

Masterarbeit

**Entwicklung einer Methode
zur Störgeräuschfilterung
auf Basis von Schallmessdaten**

Erika Rosati

Betreuer: Esther Blumendeller, M. Sc.
Philipp Rettler, M. Sc.
Prüfer: Prof. Dr. P.W. Cheng

Universität Stuttgart
Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE)
Institut für Flugzeugbau
Prof. Dr. P.W. Cheng

Januar 2021



Masterarbeit

für Erika Rosati Matr.-Nr.: 3337505

Entwicklung einer Methode zur Störgeräuschfilterung auf Basis von Schallmessdaten

Betreuer: Esther Blumendeller blumendeller@ifb.uni-stuttgart.de,
Philipp Rettler rettler@ifb.uni-stuttgart.de

Wie von nahezu alle technischen Anlagen, gehen auch von Windenergieanlagen Betriebsgeräusche aus. Abhängig von der Windstärke erzeugen vor allem Luftverwirbelungen an den Rotorblättern, aber auch Getriebe und Generator der Anlage, moderate Geräusche. Diese Schallemissionen können vom Boden aus messtechnisch erfasst werden.

Die normative Grundlage für die Messung der Schallemissionen ist die IEC 61400-11, in welcher der Messaufbau und die Messdatenauswertung näher beschrieben sind. Zur Messung wird ein Mikrofon in einem festgelegten Abstand zur Windenergieanlage auf dem Boden platziert. Da hier geringere Windgeschwindigkeiten als auf Nabenhöhe herrschen, werden Wind-induzierte Geräuscheinträge reduziert. Zur weiteren Minderung von Störgeräuschen und zur Vergrößerung des Signal-Rausch-Abstands werden zwei zusätzliche Schallschirme um das Mikrofon platziert.

Dennoch sind die Messungen von WEA-Schallemissionen insbesondere im niederfrequenten Bereich eine Herausforderung, da die Wirksamkeit der Schallschirme mit abnehmender Frequenz geringer wird. Zusätzlich beeinflussen Umgebungsgeräusche wie beispielsweise Vogelgezwitscher, Blätterrauschen, Regen, Fahrzeug- und Flugzeuggeräusche [1] die Messungen. Störgeräusche sind außerdem stark abhängig von der Umgebung, der Jahres- oder Tageszeit, vom Wochentag sowie der Windrichtung und -stärke.



Abbildung 1: Schallmessung an einer Windenergieanlage

Eine Identifizierung von Störgeräuschen ist notwendig, um sie aus der Gesamtmessung (Windpark plus Umgebungsgeräusche) zu entfernen, damit jedes zusätzliche Geräusch, das von einem Windpark erzeugt wird, richtig bewertet und mit den Vorschriften verglichen werden kann.

Daher soll im Rahmen dieser Masterarbeit eine Methode zur Störgeräuschfilterung auf Basis von Schallmessdaten entwickelt werden. Zunächst ist dafür ein Test-Messkonzept zu konzipieren. Darauf aufbauend soll eine Methode entwickelt werden, definierte Frequenzanteile zu identifizieren und im weiteren Schritt zu filtern, damit der Einfluss von Störgeräuschen auf das Messsignal reduziert werden kann. Anschließend kann die Methode auf Messdaten eines Windenergieanlagen-Standortes angewendet werden, um zukünftig genauere Rückschlüsse zum Beitrag der Windenergieanlagen zu den Schallemissionen ziehen zu können.



Empfohlener Arbeitsablauf:

- Literaturstudie, Einarbeitung, Konzeption
- Konzeption einer Testmessung.
- Untersuchung des Einflusses von Störgeräuschen auf die Schallmessdaten.
- Entwicklung einer Methode zur Reduzierung und/oder Entfernung der Störgeräusche von den Messsignalen.
- Ggf. Bewertung der entwickelten Methode sowie der Ergebnisse hinsichtlich ihrer Qualität für die Ermittlung von Umgebungsgeräuschen und Schallemissionen von Windenergieanlagen.
- Dokumentation und Präsentation

Anforderungsprofil / Qualifikation:

- Grundkenntnisse der Datenverarbeitung mit MATLAB oder python
- Grundkenntnisse im Bereich Messtechnik und Akustik sind vorteilhaft
- Selbstständige und strukturierte Arbeitsweise
- Dokumentation und Präsentation

Dauer: 6 Monate,

Ausgegeben am: 29.07.2020

Abgegeben am: _____

Literatur:

[1] Hansen, C., & Hansen, K. (2020). Recent Advances in Wind Turbine Noise Research. *Acoustics*, 2(1), 171–206. <https://doi.org/10.3390/acoustics2010013>

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Ich versichere, alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Abänderungen übernommen wurde, und die Satzung der Universität Stuttgart beachtet zu haben.

Ort, Datum

Unterschrift

Abstract

Operating noises from wind turbines (WT) are a currently discussed topic. These have been reduced in recent years due to advances in technology, but wind turbines still cause noises for aerodynamic and mechanical reasons. The wind turbine noises can be measured from the ground according to the basic standard IEC 61400-11. With the help of a microphone, the metrologically detectable sound pressure is measured, which is an important measure for assessing noises. The sound measurements are affected by ambient noises such as the chirping of birds, rain and vehicle noises. These are known as disturbing noises and are irrelevant for research purposes. In order to minimise the influence of the noise on the measured wind turbine noise, a filtering of the total signal is useful in order to be able to further process the WT signal afterwards. In scope of this master's thesis, a MATLAB method for noise filtering is developed on the basis of sound measurement data recorded from a designed test measurement. Based on the fundamentals of acoustics and digital signal processing, three possible methods are investigated. Due to the evaluation filtering in the frequency and time domain was not effective. With the chosen methods, it could not be ensured that the time or frequency components of the useful signal were not affected by the filtering. The developed method results from this knowledge. The total signal was considered in the time-frequency domain and divided into sections. By examining the signal sections, it was possible to assign disturbing noises and useful signal. The signal sections with disturbing noises were removed and the remaining signal sections put together and used for further processing. The quality of the method for the determination of ambient noises and noise emissions from wind turbines is then assessed.

Kurzfassung

Betriebsgeräusche von Windenergieanlagen (WEA) sind ein aktuell diskutiertes Thema. Diese wurden zwar in den vergangenen Jahren durch die Fortschritte in der Technologie reduziert, dennoch verursachen Windenergieanlagen Geräusche aus aerodynamischen und mechanischen Gründen. Die Anlagengeräusche können vom Boden aus messtechnisch auf Grundlage der Norm IEC 61400-11 erfasst werden. Hierbei wird mit Hilfe eines Mikrofons der messtechnisch erfassbare Schalldruck gemessen, welcher ein wichtiger Maßstab zur Beurteilung von Geräuschen darstellt. Die Schallmessungen werden von Umgebungsgeräuschen wie Vogelgezwitscher, Regen und Fahrzeuggeräuschen beeinträchtigt. Um den Einfluss der Störgeräusche auf die gemessenen Geräusche der WEA zu minimieren, ist eine Filterung des Gesamtsignales sinnvoll, um anschließend das WEA-Nutzsignal weiter verarbeiten zu können. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird auf Basis von Schallmessdaten aus einer eigens konzipierten Testmessung eine MATLAB-Methode zur Störgeräuschfilterung entwickelt. Basierend auf Grundlagen der Akustik und der digitalen Signalverarbeitung wurden drei mögliche Methoden untersucht. Eine Filterung im Frequenz- sowie im Zeitbereich wurde jedoch als nicht zielführend befunden. Mit den gewählten Methoden konnte nicht sichergestellt werden, dass Zeit- oder Frequenzanteile des Nutzsignals durch die Filterung nicht beeinträchtigt werden. Aus dieser Erkenntnis ist die entwickelte Methode entstanden. Dabei wurde das Gesamtsignal im Zeit-Frequenz-Bereich betrachtet und in Abschnitte unterteilt. Durch die Untersuchung der einzelnen Signalausschnitte wurde eine Zuordnung zwischen Stör- und Nutzsignal möglich. Damit sind die Störgeräuschausschnitte zu entfernen und die verbleibenden Ausschnitte werden zusammengesetzt und für die weitere Verarbeitung als Nutzsignal verwendet. Anschließend wird die Qualität der Methode für die Ermittlung von Umgebungsgeräuschen und Schallemissionen von WEA bewertet.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XV
Nomenklatur	XVII
1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	4
2.1. Grundlagen der Akustik	4
2.1.1. Schalldruck und Amplitude	5
2.1.2. Frequenz	6
2.1.3. Ton, Klang, Geräusch	6
2.1.4. Der menschliche Hörbereich	6
2.1.5. Schalldruckpegel	7
2.1.6. Schalleistung und Schalleistungspegel	8
2.1.7. Schallemissionen, Ausbreitung und Schallimmissionen	9
2.2. Geräusentstehung beim Betrieb von Windenergieanlagen	10
2.2.1. Konstruktiver Aufbau	10
2.2.2. Mechanische Geräusche	12
2.2.3. Aerodynamische Geräusche	12
2.2.4. Schallimmissionen von Windenergieanlagen	13
2.3. Messung von Schall	15
2.3.1. Schallmessverfahren für Windenergieanlagen	17
2.4. Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung	19
2.4.1. Signale	19
2.4.2. Abtastung	21
2.4.3. Abtasttheorem	21
2.4.4. Fourier-Analyse	22
2.4.5. Diskrete Fourier Transformation	24
2.4.6. Schnelle Fourier Transformation	24
2.4.7. Leakage-Effekt	24
2.4.8. Fensterfunktionen	26
2.4.9. Zeit-Frequenz-Analyse	27
2.4.10. Oktavband- und Terzbandanalyse	27
2.4.11. Schmalbandanalyse	28

3. Konzeption der Testmessung	29
3.1. Messung mit Smartphone	30
3.2. Messung mit Schallpegelmesser	31
4. Entwicklung der Methode	35
4.1. Mögliche Methode	35
4.2. Gewählter Ansatz	39
4.3. Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB	41
4.3.1. Fourier Transformation in MATLAB	41
4.3.2. Programmablauf	43
4.3.3. Festlegung der Auswahlparameter	47
4.3.4. Festlegung des Entscheidungsparameters für die Zuordnung der Ausschnitte	50
4.4. Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	50
4.5. Bewertung der Methode	58
4.6. Schlussfolgerungen	64
5. Zusammenfassung und Ausblick	66
Literaturverzeichnis	68
A. Messsignale aus der Testmessung	72

Abbildungsverzeichnis

1.1. Bruttostromerzeugung 2019 in Deutschland nach Energieträgern in Anlehnung an [30]	2
2.1. Darstellung einer Schallwelle in Anlehnung an [14]	5
2.2. Hörbereich des Menschen [29]	7
2.3. Schematische Darstellung von Schallemission, Schallimmission und Schallausbreitung	9
2.4. Schematischer Aufbau einer Horizontalachsen-Windenergieanlage in Anlehnung an [15]	11
2.5. Relevante aerodynamische Phänomene um die Rotorblattspitze in Anlehnung an [15]	13
2.6. Schallimmissionen verschiedener Geräuschquellen in Dezibel [29] .	15
2.7. Schematische Darstellung des Aufbaus eines Kondensatormikrofons [36]	16
2.8. Beispiel einer schallharten Platte und doppeltem Windschirm um das Mikrofon zur Messung von WEA-Schallemissionen. Foto aus [34]	18
2.9. Klassifizierung von Signalen in Anlehnung an [7]	20
2.10. Darstellung eines Signals im Zeit- und Frequenzbereich in Anlehnung an [1]	23
2.11. Zeitverlauf und Frequenzspektrum eines 1 kHz Signals [24]	25
2.12. Typische in der Signalverarbeitung gebräuchliche Fensterfunktionen	26
2.13. Darstellung des Spektrums eines Signals jeweils in Oktav-, Terz- und Schmalband[31]	28
3.1. Zeitverlauf der Testmessung	31
3.2. Schallpegelmesser Brüel & Kjær Type 2250	32
3.3. Brüel & Kjær vorpolarisiertes ½“ Freifeld-Mikrofon Typ 4189 [5] .	32
3.4. Ausrichtung des Messgerätes zu der betrachteten Schallquelle . . .	33
3.5. Akustischer Kalibrator Norsonic Typ Nor1251	34
3.6. Auswertung des vom Kalibrator erzeugten Tonsignals	34
4.1. Zeitverlauf der einzelnen Signale und der Kombination zwischen den beiden	36
4.2. Frequenzspektrum der einzelnen Signale und der Kombination zwischen den beiden. <i>Unten</i> , Erläuterung des Problems bei der Dämpfung der Peaks	37

4.3. Begrenzung des Frequenzspektrums mit Frequenzanteilen des Störgeräusches	38
4.4. Veranschaulichung der auftretenden Probleme bei Filterung im Zeitbereich	39
4.5. Darstellung eines Signals im Zeitbereich	42
4.6. Darstellung eines Frequenzspektrums	43
4.7. Schematische Darstellung des Programmablaufs	44
4.8. Schätzung der Momentanfrequenz durch die Funktion <i>instfreq</i> . .	45
4.9. Identifizierung der Zeitpunkte mit starken Änderungen der Momentanfrequenz durch die Funktion <i>findchangepts</i> und Unterteilung des Signals in Ausschnitte	46
4.10. Vogelgezwitscher: Wahl des zu betrachtenden Frequenzbereiches .	49
4.11. Traktor: Wahl des zu betrachtenden Frequenzbereiches	49
4.12. Verkehr: Wahl des zu betrachtenden Frequenzbereiches	49
4.13. Spektrogramm des Signals WEA mit Vogelgezwitscher	51
4.14. Identifizierung der Ausschnitte mit Störgeräuschen: in <i>gelb</i> nach dem <i>rms</i> - sowie nach dem <i>mean</i> -Kriterium, in <i>rot</i> der ausschließlich nach dem <i>mean</i> -Kriterium zusätzlich identifizierte Ausschnitt . . .	52
4.15. Gefiltertes Signal nach dem <i>rms</i> -Kriterium. Der Anteil des nicht-identifizierten Ausschnitts wurde jeweils im Zeit-, Frequenzbereich und im Spektrogramm markiert	53
4.16. Gefiltertes Signal nach dem <i>mean</i> -Kriterium	54
4.17. Zeitverlauf und Frequenzspektrum des 10-minütigen Messsignals .	55
4.18. Spektrogramm des 10-minütigen Messsignals und Erläuterung der dabei auftretenden Störgeräusche	56
4.19. Aufteilung des Messsignals und Identifizierung der Ausschnitte mit enthaltenen Störgeräuschen	57
4.20. Darstellung des gefilterten 10-minütigen Messsignals	57
4.21. Spektrogramm der Messsignale in der Nähe der WEA, <i>oben</i> , und in der Nähe der Zugstrecke, <i>unten</i>	58
4.22. Zeitverlauf, Frequenzspektrum und Spektrogramm eines Ausschnittes des Messsignals in Nähe einer Zugstrecke	59
4.23. Schätzung der Momentanfrequenz des betrachteten Ausschnitts .	60
4.24. Spektrogramm des mit 20 kHz abgetasteten Messsignals in der Nähe der Zugstrecke	61
4.25. Aufteilung des hochaufgelösten Messsignals und die durch die Methode identifizierten Störgeräuschausschnitte	61
4.26. Spektrogramm des gefilterten Messsignals nach der Ausführung der Methode	62
4.27. Aufteilung des bereits gefilterten Messsignals und die nach der erneuten Ausführung der Methode identifizierten Störgeräuschausschnitte	63

4.28. Spektrogramm des gefilterten Messsignals nach der erneuten Ausführung der Methode	63
A.1. Darstellung des Testmesssignals im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm	72
A.2. Darstellung des Signals 'WEA' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm	73
A.3. Darstellung des Signals 'Vogelgezwitscher' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm	74
A.4. Darstellung des Signals 'Verkehr' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm	75
A.5. Darstellung des Signals 'Traktor' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm	76
A.6. Darstellung des Signals 'Sportwagen' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm	77

Tabellenverzeichnis

2.1. Zuordnung zwischen Schalldruck und Schalldruckpegel [23]	8
2.2. Immissionsrichtwerte nach der TA Lärm	14
4.1. Festgelegte Auswahlparameter	47
4.2. Identifizierte Ausschnitte nach Frequenzbereich	55

Nomenklatur

Abkürzungen

A-D	Analog-Digital
DFT	Direkte Fourier Transformation (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
DSP	Digitale Signalverarbeitung (<i>Digital Signal Processing</i>)
FFT	Schnelle Fourier Transformation (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FT	Fourier Transformation (<i>Fourier Transform</i>)
HAWT	Windenergieanlage mit horizontaler Lage der Drehachse (<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>)
IFT	Inverse Fourier Transformation (<i>Inverse Fourier Transform</i>)
PSD	Spektrale Leistungsdichte (<i>Power Spectral Density</i>)
RMS	Quadratischer Mittelwert bzw. Effektivwert (<i>Root Mean Square</i>)
STFT	Kurzzeit-Fourier-Transformation (<i>Short Time Fourier Transform</i>)
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
WEA	Windenergieanlage

Symbole

df	Hz	Frequenzauflösung
f	Hz	Frequenz
f_a	Hz	Abtastfrequenz
f_m	Hz	Mittelfrequenz
f_{max}	Hz	Maximale Grenzfrequenz
f_n	Hz	Nyquistfrequenz
f_o	Hz	Obere Grenzfrequenz
f_u	Hz	Untere Grenzfrequenz
L_p	dB	Schalldruckpegel
L_w	dB	Schalleistungspegel
N	–	Blocklänge
$p(t)$	Pa	Schallwechseldruck
p_{atm}	Pa	Atmosphärischer Druck
p_{max}	Pa	Maximaler Schallwechseldruck
p_0	Pa	Ruhedruck
T_a	s	Abtastfrequenz
W	Watt	Schalleistung
W_0	Watt	Bezugsschalleistung

Kapitel 1.

Einleitung

Eine klimaverträgliche Energieversorgung und eine vollständige Reduzierung des Treibhausgasausstoßes bis spätestens 2050 sind die aktuellen Kernziele der europäischen Klima- und Energiepolitik [9]. Zur Erreichung dieser Klimaziele leistet die Stromversorgung aus erneuerbaren Energieträgern einen wesentlichen Beitrag [10]. In Deutschland steigt der Anteil der erneuerbaren Energien bei der Stromversorgung stetig an. Dieser ist von rund 6 % im Jahr 2000 auf runde 42 % im Jahr 2019 gestiegen. Damit wurde das Ziel von 35 % für das Jahr 2020 vorzeitig erreicht [10]. Die Energiewende wird in erster Linie von der Wind- und Sonnenenergie vorangetrieben. Abbildung 1.1 veranschaulicht den Anteil dieser regenerativen Energieträgern zu der gesamten Bruttostromerzeugung 2019 in Deutschland. 40 % der Stromproduktion stammt aus erneuerbaren Energien, dabei rund 30 % aus Wind- und Sonnenenergie. Eindeutig und klar ist die besondere Rolle der Windenergie. Sie ist mit einem Anteil an der Stromerzeugung von 21 % die wichtigste regenerative Stromquelle.

Es wird schnell klar, dass zur Realisierung der Energiewende in den nächsten Jahren viele weitere Windenergieanlagen (WEA) zu den bereits installierten dazu kommen werden. Beim Ausbau der Windenergie ist es jedoch notwendig, die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu berücksichtigen [34]. Bei der Planung und Genehmigung von WEA wird besonders drauf geachtet, Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft zu vermeiden und den Einfluss auf den Menschen deutlich zu reduzieren.

Wie nahezu alle technischen Anlagen generieren auch Windenergieanlagen Betriebsgeräusche. Diese sind besonders in der Windenergiekritik ein Thema mit großer Relevanz. Obwohl die technologischen Fortschritte leisere Windenergieanlagen ermöglicht haben, bleiben die Schallemissionen von WEA nach wie vor ein wichtiges Bewertungskriterium bei der Standortwahl. Außerdem sind diese häufig ein Hindernis für die Akzeptanz bei Anwohnern, die sich von der WEA gestört fühlen können. Anders als beispielsweise Verkehrslärm, unterliegen die von einer WEA mit Gesamthöhe größer als 50 m erzeugten Geräusche dem Bundes-Immissionsschutzgesetz.

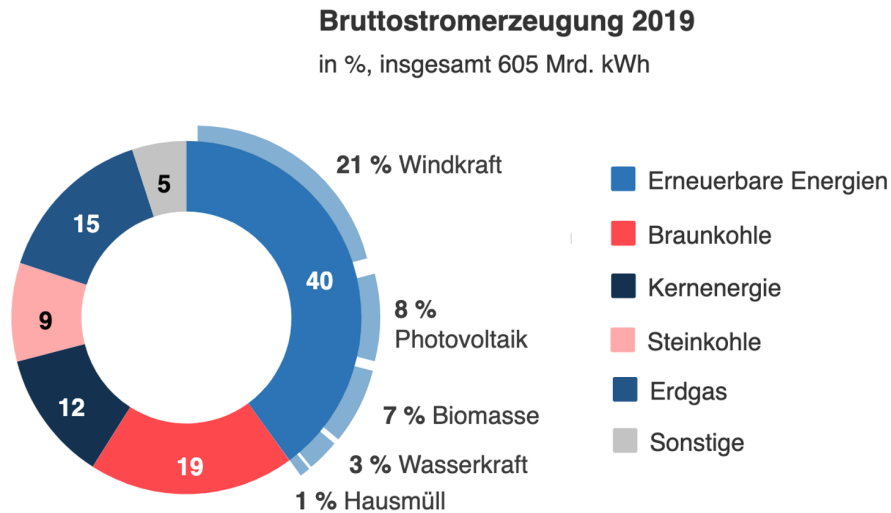


Abbildung 1.1.: Bruttostromerzeugung 2019 in Deutschland nach Energieträgern in Anlehnung an [30]

Bei der Planung von WEA müssen die Immissionsrichtwerte der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) eingehalten werden. Außerdem ist auch nach dem Bau der Anlage die Einhaltung der Lärmschutzverordnung zu beachten. Deshalb sind die Schallmessungen ein wichtiger Bestandteil für den Ausbau der Windenergie. Die von einer WEA emittierten Geräusche werden aus verschiedenen Gründen gemessen: Zur Charakterisierung der Geräuschquelle, zur Ermittlung von dem lokalen Geräuschpegel vor der Entwicklung der Anlage, sowie zu Compliance-Messungen und Untersuchung von Beschwerden [14].

Beim normalen Betrieb von WEA zur Energiegewinnung werden Schallemissionen durch aerodynamische und mechanische Mechanismen erzeugt. Die mechanischen Emissionen, die von Anlagenkomponenten wie Getriebe und Generator abgestrahlt werden, sind im Vergleich zu den aerodynamischen Geräuschen moderat. Die aerodynamischen Emissionen sind die dominanten Quellen von Schallemissionen und werden grundsätzlich von der Luftverwirbelung an den Rotorblättern und von der Blatt-Turm Interaktion erzeugt. Die WEA-Schallemissionen können vom Boden aus messtechnisch nach der grundlegenden Norm IEC 61400-11 [6] erfasst werden. In dieser Vorschrift sind der Messaufbau und die Messdatenauswertung ausführlich beschrieben. Die Messungen erfolgen vom Boden aus, wo zu vorgegebenen Abständen ein oder mehrere Mikrofone platziert werden. Da es sich um Messungen im Freien handelt, werden diese von Umgebungsgeräuschen wie beispielsweise Vogelgezwitscher, Blätterrauschen, Regen, Fahrzeug- und Flugzeuggeräuschen beeinflusst. Diese beeinträchtigen die Messungen und

werden daher als Störgeräusche bezeichnet. Sie sind stark von meteorologischen Bedingungen abhängig, wie z. B. Windrichtung, Windgeschwindigkeit oder Temperatur und verringern somit die für die Ermittlung von Schallemissionen nutzbare Datenmenge.

Allerdings sind diese Störgeräusche für Forschungszwecke und zum Verständnis der WEA-Schallemissionen nicht erwünscht. Aktuell werden bei den Messungen Zeiten mit Fremdgeräuschen bzw. Störgeräuschen markiert und nicht bei der Auswertung verwendet [34], um den Schallpegel der WEA durch deren Einfluss nicht zu verfälschen. Um alle Messungen verwenden und hinsichtlich der Untersuchungen von WEA-Schallemissionen richtig bewerten zu können, ist es notwendig, die Störgeräusche zu identifizieren und diese aus der Gesamtmessung zu entfernen. Damit können die Schallemissionen von der WEA ohne den Einfluss von Störgeräuschen untersucht werden.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, daher eine Methode zur Störgeräuschfilterung zu entwickeln. Auf Basis von Schallmessdaten sind die Störgeräusche bzw. die Frequenzanteile dieser Störungen zu identifizieren und zu filtern, damit deren Einfluss auf das Messsignal möglichst reduziert werden kann, ohne dass Informationen verloren gehen. Die Entwicklung der Methode soll von der Konzeption einer Testmessung zur Ermittlung von Schallmessdaten unterstützt werden. Anschließend sind die entwickelte Methode sowie die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Qualität für die Ermittlung von Umgebungsgeräuschen und Schallemissionen von Windenergieanlagen zu bewerten.

Um einen besseren Überblick über die vorliegende Arbeit zu bekommen, wird hierbei deren Aufbau näher erläutert.

Kapitel 2 befasst sich mit den theoretischen Grundlagen. Dabei werden die Grundlagen der Akustik und der digitalen Signalverarbeitung beschrieben. Darüber hinaus wird auf die Entstehung von WEA-Betriebsgeräuschen und auf die Schallmessverfahren für deren Ermittlung eingegangen. Die Konzeption der Testmessung und ihre Bedeutung für die Entwicklung der Methode wird in Kapitel 3 beschrieben. Die Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung in MATLAB und der Aufbau des Programms zur Störgeräuschfilterung werden in Kapitel 4 behandelt sowie die möglichen Lösungswege für die Entwicklung der Methode dargestellt. Zum Schluss werden in Kapitel 5 die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und Vorschläge für die Weiterentwicklung der Methode vorgestellt.

Kapitel 2.

Theoretische Grundlagen

Um eine Methode zur Filterung der Störgeräusche bei den Schallmessungen von Windenergieanlagen entwickeln zu können, ist ein theoretisches Grundverständnis von Schall, Geräusentstehung beim Betrieb einer WEA sowie Schallmessungen und Signalverarbeitung nötig.

