



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**

Fakultät Life Sciences

# **Vermessung von Windkraftanlagen mit einer akustischen Kamera**

BACHELORARBEIT

im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von: Jakob, Torsten

Matrikelnummer: 1994798

Hamburg 17. Oktober 2014

Gutachter: Dr.-Ing. Dagmar Rokita (HAW-Hamburg)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Friedrich Ueberle (HAW-Hamburg)

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>I.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>II.</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>III.</b>	<b>Formelverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>IV.</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>V.</b>	<b>Versicherung über Selbständigkeit</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Relevanz des Themas	6
1.2	Ziel der Arbeit	6
<b>2</b>	<b>Problemdarstellung</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>8</b>
3.1	Physikalische Grundlagen	8
3.2	Grenzwerte	12
3.3	Geräusentwicklung an WEA	13
<b>4</b>	<b>Die Messung</b>	<b>15</b>
4.1	Akustisches Messsystem	15
4.2	Nicht akustisches Messsystem	17
4.3	Betriebsdaten der WEA	19
4.4	Messaufbau	20
4.5	Messdurchführung	21
<b>5</b>	<b>Auswertung der Betriebsdaten</b>	<b>26</b>
5.1	Positionierung des Messsystems	26
5.2	Leistung während der Messung	27

<b>6</b>	<b>Analyse und Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>29</b>
6.1	Gesamtaufnahme der WEA Vorderansicht	29
6.2	Gesamtaufnahme der WEA Rückansicht	30
6.3	Aufnahme des Rotorblattes	30
6.4	Darstellung verschiedener Oktavbänder	32
6.5	Aufnahmen des Turmdurchganges	33
6.6	Messung in weiter Entfernung	34
6.7	Analyse der Frequenzspektren	35
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>39</b>
	<b>Anhang</b>	<b>41</b>

## I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Netzwerk A bis D (Maute, 2006, S. 54) .....	11
Abbildung 2 Schallquellen WEA (Wagner, Bareiß, & Guidati, 1996, S. 69) .....	13
Abbildung 3 turbulente Strömungen (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 14) .....	14
Abbildung 4 Array Star 48 (gfai tech GmbH, 2012) .....	15
Abbildung 5 Datenrekorder(gfai tech GmbH, 2014) .....	16
Abbildung 6 Referenzentfernung ( in Anlehnung DIN EN 61400-11, 2013).....	20
Abbildung 7 Messpositionen E40 (google maps, o.J.).....	22
Abbildung 8 Messpositionen E58 (google maps, o.J.).....	23
Abbildung 9 Steuerungskonsole Enercon .....	24
Abbildung 10 aufgebautes Messsystem.....	24
Abbildung 11 E40 Vorderansicht.....	29
Abbildung 12 E58 Vorderansicht.....	29
Abbildung 13 E40 Rückansicht .....	30
Abbildung 14 E58 Rückansicht .....	30
Abbildung 15 E58 Rotorblatt Vorderansicht .....	31
Abbildung 16 E58 Rotorblatt Rückansicht.....	31
Abbildung 17 2-Uhr-Stellung .....	31
Abbildung 18 3-Uhr-Stellung .....	31
Abbildung 19 4-Uhr-Stellung .....	31
Abbildung 20 250Hz .....	32
Abbildung 21 315Hz .....	32
Abbildung 22 400Hz .....	32
Abbildung 23 500Hz .....	32
Abbildung 24 630Hz .....	32
Abbildung 25 800Hz .....	32
Abbildung 26 1000Hz.....	32
Abbildung 27 1250Hz.....	32
Abbildung 28 Turm 1000Hz .....	33
Abbildung 29 Turm 1250Hz .....	33
Abbildung 30 315Hz bis 1250Hz.....	33
Abbildung 31 WEA in 375m Entfernung.....	34
Abbildung 32 Spektrum E40AM5 .....	35
Abbildung 33 Spektrum E58AM2 .....	35
Abbildung 34 Peak 5 dB(A)/ div .....	36
Abbildung 35 Spektrogramm 500ms/ div.....	36

## II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 nächtliche Grenzwerte (BlmSchG, 2014, S. 897) .....	12
Tabelle 2 Bewölkungsdichte (Deutscher Wetterdienst, o.J.).....	17
Tabelle 3 Rauigkeitslängen (BlmSchG, 2014, S. 869 f) .....	18
Tabelle 4 Positionierung E40 .....	26
Tabelle 5 Positionierung E58 .....	27
Tabelle 6 Leistung E40 .....	27
Tabelle 7 Leistung E58 .....	28

## III. Formelverzeichnis

Formel 1 Intensität (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 5).....	8
Formel 2 Schallintensitätspegel (Maute, 2006, S. 32) .....	9
Formel 3 Effektivwert des Schallwechseldrucks (Lindner, 2010, S. 241).....	9
Formel 4 Schalldruckpegel (Lindner, 2010, S. 245) .....	9
Formel 5 Schalleistungspegel (Maute, 2006, S. 32) .....	10
Formel 6 Schalleistungspegel Punktquelle (Maute, 2006, S. 46).....	10
Formel 7 Schallgeschwindigkeit in Gasen und Flüssigkeiten (Lindner, 2010, S. 239) .....	10
Formel 8 Näherungsformel Schallgeschwindigkeit (Lindner, 2010, S. 241).....	11

## IV. Abkürzungsverzeichnis

WEA	Windenergieanlage
aK	akustische Kamera
HAW	Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
BlmSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
RMP	Referenzmesspunkt
E40	Enercon-E40/6.44
E58	Enercon-E58
MEZ	mitteleuropäische Normalzeit
MESZ	mitteleuropäische Sommerzeit

## **V. Versicherung über Selbständigkeit**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, den \_\_\_\_\_

# **1 Einleitung**

## **1.1 Relevanz des Themas**

Jede Form der Energieerzeugung hat einen Einfluss auf die Umwelt. Windkraftanlagen, im Speziellen Windenergieanlagen (WEA), sind im Vergleich zu anderen Technologien jedoch wesentlich umweltfreundlicher, sie produzieren keine Abgase, sie benötigen keinen ständigen Rohstoffnachschub und bei einer Störung ist die Gefährdung von Mensch und Umwelt begrenzt. Zu den Haupteinflüssen zählen u.a. der Schattenwurf, die Veränderung des Landschaftsbildes, der Landverbrauch und die Geräuschentwicklung durch drehende Teile. Diese Einflüsse betreffen immer die unmittelbare Umgebung und führen daher häufig zu Akzeptanzproblemen bei Anliegern von Windparks. Um die Akzeptanz von Anliegern zu erhöhen und die Umwelt zu schützen ist es daher notwendig diese Einflüsse bestmöglich zu verringern.

## **1.2 Ziel der Arbeit**

Um die Schallentwicklung an WEA zu reduzieren muss zuerst die Schallquelle lokalisiert werden. Eine Lokalisation von Schallquellen ist u.a. mit einer akustischen Kamera, im Nachfolgendem aK genannt, möglich. In dieser Arbeit sollen die maßgebenden Umwelteinflüsse und Betriebszustände der WEA bestimmt werden, anhand derer eine aussagekräftige Messung mit einer aK möglich ist. Zusätzlich soll anhand von Freifeldmessungen untersucht werden ob und in welcher Art und Weise eine Lokalisation von Schallquellen möglich ist. Die Messungen sollen für spätere Vergleiche reproduzierbar und WEA typenunabhängig sein.

## 2 Problemdarstellung

Akustische Vermessungen von WEA werden im Normalfall, im Rahmen der Typenprüfung und eventueller Nachuntersuchungen, mit einem Einzelmikrofon durchgeführt. Der Messaufbau und die Durchführung ist in der DIN EN 61400-11 (Windenergieanlagen – Teil 11: Schallmessverfahren) festgelegt. Bei dieser Methode wird die WEA jedoch als eine einzige Schallquelle betrachtet. Eine Aussage über die Schalleistung einzelner Komponenten, wie zum Beispiel Rotor oder Triebstrang, ist damit nur schwer möglich. Zur Ortung von Schallquellen können aK eingesetzt werden. Diese bestehen aus einer Vielzahl von Mikrofonen und können anhand der Laufzeitdifferenz die Lage der Schallquelle berechnen. Die Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) besitzt eine solche aK. Es soll nun untersucht werden, ob eine Messung in Anlehnung an die DIN EN 61400-11 mit dieser aK in der Praxis umsetzbar und zielführend ist. Faktoren die dabei die Messergebnisse maßgeblich beeinflussen könnten, sind die Wetterbedingungen, die Leistung der Anlage, die Umgebung der Anlage und der Messaufbau.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Physikalische Grundlagen

Um die späteren Messergebnisse besser zu verstehen, werden auf den folgenden Seiten einige physikalische Grundlagen der Akustik erläutert. Betrachtet man das Thema Schall physikalisch, handelt es sich hierbei um einen „Oberbegriff für mechanische Schwingungen und Wellen in elastisch deformierbaren Medien“ (Lindner, 2010, S. 237). Schallwellen können auf zwei verschiedene Weisen auftreten, transversal (senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) und longitudinal (parallel zur Ausbreitungsrichtung). In Gasen und Flüssigkeiten treten nur longitudinale Wellen auf. In festen Medien jedoch sind beide Typen möglich. (Lindner, 2010, S. 237) An WEA treten zwei Arten von Schall auf. Einerseits aerodynamische Geräusche, diese werden als Luftschall übertragen, und andererseits Maschinengeräusche welche als Körperschall übertragen werden. Die aK misst den Luftschall, daher sind alle weiteren Grundlagen auf den Luftschall bezogen.

Der Entstehungsort des Schalls wird als Schallquelle bezeichnet. Von ihm breitet sich der Schall allseitig aus und kann als kugelförmig angesehen werden. In weiter Entfernung verringert sich die Krümmung dieser Kugel und Teilflächen können daher näherungsweise als ebene Fläche betrachtet werden. Die von der Schallquelle abgegebene mittlere Leistung  $P$  verteilt sich bei zunehmender Entfernung auf diese größer werdende Fläche, die Schallintensität  $I$  nimmt mit dem Radius  $r$  quadratisch ab. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 5)

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

- I Schallintensität in  $\text{W}/\text{m}^2$
- P mittlere Leistung in W
- r Abstand zur Schallquelle in m

**Formel 1 Intensität (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 5)**

Der Wertebereich für die Schallintensität, sowie Schalldruck und Schalleistung, besitzt eine große Bandbreite und wäre daher in der Praxis schlecht handhabbar. Aus diesem Grund wird mit der logarithmischen Intensität, dem Schallintensitätspegel gerechnet. Dieser besitzt die Einheit Dezibel dB. 0 dB entsprechen dabei der Hörschwelle des Menschen. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 2)

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

$L_I$  Schallintensitätspegel in dB

$I$  gemessene Schallintensität in  $\text{W/m}^2$

$I_0$  Hörschwelle in  $\text{W/m}^2$

**Formel 2 Schallintensitätspegel (Maute, 2006, S. 32)**

Die durch die Schallquelle in Schwingung gebrachten Luftmoleküle erzeugen lokale Dichteunterschiede in der Luft. Die dadurch resultierenden Druckunterschiede sind gut messbar und werden als Schalldruck  $p$  bezeichnet. Der Schalldruck ist eine wechselnde Größe, daher wird für eine bessere Vergleichbarkeit der Effektivwert genutzt. (Lindner, 2010, S. 241)

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2 dt}$$

$p_{eff}$  Effektivwert des Schallwechseldrucks in Pa

$\tau$  Integrationszeit des Messsystems in s

$p$  Momentanwert des Schalldrucks in Pa

**Formel 3 Effektivwert des Schallwechseldrucks (Lindner, 2010, S. 241)**

Der Schalldruck wird ebenfalls in Dezibel umgerechnet.

$$L_p = 20 \lg \frac{p_{eff}}{p_{eff,0}} \text{ dB} \quad p_{eff,0} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

$L_p$  Schalldruckpegel in dB

$p_{eff}$  Effektivwert des Schalldrucks in Pa

$p_{eff,0}$  Bezugsschalldruck nahe der Hörschwelle in Pa

**Formel 4 Schalldruckpegel (Lindner, 2010, S. 245)**

Um eine Vergleichbarkeit von Schallemissionen zu ermöglichen wird die Schalleistung ( $L_W$ ) bestimmt. Die Schalleistung ist eine ortsunabhängige Größe und beschreibt die durch die Quelle in alle Richtungen abgegebene Energiemenge pro Zeiteinheit. Die Schallintensität beschreibt die Leistung pro Fläche, daher wird zur Bestimmung der Schalleistung die Schallintensität mit der Fläche multipliziert. Bei Punktquellen wird eine Kugel mit einer Oberfläche von  $1\text{m}^2$  angenommen. (Maute, 2006, S. 46)

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad W_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

$L_W$  Schalleistungspegel in dB

$W$  Schalleistung in W

$W_0$  Bezugsgröße in W

**Formel 5 Schalleistungspegel (Maute, 2006, S. 32)**

$$L_W = L_I + 10 \lg \frac{S}{S_0} \text{ dB} \quad S_0 = 1 \text{ m}^2$$

$L_W$  Schalleistungspegel in dB

$L_I$  Schallintensitätspegel in dB

$S$  Fläche des Intensitätsmessgerät in  $\text{m}^2$

$S_0$  Fläche der Punktquelle in  $\text{m}^2$

**Formel 6 Schalleistungspegel Punktquelle (Maute, 2006, S. 46)**

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls, die Schallgeschwindigkeit  $c$ , ist abhängig vom jeweiligen Ausbreitungsmedium. Bei Luft wird die Geschwindigkeit mit Hilfe der Dichte und der Kompressionsfähigkeit berechnet. (Lindner, 2010, S. 239)

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$c$  Schallgeschwindigkeit in m/s

