrongenerators von 17,7 rpm ist hingegen schon bei 11,8 m/s Windgeschwindigkeit erreicht. Der Regler des TremAc-Modells wurde nachträglich entsprechend dieser Betriebsvorgaben angepasst. Das Gesamtmodell verfügt über die selben Funktionalitäten und die selbe Komplexität wie das Modell der generischen WEA.

5.1.4 Emissionsberechnungen

Im Rahmen von AP 3.1 wurde das methodische Vorgehen bei der gekoppelten CFD-MKS-Simulation sowie der Einfluss der Modelltiefe zunächst am Modell der generischen WEA untersucht. Dabei wurden von UST-IAG mehrere Simulationen der generischen Anlage mit unterschiedlichen Anströmungen und variiertes Strukturflexibilität durchgeführt. Anschließend wurde eine Simulation der kommerziellen Anlage mit turbulenter gescherter Anströmung und flexiblen Rotorblättern, Turm und Fundament gerechnet. Mit Hilfe von Auswerteskripten wurden die instationären Turmfußlasten extrahiert.

Um einen bezüglich der aerodynamischen Kräfte und des Strömungsfeldes gut konvergierten Zustand zu erreichen, hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die CFD-Simulation erst nach auskonvergierter Strömungssimulation zu starten. Da dabei Abbremsung und Umlenkung der Strömung verzögert reagieren, wurden vor dem Start der MKS-Kopplung weitere 32 Umdrehungen abgewartet. Der anschließenden Start der Struktursimulation führt wegen des schlagartigen Einsetzens von externen Kräften zu einem Überschwingen der Verformungen am Turm und an den Rotorblättern, die z.T.nur wenig gedämpft werden. Daher wurden die aerodynamischen Lasten über die ersten 120 Zeitschritte (entspricht einer viertel Umdrehung bei Simulationen mit konstanter Drehzahl) linear hochgefahren. Ein stetiges Anwachsen der Flieh- und Gravitationskraft wurde über ebenfalls linear zu- und dann wieder abnehmende Dämpfer erzwungen.

Während sich die Turmfußlasten (3 Kraftgrößen, 3 Momente) und damit die seismischen Emissionen unmittelbar aus dem SIMPACK-Modell ergeben, erfordert die „Übergabe“ der akustischen Emissionen einen weiteren Zwischenschritt (AP B 3.1): Rund um die WEA wurde ein „Übergabezylinder“ mit einem Radius von 100 m und einer Höhe von 200 m definiert, auf der 4218 diskrete Übergabepunkte mit äquidistanten Abständen von ca. 5 m festgelegt waren. Als Bindeglied zwischen der Hüllfläche der lärm erzeugenden Oberflächen im CFD-Modell und Übergabezylinder wurde der am UST-IAG entwickelte Ffowcs-Williams-Hawkings-Löser ACCO verwendet. Dieser berechnet den Transport schwacher Störungen im Fernfeld aus der Integration von Druck- und Geschwindigkeitsfluktuationen einer Hüllfläche. Die Hüllfläche besteht hier aus der Oberfläche aller relevanten Komponenten (Rotor, Gondel, Turm). Ergebnis ist die Berechnung des Zeitverlaufs des akustischen Drucks an den Übergabepunkten. Neben dem Schalldruck wurden der Schallschnellenvektor senkrecht zur Zylinderfläche und die Phasenlage der Schallschnelle (wegen des Nahfeldes) als Zeitreihe übergeben. Der Einfluss der Windrichtung sowie der mittleren Windgeschwindigkeit sind in den Daten implizit enthalten.

Die Anregung der WEA ist von externen Kräften dominiert, die periodisch mit der Blattdurchgangsfrequenz auftreten, insbesondere Wechselwirkungen infolge des Turmvorstaues, aber auch Gravitationskräften oder weiteren aerodynamischen Kräften, die periodische Schwankungen beispielsweise durch Scherung aufweisen. Daher eignet sich eine Auswertung im Frequenzbereich, um auftretende Effekte zu charakterisieren und die unterschiedlichen Rechenfälle zu vergleichen und es wurde auf alle extrahierten Zeitreihen eine Frequenzanalyse mittels FFT angewandt.

Die Komplexität der Simulationen wurde schrittweise gesteigert. Aufgrund des hohen Rechenzeitaufwands einer CFD basierten Simulation konnten nur exemplarisch ausgewählte Parameterkombinationen untersucht werden. Die Auswahl der Kombinationen wurde durch Testrechnungen bei der Erweiterung des aeroelastischen Gesamtmodells bestimmt. Zusätzlich wurden gezielt interessierende Kombinationen von Parametern ausgewählt. Nach ersten Simulationen zum prinzipiellen Test der Funktionalität (LC0_FSC1) wurde die Modelltiefe der Simulation der generischen OFFWINDTECH WEA in vier unabhängigen Stufen getrennt variiert (AP D1.1):

- Dreiblattrotor mit Nabe als starre Struktur: Es wurden drei Lastfälle bei gleichförmiger Einströmung und ohne Fluid-Struktur-Kopplung betrachtet (LC1_SD). Die Berücksichtigung des Turms hat starken Einfluss auf die aerodynamischen Effekte. Die Amplituden der aerodynamischen Kräfte am Turm sind höher als am Rotor, ein Effekt, der durch die Reduktion des Blatt-Turm Abstandes noch verstärkt wird. Die größten

Amplituden treten bei der ersten und zweiten Harmonischen der Blattdurchgangsfrequenz (BDF) auf der dem auflaufenden Blatt zugewandten Turmvorderseite auf. Die Höherharmonischen der BDF sind im Spektrum deutlich ausgeprägt. Neben den Turmfußschnittkräften sind auch die Schalldruckpegel im tieffrequenten Bereich durch die instationären Drücke am Turm dominiert. Dabei wird im betrachteten Frequenzbereich vom Turm mehr Schall abgestrahlt als vom Rotor und gleichzeitig gleichmäßiger in alle Richtungen.

- Einfluss der Strukturfreiheitsgrade bei konstanter Drehzahl: In dieser Studie wurden eine gleichförmiger Einströmung mit drei unterschiedlichen Strukturfreiheitsgraden betrachtet: statisch verformte Blätter (LC2_SD), flexible Rotorblätter (LC2_FSC1) sowie flexible Rotorblätter, Turm und Fundament (LC2_FSC3). Die in den beiden Simulationen mit flexibler Struktur auftretenden Schwingungen der Blattspitze werden klar von der Rotorfrequenz dominiert. Mit flexiblem Turm und Fundament zeigt sich dagegen ein klarer Einfluss der Eigenfrequenzen, insbesondere der ersten Biegeeigenfrequenz. Dies wirkt sich auch deutlich auf die Turmfußlasten aus. Die Amplituden der BDF Harmonischen sind gegenüber dem starren Turm tendenziell reduziert, im Bereich von Eigenfrequenzen aber verstärkt. Die akustischen Emissionen unterscheiden sich kaum.
- Einfluss der Zuströmung bei konstanter Drehzahl: Bei gleichbleibender Anzahl an Strukturfreiheitsgraden wurden drei Simulationen mit unterschiedlicher Zuströmung betrachtet: gleichförmige Anströmung (LC2_FSC3), gescherte Anströmung (LC3_FSC3) und überlagerte Turbulenz (LC4_FSC3). Die stochastischen Störungen der turbulenten Anströmung haben einen erheblichen Einfluss auf Lasten und Verformungen. Die Schwankungsbreiten werden deutlich größer, in den Spektren liegt das Breitbandrauschen wesentlich höher als in den beiden Vergleichsfällen und die Amplituden der Harmonischen der BDF sind dadurch teilweise kaum noch prominent. Bei turbulenter Anströmung zeigen sich die Eigenfrequenzen aber deutlicher in den Turmfußlasten und die Amplituden bei der ersten Biegeeigenfrequenz sind dominant. Wesentlich geringer ist der Einfluss der Anströmung auf die tieffrequenten akustischen Emissionen, die im Spektrum weiterhin klar von den Spitzen bei den BDF Harmonischen geprägt sind. Die Anströmung hat Einfluss auf die Schalldirektivität.
- Variable Drehzahl: Diese Studie behandelt die komplexesten Lastfälle. Dabei wurden zwei Fluid-Struktur gekoppelte Lastfälle mit flexibler Struktur, elastischem Triebstrang, Generator Drehmoment- und Pitchregelung betrachtet: mit gescherter Anströmung (LC3_FSC5) und mit turbulenter (LC4_FSC5). Die Frequenzanalyse im Drehzahlbereich zeigt, dass sich die Amplituden der BDF Harmonischen kaum verändern, sondern sich im Wesentlichen nur die Frequenzen verschieben. In beiden Lastfällen sind die ersten Biegeeigenfrequenzen der Anlage die einzigen im Spektrum der Turmfußbiegemomente klar identifizierbaren Eigenmoden. In den betrachteten Schalldruckspektren bleibt der tonale Charakter erhalten und wird klar von der Blatt-Turm Interaktion dominiert.

Dies alles demonstriert, dass die wesentliche Ursache des tieffrequenten Schalls in der Wechselwirkung zwischen Turm und Rotor liegen. Dabei entstehen impulsartige Druckstörungen, die sich im Spektrum als tonale Lärmanteile bei der Blattdurchgangsfrequenz und deren Höherharmonischen auswirken. Eine neu gewonnene Erkenntnis ist, dass für die betrachtete generische Anlage und Zuströmbedingungen der größte Anteil des Schalls vom Turm und nicht vom Blatt abgestrahlt wird. Grund dafür ist, dass das Druckfeld des vorbeistreichenden Blattes starke, impulsartige Druckschwankungen auf der Turmoberfläche

hervorrufen, die über die große Turmoberfläche als Lärm ins Fernfeld abgestrahlt werden. Für die Ermittlung der Luftschall-Emissionen ist in erster Linie die Elastizität des Rotors bedeutend, da der Abstand zum Turm durch die Durchbiegung des Rotors verändert wird.

Bei turbulenter Anströmung kommt ein breitbandiges Schallspektrum durch Interaktion von Anströmturbulenz und Rotor hinzu. Durch die turbulente Anströmung erhöhte sich zugleich der Rechenaufwand massiv, da das Hintergrundnetz feiner aufgelöst werden musste, die Numerik rechenintensiver ist und der betrachtete Simulationszeitraum länger gewählt werden musste, um statistisch verwertbare Ergebnisse zu erhalten.

Eine Auswertung auf einem Schallteppich am Boden um die Anlage ermöglicht Aussagen zur Direktivität der Emission. Während der Rotor eine leichte Direktivität aufweist, ist der Turm als Hauptschallquelle dies nicht. Die Richtwirkung der Schallabstrahlung ist allerdings stark frequenzabhängig. Während bei der Blattdurchgangsfrequenz der Schall vor allem in der Rotorebene abgestrahlt wird, erfolgt die Abstrahlung bei den höherharmonischen Frequenzen primär in und entgegen der Anströmrichtung.

Die Simulation der kommerziellen WEA musste aus Vertraulichkeitsgründen beim Hersteller vor Ort durchgeführt werden. Alle notwendigen Programme wurden dazu durch UST-IAG mit Unterstützung des Herstellers dort installiert. Die Rechnung wurde mit der in AP A1.1 generierten Anströmung und dem dazugehörigen Betriebspunkt gestartet. Die Turbulenz wurde 384 m stromauf der Anlage in das Rechengebiet eingespeist. Die Anlage wurde für 15 Umdrehungen als starre Anlage mit einem Zeitschritt von 1,5° Azimuth gerechnet bis die Turbulenz in den Nachlauf propagiert ist (ca. 56 Sekunden). Anschließend wurde der Zeitschritt wie schon bei der generischen Anlage auf 0,75° reduziert und die Rechnung mit der starren Anlage für 16 Umdrehungen fortgesetzt. Schließlich wurde die Fluid-Struktur-Kopplung eingeschaltet und weitere 12 Umdrehungen gerechnet. Dabei waren die Rotorblätter und der Turm flexibel während die Nabe, die Gondel und das Fundament sowie sämtliche Anschlüsse starr behandelt wurden. Ein Regler kam nicht zum Einsatz. Ausgewertet und verglichen wurden die Umdrehungen 16-31 (starre Anlage) sowie 34-43 (flexible Anlage).