Im Folgenden werden die für das Allgemeinverständnis der Arbeit notwendigen akustischen Begriffe definiert sowie das physikalische Vorgehen der Schallentstehung und der Schallausbreitung beschrieben. Anschließend wird ein Einblick in die Mechanismen gegeben, die beim Betrieb einer WEA zur Geräusentstehung führen sowie die Beschreibung der Messverfahren zur Erfassung und Auswertung der Schallemissionen. Zuletzt folgt die Erläuterung der Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung.

2.1. Grundlagen der Akustik

Nach DIN 1320 „Akustik-Begriffe“ handelt es sich bei Schall um mechanische Schwingungen und Wellen in einem elastischen Medium (Gas, Flüssigkeit, Festkörper) [22]. Dementsprechend unterscheidet sich Luftschall, Wasserschall und Körperschall.

In der Luft bezeichnet Schall Druck- und Dichteschwankungen, welche von einer flatternden Oberfläche oder einer turbulenten Strömung erzeugt werden [14]. Die Schallquelle versetzt dabei die Luftteilchen in kleine Schwingungen bzw. Druckschwankungen der übertragenden Luft [23]. Durch ihre Bewegung leiten diese Luftteilchen den Druckunterschied weiter und übermitteln somit das Signal. Dieser Prozess wird als Schallausbreitung bezeichnet und ist abhängig von der Entfernung der Schallquelle sowie von den Hindernissen auf dem Weg. Zu beachten ist, dass Schall sich in den verschiedenen Übertragungsmedien unterschiedlich ausbreitet: in der Luft breitet sich Schall mit einer Geschwindigkeit von ca. 340 m/s aus [23].

2.1.1. Schalldruck und Amplitude

Die Druckschwankungen sind orts- und zeitabhängig und werden Schallwechsel-
druck $p(t)$ (*sound pressure*) genannt [23]. Dies ist als Differenz zwischen dem
örtlichen Druck im Schallfeld und dem sogenannten Ruhedruck p_0 definiert [8].
Beim Luftschall entspricht der Ruhedruck dem atmosphärischen Druck p_{atm} .
Einfacher ausgedrückt bezeichnet der Schalldruck den um p_{atm} schwankenden
Druck.

Luftschall breitet sich in Form von Longitudinalwellen aus, als Folge von alter-
nierenden Kompressionen und Ausdehnungen (Abb. 2.1a) [14]. Die maximale
Auslenkung p_{max} um den atmosphärischen Druck p_{atm} wird von der Amplitude
der Druckschwankungen beschrieben und in Pascal Pa angegeben (Abb. 2.1b).
Für die Berechnungen wird der Effektivwert des Zeitverlaufs des Schalldrucks p
verwendet, der im Englischen RMS (*Root Mean Square*) abgekürzt wird [23].

Das heißt, je größer die Amplitude, desto größer ist der Schalldruck. Zudem
ist die Größe der Amplitude mit dem Energiegehalt der Schallwelle verbunden.
Demzufolge ist der Schalldruck ein Maß für die Lautstärke und damit die relevante
Kenngröße, um das Schallfeld qualitativ zu beschreiben [8].

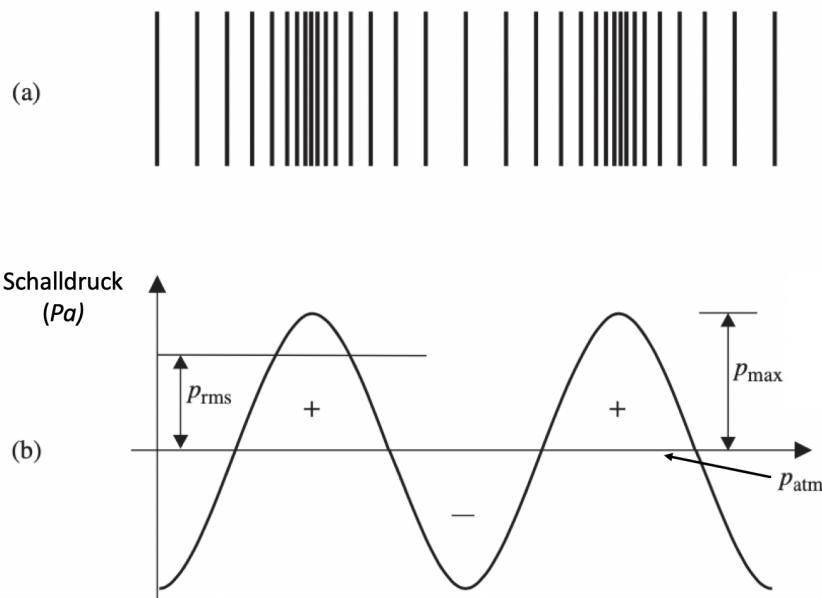


Abbildung 2.1.: Darstellung einer Schallwelle in Anlehnung an [14]: (a) Kompressionen und Dilatationen in der Luft; (b) grafische Darstellung der Druckschwankung um den atmosphärischen Druck.

2.1.2. Frequenz

Schallwellen sind nicht nur durch die Amplitude, sondern auch durch die Frequenz charakterisiert. Diese beschreibt die Häufigkeit der Schwingungen und ist als die Anzahl von Zyklus bzw. Schwingung pro Sekunde definiert. Die Einheit ist Hertz Hz, welche als 1/s definiert ist.

In der Akustik wird meist die Frequenz mit einem reinen Ton in Zusammenhang gebracht, welcher durch einen sinusförmigen Zeitverlauf dargestellt ist [23]. Dadurch wird die Frequenz als Maß für die Tonhöhe definiert, so wie die Amplitude ein Maß für die Lautstärke ist.

2.1.3. Ton, Klang, Geräusch

Allgemein kann man beliebige Zeitverläufe durch die entsprechende Frequenzzusammensetzung als Summe reiner Töne mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen repräsentieren [23]. Durch die entsprechende Frequenzzusammensetzung kann Schall in Ton, Klang und Geräusch unterschieden werden. Diese Begriffe beschreiben bestimmte Schallsignale und ihren zeitlicher Verlauf:

- Ein Ton repräsentiert eine reine sinusförmige Schwingung und besteht nur aus einer Frequenz
- Ein Klang hat einen regelmäßigen und periodischen Verlauf und besteht aus überlagerten Sinusschwingungen bzw. mehreren Tönen
- Ein Geräusch ist von einem unregelmäßigen und nicht periodischen Verlauf charakterisiert und besteht aus verschiedenen Schallwellen mit unterschiedlichen Frequenzen

Nach DIN 1320 charakterisiert ein Geräusch kein zweckgebundenes Schallereignis. Es ist ein akustisches Signal mit einer großen Anzahl von Teilfrequenzen, zwischen denen kein gesetzmäßiger Zusammenhang besteht.

Wenn ein Geräusch als störend empfunden wird, spricht man von Lärm, welcher jedoch keine physikalische oder messbare Größe ist. Bei Lärm handelt es sich um die subjektive Empfindung eines Schallereignisses, der das Wohlbefinden oder die Gesundheit schädigen kann. Daher wird Lärm in [2] als Schall definiert, der subjektiv stört und/oder objektiv schädigt.

2.1.4. Der menschliche Hörbereich

Die unterschiedlichen Schallarten können vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden, wenn diese Schallwellen im Hörbereich liegen. Dieser umfasst einen Frequenzbereich von etwa 16 bis 16 000 Hz [23]. Die Schallwellen unterhalb des menschlichen Hörbereichs werden als Infraschall (< 16 Hz) bezeichnet. Frequenzen

oberhalb der Hörgrenze ($> 16\,000\text{ Hz}$) werden Ultraschall genannt [29]. Das menschliche Ohr empfindet Töne gleichen Schalldrucks je nach Frequenz unterschiedlich laut [22]. Abbildung 2.2 zeigt die Frequenzabhängigkeit der Hörschwelle und der Schmerzgrenze.

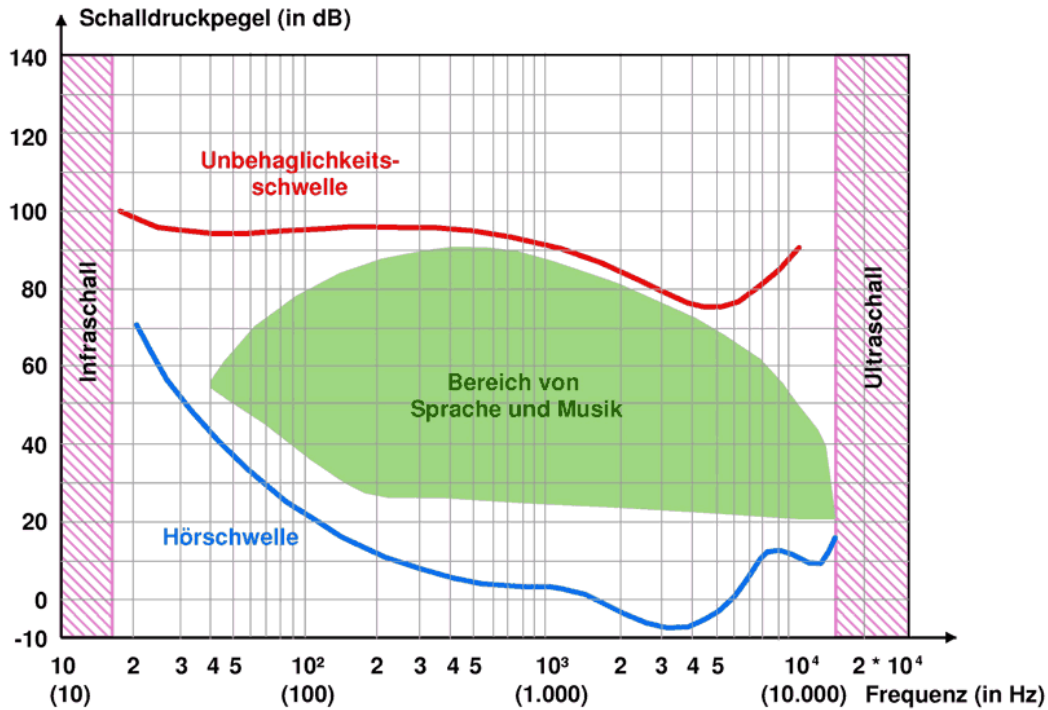


Abbildung 2.2.: Hörbereich des Menschen [29]

2.1.5. Schalldruckpegel

Ein normal hörender Erwachsener kann bei einer Frequenz von $f = 1000\text{ Hz}$ Schalldrücke von $20\ \mu\text{Pa}$ (Hörschwelle) bis 200 Pa (Schmerzgrenze) wahrnehmen. Zwischen der Hörschwelle und der Schmerzgrenze liegen sieben Zehnerpotenzen [22]. Um die Zahlen besser analysieren zu können und die in der Schalldruck-Zeit-Funktion enthaltenen Informationen zu komprimieren, wurde der Schalldruckpegel L_p (*sound pressure level*) eingeführt [8]. Der Schalldruckpegel wird im Wesentlichen berechnet, indem der gemessene Schalldruck mit dem Ruhedruck p_0 verglichen und in logarithmischer Form umgewandelt wird. Er ist definiert als

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} \quad (2.1.1)$$

wobei der Ruhedruck $p_0 = 20\ \mu\text{Pa}$ der Hörschwelle entspricht [23] und p der Effektivwert des Schalldruckes ist.

Durch die Einführung des logarithmischen Maßstabs für die Lautstärkeskala wird das nichtlineare Lautstärkeempfinden des menschlichen Gehörs berücksichtigt. Außerdem führt die dB-Lautstärkeskala zu überschaubaren Zahlenwerten des Pegels [22]. Wie in Tab. 2.1 angedeutet wird, ist die Pegelzuordnung des sieben Zehnerpotenzen umfassenden Bereichs des Schalldrucks durch die Einführung des logarithmischen System auf einer Skala von 0 bis 140 dB abgebildet [23].

Tabelle 2.1.: Zuordnung zwischen Schalldruck und Schalldruckpegel [23]

Schalldruck p Pa	Schalldruckpegel L_p dB	Situation/Beschreibung
$2 \cdot 10^{-5}$	0	Hörschwelle
$2 \cdot 10^{-4}$	20	Wald bei wenig Wind
$2 \cdot 10^{-3}$	40	Bibliothek
$2 \cdot 10^{-2}$	60	Büro
$2 \cdot 10^{-1}$	80	dicht befahrene Stadtstraße
$2 \cdot 10^0$	100	Sirene
$2 \cdot 10^1$	120	Start von Düsenflugzeugen
$2 \cdot 10^2$	140	Schmerzgrenze

Um die Frequenzabhängigkeit der Hörwahrnehmung bei einer Beurteilung von Geräuschquellen zu berücksichtigen, wurde die Frequenzbewertung eingeführt [8]. Diese gewichtet das Geräusch in Abhängigkeit von der Frequenz. Es gibt mehrere Bewertungskurven (A, B und C), die jeweils bestimmten Frequenzabhängigkeiten entsprechen. In der technischen Akustik hat sich die A-Bewertungskurve durchgesetzt, weil sie die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs nachbildet [8]. Der gemessene Schalldruckpegel ist mit dem Zusatz $dB(A)$ angegeben.

2.1.6. Schalleistung und Schalleistungspegel

Wie im Abschnitt 2.1 erwähnt, ist der Schalldruck eine lokal gemessene Größe, welche von der Entfernung zur Schallquelle und von der Umgebung abhängt. Wegen seiner physikalischen Abhängigkeiten ist der Schalldruck bzw. der Schalldruckpegel nicht geeignet, akustische Eigenschaften einer Quelle zu beschreiben. Deshalb wurde die Schalleistung W definiert, um die gesamte Schallenergie zu beschreiben, die von einer Schallquelle je Zeiteinheit abgestrahlt wird [8]. Die Einheit der Schalleistung ist Watt. Diese umfasst in der Regel einen Bereich von 10 Zehnerpotenzen. Deshalb wurde analog zum Schalldruck eine logarithmische Größe eingeführt: der Schalleistungspegel L_w (*sound power level*), der wie folgt

definiert ist:

$$L_w = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right) \text{ dB.} \quad (2.1.2)$$

Dabei entspricht W der Schalleistung und W_0 der Bezugsschalleistung, welche einen Wert von 10^{-12} Watt beträgt.

2.1.7. Schallemissionen, Ausbreitung und Schallimmissionen

In der technischen Akustik wird die Abstrahlung von Schallwellen von einer Quelle und ihr Eintreten in die Umwelt mit dem Begriff Schallemission bezeichnet. Die Einwirkung von dieser Abstrahlung an einem bestimmten Ort ist die Schallimmission. Der Vorgang zwischen Emission und Immission wird Schallausbreitung genannt [22].

Eine schematische Darstellung ist in Abb. 2.3 zu sehen. Die Schallemission ist die Ursache der Schallimmission und gibt an, wie viel Geräusch eine Quelle, wie z. B. eine industrielle Anlage, erzeugt. Schallemissionen werden durch den Schallleistungspegel beschrieben. Die Schallimmission hingegen wird mit dem Wert des Schalldruckpegels quantifiziert und gibt an, wie laut es an einem bestimmten Ort ist.

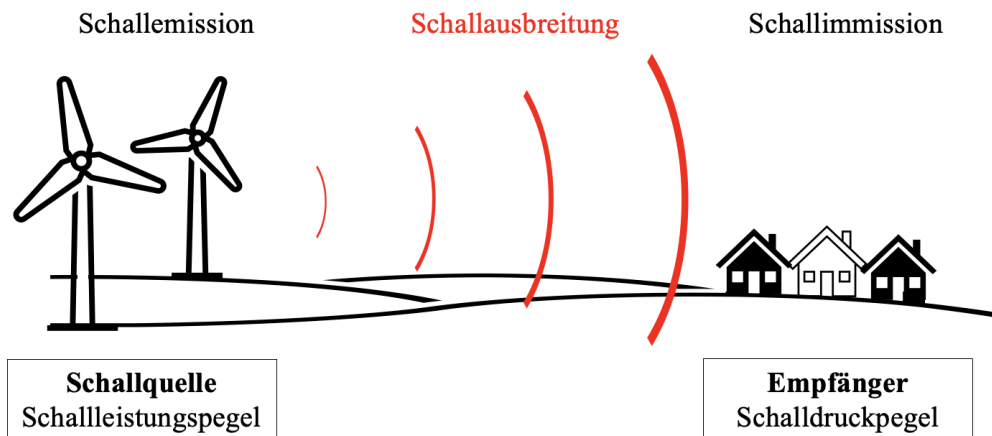


Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung von Schallemission, Schallimmission und Schallausbreitung

Bei der Ermittlung des Schallwertes an einem ausgewählten Immissionspunkt ist es notwendig, den Störschall zu berücksichtigen. Unter Störschall sind alle fremdwirkenden Geräusche zu verstehen. Diese Störgeräusche bezeichnen nicht nur Lärm wie Baustellen- oder Verkehrslärm, die als störend empfunden werden,

sondern auch alle nicht erwünschten Geräusche, welche die Schallaufnahmen beeinträchtigen. Im Gegensatz dazu wird das gewollte Geräusch (wie z. B. die Stimme beim Gespräch) als Nutzschaall bzw. Nutzschaal signal definiert. Bei Ermittlungen von Schallimmissionen bzw. bei der Auswertung von Schallemissionen bezeichnet man den Nutzschaall als Art von Geräusch, das man ermitteln bzw. auswerten möchte.

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die von einer Windenergieanlage erzeugten Geräusche als Nutzschaal signal bezeichnet. Die bei der Aufnahme der Messdaten fremdwirkenden Geräusche werden Störgeräusche genannt.

2.2. Geräuschaentstehung beim Betrieb von Windenergieanlagen

Bei der Gewinnung elektrischer Energie durch Windenergieanlagen entstehen Geräusche. Eine WEA kann während ihres Betriebes vier Arten von Geräuschen erzeugen: tonal, breitbandig, niederfrequent und impulsiv. Tonale Geräusche sind bei diskreten Frequenzen definiert und entstehen z. B. durch Grenzschichtinstabilitäten, die mit der Oberfläche des Rotorblatts interagieren oder durch dauerhafte und konstante Bewegungen. Getriebe, Lüfter und Triebstrang sind typische Anlagenkomponenten, welche tonale Geräusche erzeugen. Breitbandgeräusche werden meistens durch die Interaktion von Rotorblättern mit der atmosphärischen Turbulenz erzeugt und sind von einer kontinuierlichen Distribution des Schalldrucks charakterisiert. Niederfrequenzgeräusche enthalten Anteile in einem Frequenzbereich von 20-100 Hz und werden z. B. aus der Interaktion der Turbulenz mit den Profilvorderkanten der Rotorblätter erzeugt [14]. Impulsgeräusche sind charakterisiert durch einen kurzen akustischen Impuls oder Schlag, deren Amplitude mit der Zeit variiert [20].

Grundsätzlich emittiert eine WEA im Betrieb aerodynamische und mechanische Geräusche. Außerdem hängt der Schalleistungspegel von der Anlagengröße und der Blattspitzengeschwindigkeit des Rotors ab.

Im Folgenden wird auf die Geräuschaentstehung beim Betrieb einer WEA eingegangen. Zunächst wird der konstruktive Aufbau der Anlage beschrieben, danach folgt die Erläuterung der Anlagenkomponenten und der Mechanismen, die Schallemissionen erzeugen. Im Anschluss wird die Rolle der Schallemissionen und -immissionen einer WEA erläutert, warum sie wichtig und relevant sind.

2.2.1. Konstruktiver Aufbau

Eine Windenergieanlage wandelt grundsätzlich die Energie von Wind in elektrische Energie um. Dabei wird durch die Drehung des Rotors Windenergie in mechanische

Energie umgewandelt. Der Rotor besteht aus mehreren Rotorblättern, die an der Nabe befestigt sind. Diese ist mit einem Generator verbunden, welcher die mechanische Energie in elektrische umwandelt [33].

Die konventionellen modernen WEA mit horizontaler Lage der Drehachse (HAWT, *horizontal axis wind turbine*) bestehen aus vier Hauptkomponenten: Rotor, Gondel, Turm und Fundament. Eine schematische Darstellung einer HAWT ist in Abb. 2.4 abgebildet.

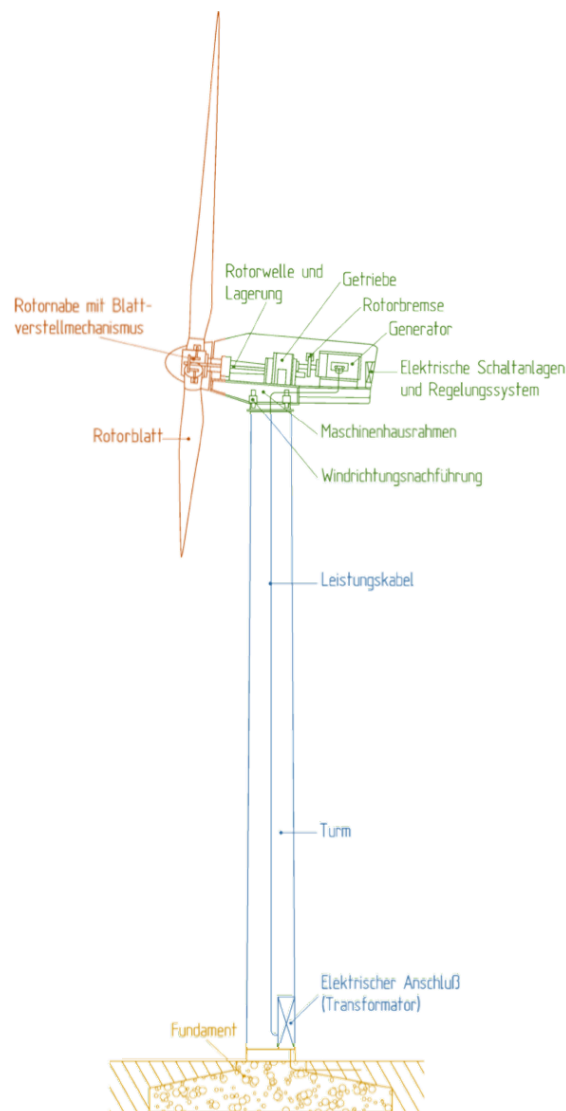


Abbildung 2.4.: Schematischer Aufbau einer Horizontalachsen-Windenergieanlage in Anlehnung an [15]: in rot der Rotor, in grün die Gondel, in blau der Turm und in gelb das Fundament

Der Rotor verfügt üblicherweise über drei Rotorblätter (*blades*), welche über die Nabe (*hub*) verbunden sind. Hier befindet sich, wenn vorhanden, der Blatteinstellmechanismus (*pitch*). Die Nabe sitzt an einem Ende der Gondel (*nacelle*). Diese wird auch Maschinenhaus genannt und beinhaltet den mechanischen Triebstrang: die Rotornabe ist über die Rotorwelle mit dem Getriebe und dem Generator verbunden. Die Ausrichtung nach dem Wind wird Windrichtungsnachführung oder Azimutverstellantrieb (*yaw-drive*) genannt. Die beschriebenen Strukturen befinden sich auf der Spitze des Turms (*tower*), welcher im Fundament (*footing*) gelagert ist.

2.2.2. Mechanische Geräusche

Mechanische Geräusche werden primär durch den Generator und das Getriebe produziert und können tonal oder breitbandig sein [18]. Bei der Schallübertragung unterscheidet man zwischen Luftschall- und Körperschallübertragung. Bei der Luftschallübertragung wird der Schall von der Komponente direkt in die Luft abgestrahlt; bei der Körperschallübertragung wird der Schall entlang anderer Anlagenkomponenten übertragen, bevor er in die Luft abgestrahlt wird [20].

2.2.3. Aerodynamische Geräusche

Aerodynamische Geräusche entstehen durch die Luftströmung um die Rotorblätter und sind die Hauptquelle der Schallemissionen. Bei der Rotorblattumströmung werden die in der turbulenten Strömung enthaltenen Wirbel unterschiedlicher Größe stromab transportiert. Diese zerfallen teilweise am Rotorblatt oder werden weiter transportiert. Bei dem Wirbelzerfall lösen sich Druckänderungen aus, welche sich als Schallwellen in die Umgebung ausbreiten [3].

Der Schalleistungspegel aller aerodynamischer Geräusche steigt mit zunehmender Blattspitzgeschwindigkeit. Die Emission nimmt theoretisch mit der 5. Potenz der Geschwindigkeit zu [15]. Allerdings tritt beim Erreichen der Nennleistung¹ keine weitere Erhöhung der Schallemission auf [29].

In Abb. 2.5 sind die relevanten aerodynamischen Phänomene am Rotorblatt dargestellt, welche Schallemissionen in bestimmten Frequenzbereichen verursachen [33]. Die wesentlichen Ursachen sind die turbulente Grenzschicht und die Wirbelbildung an der Profilhinterkante [15]. Durch die Strömung auf der Rotorblattoberfläche bildet sich eine Grenzschicht, welche an der Hinterkante des Blattes turbulent wird. Durch die Wirbelablösungen an der Profilhinterkante werden breitbandige Geräusche in einem Frequenzbereich von 250-1000 Hz generiert [33]. Ähnliche Emissionen entstehen bei der Strömungsablösung an der Blattspitze. Jedoch sind

¹Die Nennleistung bezeichnet die maximale Leistung, welche eine Anlage unter ausgelegten Bedingungen erzeugen kann.