$K$  adiabatisches Kompressionsmodul in Pa

$\rho$  Dichte in  $\text{kg} / \text{m}^3$

**Formel 7 Schallgeschwindigkeit in Gasen und Flüssigkeiten (Lindner, 2010, S. 239)**

Es wird das adiabatische Kompressionsmodul verwendet, da bei der Schallübertragung im Hörbereich nur ein vernachlässigbar kleiner Wärmeaustausch stattfindet. Die Schallgeschwindigkeit ist druck- und temperaturabhängig. Für Berechnungen in dieser Arbeit kann der atmosphärische Druck vernachlässigt werden, da dieser nur einen geringen Einfluss auf die Messung hat. Die Umgebungstemperatur muss jedoch zwingend gemessen und bei Berechnungen mit einbezogen werden. Die Schallgeschwindigkeit lässt sich mit Hilfe des Adiabatenexponenten (Luft 1,4), der spezifischen Gaskonstante (Luft 287 J/(Kg K) und der Temperatur berechnen. Für 0°C beträgt die Schallgeschwindigkeit somit 331,6 m/s. Im Temperaturbereich um 0°C kann zur Bestimmung die Näherungsformel für Luft genutzt werden. (Lindner, 2010, S. 238 ff)

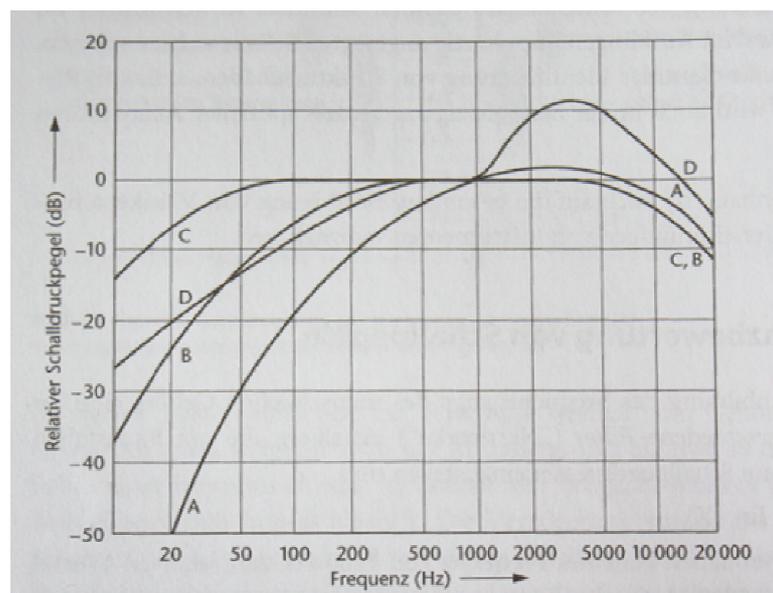
$$c = 331,6 \frac{m}{s} + 0,6 \frac{m}{s K} \Delta T$$

c Schallgeschwindigkeit in m/s

$\Delta T$  Temperaturdifferenz zu  $T_n = 0^\circ\text{C}$  in K oder  $^\circ\text{C}$

**Formel 8 Näherungsformel Schallgeschwindigkeit (Lindner, 2010, S. 241)**

Das menschliche Ohr nimmt, im Gegensatz zur Messtechnik, Veränderungen von Frequenzen nicht linear wahr. Um die Wahrnehmung nachzubilden ist es notwendig sogenannte Netzwerke, vereinfacht Filter, zu nutzen. Diese Netzwerke verändern den gemessenen unbewerteten Pegel und korrigieren diesen nach einer festgelegten Kurve. In dieser Arbeit werden A bewertete Pegel, gekennzeichnet durch dB(A), und unbewertete Pegel verwendet. Das Netzwerk A wird u.a. für gesetzliche Vorgaben genutzt und ist in der DIN EN 60651 genormt. (Maute, 2006, S. 53 f)



**Abbildung 1 Netzwerk A bis D (Maute, 2006, S. 54)**

### 3.2 Grenzwerte

In dem vorherigen Abschnitt wurden die wichtigsten Schallgrößen und deren Einheiten erläutert. Diese werden ebenfalls vom Gesetzgeber genutzt, um Grenzwerte zum Schutz von Mensch und Umwelt festzulegen. Die Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) regelt in Deutschland die am Immissionsort maximal erlaubten Beurteilungspegel. Die Bestimmung des Beurteilungspegels ist in der TA Lärm ausführlich erläutert, er wird unter anderem aus dem Dauerschallpegel, einem Aufschlag für impulshafte Geräusche und einem Aufschlag für tonhaltige Geräusche berechnet. (Hau, 2008, S. 602 ff) Die Grenzwerte sind für unterschiedliche Flächennutzungen und Tageszeiten definiert. Kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen diesen Grenzwert nicht um mehr als 20 dB(A) überschreiten. Für WEA sind die nächtlichen Grenzwerte, von 22 bis 6 Uhr, planungsrelevant. (BImSchG, S. 897)

**Tabelle 1 nächtliche Grenzwerte (BImSchG, 2014, S. 897)**

Industriegebiet	70 dB(A)
Gewerbegebiet	50 dB(A)
Kern-, Dorf-, Mischgebiete	45 dB(A)
allg. Wohn- / Kleinsiedlungsgebiet	40 dB(A)
reines Wohngebiet	35 dB(A)

Bei der Betrachtung dieser Grenzwerte sollten die natürlichen Umgebungsgeräusche mit beachtet werden. Diese steigen mit zunehmender Windgeschwindigkeit aufgrund von z.B. Häusern und Bäumen an. Näherungsweise steigen die Umgebungsgeräusche um 2,5 dB(A) je 1 m/s Windgeschwindigkeitszunahme an. Die Schalleistung einer WEA steigt gleichzeitig jedoch nur um ca. 1 dB(A). Dadurch kann es zu Verhältnissen kommen bei denen die WEA am Immissionsort nicht wahrnehmbar ist und, trotz einer Überschreitung des Grenzwertes, weiterhin betrieben werden darf. Die windabhängigen Umgebungsgeräusche variieren von Standort zu Standort und müssen daher messtechnisch oder rechnerisch ermittelt werden. (Hau, 2008, S. 602 ff)

### 3.3 Geräuscentwicklung an WEA

Um die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte einzuhalten ist es notwendig zu verstehen wo und wie Geräusche an WEA entstehen. Die Geräuscentwicklung lässt sich in zwei Kategorien unterteilen, einerseits in Maschinengeräusche und andererseits in aerodynamische Geräusche.

Maschinengeräusche entstehen in der Gondel an unterschiedlichen Komponenten. Hauptverursacher sind dabei das Getriebe, der Generator, der Azimutantrieb, verschiedene Lüfter und das Hydrauliksystem. In der folgenden Abbildung sind einige dieser Quellen genauer dargestellt. (Wagner, Bareiß, & Guidati, 1996, S. 68)

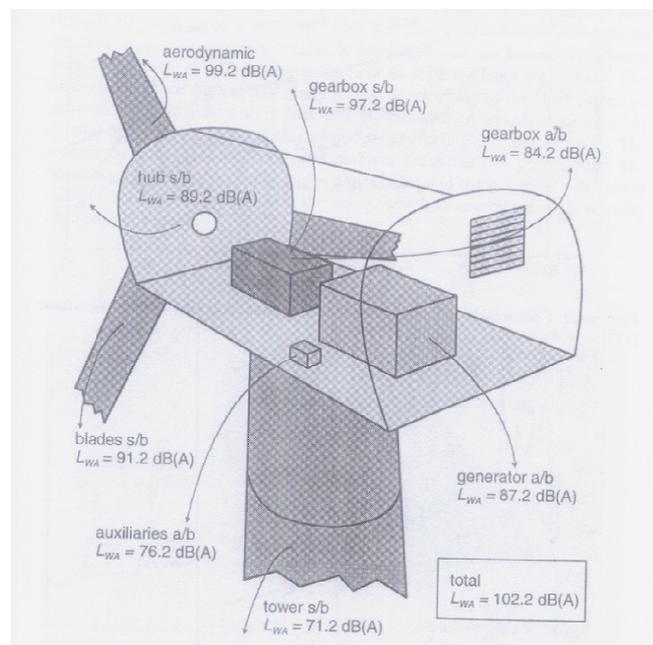


Abbildung 2 Schallquellen WEA (Wagner, Bareiß, & Guidati, 1996, S. 69)

Die Emissionen dieser Schallquellen können jedoch durch zwei technische Maßnahmen stark reduziert werden. Zum einen können Schwingungsdämpfer zwischen den mechanischen Hauptkomponenten und der Lastaufnahme in der Gondel verbaut werden. Zum anderen kann die Gondel im Inneren mit schalldämmenden Einbauten versehen werden. Durch die Kombination dieser Maßnahmen ist eine Gesamtreduktion des Schalleistungspegels der Gondelhülle um bis zu 15 dB(A) möglich. (Wagner, Bareiß, & Guidati, 1996, S. 69)

Durch weitere Maßnahmen kann eine Reduzierung der Schalleistung einzelner Komponenten erfolgen. Bei Getrieben kann z.B. eine Reduktion der Schalleistung durch eine spezielle Verzahnung erfolgen. Schrägverzahnung ist einer Geradverzahnung vorzuziehen, da eine Reduktion von ungefähr 1 dB(A) pro Grad Schrägungswinkel erreicht werden kann. (Wagner, Bareiß, & Guidati, 1996, S. 69)

Werden diese Möglichkeiten der Schallreduktion ausgenutzt, zeigt sich das aerodynamische Geräusche die Hauptursache von Schallemissionen an WEA sind. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 14)

Die turbulente Strömung des Windes erzeugt Anströmungsgeräusche (inflow turbulence noise) an der Blattvorderkante. Die Turbulenz des Windes ist von mehreren Faktoren abhängig z.B. von der Rauigkeit des umliegenden Geländes, den Windströmungen und der vorhandenen Thermik. Eine Abnahme der Turbulenzintensität ist mit steigender Windgeschwindigkeit zu erwarten. (Gasch & Twele, 2011, S. 137)

An den Rotorblättern gibt es aufgrund der Umströmung der Blattgeometrie weitere aerodynamische Turbulenzen. An der Blattspitze (tip) entsteht aufgrund des Druckunterschieds zwischen den Blattseiten eine turbulente Strömung. Die Stärke der Strömung ist von der Blattspitzengeschwindigkeit und der Bauart der Blattspitze abhängig. Die dadurch erzeugten Blattspitzengeräusche werden tip noise genannt. Im Bereich der Blatthinterkante (trailing edge) entstehen Turbulenzen beim laminar-turbulenten Übergang (transition). Bei modernen WEA sind die dadurch erzeugten Hinterkantengeräusche (trailing edge noise) dominierend. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 14 ff) In der unteren Abbildung sind die genannten Strömungen dargestellt.

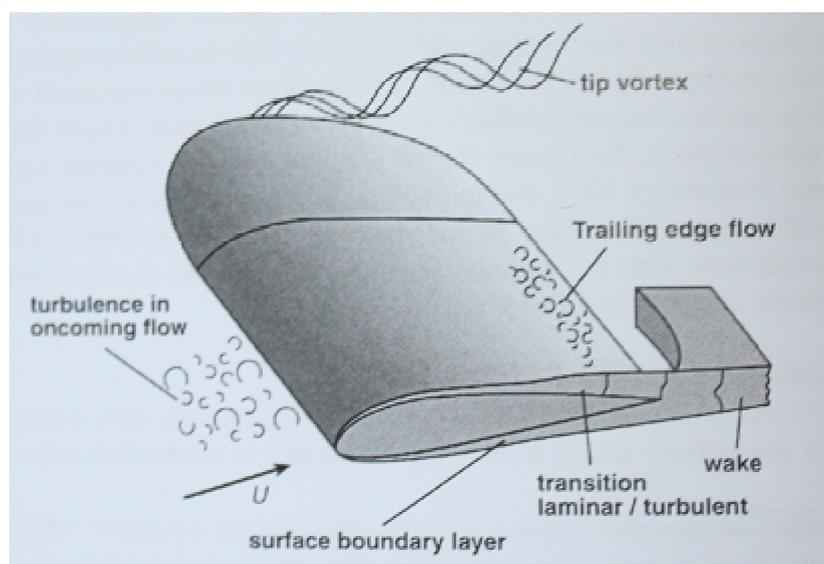


Abbildung 3 turbulente Strömungen (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 14)

## 4 Die Messung

In dem vorhergehendem Abschnitt wurde beschrieben wie und wo Geräuschentwicklungen an WEA im allgemeinen zu erwarten sind. Da jedoch jeder WEA-Typ eine unterschiedliche Bauweise besitzt und die Turbulenzen von Standort zu Standort variieren, können evtl. auftretende Störgeräusche nur durch direkte Messungen erkannt werden. In dieser Arbeit wird dazu eine akustische Kamera der Firma gfai tech GmbH genutzt.

### 4.1 Akustisches Messsystem

Das Messsystem der akustischen Kamera besteht aus mehreren Komponenten, dem Star Array 48, einem Datenrekorder und dem Messrechner mit dazugehöriger Software.