5.1.5 Turmeinfluss

Wie die genannten Rechenergebnisse von UST-IAG zeigen, hat die Turmkonstruktion einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf Emissionen. KIT-VAKA hat unter AP C2 verschiedene Turmkonstruktionen beschrieben und ihre Unterschiede sowie Eignung für verschiedene Einsatzbereiche von WEA systematisch herausgearbeitet. Dies betrifft den Stahlrohturm, den Betonturm, den Hybridturm (kombiniert aus Stahl und Betonsegmenten), den Fachwerkturm sowie „Bolted Steel Shell“-Türme.

Ausgangspunkt der Betrachtungen war dabei zunächst eine umfangreiche Analyse der auf dem Markt verfügbaren WEA und der verwendeten Turmkonstruktionen. Zwischen 9/2014 und 8/2016 wurden in Deutschland Stahlrohr-, Hybrid- und Betontürme in ähnlicher Anzahl errichtet. Zählt man die innovativen Stahlrohtürme, wie der „Bolted Steel Shell“, zu den Stahltürmen, ist eine Dominanz mit ca. 40 % Anteil am Angebotsmarkt zu erkennen. Fachwerk- und Holztürme fanden keine Anwendung. Während die Stahlrohtürme erwartungsgemäß die geringste Nabenhöhe aufwiesen, wurden Hybridtürme und innovative Stahlrohtürme nahezu ausschließlich für Turmhöhen von ca. 140 Metern eingesetzt. Betontürme und klassische Stahlrohtürme weisen hingegen ein erheblich größeres Streuband auf. Die Studie kam zum

Schluss, dass die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens betrachteten Anlagen in Ingersheim und Wilstedt für das deutsche Binnenland repräsentativ sind.

Für gesamtdynamische Berechnungen und die Strukturauslegung (AP C3.2) wurde von den Projektpartnern TUM und UST-SWE eine generische Anlage entwickelt und so modifiziert, dass diese den Makroparametern (Leistung, Nabenhöhe, Rotordurchmesser, Leistungskennlinie, Getriebekonzept) der Referenz-WEA ähnelt und vergleichbare dynamischen Effekte aufweist. Die daraus abgeleiteten Lasten wurden durch einfache Ansätze plausibilisiert und zur statischen Auslegung von KIT-VAKA für einen Hybridturm und einen BSS-Turm herangezogen.

Im Fall des Hybridkonzeptes dominiert unter den betrachteten Betriebszuständen die zweite und dritte Turmbiegeeigenfrequenz den Energieeintrag in den Baugrund. Dies lässt sich auf die Massenverteilung, die Anregungsfrequenzen sowie die lokalen Krümmungen der Biegelinien zurückführen. Die geringeren Massen beim BSS-Turm und die im Vergleich zum Hybridturm andere Massen- und Steifigkeitsverteilung führt zu höheren Frequenzen und geringeren Amplituden.

Die Auslegung erfolgte auf Basis numerischer Simulationsverfahren sowie einer Validierung durch analytische Handrechnungen. Für die dynamische Auslegung der generischen Anlage wurde der Drehzahlbereich von 6,0 bis 17,7 U/min analog zur Referenz-WEA berücksichtigt. Dies führt im Betriebsbereich zu einer 1P-Anregung (Rotordrehzahl) im Frequenzbereich von 0,1 bis 0,35 Hz und zu einer 3P-Anregung (Blattdurchgang) von 0,3 bis 1,05 Hz. Mit einer an einem Balkenmodell erfolgten numerischen Modalanalyse wurden die Eigenfrequenzen des Untersuchungsturms berechnet und mit analytischen Näherungslösungen validiert.

Als die für die statische Bemessung relevanten Bauteile ergaben sich beim Hybridturm die Betonquerschnitte, der Mantel des Stahlrohres und die Flanschverbindungen, beim BSS-Turm die Mantelfläche sowie horizontale und vertikale Schraubverbindungen. Die Beurteilung des dynamischen Verhaltens beruhen auf der Auswertung von typischen niedrigen, mittleren und hohen Windgeschwindigkeiten.

Unter AP A 3.2 wurden für die generische WEA von UST-SWE Lastreihen verschiedener Turmkonzepte berechnet und in Kooperation mit KIT-VAKA ausgewertet. Anhand der Spektren können im niederfrequenten Bereich fünf charakteristische Anregungen identifiziert werden, hervorgerufen durch die Anregung aus der Rotordrehung sowie der breitbandig angeregten Eigenfrequenzen der Turmbiegung und der Blattdurchbiegung. Bei genauerer Betrachtung kann in drehzahlabhängige und -unabhängige Peaks unterschieden werden. Die drehzahlunabhängigen Peaks fallen mit den Biegeeigenfrequenzen des Turms und den Rotorblättern zusammen, während die drehzahlabhängigen Peaks den Vielfachen der Blattdurchgangsfrequenz entsprechen.

Unterschiedliche Turmformen (Stahl oder Hybrid) und Modellierungsansätze (Balken oder Schalenmodell) führen einerseits zu veränderten Amplituden sowie zu einer Verschiebung der Eigenfrequenzen relativ zueinander. Stahltürme führen demnach im Bereich der ersten Turmbiegeeigenfrequenz zu deutlich niedrigeren Lasteinträgen ins Fundament als Hybridtürme mit ihrer höheren Masse. In allen betrachteten Fällen dominiert die zweite Turmbiegeeigenfrequenz den Energieeintrag in den Boden. Im Bereich der ersten Biegeeigenfrequenz liegt die aus M_y abgeleitete Größe um den Faktor 10 über der für M_x . Im mittleren und hohen Drehzahlbereich dominiert M_y im Bereich der zweiten und dritten

Biegeeigenfrequenz. Bei der Blattdurchgangsfrequenz bzw. deren Vielfachen können keine klaren Regeln abgeleitet werden.

Die Auswirkung auf die Fußpunktmomente eines, verglichen mit einem numerischen Balkenmodell deutlich aufwändigeren, Schalenmodells erwiesen sich als sehr gering. Lediglich in der Ausprägung der Schalenmoden waren deutliche Unterschiede zwischen den Turmkonzepten erkennbar. Die dünnwandige Stahlschale des BSS ermöglicht bereits im Frequenzbereich bis 20 Hz erheblich mehr Eigenmoden.

Zusammen mit KIT-IBF wurde auch der Einfluss der Baugrundsteifigkeit untersucht. Hier führen allerdings auch große Abweichungen in der Steifigkeit nur zu geringen Unterschieden im dynamischen Verhalten.

5.1.6 Propagationsmodell

Das Propagationsmodell wurde ursprünglich für eine generische 5-MW-Windturbine verwendet, ist aber zugleich Grundlage für die anschließend durchgeführten Simulationen der realen Windenergieanlage (WEA) in Ingersheim. Variationsberechnungen wurden durchgeführt, um den Einfluss von verschiedenen Faktoren auf die Ausbreitung der akustischen und mikroseismischen Emissionen zu analysieren.

Verwendet wurde die Randelementmethode (REM, engl. boundary element method, BEM), ein robustes numerisches Verfahren zur Lösung akustischer, elastischer und gekoppelter Fluid-Struktur-Interaktionsprobleme. Das Verfahren sucht Lösungen der Randintegralgleichungen (Kombination von Helmholtz- und Navier-Cauchy-Gleichung) für N^2 Punkte auf den Grenzflächen von Gebieten, und hat gegenüber der FEM, die Lösungen an N^3 Punkten innerhalb der Regionen suchen muss, Vorteile bei großen Gebieten.

Die numerische Berechnungsstrategie musste verbessert werden, da herkömmliche REM-Randwertprobleme infolge der voll besetzten und nicht symmetrischen Matrizen auf etwa 80.000 Freiheitsgrade begrenzt sind, was hier nicht ausreicht. Die Lösung bestand hier in einer hierarchischen Anordnung von Teilmatrizen (Adaptive Cross Approximation ACA/REM). Darüber hinaus wurde eine signifikante Reduzierung der Rechenzeit durch den Einsatz eines iterativen Gleichungslösers (GMRES) erreicht. Beide Techniken wurden in den verwendeten REM-Code „PYTHIA“ implementiert.

Es wurde ein 3D-Geländemodell mit der WEA im Zentrum erstellt, das einen Hang / Kuppe mit einem Neigungswinkel β und ein idealisiertes Einraumgebäude mit elastischen Wänden und Streifenfundamenten in 500 m Abstand beinhaltet. Im Sinne der REM besteht das Modell aus zwei akustischen „Gebieten“, die aus Luftschichten bestehen und zwei unterschiedliche Temperaturen aufweisen können, sowie zwei elastischen Bodenschichten und Beton (WEA-Fundament und Gebäude). Alle Ränder und Grenzflächen wurden mit ca. 300000 vierknotigen bilinearen isoparametrischen Randelementen diskretisiert. Die Zeitverläufe als Eingangsgrößen werden mittels FFT umgewandelt das Randwertproblem für jede Frequenz des Spektrums mit Hilfe der BEM im Frequenzbereich gelöst.

Für die generische NREL 5 MW Turbine wurde auf der Basis von Lastsimulationen von KIT-VAKA, UST-SWE und TUM-LWE ein Fundament für den Onshore-Einsatz entworfen, das die maßgebenden Einwirkungskombinationen nach DiBt-Richtlinie Windenergieanlagen bzw. IEC 61400-1 abdeckt. Unter Zugrundelegung eines mitteldichten Sand- oder Kiesuntergrunds

ergab sich ein ringförmiges Flachfundament mit einem Außendurchmesser von 19,8 m, einem Innendurchmesser von 11,88 m und einer Höhe von 2,97 m.

Die komplexe dynamische Steifigkeit des Bodens bei Wechselwirkung des kreisförmigen Fundaments mit dem Untergrund wurden mit analytischen Lösungen unter Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit ermittelt. Die Dämpfung nimmt erwartungsgemäß mit steigender Frequenz zu und Federsteifigkeit nimmt ab.

Eingangssignale der Simulation sind nun die Emissionen aus der CFD-MKS-gekoppelten Berechnung von UST-IAG und UST-SWE, gegeben als Zeitreihen der Schnittkräfte am Fundament einerseits und als Zeitreihen der Schalldruckpegel an den 4218 äquidistanten Beobachtungspunkten auf dem Übergabezylinder andererseits. Deren räumliche Auflösung ist fein genug, um Frequenzen bis zu 10 Hz mit einer guten Wellenzahlauflösung zu analysieren. Sowohl für die akustische als auch für die mechanische Belastung betrug der Simulationszeitraum 41 Sekunden und die Abtastrate zwischen 50 und 100 Hz. Die Lastsimulation umfasst einen exemplarischen Zeitausschnitt eines normalen WEA-Betriebes bei einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s.

Anschließend wurden beide Zeitreihen mittels FFT konvertiert, und nicht verschwindende Mittelwerte (infolge konstanter Lasten) ebenso abgezogen wie die ersten 20 sec. zu Beginn der Zeitreihe (Artefakte der Lastaufbringung). Die dominierenden Frequenzen wurden sodann mit ihrer Amplitude in ihren jeweiligen Quellpunkten am Fundament und am Übergabezylinder als mittelwertfreie harmonische Quellsignale für die REM-Simulationen angesetzt. Die akustischen und elastischen Amplituden sind dabei entkoppelt, sodass ihre tatsächliche Phasenverschiebungen unberücksichtigt bleibt.