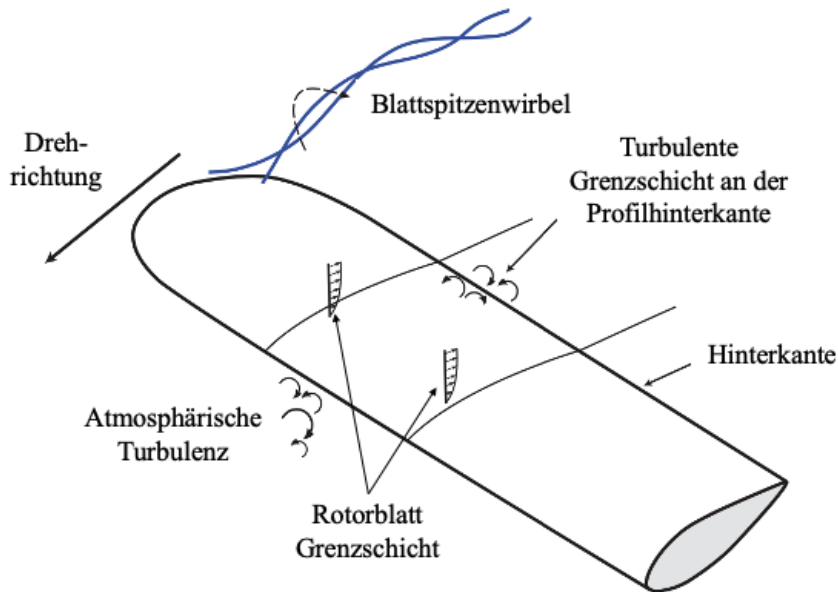


Abbildung 2.5.: Relevante aerodynamische Phänomene um die Rotorblattspitze in Anlehnung an [15]

diese im Vergleich zu den an der Profilhinterkante entstehenden Geräuschen nicht so relevant. Neben diesen breitbandigen Emissionen entstehen auch niederfrequente und impulsive Geräusche. In einem Frequenzbereich von ca. 18 Hz werden Geräusche aufgrund der Interaktion zwischen der Rotorblattoberfläche und der turbulenten Strömung erzeugt. Die Interaktion der Rotorblätter mit der vom Turm gestörten Anströmung verursacht impulsive Geräusche [33]. Dazu gehören auch Modulationen, welche als periodische Änderung der Amplitude eines Schallsignals definiert sind [14]. Dieser Effekt taucht bei drehenden Elementen mit bestimmten Frequenzen auf, welche mit der Drehzahl und der Anzahl der Rotorblätter verbunden sind [3].

Zusammengefasst führt die Drehung der Rotorblätter zur Entstehung von breitbandigen Emissionen, während die Interaktion Rotor-Turm für impulsive Geräusche verantwortlich ist. Die unterschiedlichen Schallentstehungsmechanismen an Windenergieanlagen sorgen für ein rauschendes Schallsignal [3].

2.2.4. Schallimmissionen von Windenergieanlagen

Wie bereits erwähnt, hängen die Schallemissionen einer WEA von der Anlagengröße und der Blattspitzgeschwindigkeit des Rotors ab. Diese können messtechnisch vom Boden aus erfasst werden. Das Messverfahren für die Erfassung der WEA-Schallemissionen wird im Abschnitt 2.3.1 beschrieben.

Anlagen mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 m unterliegen dem Bundes-

Immissionsschutzgesetz und müssen die Immissionsrichtwerte der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) einhalten [16]. Deswegen ist für die Genehmigung von WEA ein Schallgutachten erforderlich, um die Einhaltung der geforderten Grenzwerte sicherzustellen.

Regulär erfolgt die Genehmigung in zwei Schritten. Zunächst wird in der Planungsphase auf Basis von Emissionskennwerten die Schallimmission rechnerisch prognostiziert, danach folgt der messtechnische Nachweis, nachdem die Anlage in Betrieb gebracht ist [16]. Für die Bewertung der Schallimmissionen sind Grenzwerte in der TA Lärm definiert. Es gelten verschiedene Immissionsrichtwerte je nach Gebietsnutzung und Tageszeit (siehe Tab. 2.2).

Tabelle 2.2.: Immissionsrichtwerte nach der TA Lärm

Gebietsnutzung	Immissionsrichtwert in dB(A)
	tags/nachts
Industriegebiet	70/70
Gewerbegebiet	65/50
Urbanes Gebiet	63/45
Mischgebiet	60/45
Allgemeines Wohngebiet	55/40
Reines Wohngebiet	50/35
Kurgebiet, Krankenhäuser	45/35

Dazu ist die DIN 45645-1 das ergänzende Regelwerk zur Messdurchführung für die Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen [16]. Dabei erfolgt die Beschreibung und Beurteilung der WEA als Schallquelle.

Abb. 2.6 veranschaulicht die Schallimmissionen einer 500 m entfernten WEA im Betrieb in Bezug auf verschiedene Geräuschquellen in der Umwelt. Die Geräusche der Windenergieanlagen sind zwar wahrnehmbar, jedoch wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, vergleichbar zu anderen Quellen. Beispielsweise ist die Schallimmission einer im Betrieb befindlichen Windenergieanlagen in 500 m Entfernung vergleichbar mit dem Geräusch einer lauten Unterhaltung [29].

Um die Richtlinien einhalten zu können, sind sowohl Prognose des Schalldruckpegels als auch Schallmessungen in der Praxis notwendig.

Geräuschquellen in Dezibel



Abbildung 2.6.: Schallimmissionen verschiedener Geräuschquellen in Dezibel [29]

2.3. Messung von Schall

In der schalltechnischen Praxis sowie in der Forschung sind akustische Messungen ein grundsätzlicher Bestandteil bei akustischen Untersuchungen. Viele Faktoren, wie die Güte der eingesetzten Messtechnik oder störende Umgebungsparameter, können die Ergebnisse dieser Messungen beeinflussen und machen damit die Messergebnisse nicht absolut reproduzierbar [25]. Dennoch sind akustische Messungen bei schalltechnischen Untersuchungen erforderlich.

Grundsätzlich besteht fast jede akustische Messapparatur aus einem oder mehreren Mikrofonen sowie einem Empfangsteil, meist einem Schallpegelmesser. Ein Mikrofon ist ein Schallwandler, welcher die akustischen Größen in elektrische Signale umwandelt. Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, repräsentiert der Schalldruck eine wichtige Schallfeldgröße in der angewandten Akustik [25]. Diese Größe kann messtechnisch durch ein Mikrofon erfasst werden, indem eine dünne, elastisch gelagerte Membran den Druckschwankungen des Schalls folgt. Die Membran bildet durch ihre Bewegung den zeitlichen Verlauf des Wechseldrucks bzw. des Schalldrucks $p(t)$ nach. Die damit erfassten mechanischen Schwingungen werden durch einen mit der Membran gekoppelten Wandler in elektrische Schwingungen

gewandelt. Dabei wird im Allgemeinen möglichst weitgehende Linearität und Frequenzunabhängigkeit angestrebt [25].

Die heute verwendeten Mikrofone, die eine sehr gute Annäherung und diese Linearität gewährleisten können, sind Kondensatormikrofone [25]. Das sind Wandler, die mit Hochpräzision den Schallwechseldruck in messbare elektrische Signale wandeln. Eine schematische Darstellung des Aufbaus von diesem Mikrofon ist in Abb. 2.7 zu sehen.

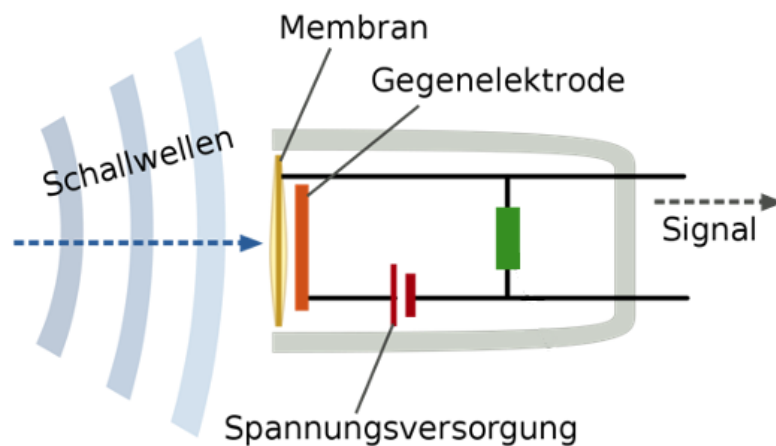


Abbildung 2.7.: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Kondensatormikrofons [36]

In einem Kondensatormikrofon befindet sich ein Plattenkondensator, welcher aus einer beweglichen Membran und einer starren Gegenelektrode besteht [25]. Durch den Schallwechseldruck wird die Membran in Schwingung versetzt, womit der Plattenabstand zwischen Gegenelektrode und Membran variiert. Dies bewirkt eine Spannungsänderung, die proportional zum Wechseldruck ist. Vorteil von diesem Mikrofon ist seine uniforme Frequenzantwort, welche dem verfügbaren Frequenzbereich entspricht [14]. Allgemein eignen sich Mikrofone mit kleinem Durchmesser für die Messung von hohen Frequenzen, mit größerem für niedrige Frequenzen [14].

Nachdem das Mikrofon den Schallwechseldruck in elektrische Signale gewandelt hat, werden diese mit analogen oder digitalen Verfahren angezeigt, gespeichert und ausgewertet. Der Empfangsteil einer Messapparatur besteht meist aus einem Schallpegelmessgerät mit Bandpässen oder A-Filtern, der einen Summen-Schallpegel in Dezibel ermittelt, oder aus einem frequenzabhängigen Analysesystem, welches ein Spektrum ausgibt [25].

Vor und nach jeder Messung muss überprüft werden, ob die Instrumentierung ordnungsgemäß funktioniert: es muss sichergestellt werden, dass der gemessene dem tatsächlichen Schalldruckpegel entspricht. Die Prozedur zur Überprüfung der Richtigkeit der Messung wird Kalibrierung genannt. Dies erfolgt in der Regel mit

einem Kalibrator, ein Gerät, welches eine einzige Frequenz bzw. ein Ton erzeugt und auf dem Mikrofon platziert wird [14]. Der Kalibrator generiert ein Schallsignal mit bekanntem Pegel. Die Instrumentierung weist eine korrekte Funktionsweise auf, wenn das Messgerät ein Ausgangssignal anzeigt, welches identisch mit dem vom Kalibrator erzeugten Schalldruckpegel ist [14]. Wird beim Kalibrierton ein falscher Messwert angezeigt, muss die Empfindlichkeit des Messgeräts geändert werden, bis der Sollwert angezeigt wird. Damit ist der Schallpegelmessers kalibriert.

Für weitere Informationen und eine ausführliche Aufklärung über die Komponenten einer Messapparatur, deren Ausbau, Funktionsweise und Kalibrierung sei auf geeignete Literatur [25], [14] verwiesen.

2.3.1. Schallmessverfahren für Windenergieanlagen

Die normative Grundlage für die Messung der Schallemissionen für WEA ist die deutsche DIN EN 61400-11 Windenergieanlagen - Teil 11: Schallmessverfahren (*IEC 61400-11 Standard: Wind turbine generator systems - Part 11: acoustic noise measurement techniques*) [6]. Dabei sind die Verfahren zur Messung, Auswertung und Ergebnisdarstellung der Schallemissionen einer WEA sowie die Anforderungen an Messgeräte und Kalibrierung beschrieben. Außerdem sind die nicht-akustischen Messungen für die Ermittlung von relevanten atmosphärischen Bedingungen näher erläutert [34]. Zur Messung wird ein Mikrofon oder mehrere Mikrofone in festgelegten Abständen zur Windenergieanlage auf einer schallharten Platte auf dem Boden aufgebaut (Abb. 2.8). Vorwiegend wird das Mikrofon auf einer flachen Oberfläche platziert, möglichst weit von Objekten wie Wald oder Gebäuden entfernt, deren Interaktion mit dem Wind zusätzliche Geräusche erzeugen könnte [14]. Um die am Mikrofon induzierten Windgeräusche zu reduzieren, wird dies mit Windschirmen versehen. Da das turbulente Spektrum des Windes bei niedrigen Frequenzen dominiert wird, werden in der Regel sphärische Windschirme verwendet. Diese Form ist sehr effektiv bei niedrigen Frequenzen [14].

Die Norm legt fest, dass das Mikrofon in der Mitte einer 1 m durchmessenden Platte auf dem Boden platziert werden soll. Grund dafür ist, dass die Effekte der Turbulenz auf dem Boden minimiert sind². Das Mikrofon ist mit einem Windschirm mit 90 mm Durchmesser zu bedecken. Nach der IEC 61400-11 soll zusätzlich ein Sekundärwindschirm verwendet werden. Dieser soll einen Durchmesser von mindestens 450 mm betragen und muss symmetrisch auf dem Primärwindschirm platziert werden [14].

²Die Windgeschwindigkeit besitzt ein logarithmisches Profil mit einem Wert von Null auf dem Boden.



Abbildung 2.8.: Beispiel einer schallharten Platte und doppeltem Windschirm um das Mikrofon zur Messung von WEA-Schallemissionen. Foto aus [34]

Über die gesamte Messzeit werden mit den Schallpegelmessgeräten der Abwertete Schalldruckpegel und die Terz- und Oktavbandspektren gebildet und gespeichert. Außerdem werden Audiodateien aufgezeichnet, die später die Ermittlung von Schmalbandspektren ermöglichen.

Die Schallemissionen von Windenergieanlagen werden auch für Forschungszwecke erfasst. Hierbei sind Parameter wie die Position des Mikrofons, die Quellen von Fremdgeräuschen und die Umgebungsparameter besonders zu beachten. Der erhebliche Beitrag von Geräuschen im niederfrequenten Bereich, die Anforderung, bei windigen Bedingungen zu messen und der Einfluss von atmosphärischen Parametern auf den Schalleistungspegel sowie auf die Schallausbreitung machen

diese Messungen zu einer Herausforderung [14]. Um bei der Auswertung der Schallmessdaten den Einfluss von atmosphärischen Parametern berücksichtigen zu können, ist es erforderlich, dass die Schallmessung simultan mit der Messung von Umgebungsparametern erfolgt. Beeinflussungsparameter sind dabei Windrichtung und -geschwindigkeit, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und atmosphärische Turbulenz [14]. Außerdem können für ausführliche Untersuchungen auch Parameter über die Anlage wie Leistung und Rotor-/Generator Drehzahl benötigt werden.

Da die atmosphärischen Bedingungen schnell variieren und nicht immer vorhersagbar sind, benötigt man Messungen über mehrere Tage, Wochen oder Monate [14]. Um den gesamten Frequenzbereich der WEA erfassen zu können, muss ein Mikrofon verwendet werden, welches über eine breite Frequenzantwort bis 20 kHz verfügt [14]. Aktuell wird bei der Messung von WEA-Schallemission das Kondensatormikrofon wegen seiner hohen Präzision und uniformen Frequenzantwort am häufigsten verwendet. Die vom Mikrofon gemessenen Signale müssen erfasst und gespeichert werden. Meistens sind Schallpegelmessgeräte digital und wandeln das Zeitsignal in ein vom Benutzer definiertes Ausgangssignal um [14].

In der Regel wird für spätere Auswertungen der Schalldruckpegel in 10-minütigen Zeitblöcken erfasst und gespeichert. Dabei wird eine kontinuierliche Zeitdatei aufgenommen, die später für die Ermittlung von Schmalbandspektren verwendet wird. Das ermöglicht genauere Untersuchungen über den Charakter von WEA-Geräuschen [14].

2.4. Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung

Um die aus den Schallmessverfahren erfassten Messdaten auswerten zu können und Informationen über ihre Frequenzzusammensetzung zu erhalten, ist die Verarbeitung des analogen Signals notwendig.

Im Folgenden wird auf die Methoden für die Signalverarbeitung eingegangen, auf welche das entwickelte MATLAB-Skript aufbaut. Zunächst werden Signale genauer definiert und die Bedeutung ihrer Digitalisierung wird erläutert. Demzufolge ist die Transformation des Signals vom Zeitbereich in den Frequenzbereich mittels FFT (Fast Fourier Transform) sowie die dementsprechende Frequenzanalyse beschrieben.

2.4.1. Signale

Signale sind physikalische Phänomene, welche Informationen beinhalten. Mathematisch gesehen sind sie Funktionen mit veränderlichem Wert über der Zeit. Man unterscheidet Signale nach Kausalität zwischen deterministisch und stochastisch. Deterministische Signale sind durch eine Funktion beschreibbar und ihr Verlauf

kann vorhergesagt werden. Stochastische Signale sind hingegen zufällig; hier kann nicht vorhergesagt werden, wie sich das Signal mit der Zeit verändert [21]. Bei der Darstellung von Signalen kann die Zeit- und die Wertachse als kontinuierlich bzw. diskret eingeteilt werden. Daher ergeben sich vier Signalarten nach Wertetyp: analog, abgetastet, quantisiert und digital (Abb. 2.9). Kontinuierliche Signale sind zu jedem Zeitpunkt definiert und an jeder Stelle kann der Wert der entsprechenden Signalgröße entnommen werden. Diskret oder quantisiert bedeutet, dass das Signal nur an bestimmten Stellen abgelesen werden kann. Ein wertdiskretes Signal ist nur an bestimmten Werten der Signalgröße definiert; ein zeitdiskretes oder abgetastetes Signal existiert nur an bestimmten Zeitpunkten [21]. Die Charakterisierung der vier Signalarten ist der Abb. 2.9 zu entnehmen.

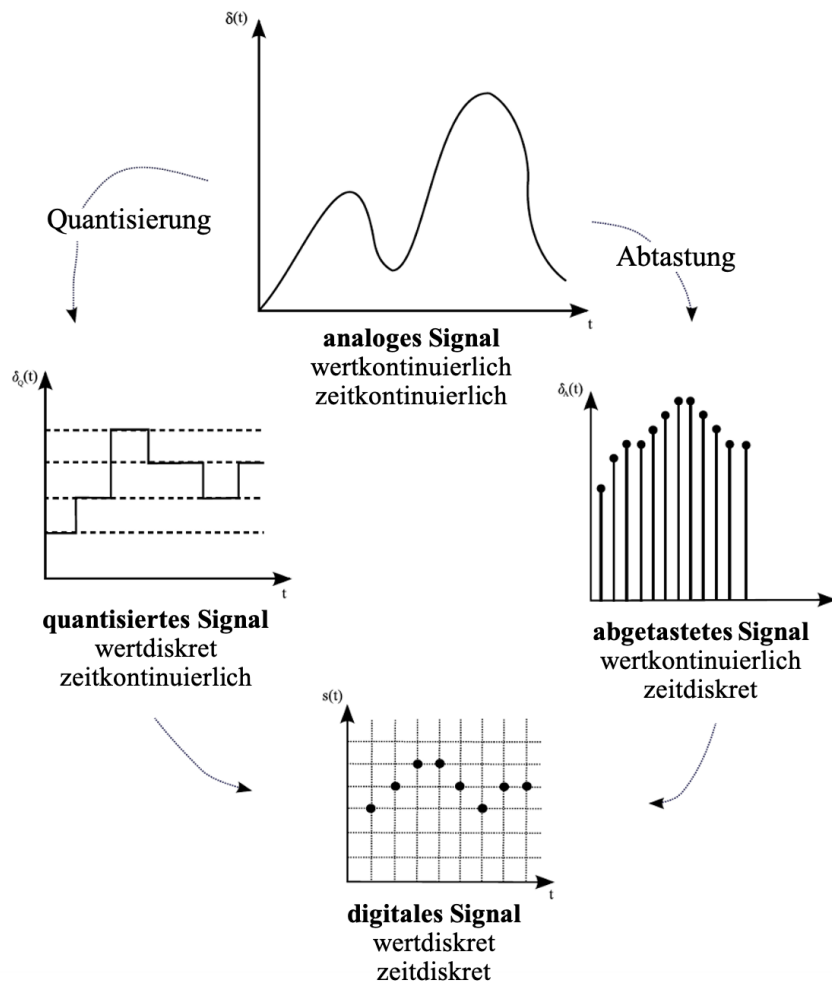


Abbildung 2.9.: Klassifizierung von Signalen in Anlehnung an [7]

Messgeräte messen das analoge Signal, welches zeit- und amplitudenkontinuierlich ist. Ein digitales Signal ist hingegen zeit- und amplitudendiskret. Das ist das Signal, welches von Computern bzw. Prozessoren für die Untersuchungen verarbeitet wird.

Bei einer Schallmessung wird ein kontinuierliches Signal erfasst. Um die Informationen aus einem kontinuierlichen Signal zu extrahieren und damit ein rechnerisch auswertbares Signal zu erhalten, müssen die vom Mikrofon aufgenommenen Signale digitalisiert werden. Dies geschieht mittels eines Analog-Digital-Wandlers (A/D Wandler) [25]. Die Feinheit der Diskretisierung hängt von der Zeit- und Amplitudenaufösung ab.

2.4.2. Abtastung

Der Prozess zur Erwerbung von Abtastwerten (*samples*) aus einem analogen Signal an diskreten Zeitpunkten wird Abtastung (*sampling*) genannt. Dabei wird das analoge Signal $x(t)$ mit einem Abtastintervall T_a abgetastet.

Ein zeitdiskretes Signal ist damit nur an bestimmten diskreten Zeitpunkten definiert und wird als mathematische Sequenz dargestellt. Die Elemente dieser Sequenz, die Abtastwerte bzw. Messwerte, entsprechen den Amplitudenwerten, die aus dem analogen Zeitsignal bei jedem Vielfachen der Abtastperiode T_a entnommen werden. Die Abtastperiode T_a bezeichnet das Zeitintervall zwischen zwei Abtastungen (Abtastmesswerte). Das heißt, nach jeder Abtastperiode T_a wird ein Wert des Signals entnommen. Die Umkehr der Abtastperiode T_a entspricht der Abtastfrequenz $f_a = 1/T_a$ ³.

Die Abtastfrequenz f_a hat in der Praxis mehr Bedeutung als das Abtastintervall T_a und beschreibt die Messwerteanzahl pro Sekunde. Des Weiteren ist sie ein Maß für die Güte der Analog-Digital-Umwandlung. Eine Abtastfrequenz f_a von 1000 Hz bzw. 1 kHz bedeutet, dass jede Sekunde 1000 Messwerte aus dem analogen Zeitsignal abgetastet werden [11].

Es wird klar, dass die Genauigkeit der Diskretisierung von der Abtastfrequenz abhängt. Voraussetzung für ein ausreichend diskretisiertes analoges Signal ist daher die Erfüllung des Abtasttheorems.

2.4.3. Abtasttheorem

Das Abtasttheorem besagt, dass die Abtastfrequenz f_a mindestens doppelt so hoch wie die obere Grenzfrequenz f_{max} sein muss [35].

$$f_a \geq 2 \cdot f_{max} \quad (2.4.1)$$

³In der englischen Literatur sind die Abtastperiode und die Abtastfrequenz als *sampling time* T_s und *sampling frequency* f_s bezeichnet.

Wird diese Bedingung nicht erfüllt, treten Spiegelfrequenzeffekte ein. Dieser Effekt wird Aliasing genannt. Dadurch können künstliche Frequenzen entstehen, die nicht im Messsignal vorhanden sind.

Die halbe Abtastfrequenz $f_a/2$ wird Nyquistfrequenz f_n genannt. Man kann davon ausgehen, dass kein Aliasing-Effekt auftritt, wenn die Amplituden bei Nyquistfrequenz f_n Null sind oder gegen Null gehen.

Heutzutage kann man sicherstellen, dass kein Aliasing auftritt, indem eine Tiefpassfilterung vor der Analog-Digital-Wandlung durchgeführt wird. Dabei sorgt der Tiefpassfilter für die notwendige Bandbegrenzung und die Unterdrückung von Rauschen [35]. Nach der Wahl der Abtastfrequenz, lässt der Tiefpassfilter nur Frequenzen durch, die kleiner als die Grenzfrequenz sind. Damit wird sichergestellt, dass das Abtasttheorem nicht verletzt wird.

Der analoge Tiefpassfilter wird auch Anti-Aliasing-Filter genannt, weil dies die Bandbreite des analogen Signals begrenzt und Aliasing-Effekte vermeidet.

Wenn das Abtasttheorem eingehalten wird, ist ein bandbegrenztetes Signal durch die Folge seiner Abtastwerte vollständig bestimmt; das heißt, es ist nicht nötig, den kompletten Verlauf des analogen Signals zu kennen. Die in dem korrekt abgetasteten zeitdiskreten Signal enthaltenen Informationen sind absolut gleichwertig mit dem Informationsgehalt des analogen Signals. Dies gilt allerdings nur für zeitdiskrete und amplitudenkontinuierliche Signale [21].

2.4.4. Fourier-Analyse

Um Informationen aus Signalen zu erhalten, ist häufig eine Betrachtung im Frequenzbereich (*frequency domain*) statt im Zeitbereich (*time domain*) nötig. Jedes Signal kann als Überlagerung von Sinus- und Kosinusschwingungen verschiedener Amplituden und Frequenzen nachgebildet werden (Abb. 2.10). Die Fourier-Analyse ermöglicht die Zerlegung des Signals in seine Bestandteile und zwar in einzelne Sinus- und Kosinusschwingungen bei diskreten Frequenzen. Von jeder Schwingung kann die Amplitude und die Phase bestimmt werden. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird jedoch die Phase nicht in Betracht genommen, da diese für stochastische Signale, wie Geräusche, zufällig ist und daher keine Informationen beinhaltet [17]. Durch die Fourier-Analyse wird damit das Signal in seine Frequenzkomponenten zerlegt. Da die Darstellung des Signals in Abhängigkeit von der Frequenz als Spektrum bezeichnet wird, ist unter Frequenzanalyse und Spektralanalyse dasselbe zu verstehen.

Der Übergang zwischen Zeit- und Frequenzbereich ist in beide Richtungen mittels der Fourier-Transformation (FT) bzw. der Inversen Fourier-Transformation (IFT) möglich [24]. Die FT ist ein mathematisches Werkzeug, welches die Ermittlung der in einem Signal enthaltenen Frequenzkomponenten ermöglicht: dadurch wird das analoge Zeitsignal in seine Frequenz- bzw. Spektralkomponenten zerlegt.