Der Star Array 48 ist ein Aufnahmegerät bestehend aus 48 Mikrofonen und einer Digitalkamera. Die Mikrofone sind auf 3 Lanzen verteilt und ermöglichen durch den fest definierten Abstand zwischen den Mikrofonen eine Berechnung der Laufzeitdifferenz und eine räumliche Zuordnung der jeweiligen Schallquelle. Mit Hilfe der Digitalkamera kann das Untersuchungsobjekt fokussiert werden. Die Digitalkamera ermöglicht kurze Videos oder eine bessere Darstellung der Messergebnisse auf einem Foto. Das Aufnahmegerät ist für Messungen in einer Entfernung von bis zu 500m entwickelt worden und in einem Frequenzbereich von 100 Hz bis 13 kHz einsetzbar. Aufnahmen im Außenbereich sind jedoch nur in einem festgelegtem Temperaturbereich, 0°C bis 45°C, und einer maximalen relativen Luftfeuchtigkeit von 80% möglich. (gfai tech GmbH, 2012)

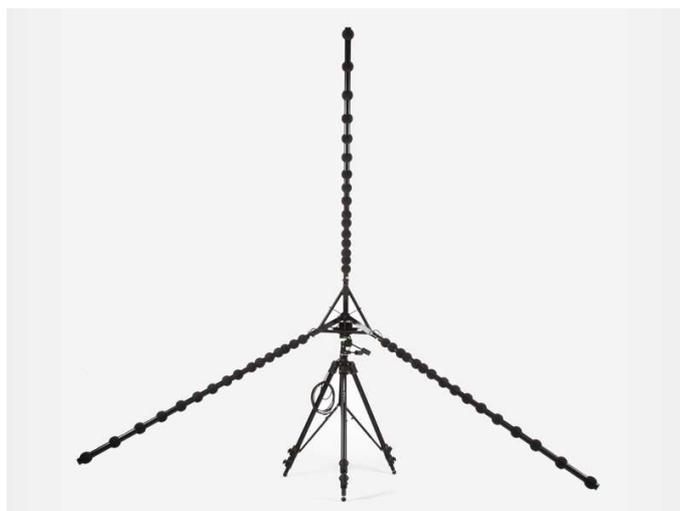


Abbildung 4 Array Star 48 (gfai tech GmbH, 2012)

Der Datenrekorder, mcdREC\_721B, ist mit dem Messrechner und dem Star Array 48 verbunden. Er nimmt die Signale der Sensoren mit einer Abtastfrequenz von bis zu 192 kHz ab, wobei die maximale Aufnahmedauer 43 Sekunden beträgt. Die Weitergabe der Daten an den Messrechner erfolgt mit Hilfe einer Ethernet Schnittstelle, die Übertragungsrate beträgt dabei 20 MByte/s. (gfai tech GmbH, 2013, S. 19 f)



**Abbildung 5 Datenrekorder (gfai tech GmbH, 2014)**

Auf dem Messrechner ist die dazugehörige Software NoiselImage4 installiert. Die Software ermöglicht die Durchführung der Messung, die Wahl der notwendigen Kenngrößen und eine Auswertung sowie Speicherung der Signale. Mit Hilfe der Software ist es ebenfalls möglich akustische Bilder und Videos zu generieren.

## 4.2 Nicht akustisches Messsystem

Neben der eigentlichen Messung mit dem Star Array 48 werden, für eine genauere Auswertung und spätere Vergleichbarkeit, die Umgebungsbedingungen ermittelt. Diese werden im Messprotokoll festgehalten. Die Wahl der zu bestimmenden Parameter erfolgt in Anlehnung an die DIN EN 61400-11, Windenergieanlagen–Teil 11: Schallmessverfahren Ausgabe 09/2013. Die Umgebungsbedingungen werden zu Beginn der Messung und dann im Abstand von jeweils 2 Stunden, bis zum Ende der Messung, ermittelt.

Die Temperatur wird mit Hilfe eines Thermometers am Messstandort in 1,5m Höhe gemessen. Die zulässige Messgeräteabweichung beträgt  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Der Luftdruck wird ebenfalls in 1,5m Höhe mit einem entsprechenden Messgerät ermittelt. Die zulässige Messgeräteabweichung beträgt  $\pm 1\text{kPa}$ . Die Bestimmung der Luftfeuchtigkeit und Luftabsorption kann vernachlässigt werden, wenn der Messaufbau nach DIN EN 61400-11 eingehalten wird.

Die Turbulenzintensität, kann mit einem Messgerät in 10m Höhe ermittelt werden. Sie beschreibt das Verhältnis der jeweiligen Windgeschwindigkeit zur mittleren Windgeschwindigkeit, meist als 10-Minuten Mittelwert. Typische Werte liegen im Bereich von 5 bis 20%. (Hau, 2008, S. 523 ff) In der Praxis ist diese Messung jedoch mit einem erhöhtem Aufwand verbunden, die DIN EN 61400-11 erlaubt daher alternativ zur Messung eine weitere Methode. Wird für den Messzeitraum die Tageszeit, die Bewölkungsdichte und die Bodenrauigkeit des Standortes ermittelt kann eine Messung der Turbulenzintensität entfallen. Für die Bestimmung der Bewölkungsdichte wird die Skala des Deutschen Wetterdienstes verwendet, diese ist in Achtel unterteilt. Beginnend mit 0/8, wolkenlos, steigt diese bis 9/8, Himmel nicht erkennbar. (Deutscher Wetterdienst, o.J.)

**Tabelle 2 Bewölkungsdichte (Deutscher Wetterdienst, o.J.)**

0/8	wolkenlos	5/8	bewölkt
1/8	sonnig	6/8	stark bewölkt
2/8	heiter	7/8	fast bedeckt
3/8	leicht bewölkt	8/8	bedeckt
4/8	wolkig	9/8	Himmel nicht erkennbar

Die Bodenrauigkeit wird anhand der Rauigkeitslänge bestimmt. Sie ist ein Maß für den Widerstand den Landschaften, Gebäude, Hecken und Bäume auf den Wind ausüben. Eine Einteilung erfolgt anhand der CORINE-Klassen, diese sind im Rahmen eines europaweiten Projektes, CORINE Land Cover, zur Erfassung harmonisierter Landbedeckungsdaten festgelegt worden. (Umweltbundesamt, 2013) Die Rauigkeitslänge kann der folgenden Tabelle entnommen werden.

**Tabelle 3 Rauigkeitslängen (BlmSchG, 2014, S. 869 f)**

<b>z<sub>0</sub> in m</b>	<b>CORINE-Klasse</b>
<b>0,01</b>	Strände, Dünen, Sandflächen und Wasserflächen
<b>0,02</b>	Deponien und Abraumhalden, Wiesen und Weiden, Natürliches Grünland, Flächen mit spärlicher Vegetation, Salzwiesen, In der Gezeitenzone liegende Flächen, Gewässerläufe, Mündungsgebiete
<b>0,05</b>	Abbauflächen, Sport- und Freizeitflächen, Nicht bewässertes Ackerland, Gletscher und Dauerschneegebiete, Lagunen
<b>0,10</b>	Flughäfen, Sümpfe, Torfmoore, Meere und Ozeane
<b>0,20</b>	Straßen, Eisenbahn, städtische Grünflächen, Weinbauflächen, Komplexe Parzellenstrukturen, Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung, Heiden und Moorheiden, Felsflächen ohne Vegetation
<b>0,50</b>	Hafengebiete, Obst- und Beerenobstbestände, Wald-Strauch-Übergangsstadien
<b>1,00</b>	nicht durchgängige städtische Prägung, Industrie- und Gewerbeflächen, Baustellen, Nadelwälder
<b>1,50</b>	Laubwälder, Mischwälder
<b>2,00</b>	Durchgängig städtische Prägung

Die Umgebung wird in einem Radius von einem Kilometer ausgehend von dem Standort der WEA betrachtet. Dies entspricht dem 10-fachen der Anlagenhöhe der höchsten WEA. Die nähere Umgebung ist durch Agrarflächen, Baumreihen, Wassergräben und Feldwege geprägt. Bei den Agrarflächen handelt es sich um abgeerntete und brach liegende Flächen. Der Windpark bestand zum Zeitpunkt der Messungen aus insgesamt 9 WEA mit einer maximalen Höhe von 100m. Weiter entfernt befinden sich Siedlungen, Straßen und die Deiche der Elbe. Es kann daher von einer Rauigkeitslänge von 0,20 m ausgegangen werden.

### 4.3 Betriebsdaten der WEA

Zusätzlich zu den Umgebungsbedingungen sind die Betriebsdaten der WEA für eine Auswertung notwendig. Dazu zählen die elektrische Leistung, die Rotordrehzahl, die Windrichtung und die gemessene Windgeschwindigkeit am Gondelanemometer. Diese Parameter verändern sich während der Messung und müssen daher für eine Auswertung arithmetisch über den Messzeitraum gemittelt werden. Die DIN EN 61400-11 empfiehlt eine Abtastrate von 1 Hz.

Die WEA entnimmt dem Wind Leistung, dadurch ist die gemessene Windgeschwindigkeit am Gondelanemometer immer geringer als die ermittelte Windgeschwindigkeit vor der WEA. Für eine spätere Auswertung ist die alleinige Messung der Windgeschwindigkeit am Gondelanemometer daher nicht ausreichend. Die Werte des Gondelanemometers sind jedoch für eine Plausibilitätsprüfung nützlich.

Anhand der Leistungsdaten und der dazugehörigen Leistungskurve, nach IEC 61400-12-1 oder IEC 61400-12-2, ist ein Rückschluss auf die vor der WEA herrschenden Windgeschwindigkeiten möglich. Dieser Rückschluss ist notwendig, da eine auswertbare akustische Messung nur innerhalb eines festgelegten Windgeschwindigkeitsfensters zulässig ist. Die Windgeschwindigkeit sollte mindestens dem 0,8-fachen und maximal dem 1,3-fachen der Windgeschwindigkeit die zum Erreichen von 85% der Nennleistung notwendig ist betragen. (DIN EN 61400-11, 2013) Für die leistungsstärkere WEA, die Enercon E58, wurde durch den Betreiber eine gemessene Leistungskurve zur Verfügung gestellt. Messungen können demnach in einem Bereich von 8,5 m/s bis 14 m/s durchgeführt werden. Dies entspricht einer Leistung von ca. 490 kW bis 1030 kW. Für die leistungsschwächere WEA liegt eine allgemeine Leistungsmessung vor. Aus dieser wurde ebenfalls eine Leistungskurve berechnet (Enercon, o.J.). Messungen können in einem Bereich von 278 kW bis 600 kW durchgeführt werden. Die Leistungskurven sind im Anhang aufgeführt.

Zwischen der Rotordrehzahl und anderen Kennwerten besteht eine direkte Abhängigkeit. Dazu gehören im Besonderen die Rotorblattspitzengeschwindigkeit und aufgrund des festen Übersetzungsverhältnisses die Getriebe- und Generator Drehzahl.

Die Windrichtung, bzw. Gondelposition, wird zur Kontrolle des Messaufbaus genutzt. Es kann dadurch kontrolliert werden, ob die Messposition im Toleranzbereich von  $\pm 15^\circ$  liegt.

#### 4.4 Messaufbau

Neben den Umgebungsbedingungen und den Betriebsdaten hat der eigentliche Messaufbau einen großen Einfluss auf die Messergebnisse. Dieser erfolgt ebenfalls in Anlehnung an die DIN EN 61400-11. Das Messsystem wird am Referenzmesspunkt (RMP), im Lee der WEA, in einer festgelegten Referenzentfernung ( $R_0$ ) aufgebaut. Die horizontale Referenzentfernung, Toleranz  $\pm 20\%$ , entspricht hierbei der Summe aus dem halbierten Rotordurchmesser  $D$  und der Nabenhöhe  $H$ . Die Entfernung zum Rotorflanschmittelpunkt  $R_1$  lässt sich mit Hilfe von  $R_0$  berechnen. (DIN EN 61400-11, 2013)

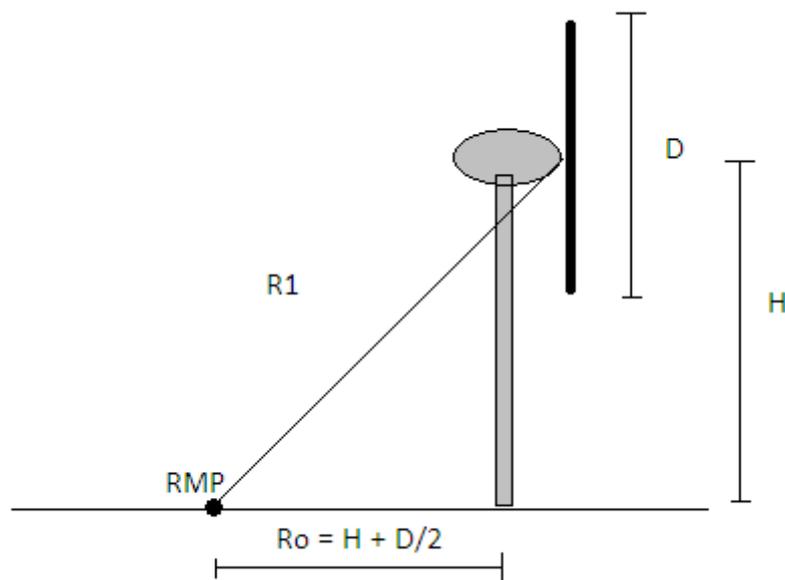


Abbildung 6 Referenzentfernung ( in Anlehnung DIN EN 61400-11, 2013)

Zusätzlich zum RMP werden in der Norm drei weitere optionale Messpunkte beschrieben, von denen einer in dieser Arbeit verwendet wird. Er befindet sich um  $180^\circ$  versetzt zum RMP im Luv der WEA. Dieser Messpunkt wurde gewählt um einen Vergleich mit den Messungen von Bowdler und Leventhall zu ermöglichen. Diese nutzten für Ihre Messungen ein aus 148 Mikrofonen bestehendes Array und platzierten dieses im Luv der WEA. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 28) Bei einer WEA wurden zusätzlich Versuchsmessung in 26m Entfernung vor der Anlage durchgeführt, diese fokussieren die Unterkante und Spitze des herab kommenden Rotorblattes auf der 3-Uhr-Position.

## 4.5 Messdurchführung

Für die Messungen wurden zwei unterschiedliche WEA des Herstellers Enercon ausgewählt. Die Anlagen besitzen einen sogenannten Direktantrieb bei dem kein Getriebe notwendig ist. Desweiteren sind die Rotorblattspitzen abgewinkelt.