5.1.7 Propagationsberechnungen

Propagationssimulationen für die generischen WEA wurden von KIT-IBF für die drei Fälle LC2_FSC1 (Turm und Fundament starr), LC2_FSC3 (gesamte Struktur flexibel) und LC2_FSC3 (turbulente Anströmung) durchgeführt.

Aus den Emissionsberechnungen von UST-IAG ergaben sich bei starrer Struktur als dominierende Frequenzen die BDF 0,59 Hz und deren Vielfache, insbesondere 2,33 Hz, sowie 4,11 Hz und 8,18 Hz. Für jede Frequenz trat eine charakteristische Direktivität auf. Der maximale unbewertete Schalldruckpegel auf dem Übergabezylinder betrug 93 dB und wurde mit 0,59 Hz etwa zu beiden Seiten in der Rotorebene abgestrahlt. Bei höheren Frequenzen wechselte die akustische Richtwirkung in die Auf-/Abwindrichtung. Die Schwingungsfrequenzen 0,59 Hz und 2,93 Hz waren auch im mikroseismischen Quellfeld dominant. Bei diesen beiden Frequenzen überwiegt die Kraftkomponente in Anströmrichtung und das Kippmoment um eine dazu senkrechte horizontale Achse, während bei 4,09 Hz und 8,18 Hz um 90° verdrehte Kräfte und Kippmomente überwiegen. Die Scherkräfte F_x/F_y emittieren Longitudinalwellen parallel zur einwirkenden Kraft und in Querrichtung, während die Biegemomente M_x/M_y ein Wellenfeld mit einer deutlichen Dipol-Richtcharakteristik senkrecht zur Rotationsachse verursachen. Die durch die vertikale Bewegung der Windkraftanlage (vertikale Kraft F_z) abgestrahlten Wellen breiten sich gleichmäßig in alle Richtungen aus. Die Torsionskomponente M_z um die Turmachse war für alle Frequenzen nur sehr gering und wurde im Folgenden ignoriert.

Durch die Flexibilität des Turms tritt dessen erste Biegeeigenfrequenz bei 0,52 Hz in Erscheinung, durch die Nachgiebigkeit des Fundaments wird sie auf 0,32 Hz verschoben. Die

zuvor untersuchten Frequenzen 2,33 Hz, 4,11 Hz und 8,18 Hz bleiben als Vielfache der BDF aber ebenfalls dominant mit unterschiedlichen Belastungsamplituden. Auf die akustischen Emissionen der WEA hat die Flexibilität der Turm-Fundamentstruktur keinen Einfluss.

Die turbulente Anströmung führt zu unregelmäßigeren Lasteinwirkungen auf das Fundament und damit auch der akustischen Quelle und folglich zu einer größeren Anzahl von dominierenden Frequenzen. Allerdings bleiben die vier zuvor untersuchten Frequenzen immer noch dominant.

Aus der Abstrahlung der akustischen Quelle ergeben sich nicht nur primäre Schalldrücke, sondern über die Einkopplung an der Grenzfläche Boden/Luft auch sekundäre Vibrationen im Untergrund. Ebenso erzeugt die mikroseismische Propagation als sekundären Effekt akustische Geräusche mit wesentlich niedrigeren Schalldruckpegeln verglichen mit der direkten akustischen Propagation. Die Tatsache, dass die REM sowohl das akustische als auch das seismische Emissionsproblem als linear betrachtet, ermöglicht es, jedes Randwertproblem separat zu betrachten und die Ergebnisse zu überlagern. Maxima des Schalldrucks und der sekundären Bodenvibration sind gleichgerichtet. Diese Effekte ergeben sich für alle dominierende Frequenzen und bei allen Strukturmodellen gleichermaßen.

Für das Verschiebungsfeld der Bodenschwingungen ist bei den tiefen Frequenzen die mikroseismische Anregung des Turmkippmoments M_x/M_y mit seiner charakteristischen Dipolwirkung dominant. Der Abklingkoeffizient sinkt von $1/r^{1,8}$ bei 0,32 Hz mit wachsenden Frequenzen auf $1/r^{1,1}$ bei 4,11 Hz oder verallgemeinert von Koeffizienten um $1/r^2$ bei tiefen Frequenzen auf $1/r$ bei hohen. Bei 8,18 Hz überwiegt die Scherkraft F_x/F_y in der Wellenpropagation und führt zu einem radialsymmetrischen Abklingen mit $1/r$. Die akustischen Wellen in den Luftschichten klingen proportional zu $1/r^{0,7}$ ab.

Sekundäre Bodenvibrationen (bzw. Verschiebungsamplituden) aufgrund von akustischer Propagation sind an der Quelle um zwei Größenordnungen kleiner als die der direkten seismischen Emissionen. Durch die unterschiedlichen Abklingkoeffizienten ändert sich dieses Verhältnis aber mit zunehmendem Abstand von der Quelle, wodurch am Gebäude die primären und sekundären Vibrationsamplituden vergleichbar groß sein können. Sekundäre Geräusche aufgrund seismischer Propagation bleiben hingegen immer leiser als direkt in der Atmosphäre propagierte.

Außerhalb des Gebäudes in 500 m Abstand tritt für 2,93 Hz der höchste Schalldruckpegel auf, der sich überwiegend aus Primär- und nur marginal aus Sekundärschall zusammensetzt. Die fensterlose Gebäudestruktur führt zu einer erheblichen Dämpfung des akustischen Rauschens, was sich mit (ggf. sogar offenen) Türen und Fenstern anders darstellen könnte. Für turbulente Anströmung sind der maximale Schalldruck sowie die maximalen Verschiebungsamplituden leicht höher (maximal 30 %) als bei gleichförmiger Anströmung.

Bei Variation des Gebäudeabstands im Propagationsmodell zwischen 350 m und 1000 m nahmen mit wachsendem Abstand sowohl der Schalldruck (um 10 dB) als auch die sekundären Bodenvibrationen infolge akustischer Anregung (auf ca. 50 %) ab. Ähnlich ergab sich das Bild infolge seismischer Anregung. Für zwei der drei untersuchten Frequenzen war der sekundäre Schalldruck innerhalb des Gebäudes praktisch vernachlässigbar.

Der Einfluss der Hangneigung war hinsichtlich der akustischen Emissionen nicht von signifikanter Bedeutung. Bei allen Frequenzen ist nur ein leichter Anstieg des Schalldruckpegels mit zunehmendem Neigungswinkel zu beobachten. Dasselbe gilt für die

sekundären Verschiebungsamplituden, Auch für die Propagation mikroseismischer Emissionen spielt die Hangneigung nur eine geringe Rolle.

Im Rahmen der Variationen wurde auch die kreisförmige Fundamentplatte durch eine Gründung auf 8 Pfählen mit 60 cm Durchmesser ersetzt. Im Blick auf die dynamische Bauwerks-Baugrund-Kopplung wirkt sie wie eine kombinierte Pfahl-Plattengründung und wurde vereinfacht als monolithischer Block simuliert. Es zeigt sich, dass die Lastübertragung über die Pfähle dämpfend sowohl für die seismischen als auch für die sekundären akustischen Emissionen ist, aber weniger als man es erwarten würde. Gegenüber der Flachgründung nahmen die Vibrationsamplituden um 10 - 25 % ab, die sekundären Schalldruckamplituden um 5 – 15 %.

Schließlich wurde auch der Baugrundaufbau variiert: Anstelle des homogenen Sanduntergrunds wurde ein Felsuntergrund modelliert, dessen höhere Steifigkeit dem in Ingersheim vorliegenden Kalkstein entspricht. Im Falle des felsigen Untergrundes sind die primären und die sekundären Verschiebungsamplituden sowohl an der Quelle als auch am Gebäude um etwa zwei Größenordnungen kleiner als bei Sanduntergrund. Sekundäre Schalldruckpegel aufgrund seismischer Emissionen sind praktisch vernachlässigbar. Die direkten akustischen Emissionen werden hingegen nicht von der Art des Untergrunds beeinflusst und die Schalldruckamplituden sind identisch wie zuvor.

Wird der Felsuntergrund von einer 5 m dicken Sandschicht überlagert, sind die Verschiebungsamplituden nahe der WEA ähnlich hoch wie bei homogenem Sand. Mit zunehmendem Abstand von der Quelle führt die tiefere Felsschicht allerdings zu einem schnelleren geometrischen Abklingen der direkten seismischen Emissionen. In zwei weiteren Berechnungsfällen wurde die Mächtigkeit der Sandschicht (oberhalb des Fels) nicht mehr konstant angenommen, sondern variierte zwischen WEA und Gebäude linear zwischen 5 m und 15 m. Hierbei variierten die Amplituden noch deutlicher; die Unterschiede betragen bis zu 110 %, was den nicht zu vernachlässigenden Einfluß der Baugrundsichtung belegt.

Für die Simulation der Luft- und Körperschallpropagation der realen Referenz-WEA in Ingersheim musste das REM-Modell nochmals in mehrfacher Hinsicht modifiziert werden. Sowohl die ausgeführte Fundamentgeometrie wurde berücksichtigt als auch eine zum Ausgleich der unebenen Felsoberfläche eingebaute Kalkschotter-Ausgleichsschicht.. Zur realitätsnahen Abbildung des Untergrundaufbaus wurde Nacherkundungen durchgeführt, die eine weichen Lößlehm-Schicht mit in Abwind-Richtung zunehmender Dicke identifizierten. Geometrie und Materialparameter wurden entsprechend angepasst. Anstatt des Einraumgebäudes wurde eine in 400 m Entfernung bestehende Scheune (Mess-Standort 1) mit idealisierter Betonplatte auf Streifenfundamenten modelliert

Nach wie vor wurden die akustische und die seismische Wellenausbreitung als zwei getrennte dynamische Randwertprobleme im Frequenzbereich betrachtet und ihre Ergebnisse superponiert. Zugrunde gelegt wurde die Lastsimulation von UST-IAG für den 07.02.2019 zwischen 22:38 und 22:40. Die 10 dominantesten Frequenzen wurden ausgewertet. Die BDF und ihre ersten Vielfachen zeigten sich als dominierende Frequenzen, daneben aber auch 6 weitere dominierende Frequenzen. Sowohl für die Bodenverschiebungen als auch für den Schalldruck konnte man den charakteristischen Dipolcharakter der Wellenemission erkennen.

Die radiale Abstrahlung der seismischen Amplituden nahm von $1/r^{2,8}$ für Frequenzen um 1 Hz auf $1/r^{1,3}$ für Frequenzen um 10 Hz ab. Die Abnahme der Amplituden mit steigender Frequenz

wird zusätzlich durch die vorliegende Bodenschichtung verstärkt. Die Abnahme der akustischen Schalldrücke proportional zu etwa $1/r^{0.6}$ war praktisch unabhängig von der Frequenz. Die resultierenden Werte wurden später mit Messwerten von KIT-IBF (Scheune) und KIT-GPI (Freifeld) verglichen.

Insgesamt bestätigte das Ergebnis die Befunde bei der generischen WEA: Sekundäre Verschiebungsamplituden aufgrund der akustischen Emissionen waren in der unmittelbaren Nähe der WEA nahezu vernachlässigbar. Dies gilt jedoch nicht für größere Entfernungen von der WEA: In 400 m Entfernung (Scheune) waren die primären und die sekundären Vibrationsamplituden infolge der unterschiedlichen Abklingcharakteristiken bereits vergleichbar. Niederfrequente Geräusche werden hingegen praktisch nur durch direkte akustischen Propagation in der Atmosphäre verursacht. Der Schalldruckpegel infolge der sekundären seismischen Einwirkungen war nahezu vernachlässigbar.

5.2 Messungen

Messungen im Gelände wurden im Rahmen des Vorhabens an den beiden Windparkstandorten Ingersheim und Wilstedt im Wesentlichen von drei Projektpartnern durchgeführt: von UST-SWE als akustische Freifeldmessungen, von KIT-GPI als seismische Freifeldmessungen und von KIT-IBF als kombinierte akustische und seismische Messung in Gebäuden. Im Fokus stand dabei insbesondere der niederfrequente Bereich 1 – 150 Hz, der mit den Rechenmodellen auch prognostiziert werden konnte).