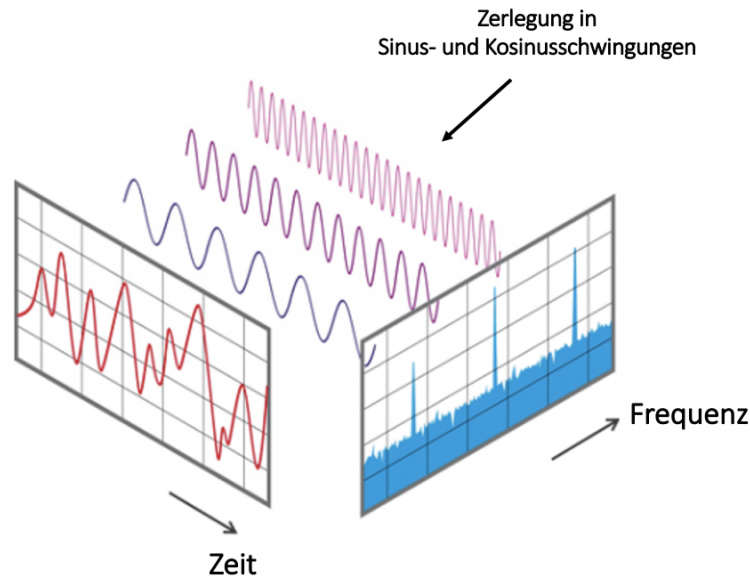


Abbildung 2.10.: Darstellung eines Signals im Zeit- und Frequenzbereich in Anlehnung an [1]

Ein zeitabhängiges Signal $x(t)$ kann in seine entsprechende Frequenzfunktion $X(f)$ mittels der FT wie folgend umgewandelt werden:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2.4.2)$$

Dabei ist $x(t)$ das analoge Zeitsignal, t ist die Zeit und j ist die imaginäre Einheit [24]. Durch die IFT ist die Rücktransformation des Signals von dem Frequenzbereich in den Zeitbereich möglich.

Aufgrund der Integrale und den unendlichen Grenzen eignet sich die Fourier Transformation allerdings nicht zur praktischen Analyse. In der Praxis werden Signale mit einem Computer verarbeitet. Dieser kann jedoch nur zeitdiskrete Signale endlicher Länge verarbeiten, daher ist die FT am Computer nicht umsetzbar. Eine Berechnung ist nur dann möglich, wenn das Signal eine finite Zeitlänge hat. Mittels der Diskreten Fourier Transformation (DFT) wird das Problem gelöst. Dabei wird die Auswertung auf endlich viele Abtastwerte N und damit die Betrachtung des analogen Signals auf eine bestimmte Zeitdauer begrenzt. Das betrachtete Zeitfenster hat eine Länge von NT_a Sekunden [21], wobei N der Blocklänge entspricht.

2.4.5. Diskrete Fourier Transformation

Die Diskrete Fourier Transformation (DFT) eines mit N Abtastwerten zeitdiskreten Signals ist definiert als

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.4.3)$$

wobei $x[n]$ die Zeitfolge und $X[k]$ ihr Spektrum ist. Zwischen diesen beiden bildet die DFT einen eindeutigen Zusammenhang [35]. Hierbei handelt es sich um eine Blocktransformation, welche den N Signalelementen im Zeitbereich genau N Elemente im Frequenzbereich und umgekehrt zuordnet. Damit geht durch die Transformation keine Information verloren.

Aufgrund ihrer Definition eignet sich die DFT, wie zuvor bereits erwähnt, zur numerischen Berechnung mittels Computern. Deshalb ist sie in der Signalverarbeitung von relevanter Bedeutung.

2.4.6. Schnelle Fourier Transformation

Eine beschleunigte und damit effiziente Berechnung der diskreten Fourier Transformation kann mit dem Algorithmus der schnellen Fourier-Transformation (FFT, *Fast Fourier Transform*) erzielt werden. Um den Algorithmus zu verwenden, muss allerdings die Signallänge eine Potenz von 2 sein. Ist dies nicht der Fall, kann man durch das Anhängen von Nullen an das Messsignal (*Zero-Padding*) die gewünschte Länge des Messsignals erzielen, ohne Informationen zu verlieren.

Die FFT-Analyse ermöglicht eine höhere Frequenzauflösung (*frequency resolution*) in Vergleich zu einer Oktav- und Terzband Analyse [14], welche im Abschnitt 2.4.10 besprochen wird. Unter dem Begriff Frequenzauflösung df ist der Abstand zwischen zwei Frequenzkomponenten im Frequenzspektrum zu verstehen [14]. Diese ist als Quotient zwischen der Abtastfrequenz f_a und der Anzahl der Messwerte N definiert

$$df = \frac{f_a}{N}. \quad (2.4.4)$$

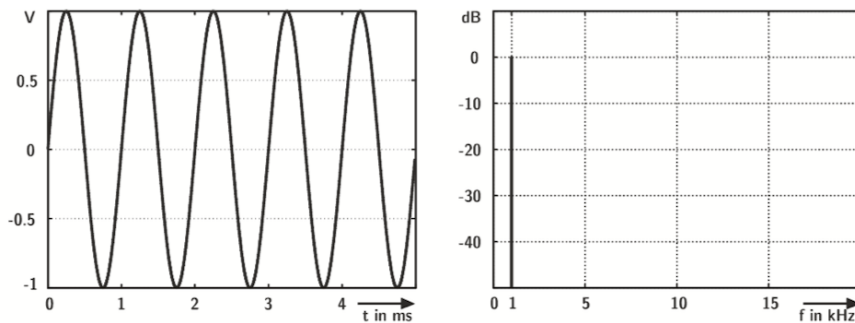
2.4.7. Leakage-Effekt

Durch die Verwendung einer finiten Anzahl von Messwerten bei der Berechnung der DFT entsteht ein sogenannter Leakage-Effekt [14], wodurch Frequenzkomponenten auftreten können, die im ursprünglichen Messsignal nicht enthalten sind (Abb.2.11b).

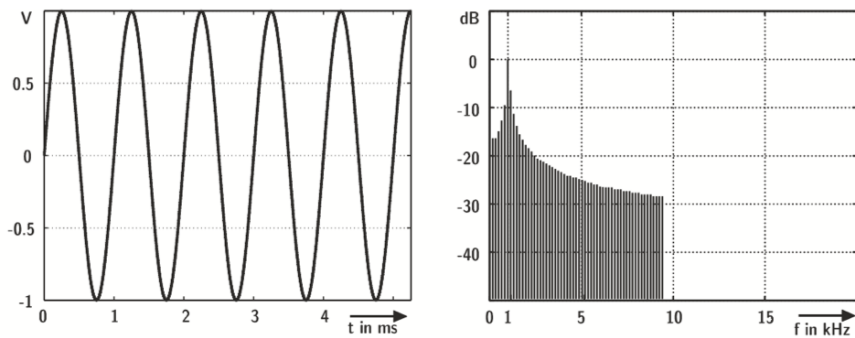
Ein zeitdiskretes Signal hat ein periodisches Spektrum [21]. Das heißt, man benötigt nur eine Periode des Spektrums, um die Frequenzzusammensetzung des Signals vollständig darzustellen. Die DFT berechnet jedoch nicht das Spektrum des Signals von der betrachteten Zeitlänge, sondern das Spektrum von dessen

periodischer Fortsetzung [21]. Enthält das Zeitsignal exakt ein ganzzahliges Vielfaches der Periode, gibt die DFT exakt das Spektrum wieder (Abb.2.11a): jede Spektrallinie repräsentiert genau die richtige Frequenz. Ist dies nicht der Fall, erhält man Sprungstellen im Zeitbereich. Diese Unstetigkeiten entstehen bei der periodischen Fortsetzung des betrachteten Signals mit endlicher Zeitlänge und induzieren störende Frequenzen, indem im Frequenzbereich ein Teil der Amplitude auf den gesamten Bereich verschmiert (Leakage-Effekt = Verschmieren des Signals).

Der Leakage-Effekt kann nicht vermieden werden, lässt sich jedoch durch Fensterfunktionen unterdrücken.



(a) Ohne Leakage-Effekt: das Zeitsignal enthält exakt ein ganzzahliges Vielfaches der Periode (exakt 5 Perioden)



(b) Mit Leakage-Effekt: das Zeitsignal enthält kein ganzzahliges Vielfaches der Periode (5,25 Perioden)

Abbildung 2.11.: Zeitverlauf und Frequenzspektrum eines 1 kHz Signals [24]

2.4.8. Fensterfunktionen

Ein Fenster (*window*) ist eine Zeitfunktion mit Anstieg und Abfallflanke [24], mit welcher die Abtastwerte des Zeitsignals gewichtet werden. Damit möchte man eine periodische Fortsetzung ohne Unstetigkeiten erzielen.

Die Fensterfunktionen ermöglichen die geringere Gewichtung der Abtastwerte am Anfang und am Ende der betrachteten Blöcke im Vergleich zu den mittleren Abtastwerten. Damit wird eine Periodisierung des Signals innerhalb der Zeitfensterlänge erzwungen und der Effekt der Unstetigkeiten reduziert.

Typische Fensterfunktionen sind das Rechteck-, Dreieck-, Hanning-, Hamming- und Blackman-Harris-Fenster [24]. Ein Beispiel von Fensterfunktionen ist in Abb. 2.12 zu sehen.

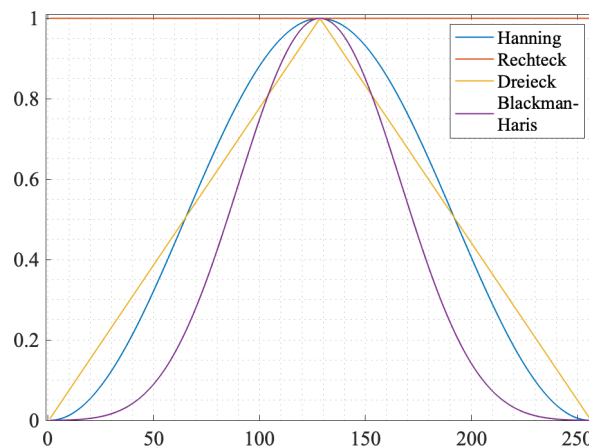


Abbildung 2.12.: Typische in der Signalverarbeitung gebräuchliche Fensterfunktionen

In dieser Arbeit wird das Hanning-Fenster verwendet, welches auch in der IEC 61400-11 gefordert wird [6].

Es gibt keine Richtlinien für die Wahl der Fensterfunktion. Allgemein lässt sich sagen, dass die Fensterbreite die zeitliche Auflösung und daraus folgend die Frequenzgenauigkeit bestimmt. Je größer die Fensterlänge ist, desto genauer lassen sich die Frequenzen bestimmen.

Obwohl mit breiteren Fensterlängen die Frequenzauflösung steigt, verringert sich jedoch die zeitliche Auflösung. Deshalb muss bei der Wahl der Fensterfunktion ein Kompromiss zwischen Zeit- und Frequenzauflösung gefunden werden. Daher ist es sinnvoll, ein schmales Fenster zu wählen, wenn das Signal schnell seine Eigenschaften ändert und ein breiteres Fenster, wenn sich die Signaleigenschaften langsam ändern.

Um den Datenverlust durch Fensterung des Signals zu minimieren, können bei der Signalverarbeitung zeitlich überlappende Fenster verwendet werden. Unter Überlappung (*overlapping*) versteht man die Überlagerung von zwei benachbarten Zeitfenstern. Besser ausgedrückt, ein Zeitfenster enthält den letzten Teil des vorherigen, der sonst verloren gehen würde. Die IEC - 61400 - 11 fordert eine minimale Überlappung von 50 % [6].

2.4.9. Zeit-Frequenz-Analyse

Bei der Untersuchung von Signalen ist es hilfreich, die Informationen aus dem Zeit- und Frequenzbereich zu kombinieren. Es ist wichtig zu wissen, welche Frequenzen zu welchem Zeitpunkt mit welcher Amplitude auftreten. Die sogenannte Kurzzeit Fourier Transformation (*Short Time Fourier transform, STFT*) ermöglicht die Erzeugung einer Zeit-Frequenz-Darstellung, welche Spektrogramm genannt wird. Bei der STFT handelt es sich um eine blockorientierte diskrete Fourier Transformation, wobei nur ein kurzer Ausschnitt des Signals verarbeitet wird [35]. Daher der Begriff Kurzzeit Fourier Transformation.

Bei der Kurzzeitspektralanalyse wird das Signal in m Blöcke mit n Länge unterteilt. Jeder Block wird mit einer Fensterfunktion multipliziert und dann durch die DFT transformiert. Dabei werden meistens die Blöcke mit einem gewissen Überlappungsgrad überlagert.

2.4.10. Oktavband- und Terzbandanalyse

Die Frequenzzusammensetzung von Signalen in Terz- oder Oktavbändern erfolgt durch die Anwendung von Filtern. Dabei wird das Frequenzspektrum in standardisierten Frequenzintervallen mit relativer konstanter Bandbreite unterteilt. Die Amplitude eines bestimmten Frequenzbandes entspricht der Summe der dazugehörigen Energie von jeder Frequenzkomponente, die in dem Frequenzband enthalten ist [14].

Jedes Oktav- oder Terzband wird definiert durch die untere Grenzfrequenz f_u , die obere Grenzfrequenz f_o und die Mittenfrequenz f_m [14].

Die Differenz aus f_o und f_u entspricht der Bandbreite. Bei Oktav- und Terzfiltern, wie bei allen Filtern relativer konstanter Bandbreite, ist diese zur Mittenfrequenz proportional und dafür gilt [23]:

$$f_m = \sqrt{f_u f_o} \quad (2.4.5)$$

Die Bandgrenzen lassen sich wie folgt berechnen

$$\frac{f_o}{f_u} = 2^{1/N} \quad (2.4.6)$$

wobei $N = 1$ für die Oktavbänder und $N = 3$ für die Terzbänder gilt [14]. Die Bandgrenzen und die Mittenfrequenzen der Terzen und Oktaven sind in den Normblättern DIN 45 651 und 45 652 festgelegt [23].

2.4.11. Schmalbandanalyse

Werden die Spektren mit einer Frequenzauflösung von 0,1-2 Hz dargestellt, spricht man von Schmalbandanalyse, welche mithilfe der Schnellen Fourier Transformation FFT erfolgt. Ein Schmalbandspektrum mit einer hohen Frequenzauflösung enthält detailliertere Informationen über die Frequenzzusammensetzung des Signals im Vergleich zu den Oktav- oder Terzspektren. Besonders bei der Analyse von WEA-Schallmesssignalen eignet sich die Schmalbandanalyse, um besondere Charakteristika des Schallfeldes zu untersuchen [14].

In Abb. 2.13 ist beispielhaft ein Oktav-, Terz- und Schmalbandspektrum abgebildet. Terz- und Oktavspektren weisen nur wenige Datenpunkte und damit eine geringere Frequenzauflösung auf. Das Schmalbandspektrum hingegen hat eine hohe Anzahl an Datenpunkten und liefert daher die meisten Informationen und eine hohe Frequenzauflösung.

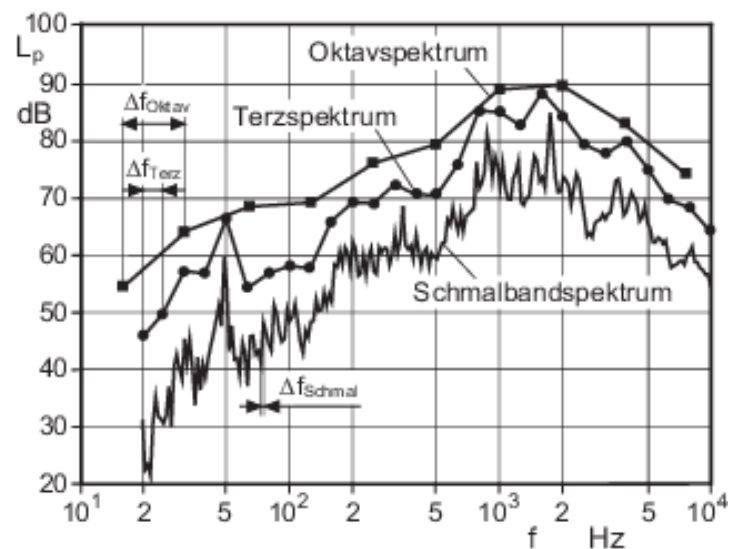


Abbildung 2.13.: Darstellung des Spektrums eines Signals jeweils in Oktav-, Terz- und Schmalband[31]

Für eine weitere und ausführliche Erklärung über die digitale Signalverarbeitung sei auf geeignete Literatur [14], [21], [24], [35] verwiesen.

Kapitel 3.

Konzeption der Testmessung

Die Entwicklung der Methode zur Störgeräuschfilterung basiert auf Schallmessdaten. Wenn Schallmessungen im Freien durchgeführt werden, werden diese, wie bereits in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, von Umgebungsgeräuschen beeinflusst. Daher bestehen diese Messsignale aus Überlagerungen mehrerer Geräusche und weisen bei der Auswertung eine Komplexität auf. Dies erschwert die Interpretation der Messsignale sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich.

Das Spektrum liefert Informationen über die Frequenzanteile, die im Signal enthalten sind, jedoch ist daraus keine Zuordnung zwischen Frequenzanteilen des Nutz- und Störsignals möglich. Deswegen sind Informationen über die bei der Messung möglichen Störquellen für eine erfolgreiche Filterung der Störgeräusche notwendig. Damit können die Störfrequenzanteile identifiziert und entfernt werden, ohne das Nutzsignal gravierend zu beeinflussen. Daher ist es sinnvoll, die Methode mit vollständig bekannten Daten zu entwickeln und anschließend mit komplexen Signalen zu testen und weiterzuentwickeln.

In einem ersten Schritt wird eine Testmessung konzipiert, um ein bekanntes Testsignal zu erzeugen. Das ermöglicht:

- die Bestimmung der Charakteristik und Dauer des Signals. Beispielsweise kann in einem ersten Schritt nur ein impulsives Signal erzeugt werden und in weiteren Schritten kann mit einer Kombination aus mehreren Geräuschen gearbeitet werden. Außerdem verringert sich bei einer reduzierten Anzahl an Messwerten die Rechenzeit. Daher ist es sinnvoll, die ersten Untersuchungen an kurzen Messsignalen zu testen, damit die Rechenzeit nicht zu groß ist.
- den Zeitverlauf des Signals zu kennen und somit Störgeräusche eindeutig identifizieren zu können. Außerdem kann man beobachten, wie sich ein bestimmtes Störgeräusch mit der Zeit verändert bzw. welche Änderungen des Zeitverlaufs diese Störung verursacht.
- einen Erkenntnisgewinn über den Zeitverlauf und das Frequenzspektrum von Störgeräuschen durch die Auswertung der entsprechenden Signale, wenn diese bei der Messung einzeln aufgezeichnet werden.
- die Entwicklung eines bekannten und realitätsnahen Messsignals.

Der Vorteil der Testmessung ist die Möglichkeit, mit einem weniger komplexen Signal zu arbeiten, welches jedoch gut die Realität annähern lässt. Somit kann die Konzeption der Testmessung die Entwicklung der Störgeräuschfilterung unterstützen und vereinfachen. Um sicherzustellen, dass die Methode nicht nur auf die ausgewählten vereinfachten Signalen anwendbar ist, wird sie stufenweise auf komplexere Signale angewendet.

Die im Rahmen der Testmessung aufgenommenen Audiodateien wurden mit zwei verschiedenen Messgeräten erfasst: zunächst erfolgen einfache Messungen mit einem Smartphone und in einem weiteren Schritt werden die Signale mit einem professionellen Schallpegelmessgerät gemessen.

Im Folgenden werden die beiden Testmessungen und die entsprechenden verwendeten Messgeräte genauer beschrieben.

3.1. Messung mit Smartphone

Die ersten Audiodateien wurden mit einem Smartphone aufgenommen. Heutzutage enthalten Smartphones ein oder mehrere interne Mikrofone mit einer Empfindlichkeit, die je nach Marke und Modell des Smartphones variiert [38]. In der Literatur sind verschiedene Lösungen zu finden, bei denen Smartphones als mobile Erfassungsgeräte verwendet werden [38]¹. Allerdings ist eine zuverlässige Genauigkeit bei Messungen mit Smartphones nicht gegeben. Für den in dieser Arbeit vorgesehenen Zweck ist die Empfindlichkeit von Smartphone-Mikrofonen ausreichend. Hierbei handelt es sich nicht um die Beurteilung des Geräuschpegels, wo eine hohe Präzision der Aufnahme gefordert wird, sondern um die Aufzeichnung verschiedener Geräusche für ihre Auswertung hinsichtlich ihrer Frequenzanteile. Für diese Testmessung wurde ein iPhone 7Plus verwendet. Die erste Datei wurde vom Balkon aus aufgenommen. Dabei handelt es sich um eine 10-minütige Messdatei von Hintergrundgeräuschen, welche in diesem Fall dem Nutzsignal entsprechen. Zufällig auftretende Störungen, wie das Vorbeifahren eines Autos oder das selbsterzeugte Klatschen, entsprechen den Störgeräuschen, die aus der Gesamtmessung gefiltert werden sollen. Das Hintergrundgeräusch wurde als Nutzsignal definiert, sodass die Störungen im Signal leicht erkennbar sind.

In Abb. 3.1 ist der Zeitverlauf dieser Messung abgebildet. Bei der Aufnahme wurde das Auftreten jedes Geräusches markiert. Damit ist der Signalverlauf leicht nachzuvollziehen: die hohen Peaks entsprechen dem Klatschen.

Diese Testmessung wurde grundsätzlich für die Einarbeitung in die Signalverarbeitung in MATLAB verwendet, welche im Unterkapitel 4.3 genau beschrieben wird.

¹Ein Überblick über die bisherigen Studien bzw. Untersuchungen, bei welcher Smartphones als Erfassungsgeräte zum Einsatz kommen, ist in [38] zu finden.

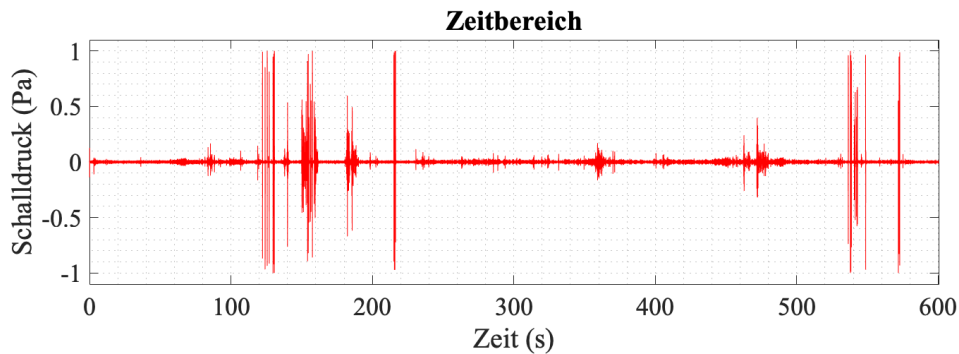


Abbildung 3.1.: Zeitverlauf der Testmessung

In einer weiteren Messung wurden typische Störgeräusche erfasst. Laut Literatur [13] sind Vogelgezwitscher, Fahrzeug- und Flugzeuggeräusche typische Schallereignisse, welche bei WEA-Schallmessungen auftreten könnten. Die Messungen typischer Störgeräusche wurden in einem Raum mit geschlossenen Fenstern durchgeführt, wobei die typischen Geräusche von einem Laptop abgespielt wurden. Diese wurden dann bei einer mittleren Laptop-Lautstärke mit dem Smartphone aufgenommen. Die Messsignale wurden in wav-Format gespeichert und sind somit für die weitere Verarbeitung und Auswertung bereit. Im Anhang A sind der Zeitverlauf, das Frequenzspektrum und das Spektrogramm dieser Messsignale zu sehen.

3.2. Messung mit Schallpegelmesser

Im nächsten Schritt wurde ein professionelles Messgerät verwendet, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und sich damit an die in der Praxis aufgenommenen Schallmesssignale annähern zu können. Dabei wurde der in Abb. 3.2 abgebildete Schallpegelmesser von Brüel & Kjær Type 2250 und das in Abb. 3.3 dargestellte Brüel & Kjær vorpolarisierte $\frac{1}{2}$ “ Freifeld-Mikrofon des Typs 4189 verwendet. Der Frequenzbereich des Mikrofons beträgt 6,3-20 kHz.

Ein Freifeld-Mikrofon gehört zu den Präzisionskondensatormikrofonen. Es misst direkt den Schall, der aus einer Richtung im rechten Winkel auf die Membran trifft. Diese Messung entspricht genau dem Schalldruck, der auftreten würde, wenn es kein Mikrofon geben würde [32]. Die höchste Präzision wird erreicht, wenn das Freifeld-Mikrofon auf die Schallquelle ausgerichtet ist [32]. Ideal sind Freifeld-Mikrofone für Messungen in großen, freien Bereichen.

Um die Geräusche einer WEA sowie die eventuellen Störgeräusche nachbilden zu können, wurden auch bei dieser weiteren Testmessung vom Laptop abgespielte Geräusche erfasst. Wie in Abb. 3.4 zu sehen ist, wurde der Schallpegelmesser auf den Laptop ausgerichtet, welcher der Schallquelle entspricht.

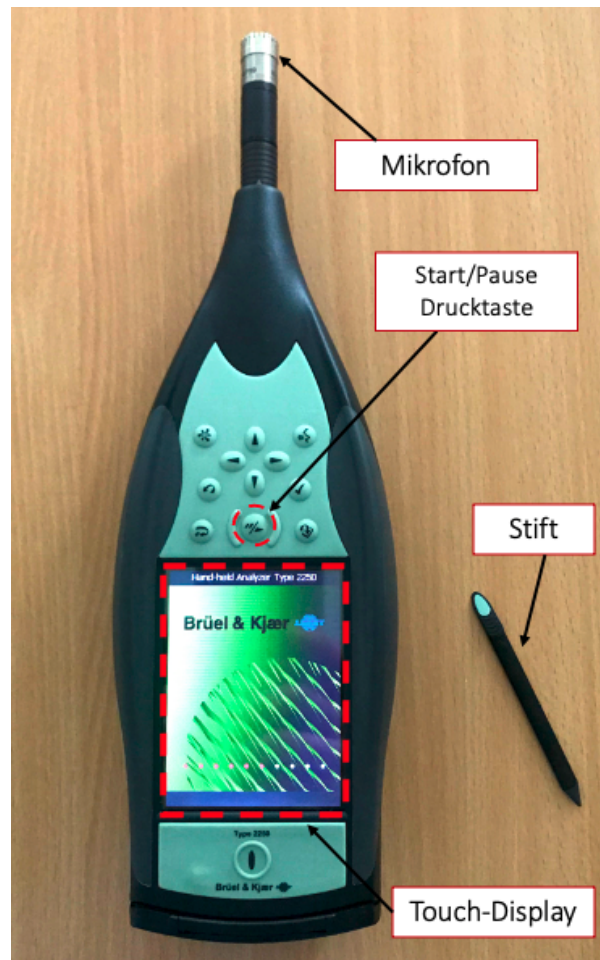


Abbildung 3.2.: Schallpegelmesser Brüel & Kjær Type 2250



Abbildung 3.3.: Brüel & Kjær vorpolarisiertes $\frac{1}{2}$ " Freifeld-Mikrofon Typ 4189 [5]

Der Abstand von 50 cm zwischen Schallquelle und Messgerät bleibt über die gesamte Messungen unverändert.