Die zuerst vermessene Anlage ist eine im Jahr 2000 errichtete Enercon-E40/6.44 (E40) mit einer Nennleistung von 600kW. An der 65m hohen Nabe sind die Rotorblätter montiert, der Rotordurchmesser beträgt 44m. Als horizontale Referenzentfernung wurden 87m berechnet, ein Aufbau des Messsystems kann daher in einem Radius von 70m bis 104m erfolgen. Die Anlage wurde, aufgrund unsteter Wetterbedingungen (Regenschauer) am ersten Messtag, an zwei unterschiedlichen Tagen vermessen. Als zweite Anlage wurde eine Enercon-E58 (E58) untersucht. Diese besitzt eine Nennleistung von 1000kW und wurde im Jahr 2003 errichtet. Die Nabenhöhe beträgt 70m und der Rotordurchmesser 58,6m. Die horizontale Referenzentfernung beträgt dadurch 99m. Eine detaillierte Beschreibung der WEA ist im angehängten Messprotokoll wiederzufinden.

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten und einer besseren Vergleichbarkeit wurden die Messungen an beiden WEA, bei Einhaltung des Toleranzbereichs, in einem Abstand von ca. 100m durchgeführt. Die Abstandsmessung erfolgte mit Hilfe eines Laser gestützten Entfernungsmessers. Um eine genauere Bestimmung der jeweiligen Messpositionen zu ermöglichen wurde der Azimut, von der WEA bezogen auf den Messstandort, mit Hilfe eines Handpeilkompasses bestimmt.

Die Temperatur wurde an jedem Messpunkt mit Hilfe eines elektronischen Thermometers bestimmt. Gleichzeitig dazu erfolgte eine Abschätzung der Bewölkungsdichte. Die Werte wurden im Messprotokoll festgehalten. Eine Messung des Luftdrucks vor Ort erfolgte nicht. Stattdessen wurden die im Anhang aufgeführten Messwerte der Wetterstation HAW-Bergedorf genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund der geringen Entfernung zum Windpark keine relevanten Unterschiede zwischen den jeweiligen Luftdrücken bestehen. Die verwendeten Messgeräte besitzen keine bzw. keine aktuelle Kalibrierung. Daher werden die folgenden Messwerte ohne die dazugehörige Messgeräteabweichung angegeben. Es soll dadurch verhindert werden, dass eine nicht vorhandene Messgenauigkeit suggeriert wird. Ebenfalls sind dadurch bei der späteren Auswertung nur qualitative und keine quantitativen Aussagen möglich.

Am ersten Messtag, den 09.09.2014, herrschte Westwind und es gab vereinzelte Schauer. Der Himmel war stark bewölkt und die Temperaturen lagen in einem Bereich von 17,3°C bis 19,0°C. Der Luftdruck nahm von 101,6 kPa auf 101,7 kPa zu. Aufgrund der Wetterbedingungen wurden nur Messungen vor der E40 durchgeführt (E40A). Es fanden im Windpark zeitgleich in einer Entfernung von ca. 500 bis 600 m Rammarbeiten für neue WEA-Fundamente statt. Die Ramme und Baustellenfahrzeuge mit akustischen Warnsignalen waren deutlich hörbar. Zusätzlich dazu wurden auf den anliegenden Feldern Arbeiten mit einem Traktor durchgeführt. Es gab vereinzelt wahrnehmbare Geräusche von überfliegenden Flugzeugen.

Am zweiten Messtag, den 12.09.2014, herrschte Nordwest- bis Nordostwind und die Wetterbedingungen ermöglichten eine Vielzahl von Messungen. Die Umgebungstemperatur stieg im Laufe des Tages von 19,0°C auf 21,9°C an. Gleichzeitig nahm die Bewölkungsdichte von wolkig bis heiter ab. Der Luftdruck sank von 102,2 kPa auf 102,1 kPa.

Es wurden Messungen hinter der E40 (E40B) und alle Messungen an der E58 durchgeführt (E58 A/B/C). In einer Entfernung von ca. 500m erfolgten Abrissarbeiten mit einem Bagger. Vergleichbar zum ersten Messtag wurden landwirtschaftliche Arbeiten durchgeführt und es gab vereinzelte Geräusche von Flugzeugen. Die Messpunkte sind in den folgenden 2 Abbildungen dargestellt.

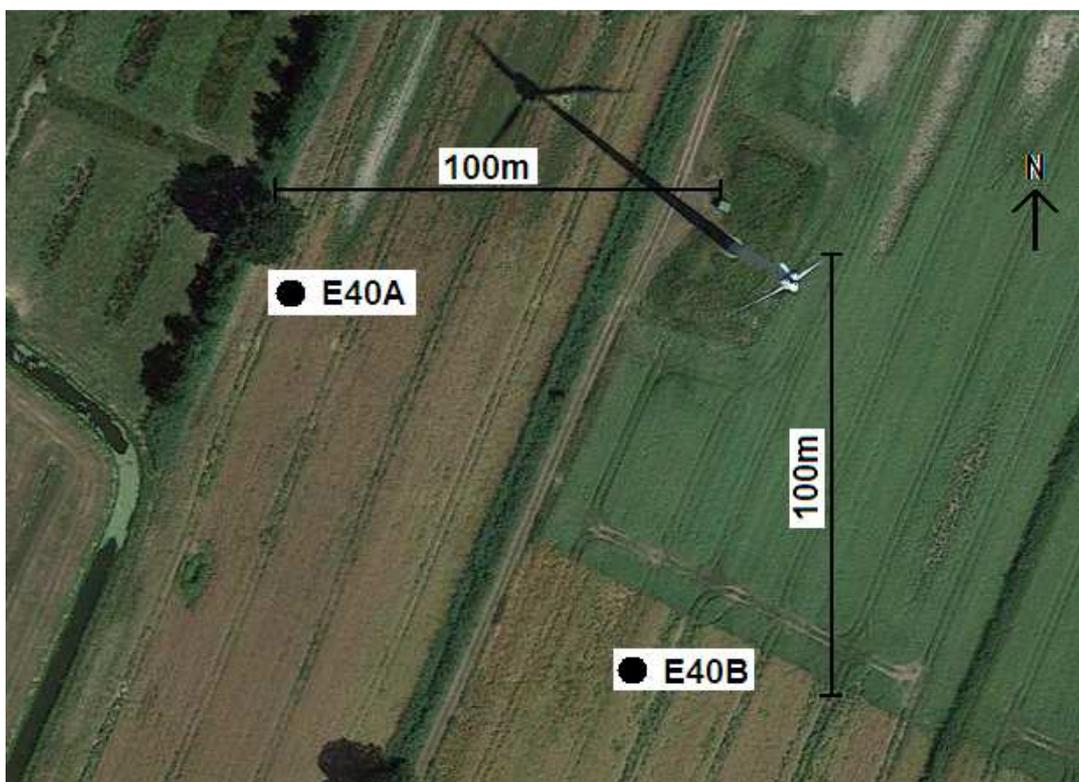


Abbildung 7 Messpositionen E40 (google maps, o.J.)

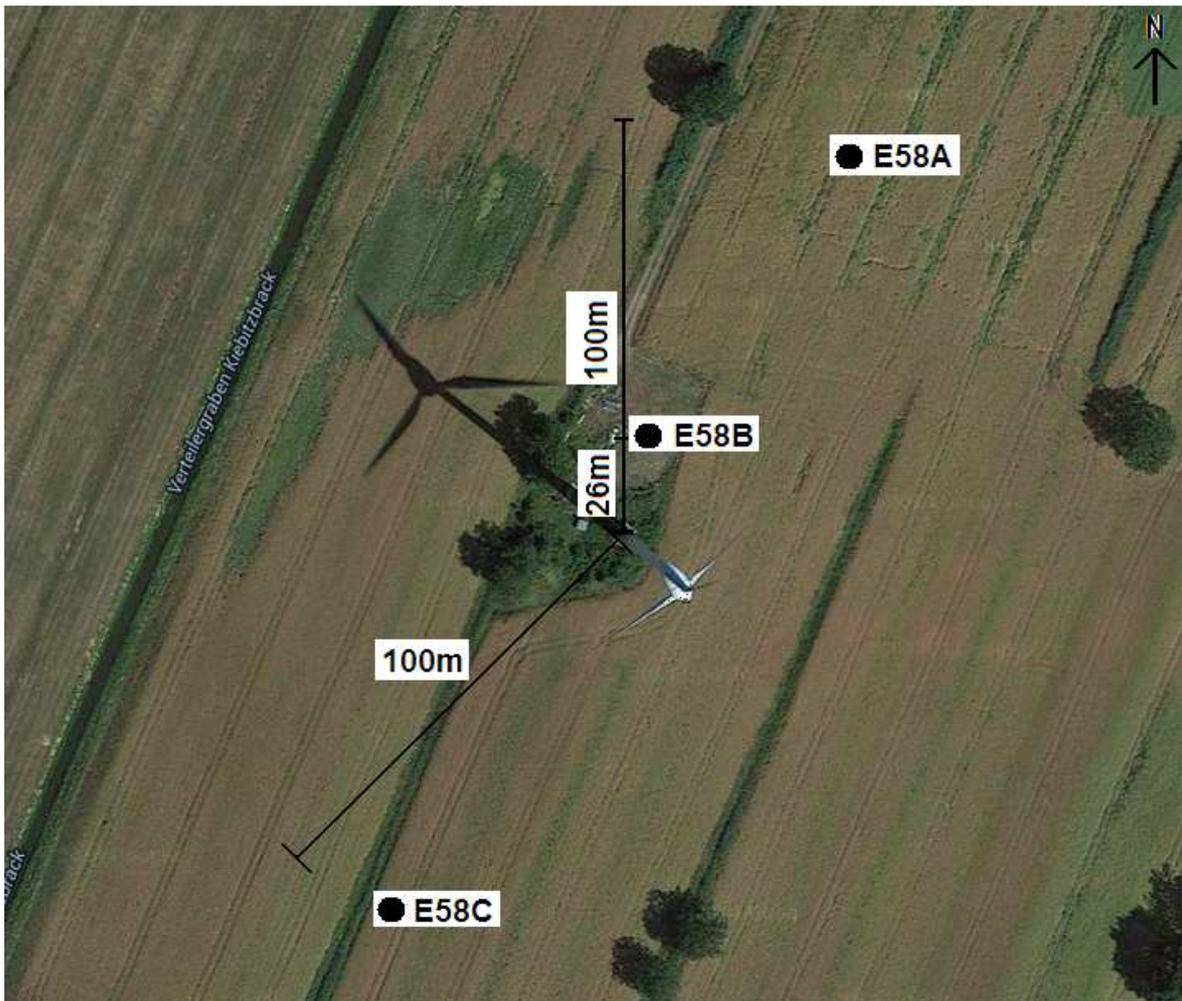


Abbildung 8 Messpositionen E58 (google maps, o.J.)

Die Betriebsdaten der WEA werden einerseits per Datenübertragung an den Betreiber übermittelt und andererseits auf der Steuerungskonsole im Eingangsbereich der WEA angezeigt. Durch Rücksprache mit dem Betreiber stellte sich heraus, dass dieser ausschließlich 10-Minutenmittelwerte empfängt. Diese sind im Anhang angefügt. Für eine Abtastung der Betriebsdaten von 1Hz wäre ein höherer Messaufwand nötig. Da dieser jedoch für diese Arbeit unverhältnismäßig ist, wurden die 10-Minutenmittelwerte des Betreibers genutzt. Die Anzeige der Steuerungskonsole wurde zusätzlich während den Messungen mit einer Kamera aufgenommen.

Die in der unteren Abbildung dargestellte Steuerungskonsole zeigt von links nach rechts die gemessene Windgeschwindigkeit des Gondelanemometers [m/s], die Rotordrehzahl [U/min], die aktuelle Leistung [kW], den Ertrag [kWh] und die Betriebsstunden [h] an.



**Abbildung 9 Steuerungskonsole Enercon**

Eine Anzeige der aktuellen Gondelposition bzw. der aktuellen Windrichtung erfolgt nicht. Daher wurden nur Messungen durchgeführt während denen sich die verlängerte Achse der Gondel und die akustische Kamera näherungsweise in einer Flucht befanden.

Der Aufbau des Messsystems erfolgte an fast allen Messpunkten nach demselben Prinzip. Eine Ausnahme bildet nur Messpunkt E58B mit einem Abstand von 26m. Zuerst wurde in der verlängerten Achse der Gondel, in einer Entfernung von 100m vor bzw. hinter der Anlage, eine Markierung gesetzt. Über der Markierung wurde das Stativ aufgebaut und auf die Anlage ausgerichtet. Nach einer Sichtkontrolle aller Mikrofone wurden diese dann mit dem Stativ verbunden. Daraufhin wurden alle weiteren Komponenten verbunden und ggf. an eine mobile Stromversorgung angeschlossen.



**Abbildung 10 aufgebautes Messsystem**

In der Software NoiselImage erfolgten im Aufnahme Fenster alle notwendigen Einstellungen. Die Aufnahmen wurden bei Nutzung aller 48 Mikrofone mit einer Abtastrate von 196kHz und Aufnahmezeit von 8 Sekunden durchgeführt. Je nach Messpunkt und den Umgebungsbedingungen variierten die Werte für Temperatur und Fokus. Als Fokus wird die Entfernung zwischen der aK und dem Messobjekt bezeichnet, die Ermittlung erfolgte dabei mit Hilfe des Laserentfernungsmessers. Die Signalverstärkung betrug standardmäßig 36 dB und wurde nur an den Messpunkten E58B und E58C aufgrund erhöhter Schalldruckpegel verringert. Alle durchgeführten Messungen wurden im Messprotokoll festgehalten und außergewöhnliche Vorkommnisse ggf. dort vermerkt. Die Benennung der gespeicherten Messdaten erfolgte nach einem einheitlichen Schema: Buchstabe des Messpunktes, Nummer der jeweiligen Messung und eventuelle Bemerkungen. Die Daten wurden für jede WEA in einem gesonderten Ordner, unter dem Pfad C:\Users\ACUser\Documents\NoiselImage\Projects\WEA TJ\, auf dem Messrechner gespeichert.