5.2.1 Akustische Messungen

UST-SWE widmete sich in AP B3.1 der Erprobung und Entwicklung neuer Verfahren zur Messung von tieffrequentem Schall. Die eingesetzte Schallmesstechnik bestand aus zwei 1/2 Zoll Freifeldmikrofonen der Firma G.R.A.S Typ 47AC mit einer Frequenzantwort von ± 3 dB bei 0,9 Hz bis 20 kHz, einer Bodenplatte und Windschirmen. Die Aufzeichnung erfolgte mit IMC-Cronosflex mit einem Sound/Audio-Modul mit 24 bit Auflösung und einer maximalen Abtastrate von 100 kHz über ein CANSAS-Modul. Um zeitgleich mit den akustischen Daten meteorologische Parameter zu erfassen, wurde am Messcontainer ein 10 m hoher Messmast mit Thermo/Hygro-Sensor, 3D Sonic-Anemometer und Barometer montiert.

Vergleichsweise erfolgten die Messungen auf einer schallharten Platte mit sekundärem Windschirm gemäß IEC 61400-11 [10] sowie in einer geländegleich eingegrabenen schallharten Kiste. Messungen im Windkanal zeigten, dass beide Messmethoden bis 150 Hz vergleichbare Ergebnisse zeigen, die Messung in der Kiste aber keine Vorteile bezüglich der Verminderung des Windrauschens bringt, und für höhere Frequenzen zunehmend von Eigenschwingungen der Kiste gestört werden.

Im Rahmen von AP B3.2 fanden drei Schallmesskampagnen statt, zwei in Ingersheim (Aug. 2018 und Febr. 2019) und eine in Wilstedt (Nov. 2018 – Jan. 2019). Bei der ersten Messkampagne in Ingersheim wurde die Schallmesstechnik in 140 m Entfernung südöstlich der WEA aufgebaut, bei der zweiten Kampagne 240 m südöstlich. Die zweite Kampagne war erforderlich geworden, da im Sommer 2018 keine geeigneten Windverhältnisse herrschten, die eine Validierung der Rechenmodelle erlaubt hätten und ein Vergleich Sommer-Winter angestrebt wurde. In Wilstedt wurden die Mikrofone in 237 m Entfernung östlich der Windenergieanlage Nr. 3 innerhalb des Windparks aufgebaut.

Um die von den WEA verursachten Geräusche identifizieren zu können, fanden während der Messkampagnen Abschaltungen im 2 Stunden-Takt für jeweils 20 Minuten statt. Während der 1. Messkampagne in Ingersheim erfolgten diese ganztägig, im Zuge der 2. und 3. Messkampagne nur noch im Nachzeitraum, weil die hohen Hintergrundgeräuschpegel tagsüber eine Auswertung nur nachts erlaubten. Für die Auswertung der Messergebnisse wurden mit den Projektpartnern des KIT-IBF und KIT-GPI geeignete Zeiträume abgestimmt, um Messergebnisse vergleichen zu können. Dies erfolgte anhand vorliegender Windgeschwindigkeiten und guter Datengrundlage.

Für die erste Messkampagne im August 2018 in Ingersheim wurden der 29.08.2018 mit Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe um 5 m/s und der 30.08.2018 mit Windgeschwindigkeiten von 10 m/s ausgewählt. In Spektrogrammdarstellungen sind im Zeitverlauf die Abschaltungen der WEA deutlich zu erkennen. Töne, die sowohl bei betriebener als auch stillstehender Anlage zu sehen sind, werden sehr wahrscheinlich nicht von der WEA verursacht. Dies betrifft z.B. die Netzfrequenz bei 50 Hz und höher Harmonische sowie ein breitbandiges Geräusch im Bereich von 60 Hz. Im Betrieb heben sich bei niedrigen Windgeschwindigkeiten einzelne Frequenzen deutlich vom Hintergrundgeräusch ab, insbesondere die BDF und ihre Höherharmonischen, sowie ebenfalls drehzahlabhängige Frequenzen zwischen 15 Hz und 120 Hz mit wiederkehrenden Vielfachen. Aufgrund von Drehzahlvariationen kann es dabei zu geringfügigen Variationen der Frequenzen kommen. Bei hohen Windgeschwindigkeiten sind keine Maxima im niederfrequenten Schallbereich erkennbar, was auf eine Maskierung der BDF zurückzuführen ist.

Auch bei den Messungen am 01.12.2018 in Wilstedt und am 10.02.2019 in Ingersheim hoben sich die höher Harmonischen der BDF vom Hintergrundgeräusch ab. Hier war ebenfalls ein drehzahlabhängiges Maximum oberhalb von 15 Hz zu sehen. Bei Darstellung unbewerteter Schalldruckpegel über die Frequenz ragen die WEA-induzierten niederfrequenten Geräusche um 10-15 dB, maximal ca. 20 dB, aus dem Hintergrundlärm heraus.

Die von KIT-IBF gemessenen Schalldruckpegel in Ingersheim liegen trotz des um den Faktor 1,5 größeren Abstands und entgegengesetzter Richtungen bei den BDF-Höherharmonischen zwischen 1,6 und 10 Hz in vergleichbarer Größenordnung (Differenz max. 5 dB), sind für höhere Frequenzen aber zunehmend stärker gedämpft. In Wilstedt waren die Messstandorte von KIT-IBF deutlich weiter vom Windpark entfernt (ca. 2 km von WEA 3 und ca. 1,3 km von den nächsten Anlagen), was zu einer deutlicheren Dämpfung der BDF-Höherharmonischen von 10 – 15 dB führte, interessanterweise aber stark frequenzabhängig und zwischen 10 und 20 Hz kaum ausgeprägt.

Sowohl in Ingersheim als auch in Wilstedt lagen die unbewerteten Schalldruckpegel im Frequenzbereich unter 100 Hz immer unterhalb der in DIN 45680 als menschliche Hörschwelle definierten Kurve, selbst bei den geringen Messabständen von der WEA unter 400 m. Dabei ist selbstverständlich zu beachten, dass die Hörschwelle nach DIN 45680 für Frequenzen unterhalb von 8 Hz abhängig von der Sensitivität der Menschen.

Für die zweite Messkampagne in Ingersheim wurde ein portables Schallpegelmessgerät der Firma Brüel & Kjaer des Typs 2250 um eine Infrashalloption erweitert. Damit konnten örtlich flexible Messungen durchgeführt werden, u.a. indem ein bestimmter Radius um die Anlage abgeschritten wurde. Schallpegel und Frequenzspektrum unterschieden sich dabei nur wenig.

Einzelne Messungen der Körperschallemission an Turm, Gondel und Blatt (AP C6.2) erfolgten durch den Anlagenhersteller.

5.2.2 Seismische Messungen

KIT-GPI konnte für die Erfassung von WEA-induzierten seismischen Signalen über 7 Breitbandsensoren (Trillium Compact Posthole 20 s) mit zugehörigen Datenerfassungsgeräten und notwendiger Break-out-Boxen (10 x DATA-CUBE3) verfügen, sowie darüber hinaus 3 weitere seismische Breitbandsensoren (Trillium Compact 120 s sowie mehrmals EDL Datenlogger und STS-2 Seismometer) aus dem Bestand des KABBA (KARlsruhe BroadBand Array) Gerätepools ausleihen. Die Funktionsweise der verwendeten Messtechnik wurde zu Projektbeginn, innerhalb der Projektlaufzeit und am Ende regelmäßig überprüft. Bei den Feldmessungen zwang ein erhöhtes Hintergrundrauschen bei hohen Windgeschwindigkeiten zu einem Vergraben der seismischen Sensoren.

Da die gemeinsamen Messungen der TremAc-Partner erst verzögert begannen, wurden seismologische Messkampagnen an zahlreichen Ausweich- und Vergleichsstandorten durchgeführt (AP C7.1, C8.1, C8.2, C8.3), um Erfahrungen mit den Messinstrumenten zu sammeln und Messdaten der Bodenbewegungen für verschiedene Untergrundarten zu erhalten. Entsprechende Lokationen waren:

- Forschungs-WEA (FWEA) der Firma QREON (Q82) von 2 MW und einer Nabenhöhe von 101 m, errichtet 2017 vom Fraunhofer Institut für chemische Technologie (ICT) in Pfinztal: Hier gab es die Möglichkeit, schon vor Baubeginn der FWEA seismische Referenzmessungen auf dem Gelände durchzuführen und dadurch die Erkenntnis zu gewinnen, dass die Leistungsdichte der Bodenbewegung, welche ein Maß für das seismische Rauschen am Standort der Station darstellt, sich nach dem Bau der FWEA um einen Faktor von etwa 10 signifikant erhöhte, auch durch Turmschwingungen ohne Rotation. Im Frequenzbereich 0,1-18 Hz ließen sich diskret angeregte Frequenzen detektieren, bei denen die Leistungsdichte um den Faktor 100 ansteigt. Des Weiteren wurde in Kooperation mit der Universität Leipzig ein Großexperiment (SMARTIE 1) durchgeführt, das in Ringmessungen keine eindeutige Vorzugsrichtung der Fundamentalschwingungen, sondern Überlagerungen von mehreren Schwingungsmustern nachwies. Durch den Vergleich von numerischen Simulationen des Turms (KIT-VAKA) konnte eine genaue Zuordnung der auftretenden Leistungsdichtepeaks in den Spektren zu Eigenmoden einzelner Bauteile erfolgen. Zur Validierung der Ergebnisse kamen zudem optische Messverfahren des Fraunhofer Instituts IOSB aus Ettlingen zum Einsatz.
- Drei verschiedene WEA auf dem „Energieberg Karlsruhe“, einer alten Mülldeponie mit 60 m Höhe: Insgesamt wurden jeweils acht seismische Messstationen entlang eines Profils mit einer Gesamtlänge von etwa 900 m zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten installiert. Bei diesem lockeren, künstlichen Baugrund ist auffällig, dass diskret angeregten Frequenzen bis auf wenige Ausnahmen bereits nach kurzer Distanz verschwinden.
- Mehrere Windparks mit unterschiedlicher WEA-Anzahl und -Dimension nahe Landau: Hier bestand die Möglichkeit, auch Bohrlochmessstationen in unterschiedlichen Tiefen zu nutzen. Der Vergleich mit den dazugehörigen Messdaten an der Erdoberfläche zeigt,

dass die seismischen Signale von WEA stärker mit der Tiefe gedämpft werden als mit der Distanz zur WEA, aber auch in 305 m Tiefe noch klar detektierbar sind.

- Vier WEA in Teuscheneck/Schwarzwald in etwa 9 km Abstand vom Black-Forest-Observatorium (BFO): Es wurden vier seismische Messstationen mit zunehmendem Abstand zur WEA installiert und festgestellt, dass WEA-induzierte Signale, insbesondere unterhalb von 2 Hz, bis zum BFO messbar sind, da sich im harten Untergrund (hier: Buntsandstein auf Granit) nur geringe Dämpfungen ergeben.

Bei den Messungen an der Einzel-WEA in Ingersheim (AP C7.1, C8.1, C8.2, C8.3) wurde mit Hilfe einer seismischen Profilmessung das Abklingverhalten der induzierten seismischen Signale untersucht. Insgesamt beobachtete man dabei, dass die induzierten Signale mit zunehmender Frequenz stärker gedämpft werden bzw. ihre Amplituden schneller mit der Distanz abklingen. Für die Anpassung des Abklingkoeffizienten wurden die ersten zwei Messpunkte aufgrund von Nahfeld-Effekten nicht berücksichtigt.