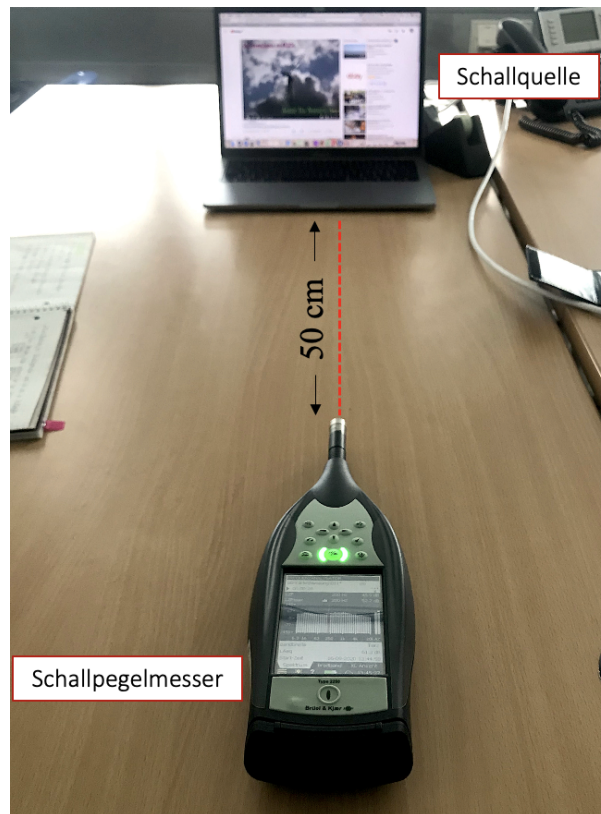


Abbildung 3.4.: Ausrichtung des Messgerätes zu der betrachteten Schallquelle

Zu Beginn der Messung wurde das Messgerät kalibriert. Wie bereits in Abschnitt 2.3 erläutert, ist Ziel der Kalibrierung, die korrekte Funktion des Mikrofons zu prüfen sowie die Empfindlichkeit des Schallpegelmessgerätes zu justieren. Für die Kalibrierung des Schallpegelmessers wurde der, in Abb. 3.5 abgebildete, akustische Kalibrator von Norsonic Typ Nor1251 verwendet. Dieser erzeugt $114 \text{ dB} \pm 0,2 \text{ dB}$ bei 1000 Hz. In Abb. 3.6 ist die Auswertung des Tonsignals von dem Kalibrator dargestellt. Zur Veranschaulichung des sinusförmigen Verlaufs eines Tones wurde der Zeitverlauf des Kalibriertons auf 0,1 s begrenzt. Das Frequenzspektrum des Kalibriertons weist hierbei einen einzigen Peak bei 1000 Hz auf.

Nachdem die korrekte Funktionsweise der Instrumentierung überprüft ist, wurden die Messungen durchgeführt. Nach der Erfassung von einzelnen Messsignalen, wie beispielsweise das Vorbeifahren eines Traktors, wurde eine 10-minütige Audiodatei aufgenommen, welche beispielhaft eine WEA-Messung nachbilden sollte. Dabei wurde im Hintergrund das Geräusch einer sich drehenden Windenergieanlage abgespielt und bei gewünschten Zeitpunkten Störgeräusche, wie Vogelgezwitscher, Klatschen, Traktor und Verkehr hinzugefügt.

Die aus der Testmessung erfassten Signale werden nun bei der Entwicklung der Methode zur Störgeräuschfilterung verwendet.



Abbildung 3.5.: Akustischer Kalibrator Norsonic Typ Nor1251

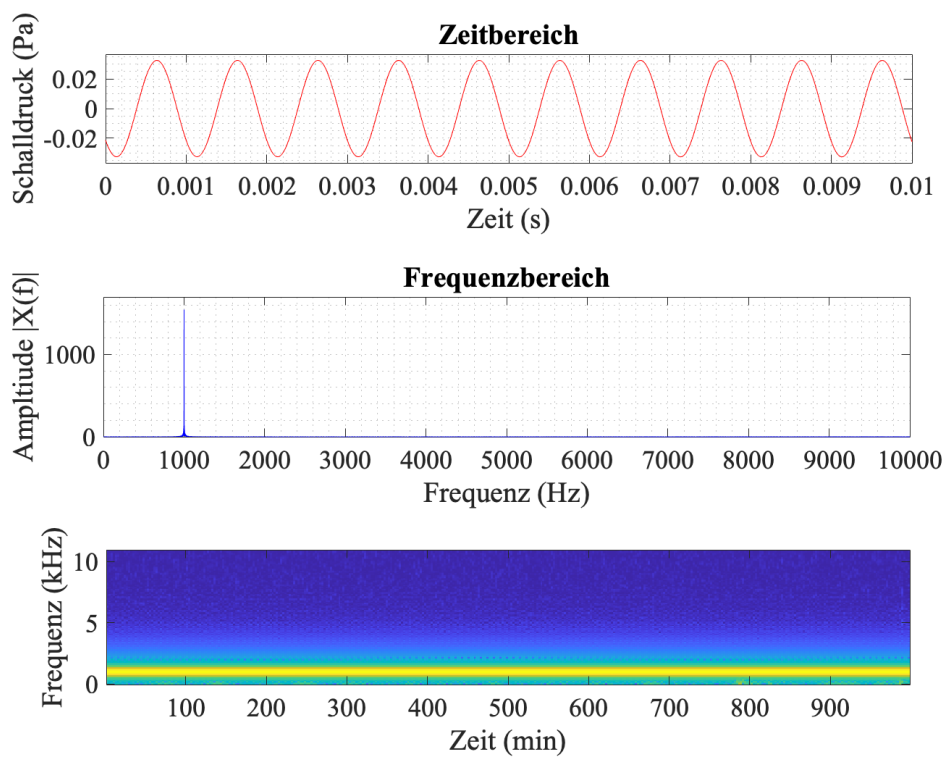


Abbildung 3.6.: Auswertung des vom Kalibrator erzeugten Tonsignals

Kapitel 4.

Entwicklung der Methode

Dieses Kapitel dient zur Erklärung der entwickelten Methode. Zunächst werden die Ansätze erläutert, die zu einer Reduzierung der Störgeräusche bei den Messsignalen geführt haben. Dabei werden auch die ersten Lösungsansätze behandelt, welche jedoch zu keiner erfolgreichen Filterung geführt haben. Besonders werden die aufgetretenen Probleme bei den ersten Ansätzen diskutiert. Nach der Beschreibung der Funktionsweise, wird auf die digitale Signalverarbeitung in MATLAB eingegangen. Hierbei werden die in MATLAB implementierten Funktionen beschrieben, die für die Entwicklung der Methode verwendet wurden und der Programmablauf wird genauer betrachtet. Abschließend werden die dargestellten Ergebnisse diskutiert und die Methode wird hinsichtlich ihrer Qualität für die Ermittlung von Umgebungsgeräuschen und Schallemissionen von Windenergieanlagen bewertet.

4.1. Mögliche Methode

Die Zielsetzung ist die Filterung definierter Frequenzanteile, um den Einfluss der Störgeräusche auf die Gesamtmessung zu reduzieren. Daher befasst sich der erste Ansatz mit der Filterung der Frequenzanteile von Störgeräuschen direkt im Frequenzbereich. Die Grundidee ist, anhand des bekannten Testsignals, die Frequenzanteile vom Störgeräusch im Frequenzspektrum zu identifizieren und zu filtern.

Das Hauptproblem bei einer Filterung im Frequenzbereich besteht darin, dass eine eindeutige Zuordnung von Frequenzanteilen dem Stör- oder Nutzgeräusch erschwert ist. Um das Problem zu umgehen und die beiden Signale (Nutz- und Störsignal) einzeln zu erkennen, wurden zwei Signale aus der Testmessung kombiniert. Dabei wurde eine sich rotierende WEA als Nutzsignal mit Vogelgezwitscher als Störsignal zusammengefügt (Abb. 4.1). In einem ersten Ansatz soll versucht werden, das Störsignal aus dem Nutzsignal mit den Kenntnissen über Zeitverlauf und Frequenzspektrum der einzelnen Signale trennen zu können.

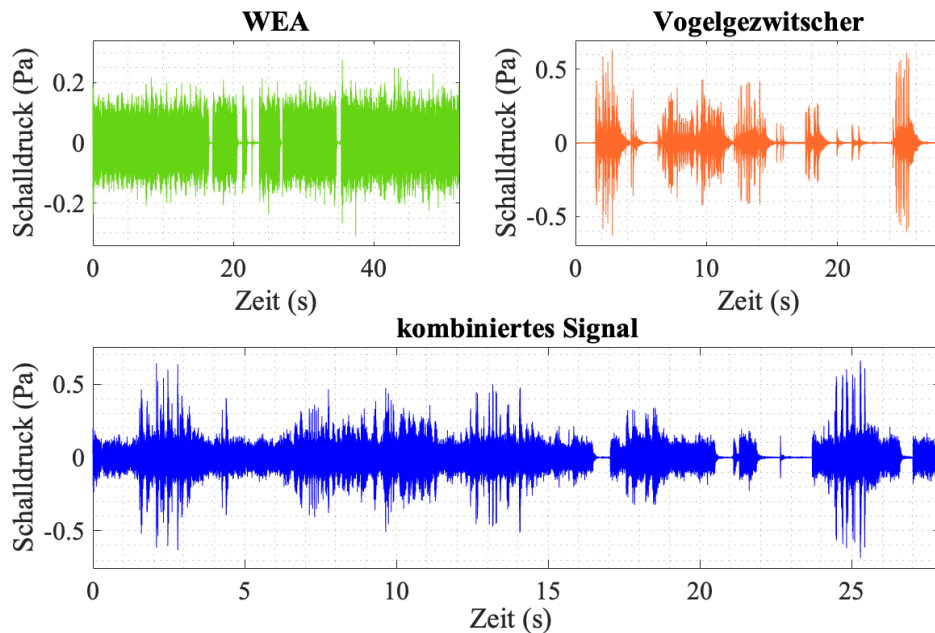


Abbildung 4.1.: Zeitverlauf der einzelnen Signale und der Kombination zwischen den beiden

Es wurde festgestellt, dass trotz der Kenntnisse über die Störgeräusche aus der Testmessung die Frequenzanteile der Störgeräusche im Frequenzspektrum nicht vollständig zu identifizieren und vom Nutzsignal eindeutig zu unterscheiden sind. Bei den Versuchen, die Peaks im Frequenzspektrum vom Störgeräusch zu detektieren und diese im Gesamtspektrum zu dämpfen oder das komplette Spektrum vom Störgeräusch aus dem Gesamtspektrum zu entfernen, haben sich diese Lösungswege als nicht sinnvoll erwiesen. Versucht man die Frequenzanteile des Störgeräusches zu dämpfen, besteht die Gefahr, Frequenzanteile des Nutzsignals zu filtern. Außerdem kann nicht eindeutig festgelegt werden, um wie viel die Amplitude der Peaks des Störgeräusches im Frequenzspektrum gedämpft werden soll, damit dies, ohne das Nutzsignal zu beeinflussen, vollständig gefiltert wird (Abb. 4.2).

Zusätzlich handelt es sich dabei um stochastische Signale, welche nicht vorhergesagt werden können. Erstellt man eine Datenbank mit einzeln aufgenommenen Störgeräuschen, ist nicht zu erwarten, dass diese bei einer Gesamtmessung mit denselben Eigenschaften (Schalldruck und Frequenz) wieder auftreten. Deswegen ist eine Mustererkennung der Frequenzspektren in dieser Art nicht möglich. Aus diesen Gründen wird dieser Ansatz als nicht zielführend befunden.

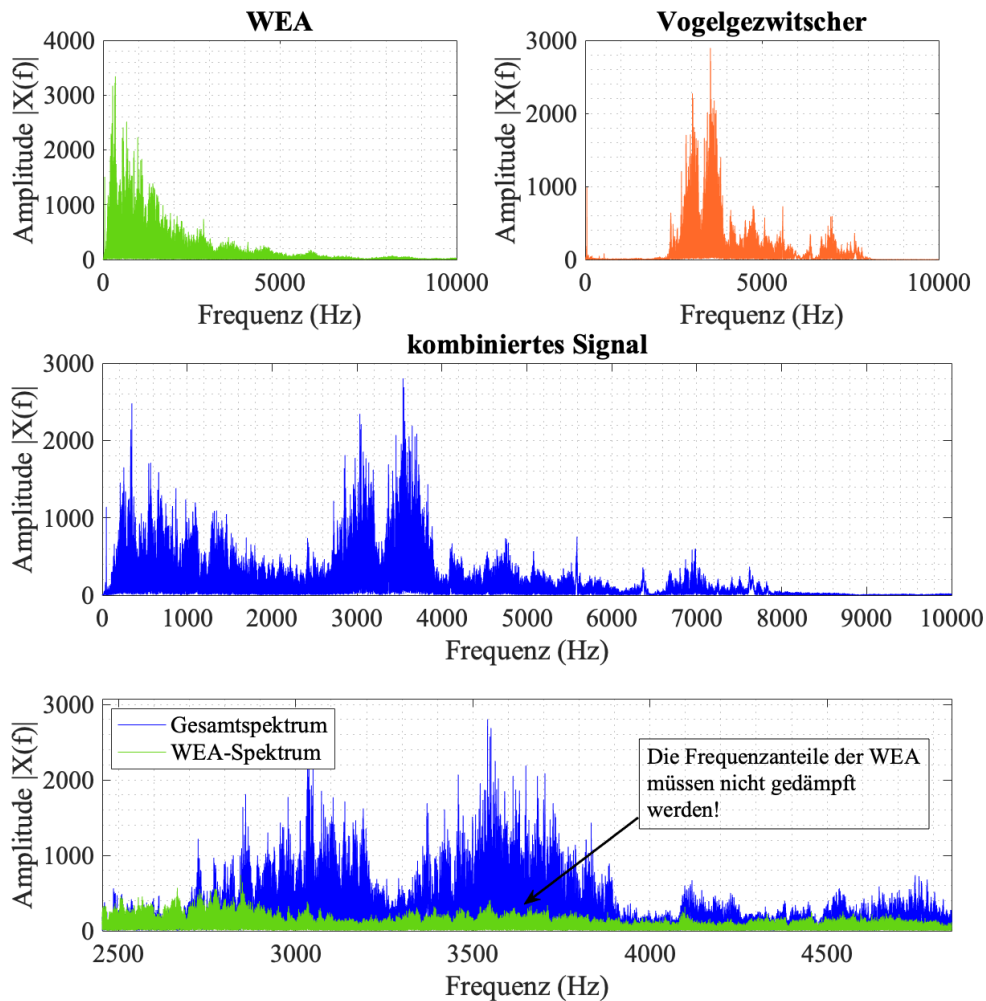


Abbildung 4.2.: Frequenzspektrum der einzelnen Signale und der Kombination zwischen den beiden. *Unten*, Erläuterung des Problems bei der Dämpfung der Peaks

Eine Datenbank der Störgeräusche kann jedoch für eine erfolgreiche Filterung hilfreich sein, indem man allgemeine Informationen (wie z. B. Frequenzbereich) über den typischen Frequenzinhalt entnehmen und weiter verwenden kann.

Um zu vermeiden, dass Frequenzanteile vom Nutzsignal durch die Dämpfung der Peaks im Frequenzspektrum gefiltert werden, wurde die Möglichkeit untersucht, die Filterung im Zeitbereich durchzuführen. Der Grundgedanke ist, den Frequenzbereich des Störgeräusches möglichst zu begrenzen und das bandbegrenzte Signal mittels der Inverse Fourier-Transformation IFT in den Zeitbereich rückzutransformieren. Die Informationen über den zu begrenzenden Frequenzbereich sind aus der

Testmessung zu entnehmen. Verfügt man über eine Datenbank von Störgeräuschen, können diese Informationen daraus entnommen werden.

Dieser Lösungsweg wurde weiter mithilfe des kombinierten Signals untersucht (Abb. 4.1). Das Signal des Vogelgezwitschers weist, wie aus seinem in Abb. 4.2 dargestellten Frequenzspektrum zu entnehmen ist, besonders Anteile in einem Frequenzbereich von 2500 Hz bis 8000 Hz auf. Deshalb wird dieser Frequenzbereich aus dem Gesamtspektrum isoliert (Abb. 4.3) und in den Zeitbereich mittels IFT rücktransformiert.

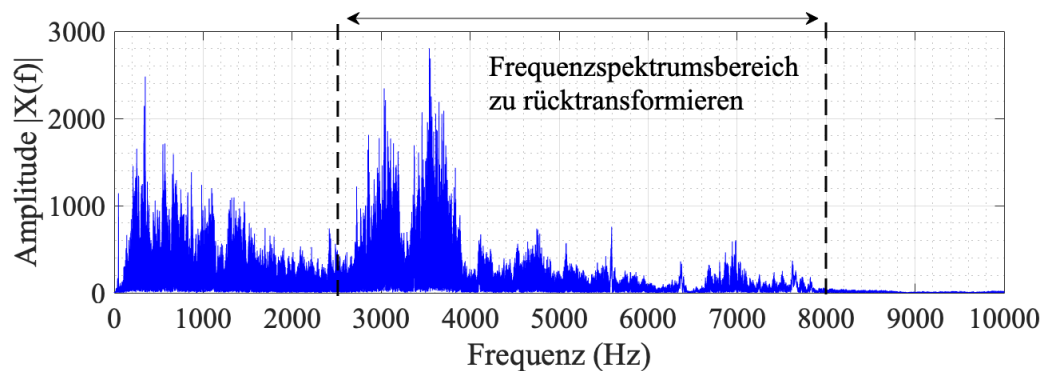


Abbildung 4.3.: Begrenzung des Frequenzspektrums mit Frequenzanteilen des Störgeräusches

Nach der Rücktransformation ist es möglich, das kombinierte Signal mit dem aus der Rücktransformation im Zeitbereich zu vergleichen. Das rücktransformierte Signal enthält nur Frequenzanteile im zuvor ausgewählten Frequenzbereich. Subtrahiert man dieses Signal aus dem Gesamtsignal, werden auch die Frequenzanteile zwischen 2500 Hz und 8000 Hz vom Nutzsignal entfernt. Das entspricht genau dem Ergebnis, welches man bei der Anwendung eines Bandpassfilters im Frequenzbereich erhalten würde.

Für die Filterung im Zeitbereich wurde hierbei wie folgend vorgegangen. Es wurden die Peaks von beiden Signalen untersucht und analysiert. Stimmt ein Peak des Gesamtsignals mit einem von dem rücktransformierten Signal überein oder ist eine minimale Abweichung ϵ zwischen den beiden festzustellen, kann angenommen werden, dass der Zeitpunkt dem Auftreten eines Störgeräusches entspricht. Damit sind die Zeitpunkte beim Auftreten der Störgeräusche identifiziert. Deren Einfluss kann nun reduziert werden, indem die Peaks des Schalldruckes bei den entsprechenden Zeitpunkten im Gesamtsignal gedämpft werden.

Allerdings lassen sich bei der Ausführung dieser Methode folgende Fragen stellen:

1. Wie groß darf maximal die Abweichung ϵ sein, damit ein Peak dem Störgeräusch zugeordnet werden kann? (Abb. 4.4)

- Um wie viel muss ein als Störgeräusch identifizierter Peak gedämpft werden, damit die Frequenzanteile des Störsignals reduziert werden, ohne das Nutzsignal zu beeinflussen?

Da keine eindeutige und sinnvolle Antwort auf diese Fragen möglich ist, wurde auch dieser Ansatz als nicht geeignet definiert.

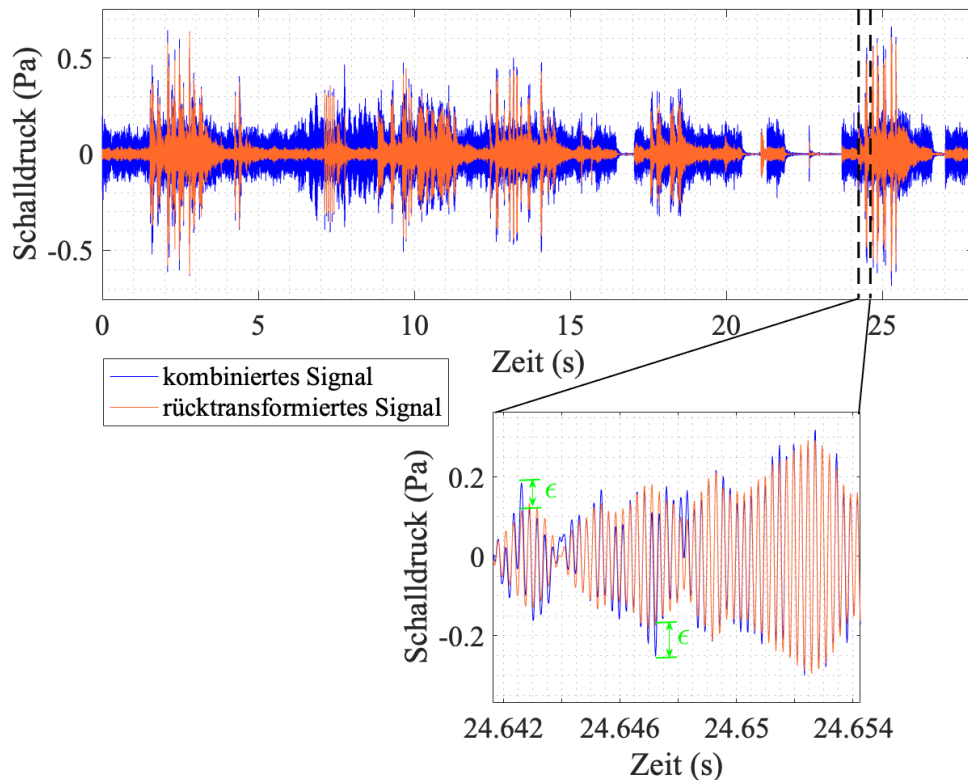


Abbildung 4.4.: Veranschaulichung der auftretenden Probleme bei Filterung im Zeitbereich

4.2. Gewählter Ansatz

Um bei der Durchführung der Filterung sicherzustellen, dass das Nutzsignal nicht beeinträchtigt wird, müssen sinnvolle Werte für die Dämpfung der Peaks sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich definiert werden. Dies war bei den beiden vorherigen Ansätzen nicht möglich.

Aus diesen gewonnenen Erkenntnissen kann geschlossen werden, dass eine

minimierte Beeinträchtigung des Nutzsignals durch das Entfernen von Signalausschnitten mit Störsignal am sinnvollsten ist. Dabei sind die Störgeräusche möglichst genau zu identifizieren und der Abschnitt zwischen den Zeitpunkten des Auftretens aus dem Gesamtsignal zu entfernen.

Um die Störgeräusche und besonders die Zeitpunkte ihres Auftretens zu identifizieren, wurde das Gesamtsignal im Zeit-Frequenz-Bereich analysiert.

Bevor der ausgewählte Ansatz vorgestellt wird, ist für das Verständnis der beschriebenen Methode die Erläuterung des Begriffes Momentanfrequenz notwendig.

Die Momentanfrequenz (*instantaneous frequency*) wird als Durchschnitt der zu einem bestimmten Zeitpunkt im Signal vorhandenen Frequenzen definiert [4].

Sie ist ein zeitlich variierender Parameter, der den Ort der spektralen Peaks des Signals definiert, wenn dieser mit der Zeit variiert [4]. Deswegen eignet sie sich für die Verarbeitung von Signalen, deren spektrale Eigenschaften mit der Zeit variieren. In der praktischen Anwendung wird die Momentanfrequenz als Deskriptor für physikalische Phänomene verwendet [4].

In dieser Arbeit ist die Momentanfrequenz ein Deskriptor für das Auftreten von Störgeräuschen. Dabei werden plötzliche Änderungen ihres Verlaufs über der Zeit untersucht. Eine solche Änderung entspricht dem Auftreten von neuen Frequenzkomponenten im Signal, welche zu dem Zeitpunkt einen hohen Energieinhalt aufweisen und daher kann das ein Indikator für das Auftreten eines Störgeräusches sein.

Der Ausgangspunkt folgendes Ansatzes ist damit die Betrachtung, dass beim Auftreten einer Störung eine Änderung der Frequenzkomponenten und ihrem Energieinhalt im Signal zu diesem Zeitpunkt zu erwarten ist. Wird die auftretende Momentanfrequenz zu jedem Zeitpunkt berechnet, ist ihr Verlauf zu analysieren und nach plötzlichen Änderungen ihres Wertes zu untersuchen. Die Zeitpunkte, bei welchen eine plötzliche Änderung der Momentanfrequenz festgestellt wurde, bestimmen den Anfangs- und Endzeitpunkt des Auftretens eines möglichen Störgeräusches. Diese Anfangszeitpunkte treten nacheinander im Signal auf.

Die Signalausschnitte mit Störgeräuschen werden nicht betrachtet bzw. entfernt. Die störgeräuschfreien Ausschnitte entsprechen dem Nutzsignal und werden für die weitere Auswertung gespeichert.

Die Zuordnung der Ausschnitte erfolgt unter der Betrachtung der spektralen Leistungsdichte (*power spectral density*, PSD) für jeden Ausschnitt. Diese gibt die Leistung an, die auf ein infinitesimal schmales Intervall auf der Frequenzachse entfällt, dividiert durch die Breite dieses Intervalls [37]. Das Integral über alle Frequenzen ergibt die Gesamtleistung des Signals [37]. Wird nur ein bestimmter Frequenzbereich betrachtet, gibt die spektrale Leistungsdichte die Leistung innerhalb des betrachteten Frequenzbereiches wieder. Damit ist es möglich, den

Prozentsatz der Gesamtleistung in einem betrachteten Frequenzbereich pro Ausschnitt zu berechnen und diesen als Maß für die Zuordnung der Ausschnitte zu verwenden.