Eine genaue Ausrichtung der akustischen Kamera auf das Messobjekt konnte mit Hilfe der grafischen Darstellung im Aufnahmemodus realisiert werden. Hauptsächlich erfolgte bei beiden WEA eine Fokussierung der Gondel. Zusätzlich dazu entstanden Aufnahmen der Rotorblattspitzen, des Turmdurchgangs und eine Aufnahme in weiter Entfernung.

## 5 Auswertung der Betriebsdaten

Für die Auswertung wurden die vom Betreiber zur Verfügung gestellten 10-Minutenmittelwerte genutzt. Die Daten sind mit mitteleuropäischer Normalzeit (MEZ) angegeben. Alle Angaben in dieser Arbeit sind in mitteleuropäische Sommerzeit MESZ angegeben.

### 5.1 Positionierung des Messsystems

Um die Positionierung zu kontrollieren wurde die aufgezeichnete Gondelposition mit dem ermittelten Azimut verglichen. Für die Messungen im Lee der WEA muss der Versatz um  $180^\circ$  beachtet werden.

13 von 14 Messungen an der E40 liegen im Toleranzbereich von  $\pm 15^\circ$ . Die Messung AM1 hält die Toleranz nicht ein.

**Tabelle 4 Positionierung E40**

MESZ	Gondelposition [°]	Azimut aK [°]	Differenz [°]	Toleranz eingehalten?	Messung
09.09.2014					
13:10	249	270	21	nein	AM1
16:00	266	270	4	ja	AM2; AM3
16:10	259	270	11	ja	AM4; AM5; AM6
12.09.2014					
10:50	22	200 (20)	2	ja	BM1; BM2; BM3; BM4; BM5
11:00	23	200 (20)	3	ja	BM6; BM7
11:10	24	200 (20)	4	ja	BM8

Für die Messungen an der E58 findet eine Auswertung der Position nur für die Standorte E58A und E58C statt, da nur diese nach DIN EN 61400-11 aufgebaut wurden. Die Messungen sind nicht vollständig im Toleranzbereich. Eine Auswertung des Standortes E58B und der Sondermessung „CM12 andere WEA E40 375m“ entfällt.

**Tabelle 5 Positionierung E58**

MESZ	Gondelposition [°]	Azimut aK aK[°]	Differenz [°]	Toleranz eingehalten?	Messung
12.09.2014					
12:30	34	30	4	ja	AM1; AM2; AM3
12:50	12	30	18	nein	AM4; AM5; AM6
13:00	23	30	7	ja	AM7; AM8; AM9
16:20	20	210 (30)	10	ja	CM1; CM2
17:00	22	210 (30)	12	ja	CM3; CM4; CM5
17:10	24	210 (30)	14	ja	CM6; CM7; CM8; CM9
17:20	28	210 (30)	18	nein	CM10; CM11

## 5.2 Leistung während der Messung

Eine Kontrolle des vorgegeben Windgeschwindigkeitsfensters unter Anwendung der Leistungskurve konnte anhand der 10-Minutenmittelwerte nicht erfolgen. Die Werte in dem Zeitbereich unterliegen einer zu großen Schwankung. Teilweise sind Unterschiede von bis zu 837 kW zwischen dem minimalem und dem maximalem Leistungswert vorhanden. Es kann jedoch festgestellt werden, dass bei den Messungen AM 2 bis 3 und BM 1 bis 5 an der E40 die Windgeschwindigkeit den unteren Schwellwert nicht übersteigt. Dasselbe gilt für die Messungen AM 4 bis 6 an der E58. Die Daten sind in den beiden folgenden Tabellen dargestellt.

**Tabelle 6 Leistung E40**

MESZ	Leistung min. [kW]	Leistung Ø-10min [kW]	Leistung max. [kW]	Messung
09.09.2014				
13:10	59	167	382	A M1
16:00	47	122	265	A M2; A M3
16:10	53	139	407	A M4; A M5; A M6
12.09.2014				
10:50	25	79	195	B M1; B M2; B M3; B M4; B M5
11:00	18	121	281	B M6; B M7
11:10	51	232	454	B M8

**Tabelle 7 Leistung E58**

MESZ	Leistung min. [kW]	Leistung Ø-10min [kW]	Leistung max. [kW]	Messung
12.09.2014				
12:30	49	241	615	AM1; AM2; AM3
12:50	76	254	446	AM4; AM5; AM6
13:00	92	394	913	AM7; AM8; AM9
14:40	68	304	622	BM1; BM2; BM3; BM4
15:00	98	331	753	BM5
15:10	108	320	518	BM6
16:20	175	532	981	CM1; CM2
17:00	91	334	713	CM3; CM4; CM5
17:10	72	361	909	CM6; CM7; CM8; CM9
17:20	123	484	976	CM10; CM11

## 6 Analyse und Darstellung der Ergebnisse

Nach der Auswertung der Betriebsdaten werden mit der Software Noiselma die verschiedenen Schallquellen der WEA untersucht. Die Analyse erfolgt in einem Frequenzbereich von 315 bis 1250 Hz, da in diesem Bereich die höchsten Pegel zu erwarten sind. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 27) Daraus ergibt sich, dass die minimale Integrationszeit ca. 10ms betragen sollte. Dies entspricht dem dreifachen der Periodendauer der kleinsten Frequenz. Für die Darstellung wird die Funktion Photo 2D genutzt, die Anlagen werden für eine bessere Analyse nur anhand ihrer Konturen dargestellt. Wolken werden dadurch ebenfalls im Hintergrund angezeigt. Das Kreuz stellt die Fokussierung der Kamera dar. Beginnend mit dem jeweiligen Maximalwert (rot) umfasst die Skala 1 dB bis zum niedrigsten Wert (blau). Beide Anlagen rotieren im Uhrzeigersinn.

### 6.1 Gesamtaufnahme der WEA Vorderansicht

Es wird die Messung AM5 an der E40 verwendet. Während dieser wurden Bauarbeiten mit einer Ramme durchgeführt und Baumaschinen mit Warnsignal waren wahrnehmbar. Für einen Vergleich wird die Messung AM1 an der E58 genutzt. Bei dieser gab es keine auffälligen Störgeräusche. Die Integrationszeit beträgt 8 Sekunden. Das entspricht in etwa dreieinhalb vollständigen Umdrehungen des Rotors.

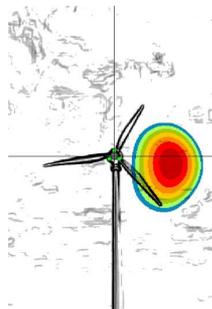


Abbildung 11 E40 Vorderansicht

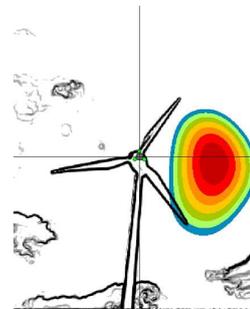


Abbildung 12 E58 Vorderansicht

Es ist erkennbar, dass bei beiden Aufnahmen die höchsten Pegel im äußeren Bereich der Rotorblätter gemessen wurden. Für die Asymmetrie und Konzentration in dem 3-Uhr-Bereich sind u.a. die an der hinteren Blattkante entstehenden Turbulenzen verantwortlich (trailing edge noise). Der erzeugte Schall breitet sich bei der Abwärtsbewegung des Rotorblattes hauptsächlich in Richtung Boden aus. Im Gegensatz dazu erfolgt eine Ausbreitung des Schalls in Richtung Himmel bei einer Aufwärtsbewegung. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 29) Ein Einfluss der starken Nebengeräusche ist nicht erkennbar.

## 6.2 Gesamtaufnahme der WEA Rückansicht

Für die Analyse werden die Messungen E40BM4 und E58CM2 genutzt. Es wird über einen Zeitraum von 8 Sekunden integriert.

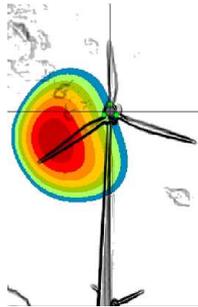


Abbildung 13 E40 Rückansicht

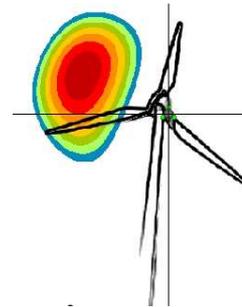


Abbildung 14 E58 Rückansicht

Es ist erkennbar, dass sich die Aufnahmen der Vorderansicht und die Aufnahmen der Rückansicht stark ähneln. Die höchsten Pegel liegen ebenfalls im äußeren Bereich der Rotorblätter. In der Aufnahme der E58 liegt das Zentrum wesentlich höher als bei der E40. Die Ursache dafür könnte die Gondelposition der E58 sein. Bei einer starken Abweichung zur Positionierung der aK ist eine Verschiebung des Zentrums möglich. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 35 f)

## 6.3 Aufnahme des Rotorblattes

Bei der Einzelbetrachtung des Rotorblattes muss die Laufzeit des Schalls zum Messstandort beachtet werden. Der Schall benötigt ca. 300 bis 400 ms bis zur akustischen Kamera, in dieser Zeit drehen sich die Rotorblätter weiter. Bei einer Rotordrehzahl im mittleren Bereich von 25 U/min entspricht dies ca. einer Achtel-Umdrehung. Das Rotorblatt wird während der Drehung von 3 bis 5 Uhr untersucht, da an dieser Stelle die maximalen Pegel erwartet werden. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 40 ff) Um eine Zuordnung zu ermöglichen wird die Integrationszeit auf 100 ms beschränkt. Es werden die Messungen E58AM8 und E58CM5 verwendet.

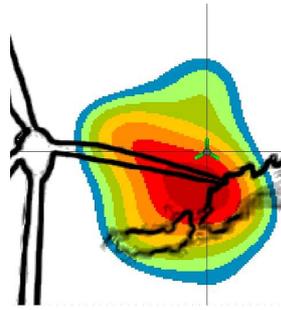


Abbildung 15 E58 Rotorblatt Vorderansicht

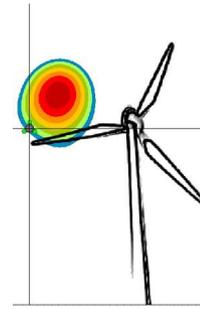


Abbildung 16 E58 Rotorblatt Rückansicht

In Abbildung 15 ist erkennbar, dass die höchsten Pegel im äußeren Blattdrittel gemessen wurden. Eine direkte Unterscheidung zwischen trailing edge noise und tip noise ist nicht möglich. Bei der Rückansicht werden die maximalen Pegel in größerer Entfernung zum Blatt gemessen. Eine genaue Zuordnung zur Schallquelle ist daher nicht möglich.

An der E58 erfolgte in einer Entfernung von 26m ein spezieller Messaufbau. Dieser fokussiert die Unterseite des Rotorblattes. Dafür war es notwendig die Kamera in einem Anstellwinkel von ca.  $60^\circ$  zur horizontalen Achse zu montieren, d.h. der Blickwinkel des Betrachters befindet sich schräg unterhalb des Blattes. Es werden 3 verschiedene Positionen des Rotors dargestellt. Für die nachstehenden Abbildungen wurde die Messung E58BM4 verwendet, die Integrationszeit beträgt 100ms.

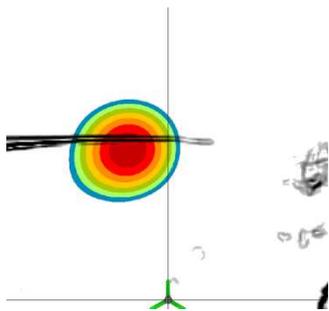


Abbildung 17 2-Uhr-Stellung

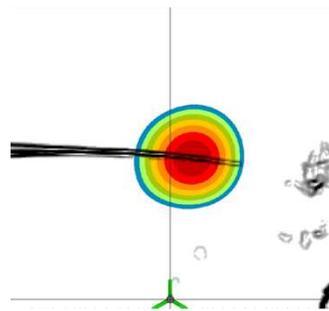


Abbildung 18 3-Uhr-Stellung

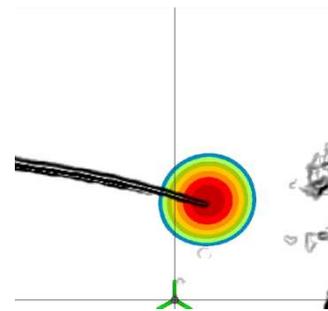


Abbildung 19 4-Uhr-Stellung

Die Abbildungen 17 – 19 zeigen, dass die maximalen Pegel sich in Richtung der Blattspitze verlagern. Um eine optische Täuschung auszuschließen wären weitere Messungen mit unterschiedlichen Anstellwinkeln bzw. Entfernungen nötig.

## 6.4 Darstellung verschiedener Oktavbänder

Um unterschiedliche Frequenzbereiche zu untersuchen wird das gesamtvermessene Frequenzband in mehrere Abschnitte, sogenannte Oktavbänder, eingeteilt. Die Bandbreite dieser Abschnitte ergibt sich aus der jeweiligen Mittenfrequenz geteilt durch die Wurzel von Zwei. (Maute, 2006, S. 65 f) Für die Analyse wurde die Messung E58AM1 genutzt. Die Integrationszeit beträgt 8s. Alle Abbildungen sind anhand der dazugehörigen Mittenfrequenz benannt.