Der Abschaltzeitraum ist eindeutig im Frequenzspektrum der Bodenbewegung zu erkennen. Dann sind vor allem tieffrequente Eigenschwingungen der WEA zu erkennen, welche durch die Windlast auf die ruhende WEA-Struktur angeregt werden. Im Zeitbereich mit rotierender WEA ist der Einfluss der Blattrotation zu erkennen, was zu einer generellen Erhöhung der Bodenunruhe und der Anregung von weiteren diskreten Frequenzen führt, welche der BDF zugeordnet werden können.

Bei den Messungen in Wilstedt (AP C7.1, C8.1, C8.2, C8.3) wurde ein seismisches Messprofil installiert, welches den Windpark durchschneidet und bis zu dem Rand der Bebauung von Wilstedt verläuft. Dadurch konnte im Detail nachvollzogen werden, wie sich die induzierten seismischen Signale entlang des Profils verhalten und abschwächen. Zusätzlich wurden weitere Sensoren entlang eines Halbkreises installiert, um eine mögliche Abstrahlcharakteristik des Windparks zu untersuchen. Die gemessenen Abklingkoeffizienten unterscheiden sich von den in Ingersheim festgestellten, aber die Dämpfung nimmt auch hier mit der Frequenz zu.

Weiter fand ein spezieller Versuch statt, um mögliche Interferenzen zwischen den einzelnen WEA zu untersuchen. Dafür wurde der Windpark an einem windigen Tag im Dezember zuerst komplett abgeschaltet und dann schrittweise wieder in Betrieb genommen. Die Zunahme der Leistungsdichte mit zunehmender Anzahl und abnehmendem Abstand an rotierenden WEA war deutlich zu erkennen, insbesondere unterhalb von 10 Hz.

Verallgemeinert lassen sich folgende Aussagen aufgrund der seismischen Messungen im Freifeld treffen (AP C8.2, C8.3):

- WEA-induzierte Bodenbewegungen können mit seismischen Sensoren über eine große Distanz (>10 km) beobachtet werden. Durch Abschaltversuche konnten vor allem diskrete Frequenzpeaks unterhalb von 10 Hz den nahegelegenen WEA zweifelsfrei als Quelle zugeordnet werden. Die induzierten Signale schwächen sich aufgrund von Dämpfungseffekten des Untergrunds und geometrischer Ausbreitungsverluste mit der Distanz ab. Auch die Dimension und Anzahl der WEA hat für die Bodenschwinggeschwindigkeit eine hohe Bedeutung.
- Das Maß der Dämpfung hängt stark vom jeweiligen Untergrund ab. Die im Rahmen des Projektes an unterschiedlichen Standorten durchgeführten Messkampagnen (nicht

konsolidierte Sedimente, z.B. Oberrheingraben), Löß auf Kalkstein, z.B. Süddeutsche Schichtstufenland, Torf und Sand, z.B. Norddeutsche Tiefebene, Buntsandstein auf Granit, z.B. Mittelgebirge) zeigen, dass sich die induzierten Signale bei festeren Untergrundarten weniger abschwächen als bei weicheren Untergrundarten. Ein allgemeingültiges Abklinggesetz fehlt.

- Es konnte gezeigt werden, dass WEA-induzierte seismische Signale im Freifeld deutlich unterhalb der menschlichen Wahrnehmbarkeitsschwelle liegen. In etwa 1,5 km Entfernung zur Einzel-WEA in Ingersheim ist die Bodenschwinggeschwindigkeit bei unter Vollast laufender Anlage durchschnittlich um einen Faktor 100 kleiner als die Wahrnehmbarkeitsschwelle einer ruhenden Person (0,1 mm/s nach DIN 4150) und um einen Faktor 1000 - 3000 zu gering, um Bauwerksschäden auszulösen. Hierbei gilt es zu betonen, dass keine Frequenzbewertung der Signale laut DIN 4150 vorgenommen wurde, welche nochmals zu einer Reduktion der Bodenschwinggeschwindigkeit der induzierten seismischen Signale führen würde. Lediglich direkt auf dem Fundament der WEA wurden Bodenschwinggeschwindigkeiten von $v = 0,2 - 0,3$ mm/s erreicht. Daraus lässt sich schließen, dass Personen im Freifeld auch in unmittelbarer Umgebung zu einer WEA keine Beeinträchtigungen durch seismische Bodenbewegungen zu erwarten haben. Sensitive Messeinrichtungen (Mikroskope, Interferometer, Seismometer etc.) können je nach Entfernung zu einer WEA und deren Quellstärke aber beeinflusst werden.

5.2.3 Kombinierte Messungen in Gebäuden

Durch akustische Messungen im niederfrequenten Bereich (Frequenz $f < 150$ Hz), ergänzt durch seismische Messungen am selben Messort, sollten Schallemissionen und Schwingungen von Windenergieanlagen (WEA) sowie deren Charakteristiken im Zeit- und Frequenzbereich identifiziert werden. Die Messungen wurden bewusst im Inneren von Gebäuden durchgeführt, um mögliche Einflüsse von anderen Störquellen oder Raummoden beurteilen zu können.

Verwendet wurden dazu ein Mikrofon Typ Brüel & Kjær 4964, ein Mikrofon Typ PCB 378A07 sowie ein Schallpegelmesser Larson Davis SoundTrack LxT mit einem Frequenzbereich von 6,3 Hz – 20 kHz und analogem Pegelausgang. Um die Privatsphäre der Bewohner vollständig zu schützen, waren die Messungen mit den Niederfrequenz-Mikrofonen ausschließlich bei Abwesenheit der Bewohner bzw. in wenig genutzten Räumlichkeiten möglich. Aus dem aufgezeichneten Pegelwert des Schallpegelmessers SoundTrack LxT kann kein Zeitverlauf des Schalldrucks rekonstruiert werden, weshalb dieser dauerhaft eingesetzt werden konnte.

Bei den verwendeten Seismometern handelt es sich um Geräte der Typen Lennartz Electronic LE-1DV MkIII und LE-3Dlite MkIII mit einer Eigenfrequenz von 1 Hz, die Datenerfassung erfolgte mit einem DiGOS DATA-CUBE3 Type 2, welcher mit 400 Samples/s und 24 Bit Samplingtiefe aufzeichnet und über drei Kanäle verfügt. In der Messkonfiguration 1 wurden die vertikale Schwinggeschwindigkeit, der Schalldruckverlauf und der Zeitverlauf des Schalldruckpegels simultan registriert. Bei Konfiguration 2 wurden die Erschütterungen in drei Raumrichtungen aufgezeichnet. Die Speicherung der Daten erfolgte unter Berücksichtigung eines Echtzeitstempels (UTC-Zeit) via GPS.

Sofern es möglich war wurde das B&K- bzw. das PCB-Mikrofon und das Mikrofon des LxT-Schallpegelmessers für die vor Ort-Messungen etwa in Raummitte mit Hilfe von Stativen in

Bodennähe platziert. Der Erschütterungsaufnehmer LE-1D wurde direkt neben den Mikrofonstativen am selben Messort aufgestellt. Der LE-3D-Aufnehmer wurde, wenn möglich, im Bereich der Gebäudefundamente bzw. alternativ dazu am Rand des jeweiligen Raumes im Bereich der aufgehenden Wände installiert, um etwaige Unterschiede zum Schwingungsverhalten in Raummitte untersuchen zu können.

Für eine Erstauswertung wurden die aufgezeichneten Messgrößen als Zeitverläufe grafisch dargestellt und mit den 10 min-SCADA-Daten (Windgeschwindigkeit im Bereich der Nabenhöhe, Windrichtung, Drehzahl, Leistung) verglichen. Des Weiteren erfolgte eine Auswertung der Signale im Frequenzbereich mittels FFT (Abtastrate 400 Hz, Verwendung Hanning-Fenster, no overlap, no averaging). Dadurch wurden pro Tag je 8640 10-Sekunden-Spektren mit einer Frequenzauflösung von 0,1 Hz und einem Frequenzbereich bis 140 Hz berechnet. Alternativ zur Spektrogrammdarstellung wurden auch Amplitudenspektren für bestimmte Zeiträume dargestellt. Dazu wurden über einen Zeitraum von 10 min einzelne, zuvor mit FFT berechnete 10-Sekunden-Spektren ausgewählt, gemittelt und über der Frequenz aufgetragen.

Im Bereich der WEA Ingersheim wurden Messungen an zwei unterschiedlichen Standorten durchgeführt (AP C6.1, C7.2): Bei Standort 1 handelt es sich um ein ehemals landwirtschaftlich genutztes Gebäude in 400 m Abstand, bei Standort 2 um ein zweigeschossiges Einfamilienhaus ca. 2,4 km zur WEA mit Unterkellerung in Massivbauweise bzw. um die zugehörige alleinstehende Garage. Die Topologie im direkten Umfeld von Standort 1 ist flach und durch Ackerfläche bestimmt, Standort 2 liegt in einer Tallage ca. 100 m tiefer als die durch einen Wald nicht einsehbare WEA.

Betrachtet wurde an Standort 1 vor allem der 29.08.2018, da an diesem Tag ab 16 Uhr eine über mehrere Stunden gleichbleibende Anströmung aus Westen mit mittleren Windgeschwindigkeiten zwischen 5 m/s und 10 m/s vorlag. Während die Schalldrücke durch einen Defekt nicht korrekt aufgezeichnet wurden, waren im Spektrogramm der vertikalen Schwinggeschwindigkeit die Abschaltungen deutlich sichtbar. Unterhalb 20 Hz waren mehrere deutliche Signalspitzen (Peaks) vorhanden, die bei Stillstand entfallen.

Ein weiterer Betrachtungszeitraum am 10.02.2019 wurde ausgewählt, da in den Nachtstunden eine vergleichsweise gleichförmige Anströmung aus südlicher Richtung mit 6-8 m/s und im weiteren Tagesverlauf in Folge von Windgeschwindigkeiten über 15 m/s das Drehzahlmaximum der Anlage erreicht wurde. Schwingungsamplituden und Schalldruckpegel steigen analog zur Windgeschwindigkeit und den daraus resultierenden Umgebungsgeräuschen an. Im Spektrogramm der Erschütterungen und des Schalldrucks waren besonders Frequenzanteile zwischen 1 Hz und 20 Hz auszumachen, die auf eine zugrunde liegende BDF hinweisen, ergänzt durch höherfrequente Anteile zwischen 20 Hz und 120 Hz. Es zeigt sich dabei eine gute Übereinstimmung zwischen seismischen und akustischen Signalen, was die Frequenzinhalte betrifft. Im Falle der Erschütterungen ergab sich insgesamt ein breiteres Frequenzband, im Luftschall traten sehr schmalbandige Frequenzanteile auf, charakteristisch für den Betrieb einer Windenergieanlage.

Die Untersuchung des 23.02.2019 mit schwankenden Windgeschwindigkeiten zwischen 5 m/s und 10 m/s war motiviert durch Anwohnerbeschwerden. An Standort 1 konnten sowohl in den Erschütterungen als auch im Luftschall verschiedene Frequenzanteile identifiziert werden, welche unter anderem den Vielfachen der BDF zugeordnet werden können, aber auch Signale um ca. 100 Hz umfassen, die der WEA zuzuordnen sind. Rückschlüsse auf eventuelle

Belästigungsursachen gab es jedoch nicht. An Standort 2 waren die Abschaltzeiten weder im Schallpegel noch in der Seismik erkennbar. Die Erschütterungen zeigten jedoch eine Grundfrequenz von etwa 10,3 Hz sowie etliche Vielfache über den gesamten Frequenzbereich hinweg, die nicht auf die WEA zurückgeführt werden können.

Am 01.03.2019 fanden bei konstanten Windgeschwindigkeit < 10 m/s Messungen an beiden Standorten statt. Die Messdaten an Standort 1 weisen nur in begrenztem Maße sehr hohe Ausschläge auf, was auf wenig turbulente Windbedingungen und geringfügige Störungen durch sonstige äußere Einflüsse (Verkehr, o.ä.) hinweist. An Standort 1 traten die höchsten Vibrationsamplituden zwischen 5 Hz und 20 Hz sowie zwischen 50 Hz und 120 Hz auf. An Standort 2 waren wiederum in den akustischen Zeitsignalen keine Stillstandszeiten erkennbar. In einem einzigen 10 min-Zeitraum des späten Abends waren die an Standort 1 vorherrschenden Vielfachen der BPF auch an Standort 2 messtechnisch nachweisbar.