Damit nur die Leistung aus den Frequenzanteilen der Störgeräusche betrachtet wird, sind typische Frequenzanteile außerhalb des Frequenzbereiches der WEA für alle möglichen Störgeräusche zu definieren. Damit kann pro Ausschnitt der Prozentsatz der Gesamtleistung berechnet werden, welcher auf diese bestimmten Frequenzanteile zurückzuführen ist. Ergeben diese Anteile in einem Ausschnitt einen hohen Prozentsatz der Gesamtleistung des betrachteten Ausschnittes, wird dieser als Störgeräusch identifiziert und entfernt. Der Grenzwert für den Prozentsatz (Entscheidungsparameter) ergibt sich aus dem Mittelwert (*mean*) der Prozentsätze über die ganzen Ausschnitte.

Diese Filterung ergibt am Ende ein Messsignal, welches der Zusammensetzung der Ausschnitte ohne Störgeräusche entspricht. Damit können weitere Auswertungen durchgeführt werden, ohne den Einfluss der Störgeräusche und ohne dass das Nutzsignal von der Filterung beeinträchtigt wurde.

4.3. Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB

Für die Entwicklung der Methode wurde MATLAB und die Erweiterung *Signal Processing Toolbox* verwendet. MATLAB ist eine kommerzielle Software, welche die Lösung mathematischer Probleme mithilfe numerischer Berechnungen und die Visualisierung deren Ergebnisse ermöglicht. Es stehen zahlreiche Toolboxen für die Erweiterung dieser Software zur Verfügung, deshalb eignet sich MATLAB für die Lösung unterschiedlicher Probleme z. B. im Bereich der Messdatenverarbeitung, Statistik, Regelungstechnik und Wirtschaftswissenschaft.

Die *Signal Processing Toolbox* ist eine MATLAB Erweiterung, welche Funktionen und Apps für die Analyse, Vorverarbeitung (*preprocessing*) und Merkmalsextraktion (*Features Extraction*) von Signalen zur Verfügung stellt. Die verwendeten Funktionen für die Entwicklung der Methode stammen aus dieser Erweiterung. Für die Ausführung des Skripts ist daher die Installation dieser Erweiterung notwendig.

Im Folgenden werden die für die Entwicklung der Methode verwendeten Funktionen beschrieben und der Programmablauf der Störgeräuschfilterung wird erklärt.

4.3.1. Fourier Transformation in MATLAB

Der Großteil der kontinuierlichen Aufzeichnungen der Messungen von Schallemissionen liegen in Form einer Audio-Datei im wav-Format vor. Bevor die Messdaten weiterverarbeitet werden können, müssen diese in MATLAB eingelesen werden. Das erfolgt mittels der Funktion *audioread*. Dabei wird von MATLAB direkt aus

der Datei auch die Abtastfrequenz ermittelt. Aus der Länge der Datei und ihrer Abtastfrequenz ergibt sich der Zeitvektor. Damit ist es möglich, das Signal über der Zeit zu plotten und den Zeitverlauf des Schalldrucks darzustellen, wie in Abb. 4.5 zu sehen ist.

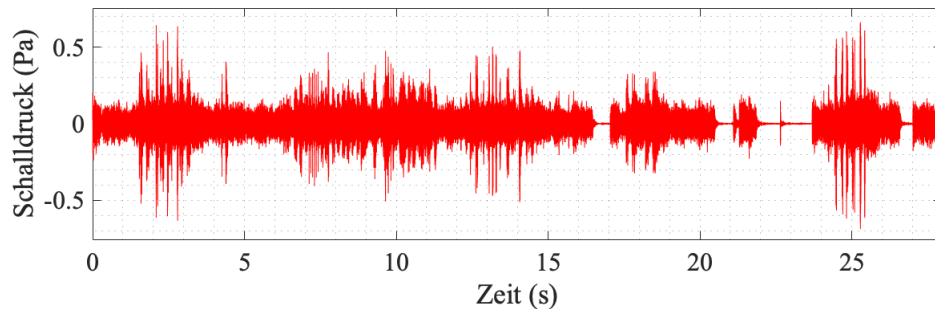


Abbildung 4.5.: Darstellung eines Signals im Zeitbereich

Für die Umwandlung in den Frequenzbereich bietet MATLAB die bereits hinterlegte Funktion *fft*. Die FFT gibt ein komplexes Ergebnis mit einem reellen und einem imaginären Teil bzw. Amplitude und Phase wieder. Wie im Abschnitt 2.4.4 erläutert ist, verliert die Phase bei der Untersuchung von Geräuschen an Bedeutung. Deshalb wird hier nur die Amplitude der FFT betrachtet. Diese wird durch die Darstellung des absoluten Wertes des Ergebnisses der FFT $|X(f)|$ abgebildet. Außerdem ist darauf zu achten, dass das Ergebnis der *fft* sowohl die positiven als auch die negativen Frequenzen von $-f_n$ bis zu f_n enthält. Die Darstellung über die negativen und positiven Frequenzen wird zweiseitiges Spektrum genannt und ist zur y-Achse symmetrisch (Abb. 4.6a). In den meisten Anwendungen sind jedoch nur die positiven Frequenzen von Interesse. Deshalb wird die Darstellung nur an diesen Frequenzanteilen von 0 bis zu f_n begrenzt. Der Frequenzbereich stellt dar, wie die Energie des Signals über die Frequenzen aufgeteilt ist. Bei dem zweiseitigen Spektrum ist diese Energie über die negativen und positiven Frequenzen aufgeteilt. Da das Spektrum der negativen Frequenzen eine Widerspiegelung des Spektrums der positiven ist, wird das Ergebnis der *fft* bei der Darstellung nur über den positiven Frequenzen mit dem Faktor 2 multipliziert. Dadurch wird die gesamte Energie dargestellt. Das gilt allerdings nicht für den Wert bei $x=0$, weil dieser bereits beide Anteile enthält. Die Darstellung nur über den positiven Frequenzen nennt sich einseitiges Spektrum. In Abb. 4.6 ist beispielhaft die Darstellung eines Spektrums zweiseitig, Abb. 4.6a, und einseitig, Abb. 4.6b, gezeigt.

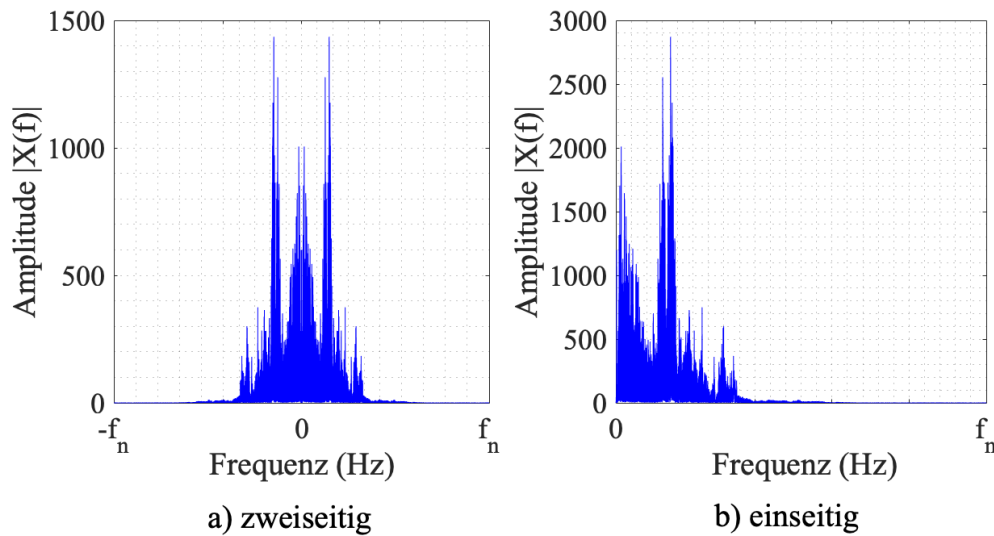


Abbildung 4.6.: Darstellung eines Frequenzspektrums

4.3.2. Programmablauf

Nun wird der Programmablauf beschrieben, welcher die im Abschnitt 4.2 beschriebene Methode ausführt. Ein schematischer Ablauf des Programms ist in Abb. 4.7 veranschaulicht.

Der erste Schritt entspricht dem Einlesen der Messdaten. Liegt das Messsignal in wav-Format vor, wird die Audio-Datei, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, mittels *audioread* in MATLAB importiert. Wurden die Daten schon vorbearbeitet und in mat-Format gespeichert, erfolgt das Einlesen mit dem Befehl *load 'filename.mat'*. Bei diesem letzten Vorgehen ist zu beachten, dass die Abtastfrequenz f_a definiert wird. Ist diese in der mat-Datei nicht enthalten, muss sie nach dem Einlesen der Daten angegeben werden.

Sind das Messsignal und seine Abtastfrequenz vorhanden, ist die Momentanfrequenz zu berechnen. Dafür enthält die MATLAB Erweiterung *Signal Processing Toolbox* die Funktion *instfreq*. Dadurch wird die Momentanfrequenz eines mit Abtastfrequenz f_a diskretisierten Signals geschätzt. Die Schätzung der Momentanfrequenz bezieht sich auf den Durchschnitt der Frequenzen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zeit-Frequenz-Ebene existieren [28]. Dadurch werden die Werte der Momentanfrequenz und die entsprechenden Zeitindexe wiedergegeben. Grafisch stellt *instfreq* das Spektrogramm des Messsignals dar, worauf der Verlauf der Momentanfrequenz visualisiert ist. Ein Beispiel von dieser Darstellung ist in Abb. 4.8 veranschaulicht.

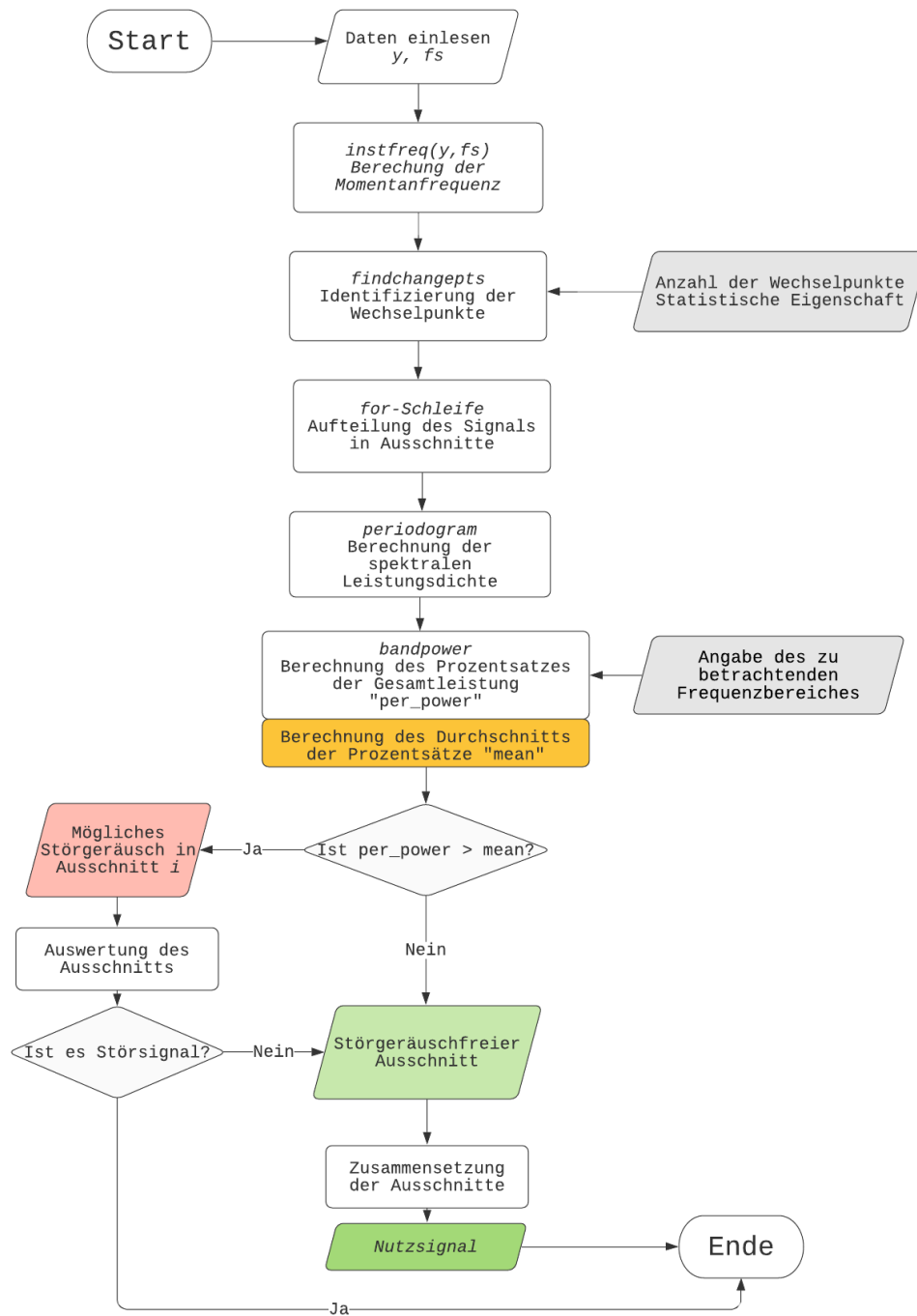


Abbildung 4.7.: Schematische Darstellung des Programmablaufs

Im nächsten Schritt wird nach plötzlichen Änderungen des Wertes der Momentanfrequenz gesucht. Hierfür bietet das *Signal Processing Toolbox* die Funktion *findchangepts*. Diese gibt die Messwerte oder die Zeitpunkte wieder, zu welchen

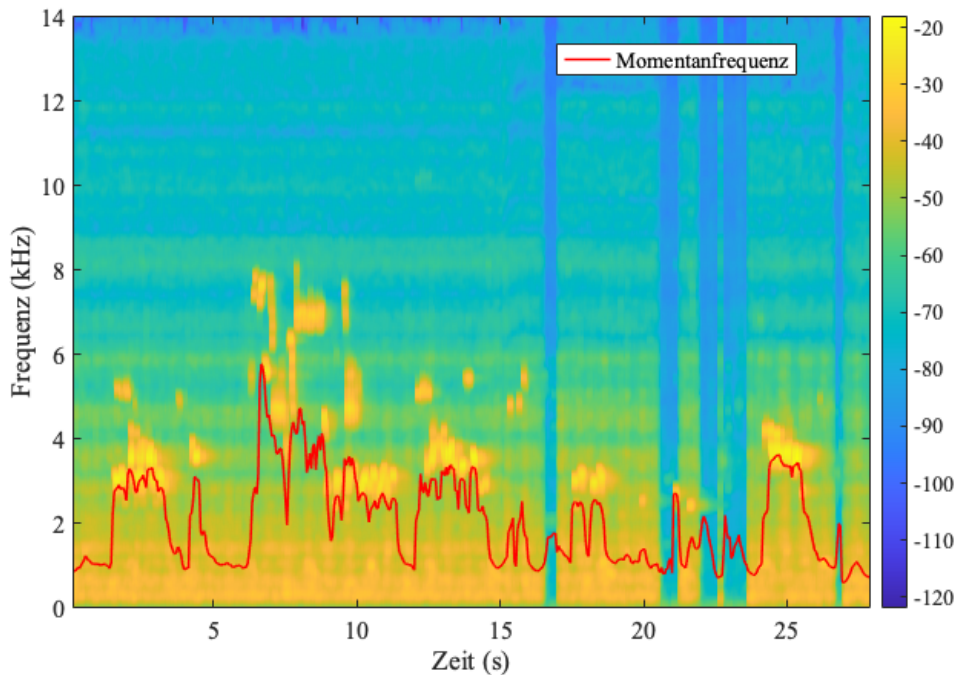


Abbildung 4.8.: Schätzung der Momentanfrequenz durch die Funktion *instfreq*

sich eine statistische Eigenschaft im Signal plötzlich ändert. Diese Punkte nennen sich *changepoints* (Wechselpunkte). Zuvor muss angegeben werden, für welche statistische Eigenschaft die Funktion nach Wechselpunkten suchen muss. Diese kann der Mittelwert, der Effektivwert (RMS), die Varianz oder eine spektrale Charakteristik des Signals sein [28]. Ohne zusätzliche Angabe liefert *findchangepts* den Index des Messwerts, bei dem sich der Mittelwert von der eingegebenen Größe, im betrachteten Fall der Momentanfrequenz, am wesentlichsten ändert. Die Funktion bietet die Möglichkeit, zusätzliche Spezifikationen anzugeben. Dazu gehören die Anzahl der Wechselpunkte, die zu identifizieren sind, und die zu messende statistische Eigenschaft (Mittelwert, RMS, Varianz) [28]. Bevor die Methode ausgeführt wird, müssen diese zwei zusätzlichen Parameter vom Benutzer definiert werden.

Nach der Identifizierung der Wechselpunkte wird das Messsignal in Ausschnitte aufgeteilt. Werden p Wechselpunkte identifiziert, wird das Signal in $p+1$ Ausschnitte aufgeteilt. Der Beginn und das Ende eines Ausschnittes wird von den Zeitpunkten definiert, bei welchen sich die Momentanfrequenz nach den eingegebenen Kriterien ändert. Deshalb weisen die Ausschnitte unterschiedliche Längen auf und damit handelt es sich hierbei um keine Frame-Analyse. Die Unterteilung des Messsignals in Ausschnitte, wie bereits beschrieben, ist beispielhaft in Abb. 4.9 abgebildet.

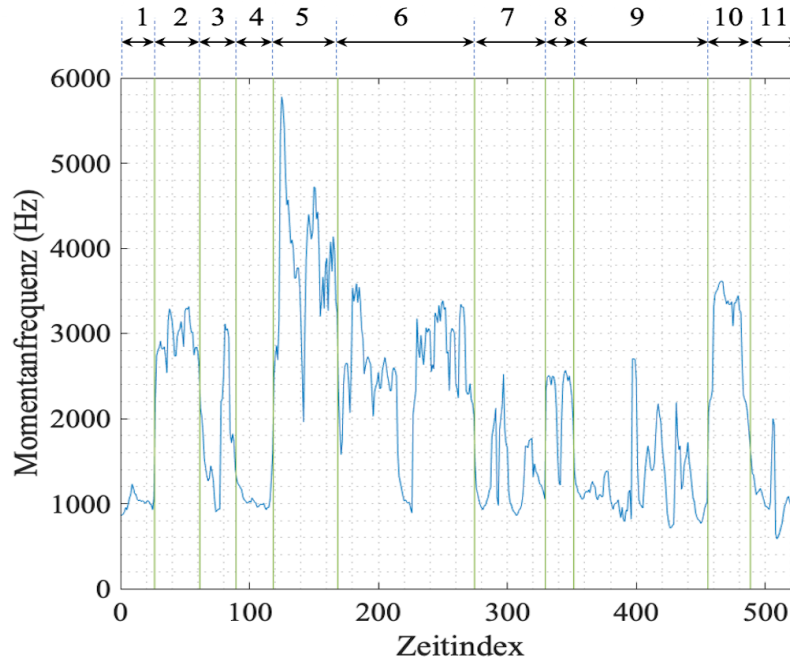


Abbildung 4.9.: Identifizierung der Zeitpunkte mit starken Änderungen der Momentanfrequenz durch die Funktion *findchangepts* und Unterteilung des Signals in Ausschnitte

Nach der Signalaufteilung müssen die Ausschnitte identifiziert werden, welche Störgeräusche enthalten. Wie in Abschnitt 4.2 bereits erwähnt, erfolgt dieser Schritt unter der Betrachtung der spektralen Leistungsdichte PSD. Diese wird für jeden Ausschnitt mittels der Funktion *periodogram* berechnet. Um nun den Prozentsatz der Gesamtleistung in dem zu betrachtenden Frequenzbereich berechnen zu können, wird der Mittelwert der spektralen Leistungsdichte jeweils im gesamten Ausschnitt und über den betrachteten Frequenzbereich berechnet. Das erfolgt für jeden Ausschnitt mittels der Funktion *bandpower*. Die Funktion wird zweimal eingesetzt: ohne weitere Angabe für die Berechnung des Mittelwertes der Leistung im Ausschnitt und zusätzlich bei Angabe des zu betrachtenden Frequenzbereichs. Damit ist es möglich, den Prozentsatz der Gesamtleistung des betrachteten Frequenzbereichs pro Ausschnitt zu berechnen. Ist dieser größer als ein vom Benutzer festgelegter Wert, wird der Ausschnitt als Störgeräusch definiert. Die Festlegung dieses Parameters wird im nächsten Abschnitt erläutert. Am Ende der Ausführung werden die Ausschnitte gezeigt, die nach den angegebenen Parametern Störgeräusche enthalten. Die verbleibenden Ausschnitte werden zusammengesetzt und entsprechen damit dem Nutzsignal am Ende der Filterung. Außerdem besteht durch die Wiedergabe der zu filternden Ausschnitte

die Möglichkeit, bei Bedarf die Störgeräusche separat zu untersuchen. Durch die Auswertung der einzelnen Ausschnitte kann damit auch nachgeprüft werden, ob in den entfernten Ausschnitten tatsächlich Störgeräusche enthalten sind. Darüber hinaus kann am Ende der Filterung das sich ergebende Nutzsinal ausgewertet werden und zur Nachprüfung der Funktionalität der Filterung kann eine optische Auswertung durchgeführt werden.

Sind mehrere Störgeräusche mit typischen Frequenzanteilen in verschiedenen Bereichen möglich, kann die Methode jeweils für den entsprechenden Frequenzbereich durchgeführt werden.

4.3.3. Festlegung der Auswahlparameter

Bevor die Ergebnisse der ausgeführten Methode dargestellt und diskutiert werden, wird auf die Festlegung der Auswahlparameter eingegangen. Wie aus dem vorherigen Abschnitt zu entnehmen ist, muss der Benutzer vor der Ausführung der Störgeräuschfilterung bestimmte Parameter angeben, welche hier als Auswahlparameter bezeichnet werden. Diese sind in der schematischen Darstellung des Programmablaufs in Abb. 4.7 in hellgrau hervorgehoben. Die hierbei verwendeten Parameter sind in Tab. 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1.: Festgelegte Auswahlparameter

Auswahlparameter	Angabe
Anzahl der Wechsellpunkte	10
Statistische Eigenschaft	<i>rms</i>
Betrachtender Frequenzbereich bei PSD Schätzung	geräuschabhängig

Für die maximale Anzahl der Wechsellpunkte, die zu identifizieren sind, wurde ein Wert von 10 angegeben. Dieser Wert wurde allgemein aus der Betrachtung der Signallänge und aus der Anzahl der möglichen erwarteten Störgeräusche definiert. Bei der Wahl der statistischen Eigenschaft ist die Entscheidung auf den Effektivwert *rms* gefallen, da in der schalltechnischen Anwendung dieser Wert oft verwendet wird. Beispielsweise wird der Effektivwert des Zeitverlaufs des Schalldruckes bei der Berechnung verwendet (Abschnitt 2.1.1).

Der zu betrachtende Frequenzbereich für die Berechnung des Prozentsatzes der Gesamtleistung ist davon abhängig, nach welcher Art von Störgeräusch untersucht werden muss und wird daher je nach Untersuchung angepasst. Dabei ist darauf zu achten, dass der prozentuale Anteil der PSD von dem entsprechenden

Frequenzbereich abhängt. Deshalb kann die Identifizierung und die Filterung bei unterschiedlichen Angaben des Frequenzbereiches abweichen. Aus diesem Grund werden, wie bereits erwähnt, Kenntnisse über die Störgeräusche benötigt. Je genauer der Frequenzbereich der Störung angegeben werden kann, desto besser erfolgt die Identifizierung und die daraus folgende Filterung.

Im Folgenden wird genauer beschrieben, wie für die in dieser Arbeit angewendeten Frequenzbereiche ausgewählt werden.

Wahl des zu betrachtenden Frequenzbereiches

Damit die WEA-Geräusche nicht gefiltert werden, muss die Untersuchung der spektralen Leistungsdichte auf die Frequenzanteile begrenzt werden, welche sich von den Frequenzkomponenten der WEA unterscheiden.

Damit wird klar, dass Kenntnisse über mögliche Störgeräusche notwendig sind. Je genauer die Angabe über den Störfrequenzbereich ist, desto besser können die Ausschnitte mit Störgeräuschen identifiziert werden. In diesem Sinn wäre, wie zuvor erwähnt, eine Datenbank der Störgeräusche sinnvoll.

Im Rahmen dieser Masterarbeit erfolgt die Filterung mithilfe der Kenntnisse über die Störgeräusche aus der Testmessung.

Im Folgenden wird der zu betrachtende Frequenzbereich für jedes Störgeräusch erläutert. Dabei wird jeweils das Frequenzspektrum des entsprechenden Störgeräusches mit dem von der WEA verglichen und daraus der zu betrachtende Frequenzbereich abgeleitet.

Vogelgezwitscher

Für das Signal Vogelgezwitscher wurde ein typischer Frequenzbereich von 2500-8000 Hz identifiziert (Abb. 4.10).

Traktor

Traktorgeräusche zeichnen sich mit großen Amplituden bei Frequenzen unter 2000 Hz aus. Jedoch sind die Frequenzanteile in diesem Bereich denen des WEA-Frequenzspektrums sehr ähnlich. Aus diesem Grund wurden für das Signal Traktor Frequenzen zwischen 2500 Hz und 10 000 Hz betrachtet, welche eine moderate Amplitude aufweisen (Abb. 4.11).

Verkehr

Das Signal Verkehr weist sehr ähnliche Frequenzanteilen wie die WEA auf. Daher wurde die zu betrachtenden Frequenzen auf den Bereich 1200-2000 Hz begrenzt, wo sich die Frequenzanteile am meisten von den Komponenten der WEA unterscheiden (Abb. 4.12).