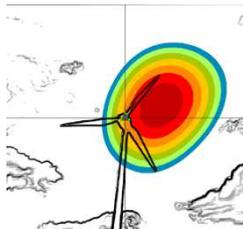


Abbildung 20 250Hz

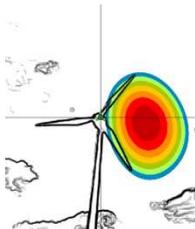


Abbildung 21 315Hz

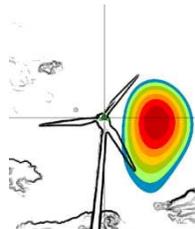


Abbildung 22 400Hz

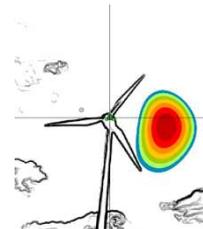


Abbildung 23 500Hz



Abbildung 24 630Hz



Abbildung 25 800Hz

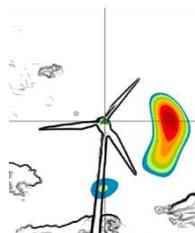


Abbildung 26 1000Hz

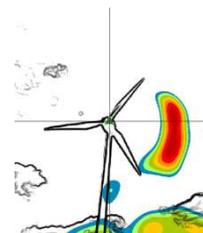


Abbildung 27 1250Hz

Es ist eine Abhängigkeit zwischen den maximalen Pegeln und dem Abstand zur Gondel erkennbar. Mit steigender Frequenz kommt es zu einer Verlagerung in den äußeren Bereich. Ursache dafür ist die mit dem Radius quadratisch steigende Anströmungsgeschwindigkeit. Geräusche vom Generator sind nicht erkennbar. In den Abbildungen 1000Hz und 1250Hz ist eventuell der Turmdurchgang ersichtlich.

## 6.5 Aufnahmen des Turmdurchganges

Zur Untersuchung des Turmdurchganges wurden mehrere Messungen an der E58 und E40 durchgeführt. Jedoch ist er nur auf der E40BM6 deutlich erkennbar. Es konnte nicht ermittelt werden aus welchem Grund er auf den anderen Aufnahmen fehlt. Nur die Oktavbänder 1000 Hz und 1250 Hz zeigen den Turmdurchgang an. Alle anderen zeigen die Maximalpegel am herabkommenden Rotorblatt. Für einen Vergleich ist die Aufnahme mit einem Frequenzbereich von 315 bis 1250 Hz dargestellt.

Bei einer Rotordrehzahl im mittleren Bereich von 25 U/min ergibt sich, aufgrund der 3 Rotorblätter, eine Turmdurchgangsfrequenz von 1,25Hz. Die minimale Integrationszeit sollte daher 3,75 Sekunden betragen. Es wurde eine Integrationszeit von 8 Sekunden gewählt.

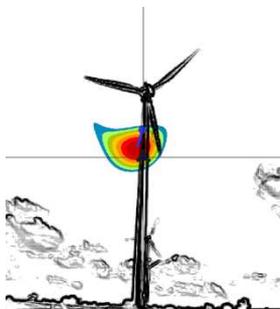


Abbildung 28 Turm 1000Hz

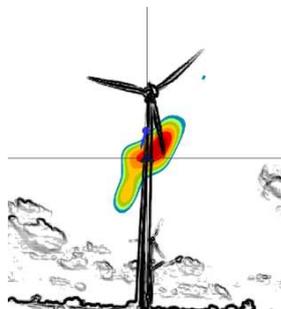


Abbildung 29 Turm 1250Hz

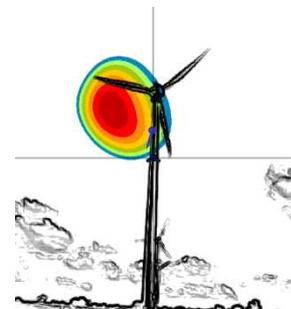


Abbildung 30 315Hz bis 1250Hz

## 6.6 Messung in weiter Entfernung

Zu Testzwecken wurde vom Standort E58C eine WEA in 375m Entfernung gemessen. Die Anlagenhöhe und Leistung entspricht annähernd der E40. Es liegen jedoch keine Betriebsdaten für die WEA vor. Der Messpunkt liegt nicht im Lee der WEA. Der genaue Versatz konnte aufgrund der fehlenden Betriebsdaten nicht ermittelt werden. Es wurde die Messung E58C12 mit einer Integrationszeit von 8 Sekunden verwendet.

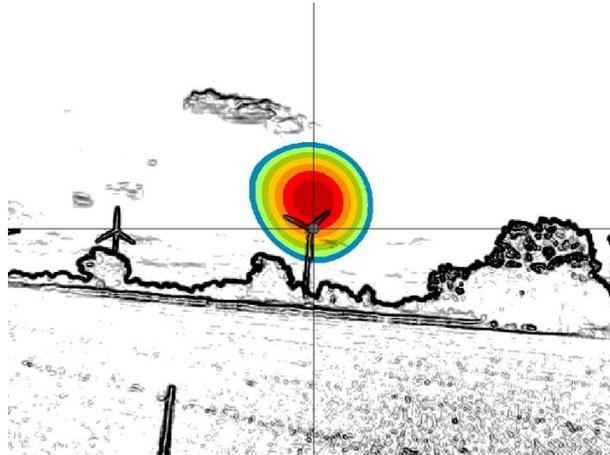


Abbildung 31 WEA in 375m Entfernung

Die Signale können der WEA eindeutig zugeordnet werden. Die zusätzliche WEA im Hintergrund und die nahestehende E58 beeinflussen das Ergebnis nicht. Die bekannte Verteilung der maximalen Pegel auf der Seite des herabkommenden Rotorblattes ist nicht erkennbar. Eine Ursache dafür könnte der versetzte Messaufbau sein.

## 6.7 Analyse der Frequenzspektren

Bei der Analyse der Frequenzspektren wurde ein A-Filter verwendet, dadurch wird die nicht lineare Wahrnehmung des menschlichen Gehörs beachtet. Im ersten Schritt wurden die Schalldruckpegel der jeweiligen Oktavbänder miteinander verglichen. Der Auswertzeitraum betrug 8 Sekunden, wobei die Messungen E40AM5 und E58AM2 verwendet wurden. Beide wurden vor den Anlagen und mit einer Fokussierung auf die Gondel durchgeführt.

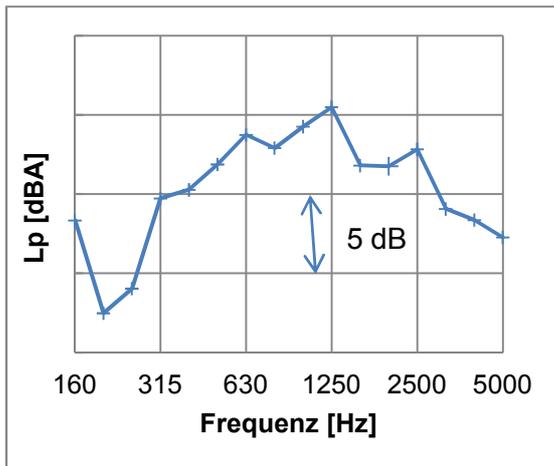


Abbildung 32 Spektrum E40AM5

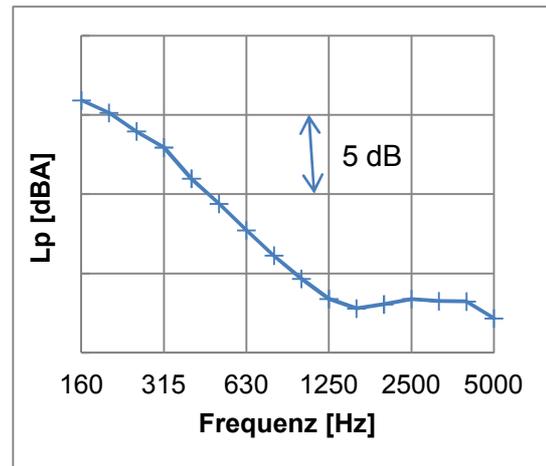
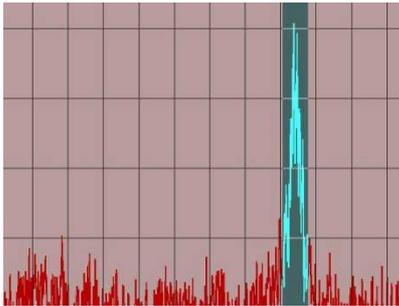


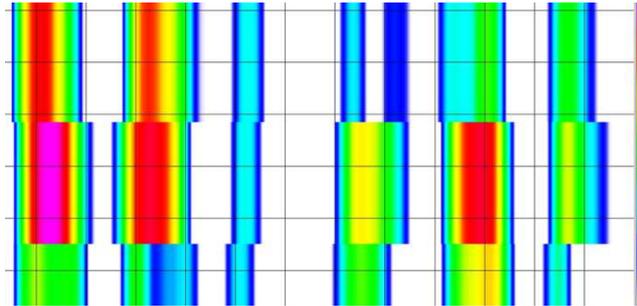
Abbildung 33 Spektrum E58AM2

Es ist zu erkennen, dass sich die beiden Graphen grundlegend voneinander unterscheiden. Eine mögliche Ursache dafür könnten stark unterschiedliche Betriebsbedingungen zum Zeitpunkt der Messung sein. Das Spektrum der E40 ähnelt den Messungen von Bowdler & Leventhall. Der markanteste Unterschied liegt in dem Einbruch bei 200 bis 250 Hz und dem Maxima bei 1250 Hz. (Bowdler & Leventhall, 2011, S. 27) Das Spektrum der E58 entspricht diesem in keinsten Weise. Die Schalldruckpegel der Frequenzen von 160 bis 500 Hz dominieren diese Messung. Eine mögliche Ursache dafür könnte ein Einbruch der Windgeschwindigkeit und Rotordrehzahl zum Messzeitpunkt sein. Für eine verbesserte Aussagekraft wären die Betriebsdaten erhöhten Abtastung notwendig.

Anhand des Spektrums können einzelne Frequenzen genauer untersucht werden. Dazu gehört der Peak im Oktavband 1250 Hz, dieser ist um ca. 15 dB(A) größer als die umliegenden Frequenzen. Der Peak besitzt eine Breite von ca. 8 Hz und liegt bei 1.189 bis 1.197 Hz. Er ist bei den Messungen E40A4 bis 6 erkennbar. Auf der Darstellung des Photo2D ist eine Lokalisation nicht möglich, aus diesem Grund wurde eine Darstellung im Spektrogramm gewählt. Das Spektrogramm ermöglicht eine Darstellung des Schalldrucks in Abhängigkeit von Frequenz [Hz] und Zeit [ms]. Die Skale entspricht 15 dB(A).



**Abbildung 34 Peak 5 dB(A)/ div**



**Abbildung 35 Spektrogramm 500ms/ div**

Auf dem Spektrogramm ist ein pulshaftes Signal zu erkennen. Die Pulsfrequenz beträgt in etwa 1Hz. Anhand der Aufnahmen konnte letztendlich festgestellt werden, dass dieser Peak nicht von der WEA verursacht wird, sondern der Baumaschine mit Warnsignal zuzuordnen ist.

## 7 Fazit

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass ein Messverfahren in Anlehnung an die DIN EN 61400-11 bei der Messung von WEA mit einer aK aussagekräftige Messungen ermöglicht. Der Messaufbau kann für die Positionierung in Luv und Lee direkt übernommen werden. Die in der Norm angegebenen Einflussgrößen ermöglichen eine qualitative Analyse der Messergebnisse. Es konnte aufgrund unzureichender Betriebsdaten jedoch nicht ermittelt werden, inwiefern diese Einflussgrößen für eine qualitative Analyse genügen.

Für die Messung wurden die maßgebenden Umwelteinflüsse bestimmt. Diese sind, die Umgebungstemperatur, die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung, der atmosphärische Luftdruck und die Rauigkeitslänge der Umgebung.

Die Betriebsdaten der WEA sind für eine Analyse der Messung notwendig. Folgende Daten sollten bekannt sein, die Gondelposition, die elektrische Leistung, die Rotordrehzahl und die Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung an der Gondel.

Die Schallemission von WEA ist im Besonderen von der vorherrschenden Windgeschwindigkeit abhängig. Der Wind weht un stetig, daher ist für eine vollständige Analyse der Schallemissionen, in Abhängigkeit zur Windgeschwindigkeit, eine Langzeitmessung notwendig. Diese war, Aufgrund des vorgegeben Zeitfenster dieser Abschlussarbeit, nicht möglich.

Eine Untersuchung der Schallemission des Getriebes konnte, Aufgrund des getriebelosen Triebstranges, nicht durchgeführt. Diese Untersuchung sollte jedoch in späteren Arbeiten, zur Validierung der aK, durchgeführt werden.

Anhand der Freifeldmessungen wurde gezeigt, dass mit einer aK eine Lokalisation von bauteilspezifischen Schallquellen an WEA möglich ist. Die maximalen Schallemissionen konnten dem äußeren Drittel des Rotorblattes zugeordnet werden. Desweiteren konnte eine Abhängigkeit zwischen Frequenz und Lage der maximalen Schallemission am Rotorblatt nachgewiesen werden. Die Untersuchungen haben bestätigt, dass die Schallentwicklung während des Turmdurchgangs lokalisierbar ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass die aK z.B. im Bereich der Rotorblattentwicklung eingesetzt werden könnte.

Um eine quantitative Analyse zu ermöglichen, muss bei weiteren Untersuchungen mit der aK eine höhere Abtastung der Betriebsdaten erfolgen. Eine Abtastung von 1 Hz sollte nach DIN EN 61400-11 gewählt werden. Als Alternative dazu wäre ein Windmessmast mit 10 m Höhe oder ein lasergestütztes Windgeschwindigkeitsmesssystem (LiDAR) möglich. Bei einer Fortsetzung der Untersuchung könnten einzelne Komponenten der WEA, z.B. die Rotorblattspitzen unterschiedlicher Bauart oder Rotorblätter mit verschiedenem Design, über einen längeren Messzeitraum untersucht werden. Diese Untersuchungen wären evtl. für eine Weiterentwicklung von schalloptimierten Rotorblättern verwendbar.