Am Windpark Wilstedt (AP C6.1, C7.2) befand sich Standort 1 in einem zweigeschossigen Einfamilienhaus in Massivbauweise, welches teilweise unterkellert ist und einen minimalen Abstand zum Windpark von 1,56 km aufweist. Am Standort 2 mit einem Abstand von ca. 1,64 km zum Windpark wurde die Messtechnik innerhalb eines freistehenden, ehemaligen Pferdestalls aufgebaut. Die Messzeiträume beliefen sich auf 9 Tage am Standort 1 und 33 Tage am Standort 2. Im überwiegenden Teil dieser Zeiträume erfolgten nachts geplante Abschaltungen aller 9 baugleichen WEA.

Der Betrachtungszeitraum 01.12.2018 steht exemplarisch für mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 5 m/s und 10 m/s und nur geringfügig variierender Windrichtung. Der Schalldruckpegel an Standort 1 lag im Tagesmittel bei etwas unter 60 dB(Z). Abschaltungen waren in Schwinggeschwindigkeit und Schalldruckpegel erkennbar, während der Schalldruck unverändert blieb. Dies deutet daraufhin, dass durch Umgebungsgeräusche (Bewuchs, etc.) verstärkt niederfrequente Schallanteile durch den Wind erzeugt und übertragen werden oder andere Schallquellen vorhanden sind. In den Erschütterungen sind vorwiegend schmalbandige Anteile beim Vielfachen der BDF dem Betrieb der WEA zuzuordnen, ebenso im Schalldruck, der aber auch Anteile im Bereich 120 Hz enthält.

Am Standort 2 wurde in der Nacht des 25.12.2018 bei Windgeschwindigkeiten von 5 m/s bis 10 m/s ein besonders ruhiges Umfeld erwartet. Die gemessenen Erschütterungen und Schalldrücke zeigen die Abschaltzeiträume als Reduktion der Intensität im gesamten Spektrum klar an. Der Schalldruckpegel (Summenpegel, 6 Hz - 20 kHz) reduziert sich dabei um ca. 8 dB(Z). Kurzzeitig wiederkehrende Signalanteile aus unbekanntem, anderen Erschütterungsquellen (z. B. bei 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz) erschwerten die Interpretation. Eine Besonderheit im Spektrogramm des Schalldrucks war ein lokales Minimum der spektralen Amplituden im Bereich zwischen 12 Hz und 20 Hz unabhängig vom Betrieb des Windparks.

Folgende Verallgemeinerungen und Schlussfolgerungen können aus den Messungen an Gebäuden (AP C6.1, C7.2) gezogen werden:

- Hochauflösende Messgeräte können unter geeigneten Bedingungen seismische und akustische Emissionen bis zu einer Entfernung von mindestens 2,5 km zu einer Windenergieanlage oder einem Windpark auch in Gebäuden registrieren. Sowohl bei den Erschütterungen als auch im Luftschall waren vor allem niederfrequente Anteile unter 20 Hz feststellbar. Auf WEA zurückzuführen waren insbesondere Emissionen mit einer relativ eindeutigen Frequenzcharakteristik, welche sich hauptsächlich infolge des

Durchgangs der Rotorblätter am Turm ergibt (Vielfache der BDF). Drehzahlunabhängige tieffrequente Signale können von Turmschwingungen verursacht werden. Signalanteile mit höheren Frequenzen bis 120 Hz hatten im Vergleich zu Anteilen unterhalb 20 Hz deutlich geringere Intensitäten. Eine Generalisierung dieser Befunde ohne Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen und konkreter Pegelbewertungen kann leicht zu Fehlinterpretationen führen und verbietet sich deshalb.

- Um akustische Emissionen eindeutig dem Betrieb von WEA zuzuordnen, bedarf es besonderer Windbedingungen und eines niedrigen Hintergrundrauschens aufgrund weiterer Geräuschquellen. Sofern diese Voraussetzungen gegeben waren, war eine Verstärkung des Schalldruckpegels infolge des Betriebs einer WEA immer messbar. Mit wachsendem Abstand nehmen die Schalldrücke ab, wobei dieses Abklingen im betrachteten Bereich frequenzabhängig und bei einigen Frequenzen nur schwach ausgeprägt ist. Dadurch ist erklärbar, dass in Gebäuden in 1,5 km Entfernung von einem Windpark mit 9 WEA immer noch ähnlich hohe Schalldrücke auftreten können wie in nur 0,4 km Entfernung zu einer Einzel-WEA. Es wäre allerdings falsch, die Messbarkeit gleichzusetzen mit Hörbarkeit, denn die dominierenden Amplituden bei WEA-typischen Geräuschen sind sehr tieffrequent. Schalldruckpegel oberhalb der Wahrnehmungsgrenze wurden im gesamten Frequenzbereich bis 100 Hz weder bei einzelnen Signalanteilen noch in Summe gemessen..
- Die gemessenen Bodenschwinggeschwindigkeiten wiesen in allen Fällen (Abstand von 0,4 km bis 2,4 km zur WEA) Amplituden auf, welche um ein Vielfaches unterhalb der Spürbarkeitsgrenze des Menschen liegen. Eine nennenswerte Verstärkung oder Abminderung der aufgezeichneten Amplituden infolge einer Anregung der Gebäudestruktur wurde nicht beobachtet. Die Richtungskomponenten sind in den Amplituden vergleichbar. Hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit von WEA-Emissionen sind Erschütterungen auch im Zusammenspiel mit Luftschall für Anwohner nicht relevant (im Unterschied etwa zu seismischen Beobachtungsstationen).
- Aussagekräftige Messergebnisse wurden besonders bei stabiler Luftschichtung, mittleren Windgeschwindigkeit unter 10 m/s und gleichbleibender Windrichtung erhalten. Abschaltungen der WEA waren für eine belastbare Beurteilung unerlässlich, aber im Unterschied zum Schalldruck zeigten nur der Schalldruckpegel und die seismischen Messungen den Stillstand verlässlich an.

Weiter hat die Auswertung der akustischen Messdaten ergeben, dass eine Amplitudenmodulation (AM) der Luftschallemissionen in Form einer Überlagerung höherfrequenter ($f > 50$ Hz) mit niederfrequenten Anteilen ($f < 10$ Hz) in den zeitvarianten Spektren nicht festgestellt werden konnte.

5.3 Befragungen

Befragt wurden Anwohner der WEA Ingersheim und des Windparks Wilstedt. Für die Wilstedter war es die dritte Befragung durch die MLU innerhalb von 6 Jahren (nach 2012 und 2014). Um die Verallgemeinerbarkeit der Befunde zu prüfen, wurden die Befragungsdaten mit den Daten einer Referenzstichprobe aus Anwohnern/innen von 13 deutschen und sieben schweizerischen Windparks verglichen.

In Ingersheim konnten von 765 schriftlich informierten Haushalten 130 Personen aus sechs umliegenden Ortschaften für eine umweltsychologische Befragung gewonnen werden, in Wilstedt aus 400 angefragten Haushalten ebenfalls 130 Personen aus vier Ortschaften.

Im Rahmen der umweltsychologischen Studie wurde von MLU zur Akzeptanz die Einstellung zur Windenergie im Allgemeinen, zu den lokalen WEA, Gefühle gegenüber den WEA, wahrgenommene Vor- und Nachteile der WEA, Interesse und Belastung durch den Planungs- und Bauprozess sowie das Vertrauen in die Akteure erfragt. Fragen zur Stresswirkung betrafen u. a. die Geräuschbelästigung von WEA und zu Vergleichszwecken auch zum Verkehr, durch WEA-Geräusche ausgelöste psychische und körperliche Symptome, kognitive Bewältigungsstrategien und Verhaltensmaßnahmen.

Die Akzeptanz fiel in Ingersheim und Wilstedt positiv aus, in Ingersheim insgesamt etwas stärker als in Wilstedt. Dafür sprechen die positiveren Gefühle, relativ mehr aktive Befürworter/innen, die WEA als charakteristisches Merkmal der Gemeinde, der stärkere Beitrag zum Klimaschutz, stärkeres Interesse an der Planung sowie die Meinung, den eigenen und den Interessen der Gemeinde stärker gerecht geworden zu sein. In Wilstedt gab es mehr aktive Gegner/innen und eine stärkere Belastung durch den Planungsprozess.

Ein geringer Prozentsatz der Befragten in Ingersheim (6,2 %) und Wilstedt (4,6 %) erwies sich als stark belästigt durch WEA-Geräusche (mindestens mittelstarke Belästigung und mindestens ein Symptom einmal pro Monat, zurückgeführt auf WEA-Geräusche). Stark Belästigte wohnten durchschnittlich 300 m näher an den WEA als nicht stark Belästigte. Bei ihnen ließ sich ein klares Muster einer Stressreaktion feststellen (negative Einstellungen und Bewertung der Geräuschquelle, typische Symptome einer Lärmwirkung, ungünstigere kognitive Bewältigung, bewusste aktive Minderungsmaßnahmen).

Unter den durch WEA-Geräusche stark Belästigten gab es eine Untergruppe von Anwohnern mit tieffrequenten Schallsymptomen (Druckgefühle im Ohr, Druck in der Brust, Druck in oder Reizung der Nebenhöhlen, Schwindel, allgemeine Druckgefühle, Vibrationen im Körper, Vibrationen von Objekten. Dieser Personenkreis war besonders stark durch WEA-Wirkungen belastet, im Schnitt um 12 Jahre älter als die stark Belästigten ohne solche Symptome und bereits seit der Bauphase sehr negativ gegenüber den lokalen WEA eingestellt.

Wird als Indikator für die Akzeptanz die Einstellung zu den lokalen WEA herangezogen, zeigt sich in beiden Stichproben ein vergleichbares Korrelationsmuster: Je positiver die Einstellung zur Windkraft im Allgemeinen und der Eindruck der Ernstnahme eigener Interessen bei der Planung war, desto positiver war die Einstellung zu lokalen WEA. Je stärker sich die Befragten durch verschiedene Emissionen belästigt bzw. durch die Planungs- und Bauphase belastet fühlten, desto weniger akzeptierten sie die lokalen WEA. Bei der Referenzstichprobe gab es zwei weitere bedeutsame Korrelationen: Mit steigender Lärmempfindlichkeit und Anzahl vom Grundstück aus sichtbarer WEA verminderte sich die Akzeptanz.

Für weitere Gesundheits- bzw. soziodemografische Merkmale waren hingegen keine bedeutsamen Zusammenhänge zur Einstellung nachweisbar, insbesondere auch nicht zwischen Belästigungsgrad und WEA-Abstand bzw. dem (nach Interimsverfahren) errechneten abstandsgemäßen Schalldruckpegel.

In der parallel durchgeführten umweltmedizinischen Befragung durch UBI wurde untersucht, ob Häufungen von subjektiv beobachteten Beschwerden und Symptomen feststellbar sind, die ggf. durch Immissionen der WEA verursacht werden und mögliche Ursachen für eine Vulnerabilität bei Betroffenen analysiert.. Diese Umfrage erfolgte schriftlich, wobei aus Ingersheim 108 und aus Wilstedt 62 Fragebögen zurückgesandt wurden.