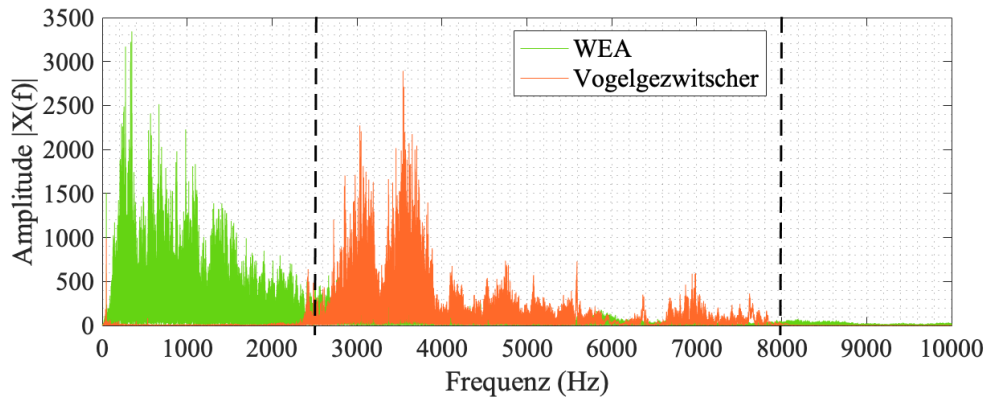


Abbildung 4.10.: Vogelgezwitscher: Wahl des zu betrachtenden Frequenzbereiches

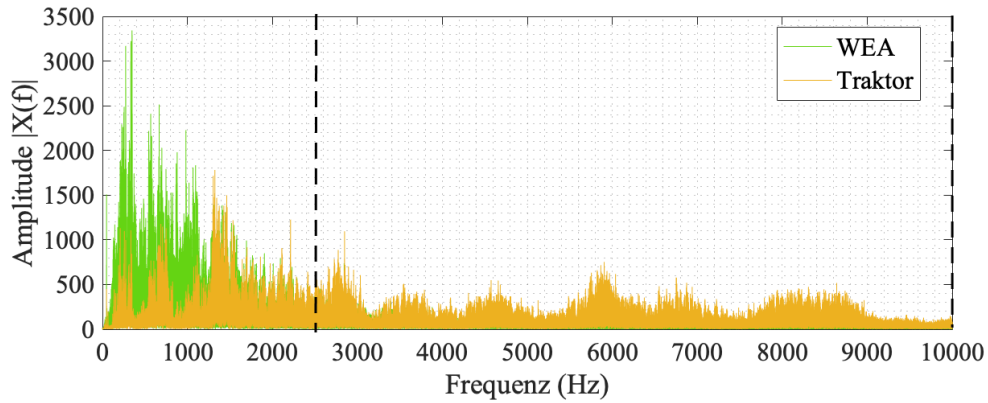


Abbildung 4.11.: Traktor: Wahl des zu betrachtenden Frequenzbereiches

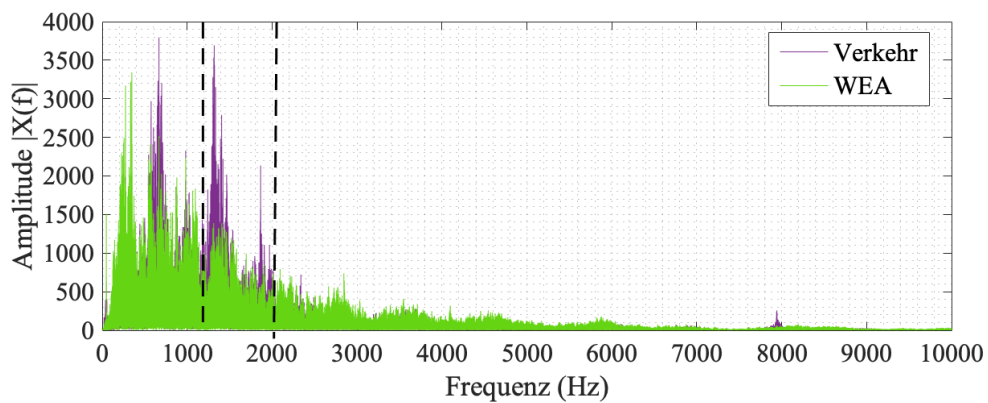


Abbildung 4.12.: Verkehr: Wahl des zu betrachtenden Frequenzbereiches

4.3.4. Festlegung des Entscheidungsparameters für die Zuordnung der Ausschnitte

Das Kriterium für die Zuordnung der Ausschnitte ist der entscheidendste Parameter, da in diesem Schritt entschieden wird, ob der entsprechende Ausschnitt weiter betrachtet wird oder nicht. Bei der Entwicklung der Methode wurden zwei Kriterien untersucht: diese wurden *mean*- und *rms*-Kriterium bezeichnet. Nach der Berechnung der Prozentsätze der Gesamtleistung für jeden Ausschnitt wird jeweils der Mittelwert (*mean*) oder der Effektivwert (*rms*) berechnet.

Beträgt der Prozentsatz der Gesamtleistung eines bestimmten Frequenzbereiches bei einem Ausschnitt einen höheren Wert als der Mittelwert bzw. Effektivwert wird dieser als Störgeräusch definiert. Ist dies nicht der Fall, ist anzunehmen, dass es sich dabei um Nutzsignal handelt.

Am Ende verschiedener Untersuchungen hat sich das *mean*-Kriterium genauer als das *rms*-Kriterium erwiesen. Außerdem wurde für die Berechnung des Prozentsatzes die durchschnittliche Leistung verwendet und mit dem Vorgehen nach dem *mean*-Kriterium wird sichergestellt, dass bei den kompletten Schritten dieselbe statistische Eigenschaft verwendet wird. Aus diesen Gründen ist die Entscheidung auf das *mean*-Kriterium gefallen.

4.4. Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Die Methode wurde auf verschiedene Messsignale angewendet. Hierbei werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

Die Darstellung der Messsignale im Zeit- und Frequenzbereich erfolgt nach dem in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Vorgehen. Für die Abbildung des Spektrogramms wurde die in der *Signal Processing Toolbox* bereits hinterlegte Funktion *spectrogram* verwendet. Hierbei wird die Kurzzeit-Fourier-Transformation STFT (Abschnitt 2.4.9) errechnet. *spectrogram* stellt die Magnitude (Absolutwert der Amplitude) der STFT im Quadrat dar und weist eine fixierte Zeit-Frequenz-Auflösung auf. Zusätzliche Spezifikationen können vor der Ausführung eingegeben werden. Dazu gehören die Fensterfunktion und Fensterlänge, der Überlappingsgrad und die Anzahl an Messwerten für die Berechnung der DFT. Die Fensterfunktionen sind auch in MATLAB bereits hinterlegt. Wenn keine Fensterfunktion oder Überlappingsgrad angegeben wird, wird das Spektrogramm mit dem Hamming Fenster und 50% Überlappung berechnet [28]. Bei den folgenden Anwendungsfällen wird die *hann*-Fensterfunktion und eine Fensterlänge von 256 mit 50% Überlappung verwendet. Diese Parameter bleiben unverändert bei allen Darstellungen.

WEA mit Vogelgezwitscher

Die bei der Beschreibung des Programmablaufs dargestellten Abbildungen für die Erläuterung der Schritte der entwickelten Methode beziehen sich auf die Filterung des kombinierten Signals, welches auch für die Untersuchung der ersten Ansätze verwendet wurde. Nun wird das Ergebnis der Filterung dargestellt und diskutiert. Dabei wird gezeigt, wie sich das Signal am Ende der Filterung durch die bereits beschriebene Methode präsentiert.

Das kombinierte Signal erfasst die Schallemissionen einer sich drehenden WEA und des Vogelgezwitschers. Die beiden Signale wurden separat mit dem Smartphone aufgenommen und für die Untersuchungen durch MATLAB kombiniert. Vor der Filterung zeigt sich das Signal im Spektrogramm so wie in Abb. 4.13 veranschaulicht ist.

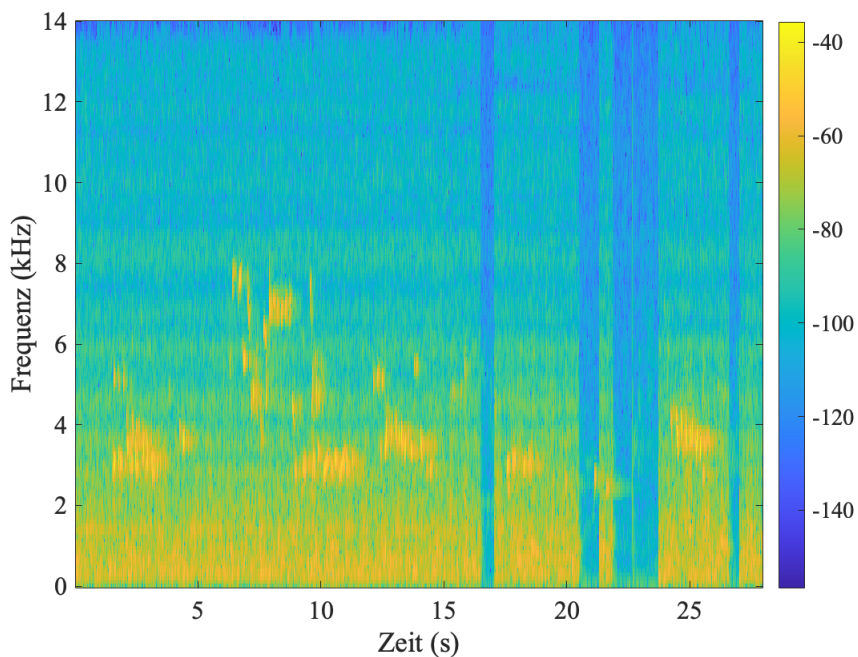


Abbildung 4.13.: Spektrogramm des Signals WEA mit Vogelgezwitscher

Das Vogelgezwitscher ist hierbei leicht erkennbar und muss gefiltert werden. Die Unterteilung des Messsignals in Ausschnitte nach den zuvor erläuterten Angaben ist bereits in Abb.4.9 dargestellt. Hiernach erfolgt in einem Schritt die Identifizierung und die Filterung der Ausschnitte, welche das Auftreten von Vogelgezwitscher aufweisen. Die Angabe der zu betrachtenden Frequenzen entspricht dem Bereich 2500-8000 Hz und wurde nach den im Abschnitt 4.3.3 erläuterten Kriterien ausge-

wählt.

Um eine der Untersuchungen über die Wahl des Entscheidungsparameters vorzustellen, wird hierbei die Filterung mit den beiden in Abschnitt 4.3.4 erläuterten Kriterien durchgeführt.

In Abb. 4.14 sind die identifizierten Ausschnitte mit Störgeräuschen jeweils für die Filterung nach dem *mean*- und nach dem *rms*-Kriterium dargestellt.

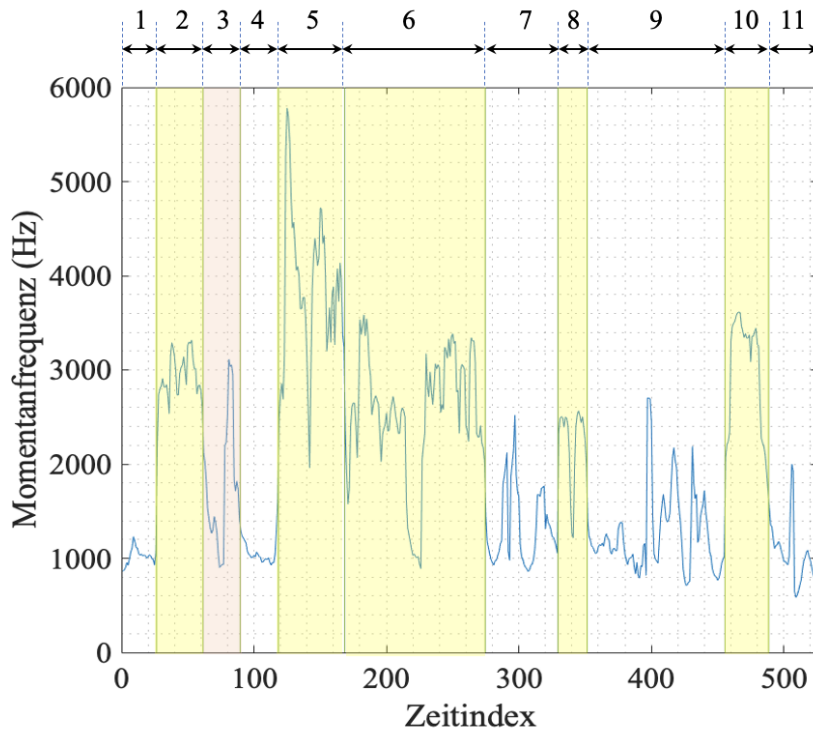


Abbildung 4.14.: Identifizierung der Ausschnitte mit Störgeräuschen: in *gelb* nach dem *rms*- sowie nach dem *mean*-Kriterium, in *rot* der ausschließlich nach dem *mean*-Kriterium zusätzlich identifizierte Ausschnitt

Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, wurde bei der Filterung nach dem *mean*-Kriterium ein zusätzlicher Ausschnitt identifiziert. Das bei Filterung mit dem *rms*-Kriterium verbleibende Störgeräusch im Nutzsignal ist in Abb. 4.15 markiert. Das gefilterte Signal nach dem *mean*-Kriterium ist in Abb. 4.16 abgebildet.

Obwohl die Filterung nach *rms*-Kriterium in diesem Fall ein schlechteres Ergebnis geliefert hat, ist das nicht verallgemeinerbar. Bei der Filterung von Messsignalen mit einer größeren Signallänge, haben die beiden Kriterien dieselben Ergebnisse geliefert. Welches Kriterium besser für diesen Zweck der Filterung geeignet ist, ist weiter zu untersuchen.

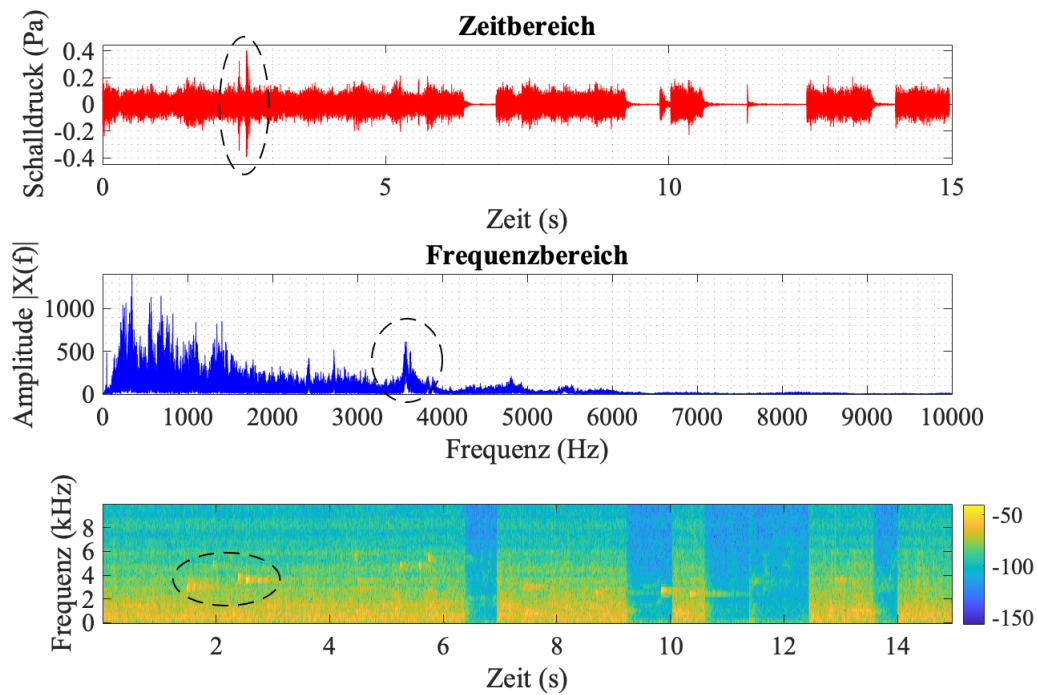


Abbildung 4.15.: Gefiltertes Signal nach dem *rms*-Kriterium. Der Anteil des nicht-identifizierten Ausschnitts wurde jeweils im Zeit-, Frequenzbereich und im Spektrogramm markiert

Trotz der Unterschiede bei den Ergebnissen der Filterung nach den verschiedenen Kriterien, ist zu bemerken, dass in beiden Fällen das Vogelgezwitscher anhand der entwickelten Methode deutlich reduziert werden konnte. Die Störgeräusche konnten zwar nicht vollständig entfernt werden, jedoch ist anzumerken, dass es sich dabei um eine kurze Audiodatei handelt. Bei einem längeren Messsignal wäre der komplette 30 s-Ausschnitt als Störsignal klassifiziert und aus dem Messsignal entfernt worden.

Für eine aussagekräftige Diskussion der Ergebnisse, wird im Folgenden die Methode auf weitere Signale der Testmessung mit Schallpegelmessgerät angewendet.

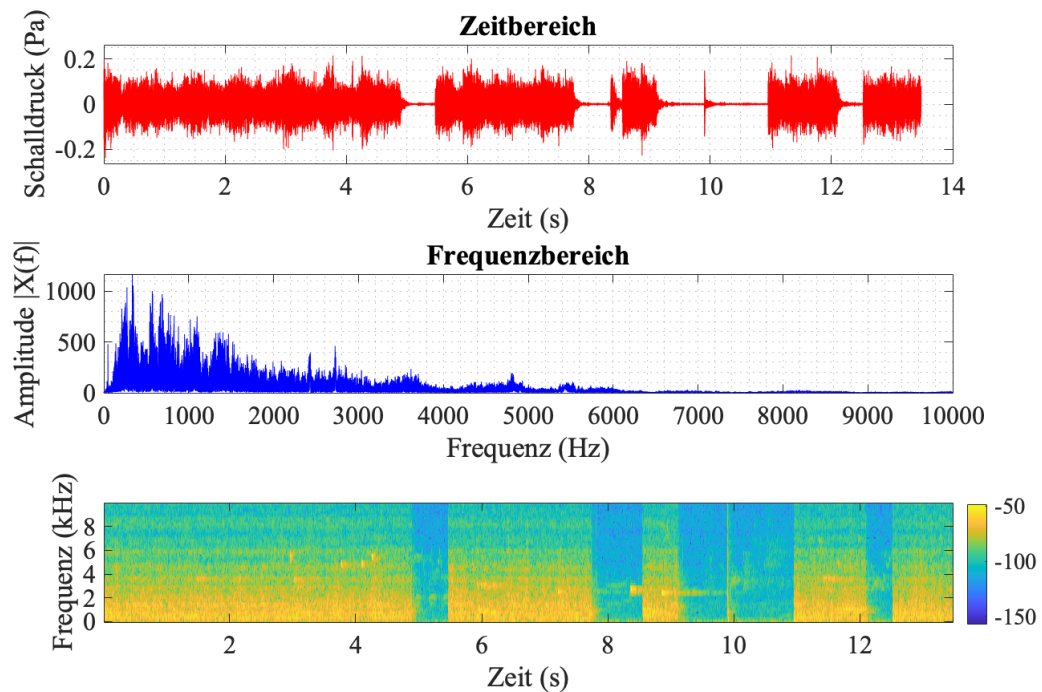


Abbildung 4.16.: Gefiltertes Signal nach dem *mean*-Kriterium

Messsignal zur Nachbildung der WEA-Schallemissionsmessung

Nach der Anwendung der Methode an das kombinierte Signal, welches sich aus der Kombination zweier mit dem Smartphone erfassten Signale ergeben hat, wird die Störgeräuschfilterung an einem ca. 10-minütigen Messsignal getestet. Dies wurde mittels Schallpegelmessung erfasst und bildet die Messung der Schallemissionen einer WEA nach, wobei verschiedene Störgeräusche wie Vogelgezwitscher, Traktor und Lärmverkehr aufgetreten sind.

In Abb. 4.17 ist das Signal im Zeit- und Frequenzbereich dargestellt. Bei der Darstellung des in Abb. 4.18 abgebildeten Spektrogramms sind die verschiedenen Störgeräusche erläutert, welche bei der Aufnahme des Signals erfasst wurden. Außerdem wurde während der Messung ein Klatschen erzeugt, welches dem hohen Peak im Zeitverlauf entspricht.

Bei der Ausführung der Methode wurden hierbei dieselben Auswahlparameter angegeben, wie in Abschnitt 4.3.3 definiert und die Identifizierung bzw. die Filterung erfolgt nach dem *mean*-Kriterium.

Die betrachteten Frequenzen entsprechen den in Abschnitt 4.3.3 erläuterten Frequenzbereichen. Hierbei fehlt jedoch der Frequenzbereich des Klatschens, welches nicht einzeln erfasst wurde.

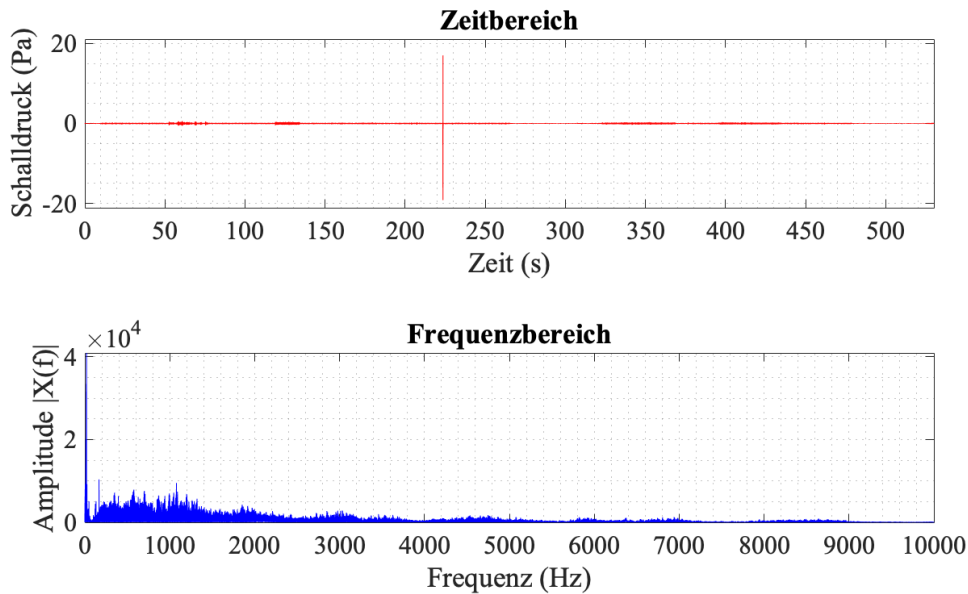


Abbildung 4.17.: Zeitverlauf und Frequenzspektrum des 10-minütigen Messsignals

Da verschiedene Störgeräusche auftreten, ist der letzte Schritt der Methode für jeden Frequenzbereich durchzuführen.

In Abb. 4.19 ist die Signalaufteilung dargestellt und die am Ende der Filterung identifizierten Ausschnitte sind hervorgehoben. Jeder Ausschnitt wird mit einer Zahl von 1 bis 11 bezeichnet. In Tabelle 4.2 sind die identifizierten Ausschnitte je nach betrachtetem Frequenzbereich zusammengefasst.

Tabelle 4.2.: Identifizierte Ausschnitte nach Frequenzbereich

Betrachteter Frequenzbereich Hz	Identifizierter Ausschnitt
Vogelgezwitscher: 2500-8000	2, 3, 5
Traktor: 2500-10 000	2, 3, 5
Lärmverkehr: 1200-2000	5, 7, 9

Zu bemerken ist, dass die charakteristischen Frequenzbereiche, welche für Vogelgezwitscher und Traktor ausgewählt wurden, ähnliche Frequenzen enthalten und daher dieselben Ausschnitte identifiziert wurden. Ausschnitt 5, welcher das Geräusch eines Traktors enthält, wurde bei allen Untersuchungen identifiziert. Das kann auf sein breites Frequenzspektrum zurückgeführt werden.

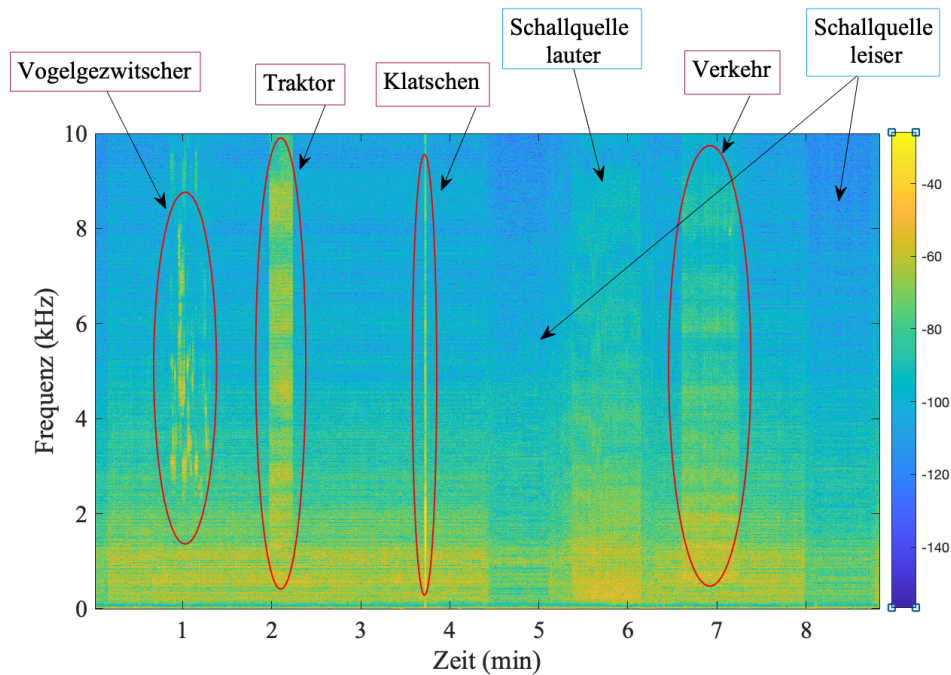


Abbildung 4.18.: Spektrogramm des 10-minütigen Messsignals und Erläuterung der dabei auftretenden Störgeräusche

Außerdem wurde bei der Untersuchung des Frequenzbereiches des Verkehrs zusätzlich der Ausschnitt 7 identifiziert, welcher dem Klatschen entspricht. Hierbei handelt es sich um ein typisches Beispiel, bei dem eine Nachprüfung der identifizierten Ausschnitte sinnvoll ist.