## 8 Literaturverzeichnis

- BImSchG. (2014). *Bundes-Immissionsschutzgesetz In der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013* (13. Auflage). München: Deutscher Taschenbuch Verlag.
- Bowdler, D., & Leventhall, G. (2011). *Wind Turbine Noise*. Brentwood Essex, United Kingdom: Multi-Science Publishing Co. Ltd.
- Deutscher Wetterdienst. (o.J.). *www.deutscher-wetterdienst.de*. Abgerufen am 21. September 2014 von <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=G&DAT=Gesamtbedeckungsgrad>
- DIN EN 61400-11. (09 2013). *Windenergieanlagen - Teil 11: Schallmessverfahren* (IEC 61400-11:2012); Deutsche Fassung EN 61400-11:2013.
- Enercon. (o.J.). <http://www.kulak.com.pl>. Abgerufen am 07. Oktober 2014 von <http://www.kulak.com.pl/Wiatraki/pdf/enercon%20e40%20600.pdf>
- Gasch, R., & Twele, J. (2011). *Windkraftanlagen Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb* (7. Auflage). Berlin, Deutschland: Vieweg + Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011.
- gfai tech GmbH. (2013). *Akustische Kamera Schulungsunterlagen 03/2013*.
- gfai tech GmbH. (Mai 2012). <http://www.acoustic-camera.com>. Abgerufen am 21. September 2014 von [http://www.acoustic-camera.com/fileadmin/acoustic-camera/products/Microphome\\_Arrays/Stern/Array-Star-48\\_800x600\\_IMG\\_6781-E1-0.jpg](http://www.acoustic-camera.com/fileadmin/acoustic-camera/products/Microphome_Arrays/Stern/Array-Star-48_800x600_IMG_6781-E1-0.jpg)
- gfai tech GmbH. (21. September 2014). <http://www.acoustic-camera.com>. Abgerufen am 21. September 2014 von <http://www.acoustic-camera.com/de/produkte/datenaufnahme/datenrekorder-mcdrec.html>
- google maps. (o.J.). *maps.google.de*. Abgerufen am 29. 09 2014 von <https://maps.google.de/maps?t=h&ll=53.4201016,10.237824&spn=0.0022303,0.00499&output=classic&dg=opt>
- google maps. (o.J.). *maps.google.de*. Abgerufen am 29. 09 2014 von <https://maps.google.de/maps?t=h&ll=53.4201016,10.237824&spn=0.0022303,0.00499&output=classic&dg=opt>
- Hau, E. (2008). *Windkraftanlagen Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit* (4. Auflage). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- Lindner, H. (2010). *Physik für Ingenieure* (18. Auflage). München, Deutschland: Carl Hanser Verlag München.
- Maute, D. (2006). *Technische Akustik und Lärmschutz*. Aalen: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Umweltbundesamt. (27. 08 2013). <http://www.umweltbundesamt.de>. Abgerufen am 15. 10 2014 von <http://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten/corine-land-cover-clc>
- Wagner, S., Bareiß, R., & Guidati, G. (1996). *Wind Turbine Noise*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

## Anhang

Messprotokoll E40 .....	42
Messprotokoll E58 .....	47
Leistungskurve E40 .....	53
Leistungskurve E58 .....	54
Betriebsdaten E40 .....	55
Betriebsdaten E58 .....	56
Luftdruck Wetterstation HAW-Bergedorf .....	57

## Messprotokoll E40

Dokumentation in Anlehnung an DIN 61400-11  
Entwurf Melanie Buder

Projekt: Bachelorarbeit T. Jakob - E40

Einzelheiten zur WEA:	
Hersteller	Enercon
Typenbezeichnung	E40/6.44
Seriennummer	keine Angabe

Einzelheiten zur Betriebsweise:	
Vertikale oder Horizontal-achs Maschine	Horizontalachsmaschine
Luv- oder Leeläufer	Luvläufer
Nabenhöhe	65m
horizontalen Abstand zwischen Rotormittelpunkt und der Turmachse	ca. 5m
Rotordurchmesser	44m
Turmtyp (Gitter oder Rohr)	Rohr
passiv stall-, aktiv stall- oder pitchgeregelte Anlage	pitchgeregelt
konstante oder variable Drehzahl	variable Drehzahl
Leistungskurve	siehe Anhang Leistungskurve E40

Einzelheiten zum Rotor:	
Vorhandensein von Vortexgeneratoren, Stall- Strips oder sägezahnförmiger Blatt-hinterkanten	nein
Typ der Rotorblätter	GFK AERO E-40
Anzahl der Rotorblätter	3

Einzelheiten zum Getriebe:	
Hersteller	getriebelose WEA
Typenbezeichnung	-
Getriebetyp	-

Einzelheiten zum Generator:	
Hersteller	Enercon
Typenbezeichnung	synchronous
Übersetzung	-

sonstige Angaben:	maximale Drehzahl 34,0 U/min
	Netzfrequenz 50,0 Hz

Merkmale der Umgebung:	
Einzelheiten des Standortes (Ortsangabe wenn möglich mit geografischen Koordinaten, andere relevante Informationen, Lageplan)	Hamburg keine konkrete Ortsangabe auf Wunsch des Betreibers
Art der Landschaft (hügelig, flach, Klippen, Berg, usw.) in dem umgebenden Gebiet (im Umkreis von 1km)	flach
Oberflächencharakteristiken (z.B. Gras, Sand, Bäume, Büsche, Wasserflächen, etc.)	Agrarflächen, Baumreihen, Wassergräben und Feldwege
nahe gelegene reflektierende Oberflächen wie Gebäude oder andere Gebilde wie Felsen, Bäume, Wasserflächen	vereinzelte Bäume und Büsche
andere nahe gelegene Schallquellen, die möglicherweise den Fremdgeräuschpegel beeinflussen können wie andere WEA, Autobahn, Industriekomplexe Flughäfen	8 weitere WEA in der direkten Umgebung

Messgeräte:	
Gondelanemometer	Schalenanemometer
Hersteller	nicht bekannt
Messbereich und Unsicherheit	nicht bekannt
Gondelwindrichtungsgeber	nicht bekannt
Hersteller	nicht bekannt
Messbereich und Unsicherheit	nicht bekannt
Temperaturmessgerät	Thermologger 309
Hersteller	Voltcraft
Messbereich und Unsicherheit	0°C bis +50°C; ± (0,2%+1K)
Luftdruckmessgerät	Wetterstation HAW – Bergedorf
Hersteller	nicht bekannt
Messbereich und Unsicherheit	nicht bekannt

Bemerkung:	

Datenblatt – Hauptübersicht  
 Entwurf Torsten Jakob

Projekt: Bachelorarbeit T. Jakob - E40  
 Prüfer: Torsten Jakob

Anemometerposition und Messhöhe: 65m, Mitte Gondel  
 Windrichtungsposition und Messhöhe: 65m, Mitte Gondel  
 Rauigkeitslänge: 0,2 m

Allgemeine Parameter

Datum	09.09.2014	09.09.2014	09.09.2014	12.09.2014	12.09.2014
Uhrzeit [hh:mm]:	12:00	14:00	16:00	10:30	12:00
Temperatur in °C:	18,5	17,3	17,5	19,0	21,9
Luftdruck in kPa:	101,7	101,5	101,4	102,2	102,2
Bewölkungsdichte:	6/8	6/8	6/8	4/8	3/8

Messpunkt	Anzahl der Messungen	Entfernung [m]	Azimut [°]	Windrichtung [°]
A	6	100	270	ca. 270
B	8	100	200	ca. 20

# Datenblatt-Messpunkt

Entwurf: Torsten Jakob

Projekt: Bachelorarbeit T. Jakob - E40  
Messpunkt: A  
Datum: 09.09.2014  
Uhrzeit: 12:00 Uhr  
Temperatur: 18,5 °C  
Abstand zur WEA: 100 m  
Azimut aK: 270 °  
Neigung der AC: 30 °

Dateiname	Verstärkung aK [dB]	Fokus der aK [m]	Bemerkung
AM1	36	117	keine markanten Nebengeräusche
AM2	36	117	Ramme hörbar
AM3	36	117	hintere WEA im Fokus
AM4	36	117	Flugzeug und Ramme hörbar
AM5	36	117	Flugzeug und Ramme hörbar
AM6	36	117	Baumaschine mit piependem Signal

Datenblatt-Messpunkt

Entwurf: Torsten Jakob

Projekt: Bachelorarbeit T. Jakob - E40  
 Messpunkt: B  
 Datum: 12.09.2014  
 Uhrzeit: 10:30 Uhr  
 Temperatur: 19,0 °C  
 Abstand zur WEA: 100 m  
 Azimut aK: 200 °  
 Neigung der AC: 30 °

Dateiname	Verstärkung aK [dB]	Fokus der aK [m]	Bemerkung
BM1	36	116	Traktor und Abrissbagger hörbar; kein Video
BM2	36	116	Traktor und Abrissbagger hörbar; kein Video
BM3	36	116	Traktor und Abrissbagger hörbar
BM4	36	116	Traktor und Abrissbagger hörbar
BM5	36	116	Rotorblattspitze rechts im Fokus
BM6	36	110	Turmdurchgang im Fokus
BM7	36	110	Einzelmessung Traktor Fokus nachträglich ändern auf 270m

## Messprotokoll E58

Dokumentation in Anlehnung an DIN 61400-11  
Entwurf Melanie Buder

Projekt: Bachelorarbeit T. Jakob – E58

Einzelheiten zur WEA:	
Hersteller	Enercon
Typenbezeichnung	E58
Seriennummer	keine Angabe

Einzelheiten zur Betriebsweise:	
Vertikale oder Horizontal-achs Maschine	Horizontalachsmaschine
Luv- oder Leeläufer	Luvläufer
Nabenhöhe	70m
horizontalen Abstand zwischen Rotormittelpunkt und der Turmachse	ca. 5m
Rotordurchmesser	58,6m
Turmtyp (Gitter oder Rohr)	Rohr
passiv stall-, aktiv stall- oder pitchgeregelte Anlage	pitchgeregelt
konstante oder variable Drehzahl	variable Drehzahl
Leistungskurve	siehe Anhang Leistungskurve E58

Einzelheiten zum Rotor:	
Vorhandensein von Vortexgeneratoren, Stall- Strips oder sägezahnförmiger Blatt-hinterkanten	nein
Typ der Rotorblätter	GFK AERO E-58
Anzahl der Rotorblätter	3

Einzelheiten zum Getriebe:	
Hersteller	getriebelose WEA
Typenbezeichnung	-
Getriebetyp	-

Einzelheiten zum Generator:	
Hersteller	Enercon
Typenbezeichnung	synchronous
Übersetzung	-

sonstige Angaben:	maximale Drehzahl 24,0 U/min
	Netzfrequenz 50,0 Hz

Merkmale der Umgebung:	
Einzelheiten des Standortes (Ortsangabe wenn möglich mit geografischen Koordinaten, andere relevante Informationen, Lageplan)	Hamburg keine konkrete Ortsangabe auf Wunsch des Betreibers
Art der Landschaft (hügelig, flach, Klippen, Berg, usw.) in dem umgebenden Gebiet (im Umkreis von 1km)	flach
Oberflächencharakteristiken (z.B. Gras, Sand, Bäume, Büsche, Wasserflächen, etc.)	Agrarflächen, Baumreihen, Wassergräben und Feldwege
nahe gelegene reflektierende Oberflächen wie Gebäude oder andere Gebilde wie Felsen, Bäume, Wasserflächen	vereinzelte Bäume und Büsche
andere nahe gelegene Schallquellen, die möglicherweise den Fremdgeräuschpegel beeinflussen können wie andere WEA, Autobahn, Industriekomplexe Flughäfen	8 weitere WEA in der direkten Umgebung

Messgeräte:	
Gondelanemometer	Schalenanemometer
Hersteller	nicht bekannt
Messbereich und Unsicherheit	nicht bekannt
Gondelwindrichtungsgeber	nicht bekannt
Hersteller	nicht bekannt
Messbereich und Unsicherheit	nicht bekannt
Temperaturmessgerät	Thermologger 309
Hersteller	Voltcraft
Messbereich und Unsicherheit	0°C bis +50°C; $\pm (0,2\%+1K)$
Luftdruckmessgerät	Wetterstation HAW – Bergedorf
Hersteller	nicht bekannt
Messbereich und Unsicherheit	nicht bekannt

Bemerkung:	

Datenblatt – Hauptübersicht  
 Entwurf Torsten Jakob

Projekt: Bachelorarbeit T. Jakob – E58  
 Prüfer: Torsten Jakob

Anemometerposition und Messhöhe: 65m, Mitte Gondel  
 Windrichtungsposition und Messhöhe: 65m, Mitte Gondel  
 Rauigkeitslänge: 0,2 m

Allgemeine Parameter

Datum	12.09.2014	12.09.2014	12.09.2014		
Uhrzeit [hh:mm]:	12:00	14:00	16:00		
Temperatur in °C:	21,5	21,9	21,5		
Luftdruck in kPa:	102,2	102,2	102,1		
Bewölkungsdichte:	3/8	3/8	2/8		

Messpunkt	Anzahl der Messungen	Entfernung [m]	Azimut [°]	Windrichtung [°]
A	9	100	30	ca. 30
B	6	26	0	ca. 30
C	12	100	210	ca. 30

## Datenblatt-Messpunkt

Entwurf: Torsten Jakob

Projekt: Bachelorarbeit T. Jakob – E58  
Messpunkt: A  
Datum: 12.09.2014  
Uhrzeit: 12:00 Uhr  
Temperatur: 21,5 °C  
Abstand zur WEA: 100 m  
Azimut aK: 30 °  
Neigung der AC: 40 °

Dateiname	Verstärkung aK [dB]	Fokus der aK [m]	Bemerkung
AM1	36	120	keine markanten Nebengeräusche
AM2	36	120	keine markanten Nebengeräusche
AM3	36	120	keine markanten Nebengeräusche
AM4	36	120	schallharte Platte vorn links
AM5	36	120	schallharte Platte vorn rechts
AM6	36	120	schallharte Platte vorn mittig
AM7	36	110	Turmdurchgang
AM8	36	110	Blattspitze links
AM9	36	110	Blattspitze rechts