Analysiert wurde der allgemeine Gesundheitszustand der Befragten, aktuelle körperliche Beschwerden, der Beschwerdedruck (Gießener Beschwerdebogen GBB-24), subjektive, mit der WEA-assoziierte Gesundheitsbeschwerden, die Schlafqualität der letzten 4 Wochen (Pittsburgh Schlafqualitätsindex -PSQI), die somatorforme (Mit-)Bedingtheit von Körperbeschwerden (Somatic Symptoms Experiences Questionnaire -SSEQ), die gesundheitsbezogene Lebensqualität (SF-12 Health Survey) und die Lärmempfindlichkeit (Weinstein-Lärmempfindlichkeitsskala). Ergänzend wurden Angaben zu (tieffrequenten) Geräuschquellen im Wohnumfeld, zur Belästigung durch Umwelteinflüsse und Lärm im Wohnumfeld sowie zur Zufriedenheit mit der Wohnsituation erhoben.

Insgesamt 12 Personen führten diverse Gesundheitsbeschwerden direkt auf die WEA zurück (Beschwerdeträger/innen) und sieben Anwohner/innen fühlten sich durch die WEA *ziemlich* oder *sehr* belästigt. Die am häufigsten genannten Symptome waren *Schlafstörungen* und *Druckempfinden* sowie *Unruhezustände* und *Kopfschmerzen*. Bei den genannten Symptomen handelt es sich prinzipiell um unspezifische Beschwerden.

Schlafstörungen zählen zu den am häufigsten genannten WEA-assoziierten Beschwerden. Die Analyse der Schlafqualität mittels PSQI, ergab bei 28 % der Befragten einen Summencore, der auf Schlafstörungen in den letzten 4 Wochen hinweist. Darunter waren sieben Beschwerdeträger/innen. Von vier Beschwerdeträgern/innen, die ihre subjektiven Schlafstörungen auf den Betrieb der WEA zurück führen, erreichten nur drei einen PSQI-Summenscore der auf Schlafstörungen hinweist. Mittels der Weinstein-Lärmempfindlichkeitsskala konnten keine Personen identifiziert werden, die eine besondere Lärmempfindlichkeit besitzen. Hinweise auf eine verminderte gesundheitsbezogene Lebensqualität bzw. subjektive Gesundheit (aus der SF-12-Analyse) ergaben sich im Vergleich zu den anderen befragten Anwohnern/innen der Stichprobe weder in Ingersheim noch in Wilstedt.

Grundsätzlich konnte im Rahmen der umweltmedizinischen Befragung festgestellt werden, dass sich an beiden Standorten jeweils nur ein kleiner Teil von Anwohnern/innen gesundheitlich durch die WEA belastet fühlt und unter eher unspezifischen Symptomen leidet. Es lässt sich anhand der Befragungsdaten allein nicht eindeutig differenzieren, ob die Beschwerden von den Betroffenen explizit auf eine Belastung durch tieffrequenten Schall zurückgeführt werden oder, ob sie eher im Zusammenhang mit einer allgemeinen Geräuschbelästigung durch die WEA stehen. Sowohl in der umweltpsychologischen als auch der umweltmedizinischen Studie ergab sich übereinstimmend, dass Verkehrslärm ein wesentlich höhere Belästigung darstellt als die WEA.

Bei jeweils zwei Haushalten in Ingersheim und in Wilstedt führte KIT-IBF akustische und seismische Messungen durch. Dabei wurden WEA-assoziierte tieffrequente Signale bis einschließlich 120 Hz gemessen. Die in den Gebäuden gemessenen Schalldruckpegel lagen aber deutlich unterhalb der menschlichen Hörschwelle (DIN 45680). Es gibt daher keine Hinweise darauf, dass explizit von den tieffrequenten Schallkomponenten eine belästigende Wirkung auf die Anwohner/innen ausgeht. Ob diese tieffrequenten Schallkomponenten ggf. über extra-aurale Wirkung zu den gesundheitlichen Beschwerden bei den Betroffenen beitragen, konnte nicht beantwortet werden. WEA-assoziierte Erschütterungen oder Vibrationen in den (Wohn-) Gebäuden von Beschwerdeträgern/innen waren ebenfalls nicht spürbar.

Da es im vorgegebenen Zeitrahmen des TremAc-Vorhabens nicht möglich war bei allen gesundheitlich betroffenen Anwohnern/innen Immissionsmessungen im Wohnumfeld

durchzuführen, standen für die meisten der identifizierten Beschwerdeträgern/innen nach Abschluss des Projektes keine Daten zur Verfügung, um den möglichen Zusammenhang zwischen den beschriebenen Symptomen und der lokalen Exposition durch tieffrequente Schallimmissionen auf Plausibilität zu prüfen.

5.4 Schlussfolgerungen

5.4.1 Ergebniszusammenfassung

Aus den gekoppelten CFD-MKS-Simulationen ergab sich, dass die Blatt-Turm Interaktion einen starken Einfluss auf Turmfußlasten und tieffrequente akustische Emissionen hat. Die Spektren der Simulationen mit Turm waren im niedrigen Frequenzbereich von den Harmonischen der BDF dominiert, während ohne Turm nur sehr schwache periodische Effekte auftraten. Die Abstrahlung des Rotors zeigt eine starke Direktivität in axiale Richtung, während der Turm fast gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlt.

Mit elastischem Turm, Rotor und Fundament verändern sich die Turmfußlasten deutlich und die Spektren werden von den ersten Biegeeigenfrequenzen der WEA dominiert. Die gescherte turbulente Anströmung führt hauptsächlich zu stochastischen Lastschwankungen an den Rotorblättern, was sich in einer breitbandigen Anhebung der Amplituden der tieffrequenten Emissionen zeigt. Die Prominenz der Harmonischen der Blattdurchgangsfrequenz reduziert sich dadurch deutlich und in den Spektren der Turmfußlasten sind Eigenfrequenzen der WEA deutlicher zu sehen. Aufgrund der Direktivität der Abstrahlung des Rotors wirkt sich die Turbulenz in den Geräuschemissionen in Windrichtung wesentlich stärker aus als querab.

Wie detailliert ein Turmmodell sein muss, sollte für Frequenzen über 15 Hz anhand der Fragestellung ermittelt werden. Während für die Berechnung der Turmfußlasten der WEA die Fundamentstruktur vernachlässigt werden kann, spielt bei Betrachtung dynamischen Fundament-Baugrund-Kopplung auch die Wahl des Fundamentes eine große Rolle. Während der qualitative Verlauf der Schwingungspropagation unabhängig vom Bodentyp ist, liegen die am Fundament in den Baugrund eingekoppelten Schwingungsamplituden auf Fels zwei Größenordnungen unter den Amplituden bei Lockergestein.

Betreffs der Zuordnung von Emission und Immission hat sich die These bestätigt, dass die Wellenfelder aus akustischen und mikroseismischen Quellen entlang ihres Propagationspfades interagieren. Insbesondere im niederfrequenten Bereich kommt es zu jeweils „sekundären“ Schallemissionen und Bodenerschütterungen. Diese sind zwar in der Magnitude den primären Wirkungen zumeist untergeordnet. Die relativen Anteile primärer und sekundärer Wirkungen verschieben sich aber entlang des Ausbreitungspfades infolge unterschiedlicher Abklingkoeffizienten, und können am Ort des Empfängers dieselbe Größenordnung erreichen.

Werden die seismischen Schwingungen für sich allein betrachtet, hängt ihre Propagation stark vom Baugrundaufbau ab, und zwar über den unmittelbaren WEA-Standort hinaus entlang des gesamten Propagationspfades. Generell werden in kompressiblem Boden Schwingungen rascher gedämpft als im Fels. Gleichwohl können sie wegen höherer Anfangswerte an der WEA auch in mehreren km Entfernung noch messbar sein. Weder die Simulationsergebnisse noch die durchgeführten Messungen lassen erwarten, dass Bodenerschütterungen im Umfeld von WEA Amplituden erreichen, die für den Menschen spürbar sind, geschweige denn für Gebäude schädlich sein können.

Die in den gängigen Regelwerken wie TA Lärm verwendeten Gesetzmäßigkeiten für die Luftschallausbreitung, die im Wesentlichen eine frequenzunabhängige Abnahme mit $1/r$ prognostizieren, gelten offenbar nicht für akustische Emissionen unter 20 Hz, und erst recht nicht für mikroseismische Emissionen. Vielmehr spielt hier eine Rolle, dass bezüglich tiefer Frequenzen und hoher WEA mit niedrigen Drehzahlen im Abstandsbereich von ca. 0,5 - 1 km bereits Nahfeldeffekte dominieren können.

Messbar sind auch akustische Emissionen im tieffrequenten Bereich bis in mehrere km Entfernung. Allerdings heben sie sich aus dem Hintergrundrauschen nur bei gleichmäßigen Anströmbedingungen, mittleren Windgeschwindigkeiten und gleichmäßiger Luftschichtung heraus. Bei Starkwind werden sie zumeist maskiert. Geräuschbelästigungen durch andere technische Quellen werden besonders bei einer kritischen Einstellung gern missgedeutet und zu Unrecht WEA angelastet. Eine eindeutige Identifikation der Ursache bedeutet jedoch fast immer einen hohen Messaufwand.

Es besteht insbesondere im Frequenzbereich 20 – 150 Hz Bedarf nach weiteren Untersuchungen insbesondere der akustischen Wirkungen. Zwar bieten die verwendeten „high fidelity“ Modellierungs- und Simulationsverfahren neue Chancen, die Entstehung von Emissionen sehr detailgenau zu erklären und ggf. auch bereits an der Quelle zu reduzieren. Hochgenaue numerische Simulationen haben aber alle den Nachteil, dass die numerischen Möglichkeiten den abbildbaren Frequenzbereich nach oben begrenzen, derzeit auf maximal 20 - 25 Hz. Für die wesentlichen seismischen Emissionen scheint dies auch ausreichend, nicht jedoch für den bereits hörbaren akustischen Bereich.

Die umweltmedizinische Befragung an zwei Standorten hat ergeben, dass offensichtlich nur eine kleine Anzahl von Anwohnern/innen WEA-assoziierte Gesundheitsbeschwerden entwickelt. Bei den betroffenen Personen konnte eine Häufung von Symptomen erfasst werden, die subjektiv auf den WEA-Betrieb zurückgeführt wurden. Allerdings handelt es sich bei den Symptomen generell um unspezifische Beschwerden, die eine Vielzahl von auslösenden Ursachen haben können. Aufgrund der kleinen Fallzahl gesundheitlich betroffener Anwohnern/innen und fehlender ortsspezifischer Immissionsmessungen war eine zu verallgemeinernde Einschätzung der gesundheitlichen Risiken für Anwohner/innen, die mit tieffrequenten Schallimmissionen von WEA im Zusammenhang stehen, an dieser Stelle nicht abschließend möglich. Die Ergebnisse der umweltmedizinischen Befragung verdeutlichen erneut, dass subjektive WEA-assoziierte gesundheitliche Beschwerden, aufgrund des komplexen Zusammenwirkens zahlreicher potentieller Einflussfaktoren, sehr differenziert betrachtet werden müssen. Die Betrachtung und der Vergleich von Gesundheitsparametern allein erlaubt weder zuverlässige Rückschlüsse auf die Ursachen einer Vulnerabilität noch auf mögliche Kausalitäten. Die umweltpsychologische Studie zeigte, dass nur relativ wenige Anwohner/innen durch WEA-Geräusche stark belästigt sind. Diese fühlen sich aber durch WEA-Geräusche desto belästigter, je stärker sie sich in der Planungs- und Bauphase belastet fühlen und je geringer sie ihre Interessen in der Planungsphase ernstgenommen sahen. Eine klare Korrelation zwischen WEA-Abstand oder messbaren Immissionen und Belästigungsgrad fehlt. Die Untersuchungen in Wilstedt waren als Verlaufsstudie über drei Zeitpunkte einzigartig. Es konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass sich anfängliche Stresseffekte durch Partizipation im weiteren Sinne (Ansprache der Anwohner/innen als lokale Experten/innen, Eingehen auf die Geräuschbeschwerden mit anschließender Nachrüstung von Geräuschminderungsmaßnahmen) deutlich abschwächen ließen.

5.4.2 Vergleichende Auswertung

Die Ergebnisse der Propagationsberechnungen von KIT-IBF für den ausgewählten Zeitausschnitt der realen Referenz-WEA wurden mit den verfügbaren Messergebnissen direkt verglichen. Da hierbei die Ergebnisse für eine Auswahl dominierender diskreter Einzelfrequenzen durch einen IFFT-Algorithmus aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich rücktransformiert werden müssen, gehen Signalanteile verloren und die Amplituden des Schalldruckes sowie der vertikalen Schwingungskomponente werden tendenziell unterschätzt.

Aus der numerischen Lösung ergibt sich etwa das Doppelte der tatsächlich gemessenen Schalldruckamplitude. Diese Abweichung entspricht einer Schalldruckpegeldifferenz von weniger als 10 dB. Qualitativ stimmen die Ergebnisse jedoch überein: Sowohl bei den Simulations- als auch bei den Messergebnissen gibt es eine Abnahme der Schalldruckamplitude mit der Zunahme der Frequenz. Der Unterschied im Schalldruckpegel beträgt für alle dominierenden Frequenzen weniger als 10 dB.

Auch die Amplituden der Bodenvibration stimmen an den beiden KIT-GPI-Messpunkten in der unmittelbaren Nähe der WEA gut überein. An den anderen acht kreisförmig um die WEA liegenden Messpunkten werden die Amplituden bei der Approximation der numerischen Lösung leicht unterschätzt. Die größte Abweichung wird an einem Punkt beobachtet, wo die gemessenen seismischen Amplituden etwa das Vierfache der berechneten betragen. Allerdings ist die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Ergebnissen zufriedenstellend, besonders, wenn berücksichtigt wird, wie stark die Ergebnisse vom Baugrundaufbau beeinflusst werden können.

Aus der guten Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den gemessenen seismischen Beobachtungen lässt sich schließen, dass seismische Messungen generell für die Validierung von Simulationen von WEA geeignet sind. Insbesondere konnten in den seismischen Messungen identifizierte Frequenzen unterschiedlichen Bauteilen der WEA und deren Eigenmoden zugeordnet werden.

Keine Korrelation zeigte sich hingegen bei der Prüfung des Zusammenhangs zwischen Geräuschbelästigung und Abstand der Wohnung von den WEA. Dieser Befund steht im Einklang von früheren Untersuchungen der MLU und mehreren internationalen Studien. Das Ausmaß der Stressbelastung durch WEA-Geräusche hängt hingegen stark mit den Voreinstellungen, der Belästigung durch das veränderte Landschaftsbild und den erlebten Belastungen in der Planungs- und Bauphase zusammen, nicht aber mit Stressbelastungen durch andere negative persönliche Ereignisse.

5.4.3 Optimierungspotential

Bei den Beteiligten herrscht Übereinstimmung, dass Optimierungsansätze für WEA-Komponenten (AP D2) bei der Quelle einsetzen müssen: Hierfür bieten insbesondere Vorschläge des Projektpartners MEG im Bereich der Triebstranglagerung und Getriebeausbildung (bei Getriebe-WEA) zahlreiche Anregungen.

Vorschläge zum Design von Rotorblättern wurden im Rahmen von TremAc nicht abgeleitet. Aus der großen Bedeutung der Blatt-Turm-Interaktion für Emissionen, insbesondere bei hoher Blattflexibilität und geringem Abstand von Blattspitze und Turm, dürften sich aber Ansätze für mögliche Optimierungen ergeben. Hierzu zählt auch eine zyklische Pitchregelung der Blätter bei der Turmpassage, wie sie bei einigen Herstellern bereits entwickelt wird. Die

Parameterstudien von KIT-VAKA zu Gründung und Modifikation der Turmquerschnitte (z.B. Anteile von Beton und Stahl in dem Hybridturm) zeigten die Möglichkeit der gezielten Beeinflussung einzelner Frequenzen. Da dies nur in einer individuellen Auslegung anzuwenden ist werden hierzu keine allgemeingültigen Aussagen getroffen. Beim Turmdesign zeigt der Einsatz von Schwingungstilgern (gezielte Zusatzmassen zwischen 2 und 10 Tonnen, angebracht in bestimmten Turmhöhen) sowohl in einfachen für die Auslegung interessanten harmonischen Analysen als auch in transienten Mehrkörpersimulationen das Potential einer effizienten Reduktion der in den Boden eingebrachten Energie. Simulationen an einer neuartigen hybriden Turmstruktur basierend auf geklebten Anschlüssen zeigten weitere Dissipationspotentiale.

Hingegen werden auf dem Propagationspfad kaum Möglichkeiten einer Abschirmung gesehen. Gerade im niederfrequenten Bereich sind die beteiligten Wellenlängen so groß, dass Barrieren mit bautechnisch möglicher Größe unwirksam bleiben.

5.4.4 Empfehlungen

Für die Modellierung von tieffrequenten seismischen und akustischen Emissionen wurden die folgenden Empfehlungen ausgesprochen:

- Triebstrangflexibilität und Drehzahlregelung müssen berücksichtigt werden, da sie einen Einfluss auf die Eigenmoden der WEA haben, der auch in den Spektren der Turmfußlasten sichtbar ist. Eine Drehzahl- und gegebenenfalls auch die Pitchregelung sollten bei entsprechend hohem Turbulenzgrad auch deshalb berücksichtigt werden, weil sie einen erheblichen Einfluss auf den Betriebszustand und die aerodynamischen Lasten haben. Hingegen kann die Drehzahlregelung bei geringem Turbulenzgrad für die Untersuchung von tieffrequenten akustischen Emissionen vernachlässigt werden kann, sofern die Drehzahl passend vorgegeben wird.
- Es ist essenziell, den Turm in der Simulation mit zu berücksichtigen. Er ist als Quelle akustischer Emissionen nicht zu vernachlässigen. Insbesondere muss die gekoppelte instationäre viskose Umströmung von Turm und vorbeilaufendem Rotor korrekt erfasst werden. Dies ist nur mit instationären CFD Rechnungen möglich. Es ist ebenso wichtig, im Betrieb (unter Last) mit der verformten Geometrie zu rechnen.
- Solange mit einer realistischen (statischen) Durchbiegung der Rotorblätter gerechnet wird, ist für die akustischen Emissionen keine Berechnung mit Fluid-Struktur-Kopplung nötig. Die Turmfußlasten verändern sich allerdings bei Fluid-Struktur-Kopplung mit elastischem Turm, Rotor und Fundament deutlich und die Flexibilität der Komponenten muss dafür berücksichtigt werden.
- Bei Rechnungen mit stark veränderlicher Drehzahl (Regler) eignet sich eine umdrehungsbezogene Frequenzanalyse besser als ein herkömmliches Spektrum zur Analyse.
- Mit Balkenmodellansätzen können Turmmoden für eine Lastenberechnung ausreichend genau beschrieben werden. Für die Untersuchung höherfrequenter Schallemissionen eignet sich ein Schalenmodell-Ansatz besser, da die elliptische Verformung des Turmfußes möglich ist, was maßgeblich die Systemeigenfrequenzen beeinflusst.

Zu den akustischen und seismischen Messungen wurden folgende Empfehlungen abgeleitet:

- Um möglichst viele unterschiedliche Windbedingungen abbilden zu können, wird ein Messzeitraum von mindestens 2, besser 4 Wochen empfohlen. Dieser Zeitraum rechtfertigt auch den Aufwand der Installation, bei welcher Seismometer in den Untergrund vergraben werden müssen. Messungen in der Winterzeit sind zu bevorzugen, da dann eher relevante Windgeschwindigkeiten auftreten..
- Ein wesentlicher Beitrag zur korrekten Analyse von emittierten Signalen stellt der Vergleich von Tag- und Nachtmessungen dar. Aufgrund des geringeren Rauschniveau muss sich die Auswertung die WEA-induzierten Signale häufig nur auf nächtliche Zeiträume zwischen 22 Uhr und 6 Uhr beschränken. Dennoch sollte zur Validierung auch die Tagzeit berücksichtigt werden, weil es dann aufgrund unterschiedlicher Atmosphärenschichtung zu veränderten Propagationsbedingungen kommen kann.
- Für die eindeutige Identifizierung der WEA-induzierten Signale, besonders hinsichtlich des Frequenzgehalts, sind Abschaltungen der Einzel-WEA oder ggf. des gesamten Windparks unerlässlich. Nur so können andere Emissionsquellen eindeutig ausgeschlossen werden.
- Die Anzahl der Messpunkte sollte so hoch wie möglich gewählt werden. Es empfiehlt sich, mindestens fünf Messpunkte im Fernfeld der Wellenausbreitung für die Profilmessungen zu verwenden, um eine gute Anpassung des Abklingverhaltens zu erhalten.
- Zum Vergleich der Bodenbewegungs-Messungen mit WEA-spezifischen Daten (SCADA-Daten) sollten diese möglichst hochaufgelöst vorliegen (Mindestintervall Auflösung von einer Minute).

Von Seiten der Umweltmedizin und -psychologie wird empfohlen, verstärkt bestimmte Geräuschqualitäten zu erforschen, die zur Lästigkeit beitragen. WEA-Betriebszustände sollten variiert und deren Einfluss auf die Lästigkeit untersucht werden. Durchgeführte Geräuschminderungsmaßnahmen sollten systematischer evaluiert werden. Vor dem Hintergrund des vorbeugenden Gesundheitsschutzes ist es zudem notwendig, die noch unzureichenden Kenntnisse bezüglich möglicher pathophysiologischer Wirkungen von tieffrequenten Schallwellen im Organismus zu erweitern. In diesem Zusammenhang wird auch eine audiologische Charakterisierung von Betroffenen empfohlen. Weiterhin gilt es die Mess- und Befragungsdiagnostik zu standardisieren. Anwohner/innen mit subjektiven, WEA-assoziierten gesundheitlichen Beschwerden sollte ein zeitsynchrones Registrieren von lästigen Geräuschen ermöglicht werden. Generell wäre anzustreben, dem Wunsch möglichst vieler Beschwerdeträger nach Messungen im eigenen Anwesen auch wirklich Rechnung zu tragen. Der Zeit- und Kostenrahmen von TremAc hat dies noch nicht zugelassen.

Objektive Kriterien für Erschütterungs- und Schallemissionen durch WEA im Binnenland scheinen nur begrenzt möglich. Von Erschütterungen sind hauptsächlich seismologische Messstationen betroffen, d.h. um den Betrieb dieser Anlagen nicht zu stören müssen entsprechende Schutzradien eingeführt werden, die je nach Untergrund bis zu 10 km und mehr betragen können. Hinsichtlich der Schallemissionen kann zum jetzigen Stand der Einfluss tieffrequenter Signalanteile nicht abschließend bewertet werden. Anhand der Messdaten ist bei Abständen von 1 km zur Wohnbebauung im Regelfall nicht von einer Wahrnehmbarkeit auszugehen.

Als Kriterium für die Bewertung der Schallemissionen einer Anlage ist eher der Luftschall im hörbaren Bereich deutlich über 100 Hz maßgebend, in dem einzelne Töne wahrnehmbar werden können. Dieser Frequenzbereich wurde in TremAc nur am Rande betrachtet. Der Fokus lag auf Entstehungsmechanismen, Propagation, Modellierbarkeit und Messbarkeit von besonders niederfrequenten Emissionen. Die Studie wurde durch Erhebung subjektiver Befindlichkeiten und gesundheitlichen Belastungen von Betroffenen bedeutsam ergänzt, die durch geringe Fallzahlen aber in ihrer Aussagekraft begrenzt sind. Weitergehende Fragen wie die nach der Wahrnehmbarkeit von niederfrequentem Schall, nach einer tatsächlich monokausalen Gesundheitsbeeinträchtigung oder nach der Angemessenheit von Hörkurven und Grenzwerten konnten mit den verwendeten methodischen Ansätzen nicht beantwortet werden.

Für Abbildungen wird auf die ausführlichen Teilberichte verwiesen.