Datenblatt-Messpunkt

Entwurf: Torsten Jakob

Projekt: Bachelorarbeit T. Jakob – E58  
 Messpunkt: B  
 Datum: 12.09.2014  
 Uhrzeit: 14:30 Uhr  
 Temperatur: 21,9 °C  
 Abstand zur WEA: 26 m  
 Azimut aK: 0 °  
 Neigung der AC: 60 °

Dateiname	Verstärkung aK [dB]	Fokus der aK [m]	Bemerkung
BM1	36	73	Blattspitze rechts im Fokus; Abrissbagger hörbar
BM2	36	73	Blattspitze rechts im Fokus; Abrissbagger hörbar
BM3	24	73	Blattspitze rechts im Fokus; Flugzeug und Abrissbagger hörbar
BM4	24	73	Blattspitze rechts im Fokus; starke Nebengeräusche
BM5	24	70	Turm im Fokus; Traktor hörbar
BM6	24	70	Turm im Fokus; geringe Nebengeräusche

Datenblatt-Messpunkt

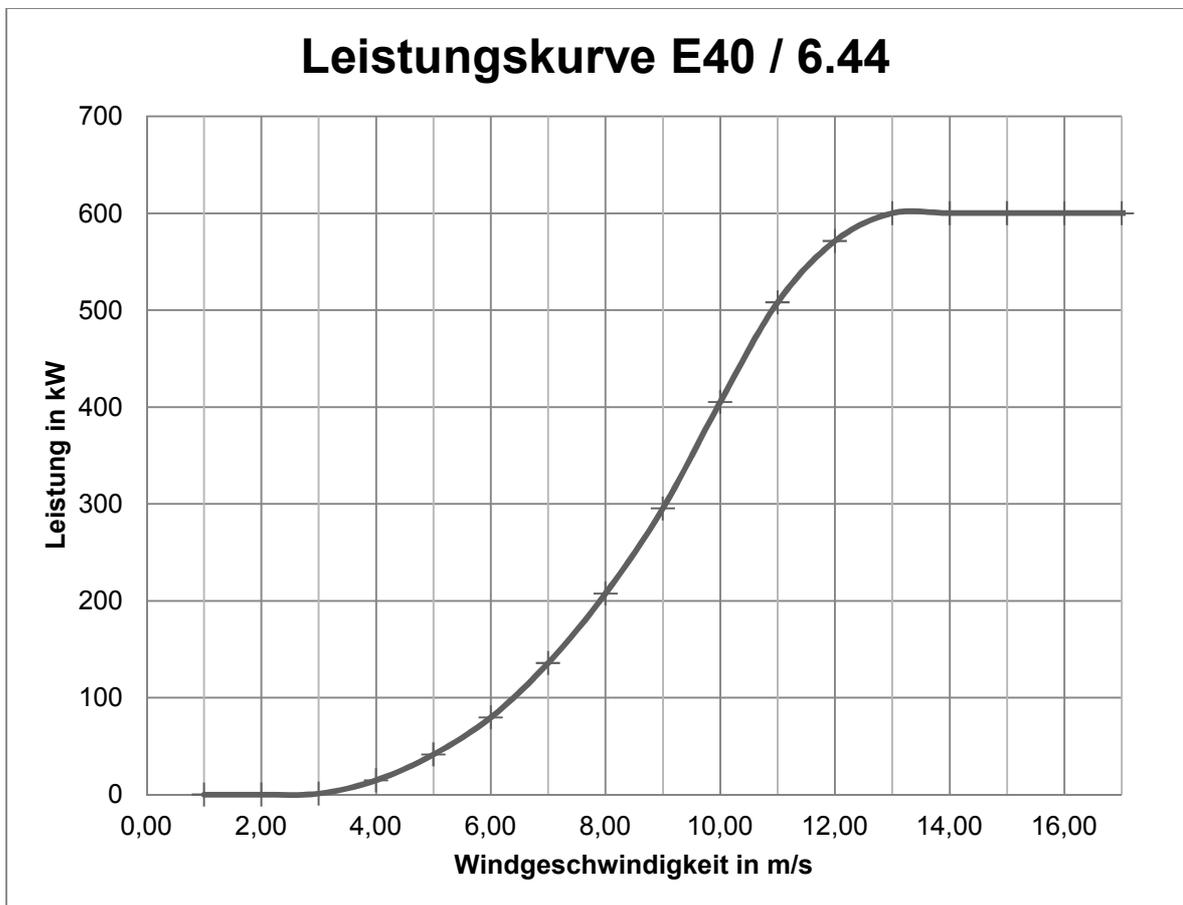
Entwurf: Torsten Jakob

Projekt: Bachelorarbeit T. Jakob – E58  
 Messpunkt: C  
 Datum: 12.09.2014  
 Uhrzeit: 16:00 Uhr  
 Temperatur: 21,5 °C  
 Abstand zur WEA: 100 m  
 Azimut aK: 210 °  
 Neigung der AC: 40 °

Dateiname	Verstärkung aK [dB]	Fokus der aK [m]	Bemerkung
CM1	24	120	leichte Nebengeräusche durch Gras
CM2	36	120	Fokus Gondelmitte
CM3	36	120	Fokus Gondelmitte
CM4	30	120	Fokus Gondelmitte
CM5	30	120	Blattspitze rechts im Fokus
CM6	30	120	Blattspitze rechts im Fokus
CM7	30	110	Blattspitze links im Fokus
CM8	30	110	Turm im Fokus
CM9	30	110	Turm im Fokus
CM10	30	110	Blattspitze rechts im Fokus
CM11	30	110	Blattspitze rechts im Fokus
CM12	30	110	andere WEA E40; Entfernung ca. 375m; Fokus nachträglich ändern

## Leistungskurve E40

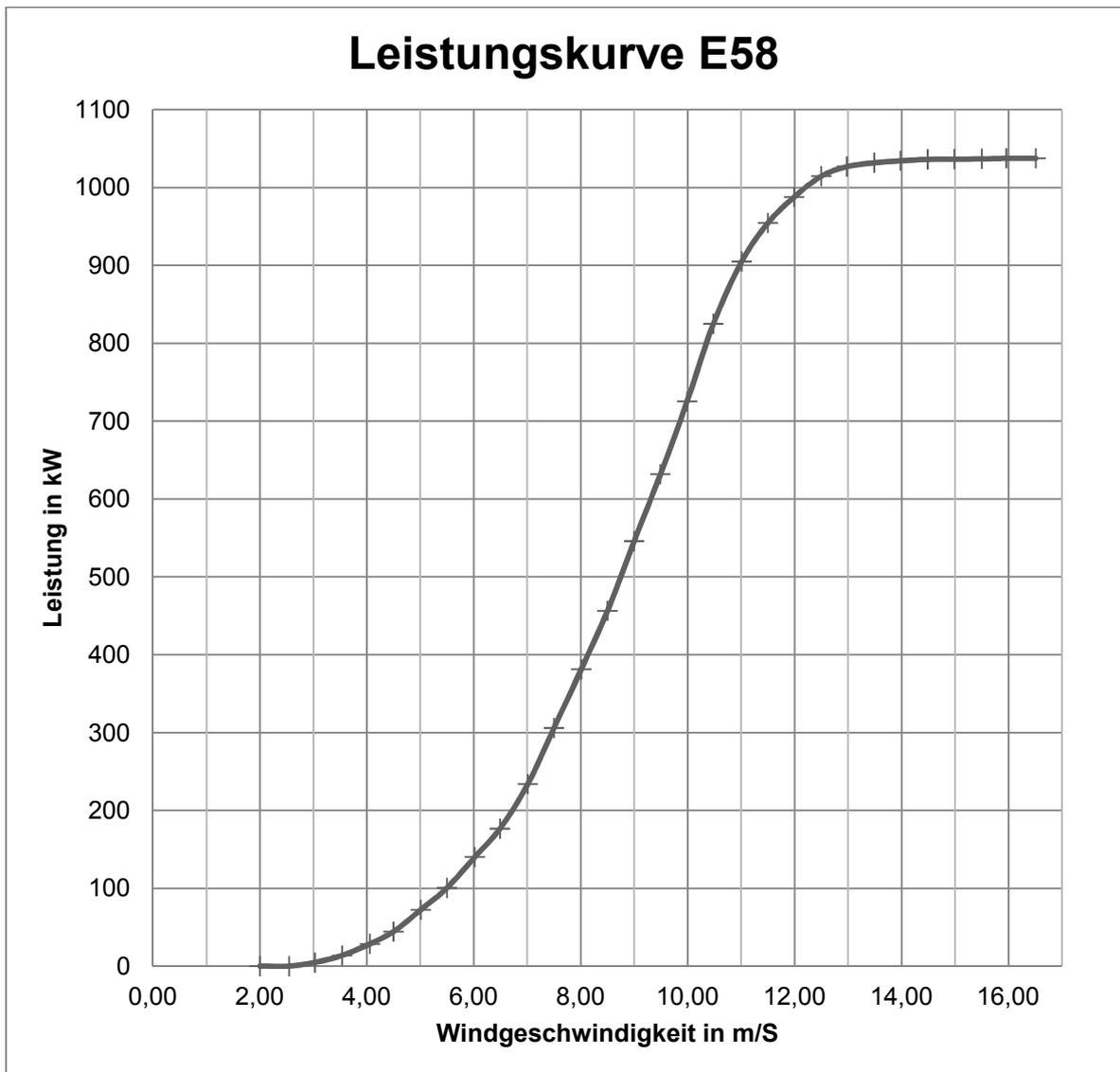
Die Leistungskurve wurde von der Firma Windtest im Juni 2001 vermessen.



85% der Nennleistung:	510 kW	
v-Wind 85% $P_{\text{Nennleistung}}$ :	11 m/s	
Messkorridor:	8,8 m/s bis	14,3 m/s
	278 kW bis	600 kW

## Leistungskurve E58

Die Leistungskurve wurde, am 12. März 2002, von der Firma „Ingenieur-Werkstatt“ Gerstenbergstr. 31 in 22609 Hamburg vermessen.



85% der Nennleistung:	850 kW	
v-Wind 85% $P_{\text{Nennleistung}}$ :	10,64 m/s	
Messkorridor:	8,5 m/s bis	14 m/s
	450 kW bis	1035 kW

## Betriebsdaten E40

Datum / Uhrzeit (MEZ)	Wind Ø [m/s]	Drehzahl Ø [1/min]	Leistung min. [kW]	Leistung Ø [kW]	Leistung max. [kW]	Gondelposition [°]
09.09.2014						
12:00	8,1	30,48	25	235	486	247
12:10	7,4	28,02	59	167	382	249
12:20	8,2	30,78	90	238	499	254
12:30	7,1	27,32	32	156	342	255
12:40	7,1	27,33	54	151	266	259
12:50	7,7	28,52	26	191	612	259
13:00	9,1	32,9	122	312	607	268
13:10	7,3	28,15	49	169	321	265
13:20	6,6	25,44	36	121	249	260
13:30	7,5	28,5	36	185	447	259
13:40	7,1	27,27	49	150	284	251
13:50	6,8	26,07	25	133	292	257
14:00	6,2	23,77	36	95	230	250
14:10	6,6	25,42	27	120	231	245
14:20	7,2	27,06	54	156	419	250
14:30	8,7	32,4	118	287	595	259
14:40	5,7	22,19	12	72	179	260
14:50	6,7	25,36	59	120	285	260
15:00	6,7	25,47	47	122	265	266
15:10	6,9	26,29	53	139	407	259
15:20	6,9	26,34	49	137	272	268
15:30	8,4	31,35	103	261	550	268
15:40	7,8	28,83	40	212	626	288
15:50	6,3	24,2	51	101	180	286
16:00	5,1	20,88	22	52	165	279
16:10	5,2	20,72	15	49	102	279
16:20	7,4	28,05	21	170	391	274
12.09.2014						
09:50	5,8	22,77	25	79	195	22
10:00	6,5	25,45	18	121	281	23
10:10	8,1	30,46	51	232	454	24

## Betriebsdaten E58

Datum / Uhrzeit (MEZ)	Wind Ø [m/s]	Drehzahl Ø [1/min]	Leistung min. [kW]	Leistung Ø [kW]	Leistung max. [kW]	Gondelpos. [°]
12.09.2014						
11:30	6,6	17,4	49	241	615	34
11:40	7,4	19,26	39	354	862	33
11:50	6,7	18,05	76	254	446	12
12:00	7,5	19,5	92	394	913	23
12:10	7,4	19,52	67	371	861	28
12:20	7,7	20,23	60	406	757	20
12:30	7,3	19,37	113	334	682	22
12:40	6,9	18,46	114	278	627	28
12:50	6,9	18,35	90	281	693	25
13:00	8	20,54	119	441	904	40
13:10	6,7	18,08	69	258	549	22
13:20	7,4	19,74	156	358	685	20
13:30	8	20,75	164	459	952	19
13:40	7	18,92	68	304	622	30
13:50	7,5	19,56	67	378	1.031	33
14:00	7,3	19,11	98	331	753	28
14:10	7,1	19,25	108	320	518	22
14:20	7,2	19,71	153	340	621	13
14:30	7,7	20,11	117	414	942	19
14:40	8,2	20,87	126	460	971	28
14:50	9,4	22,35	312	674	1.075	30
15:00	7,5	19,6	104	355	733	34
15:10	7,3	19,43	133	339	833	22
15:20	8,5	21,39	175	532	981	20
15:30	8,9	21,06	127	586	1.039	29
15:40	9,1	22	191	609	1.046	28
15:50	7,3	19,54	108	343	651	21
16:00	7,2	19,22	91	334	713	22
16:10	7,5	19,41	72	361	909	24
16:20	8,2	20,48	123	484	976	28
16:30	9	22	264	616	968	29
16:40	8,9	21,99	220	627	1.051	24

## Luftdruck Wetterstation HAW-Bergedorf