Nachdem sichergestellt wird, dass die identifizierten Ausschnitte Störgeräusche enthalten, werden diese für die weitere Verarbeitung nicht mehr betrachtet. Die verbleibenden Ausschnitte mit Nutzsignal werden zusammengesetzt und damit wird das Nutzsignal für weitere Auswertungen erhalten.

Das Nutzsignal ist in Abb. 4.20 veranschaulicht. Dabei weist das Signal nach der Filterung keine Frequenzanteile bei hohen Frequenzen auf. Außerdem kann aus dem Spektrogramm in Abb. 4.20 leicht erkannt werden, dass die Ausschnitte mit Vogelgezwitscher, Traktor, Klatschen und Verkehr nicht mehr enthalten sind. Die Methode hat hiermit die gewünschte Filterung erfüllt und das erwartete Ergebnis geliefert.

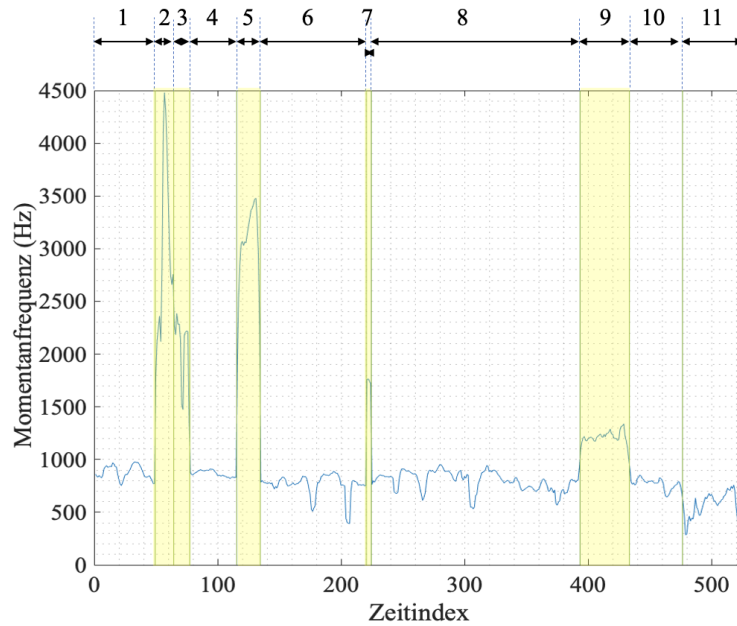


Abbildung 4.19.: Aufteilung des Messsignals und Identifizierung der Ausschnitte mit enthaltenen Störgeräuschen

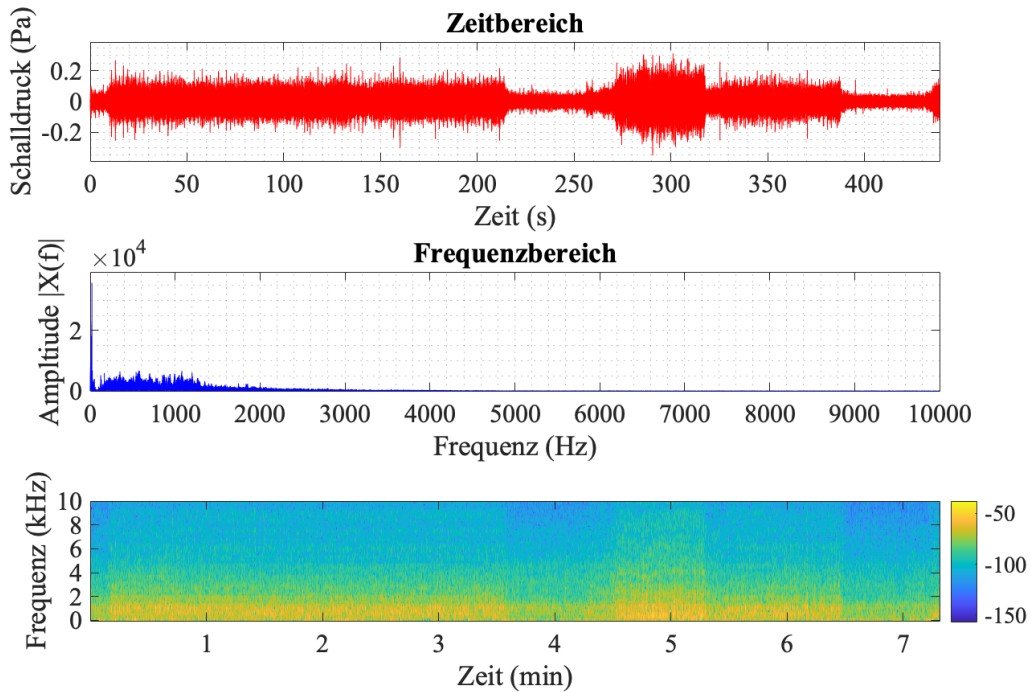


Abbildung 4.20.: Darstellung des gefilterten 10-minütigen Messsignals

4.5. Bewertung der Methode

Um die Qualität der Methode hinsichtlich der Ermittlung von Umgebungsgläuschen und Schallemissionen von Windenergieanlagen bewerten zu können, wird die Methode auf ein Messsignal aus einem WEA-Schallmessverfahren angewendet. Dabei handelt es sich um einen 1-stündigen Datensatz von 00:00 - 01:00 Uhr. Bis ca. 00:20 Uhr war die WEA abgeschaltet. Ein Signal wurde von einem Mikrofon in ca. 140 m Entfernung zu einer WEA erfasst; das zweite Signal von einem Mikrofon im Tal in ca. 1 km Entfernung vom Windpark und in unmittelbarer Nähe zu einer Zugstrecke. Außerdem wurden die Daten ursprünglich mit 20 kHz abgetastet und später auf 1 kHz Abtastrate reduziert.

In Abb. 4.21 ist das Spektrogramm jeweils für das Messsignal in der Nähe der WEA und in der Nähe der Zugstrecke veranschaulicht. Auffällig sind die Zeitpunkte, an welchen die WEA angeschaltet wird und das Vorbeifahren der Züge.

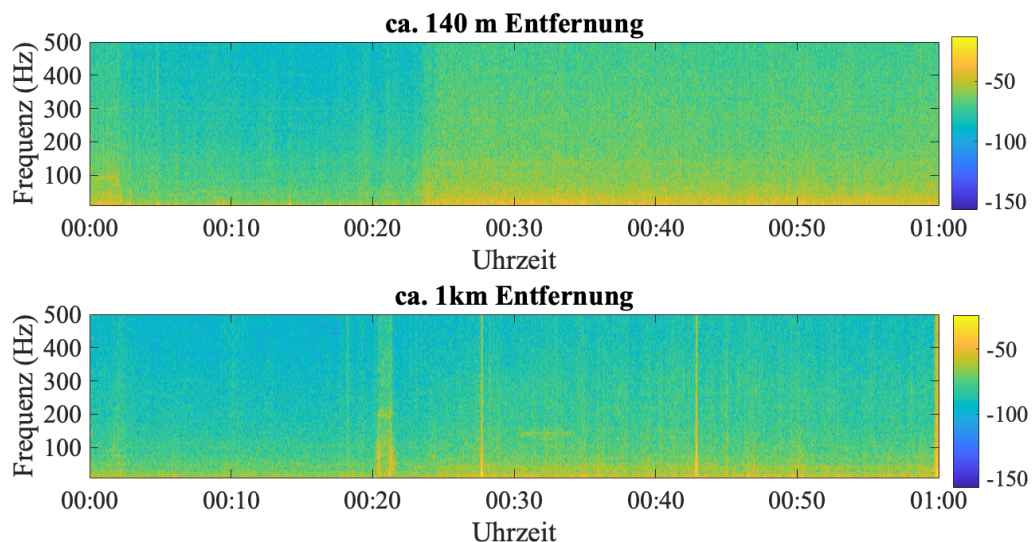


Abbildung 4.21.: Spektrogramm der Messsignale in der Nähe der WEA, *oben*, und in der Nähe der Zugstrecke, *unten*

Das 1-stündige Messsignal wurde in 10-minütige Ausschnitte aufgeteilt. Damit kann die Untersuchung nur auf die Ausschnitte begrenzt werden, welche die Fahrt der Züge enthalten.

Der Signalausschnitt von 00:40 - 00:50 Uhr ist beispielsweise in Abb. 4.22 veranschaulicht. Für die Veranschaulichung des Frequenzspektrums wurde hierbei der dargestellte Frequenzbereich auf 10 Hz beschränkt.

Nun wurde die Methode auf die einzelnen Ausschnitte angewendet. Abbildung 4.23 zeigt die Schätzung der Momentanfrequenz für den ersten betrachteten Ausschnitt.

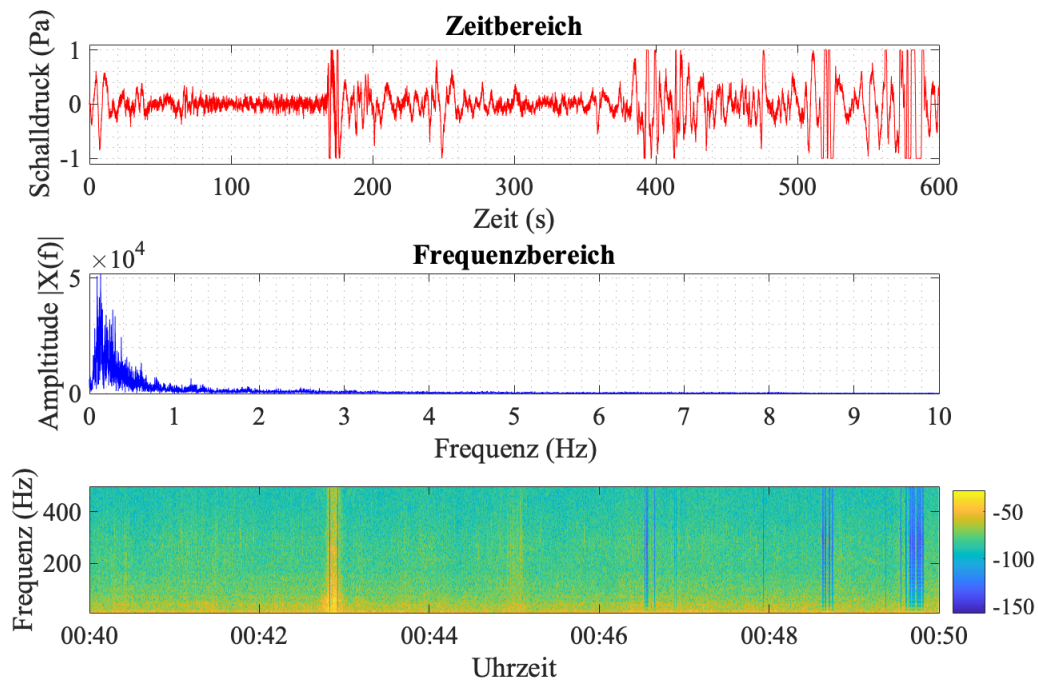


Abbildung 4.22.: Zeitverlauf, Frequenzspektrum und Spektrogramm eines Ausschnittes des Messsignals in Nähe einer Zugstrecke

Die geschätzte Momentanfrequenz befindet sich in einem sehr begrenzten Bereich von ca. 1 bis 10 Hz. Wie eindeutig zu sehen ist, weist die Momentanfrequenz durchschnittlich einen flachen Verlauf auf.

Bei der Ausführung der Methode an diesen Daten konnten folgende Probleme festgestellt werden:

- Die Identifizierung der Störgeräuschausschnitte ist von den plötzlichen Änderungspunkten im Verlauf der Momentanfrequenz abhängig. Weist sie einen flachen Verlauf auf, sind die Wechsellpunkte mit der entwickelten Methode schwer zu identifizieren. Das ist auf die Definition der Momentanfrequenz rückführbar. Diese kann, wie im Abschnitt 4.2 erläutert, als Durchschnitt der Frequenzen betrachtet werden, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zeit-Frequenz-Ebene existieren. Bei reduzierten Messdaten steht ein geringerer Frequenzbereich zur Verfügung und das sorgt für einen durchschnittlich konstanten Wert der Momentanfrequenz.
- Bei den reduzierten Messdaten können typische Frequenzbereiche des Störgeräusches außerhalb des Frequenzspektrums der WEA schwer identifiziert werden. Alle hierbei enthaltenen Frequenzanteile sind für eine WEA charakteristische Frequenzen.

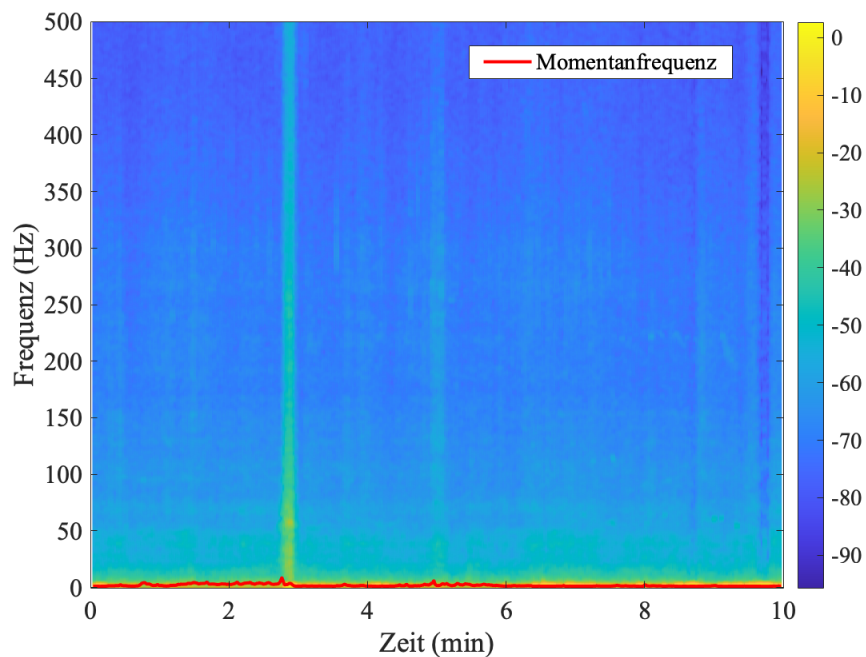


Abbildung 4.23.: Schätzung der Momentanfrequenz des betrachteten Ausschnitts

Deshalb konnten durch die entwickelte Methode nicht die richtigen Ausschnitte identifiziert werden, welche Störgeräusche enthalten. Anhand der vorhandenen Daten ist somit die Methode zur Störgeräuschfilterung für Messsignale im Niederfrequenzbereich nicht geeignet.

Um die Anwendbarkeit der entwickelten Methode für die Ermittlung der WEA-Schallemissionen zu prüfen, ist diese an den ursprünglichen Messdaten vor der Reduzierung zu testen.

Die Prüfung erfolgt durch die Ausführung der Methode an einem hochaufgelösten Datensatz. Hierbei werden die mit 20 kHz abgetasteten Daten verwendet. Der 10-minütige Ausschnitt von 05:00-05:10 Uhr bezieht sich auf das in unmittelbarer Nähe zu einer Zugstrecke erfasste Messsignal. Aus dem in Abb. 4.24 dargestellten Spektrogramm ist die Zugdurchfahrt erkennbar. Außerdem sind in den ersten Minuten zusätzliche Störgeräusche, wie das Glockenläuten sowie Zug An-/Abfahrt, zu erkennen.

Durch die Ausführung der Methode mit den in Abschnitt 4.3.3 festgelegten Parametern wurden 9 Wechsellpunkte im Verlauf der Momentanfrequenz identifiziert. Für die Identifizierung der Ausschnitte mit Störgeräuschen wurde ein Bereich von 160-5000 Hz als charakteristischer Frequenzbereich für Züge verwendet.

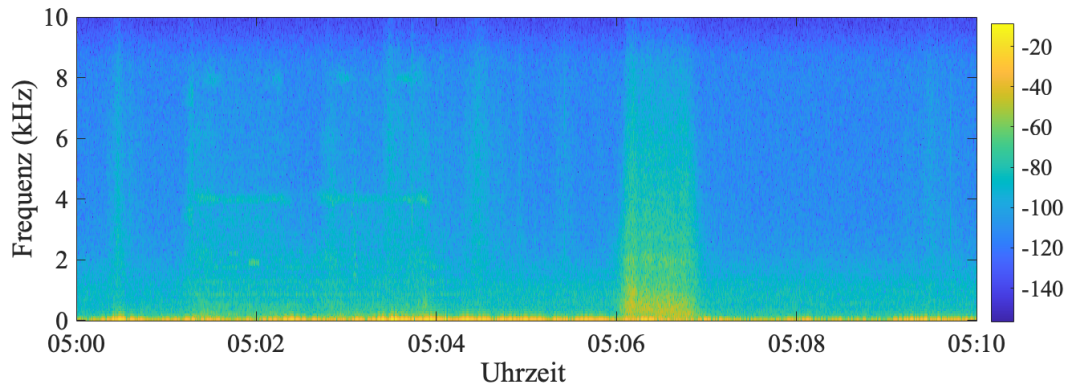


Abbildung 4.24.: Spektrogramm des mit 20 kHz abgetasteten Messsignals in der Nähe der Zugstrecke

Da in diesem Fall keine Kenntnisse über das Störsignal vorhanden sind, wurde dieser Bereich aus der Literatur entnommen [12].

In Abb. 4.25 sind der Verlauf der Momentanfrequenz und die als Störgeräusch identifizierten Ausschnitte dargestellt. Auffällig ist, dass die Momentanfrequenz höhere Werte beträgt als bei dem reduzierten Datensatz.

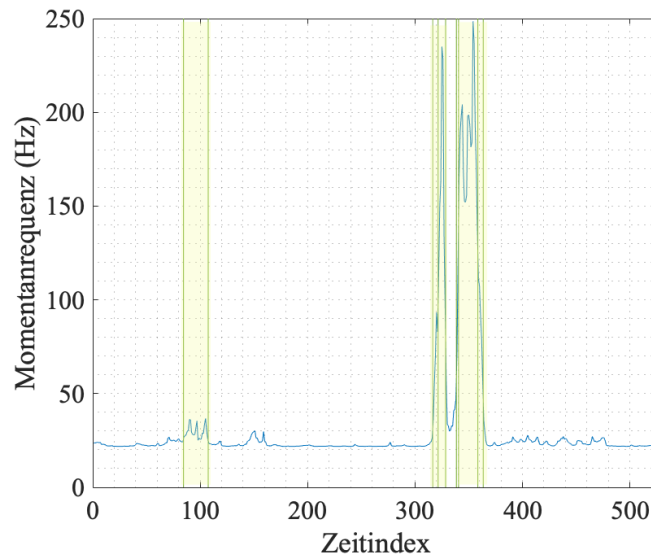


Abbildung 4.25.: Aufteilung des hochaufgelösten Messsignals und die durch die Methode identifizierten Störgeräuschabschnitte

Mit der Methode wurden 6 von 10 Ausschnitte als Störgeräusch identifiziert. Um die Qualität dieser Ergebnisse zu bewerten, wurden die einzelnen Ausschnitte ausgewertet und angehört. Dabei wurde festgestellt, dass die identifizierten Ausschnitte großteils der Zugdurchfahrt entsprechen. Die Methode konnte 5 von 6 Ausschnitte für die Zugdurchfahrt identifizieren. Außerdem wurde noch ein weiterer Störgeräuschausschnitt erkannt, welcher Geräusche von der Zug An-/Abfahrt enthält. Das gefilterte Messsignal in der Zeit-Frequenz-Ebene ist in Abb. 4.26 dargestellt.

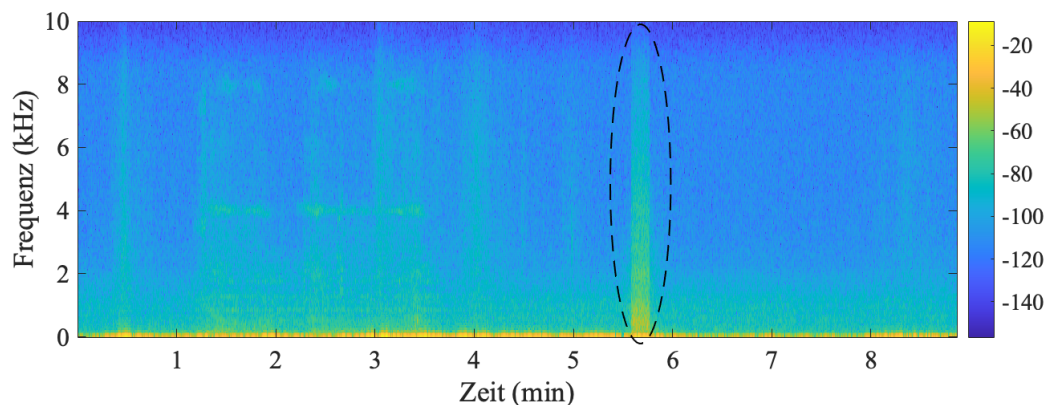


Abbildung 4.26.: Spektrogramm des gefilterten Messsignals nach der Ausführung der Methode. Der Einfluss des nicht-identifizierten Störausschnittes ist markiert

Im Spektrogramm ist der Effekt des nicht-identifizierten Störausschnitts für die Zugdurchfahrt auffällig. Hierbei wurde die Möglichkeit untersucht, die Methode ein weiteres Mal auf das bereits gefilterte Signal anzuwenden. Der betrachtete Frequenzbereich und alle angegebenen Parameter bleiben unverändert. Nach der erneuten Ausführung der Methode konnte der fehlende Ausschnitt identifiziert werden. Außerdem wurden zusätzliche Geräusche detektiert, die auf Zug An-/Abfahrt rückführbar sind. Die hierbei identifizierten Ausschnitte sind in Abb. 4.27 hervorgehoben. Das Spektrogramm des Nutzsignals am Ende der erneuten Filterung ist in Abb. 4.28 veranschaulicht. Aus dem Spektrogramm ist zu entnehmen, dass das Störgeräusch 'Zugdurchfahrt' aus der Betrachtung des entsprechenden Frequenzbereiches gefiltert werden konnte. Außerdem wurde dabei auch der Einfluss von zusätzlichen Störsignalen, wie die Geräusche der Zug An-/Abfahrt, reduziert.

Basierend auf diesen Ergebnissen folgt, dass die Methode zur Ermittlung der WEA-Schallemissionen und der Umgebungsgeräusche gute Ergebnisse liefert, sofern diese auf hochaufgelöste Datensätze angewendet wird.

Für aussagekräftige Beschlüsse über Qualität und Anwendbarkeit der Methode sind jedoch weitere Untersuchungen zu empfehlen.

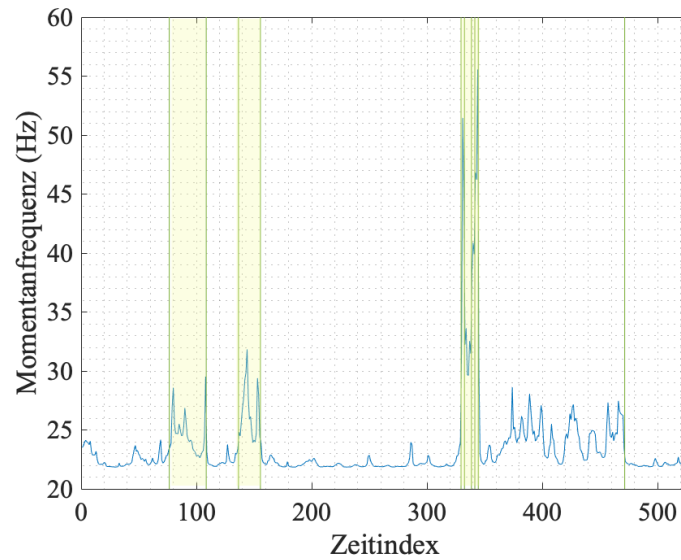


Abbildung 4.27.: Aufteilung des bereits gefilterten Messsignals und die nach der erneuten Ausführung der Methode identifizierte Störgeräuschausschnitte

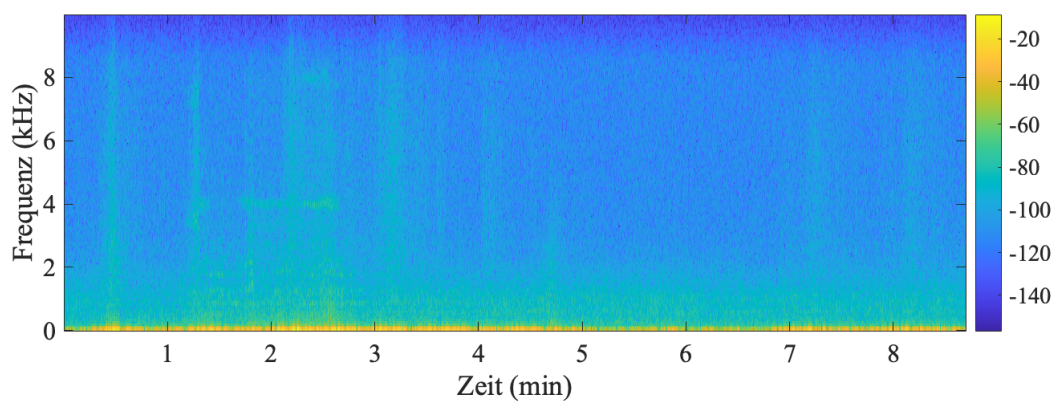


Abbildung 4.28.: Spektrogramm des gefilterten Messsignals nach der erneuten Ausführung der Methode

4.6. Schlussfolgerungen

Wie bei nahezu allen entwickelten neuen Methoden konnten auch für diese entwickelte Störgeräuschfilterung Schwächen aufgezeigt werden. Diese haben einen direkten Bezug zu den benötigten Auswahlparametern für die Ausführung des Skripts und sind im Folgenden erläutert.

- **Angabe der maximalen Anzahl an Wechsellpunkten.** Die Identifizierung der Ausschnitte ist von der angegebenen Anzahl der zu identifizierenden Wechsellpunkte abhängig. Ein Kriterium für eine sinnvolle Wahl dieses Parameters konnte nicht festgelegt werden und ist daher weiter zu untersuchen.
- **Angabe des zu betrachtenden Frequenzbereiches.** Die Güte der Identifizierung von Störgeräuschausschnitten hängt von der Angabe des zu betrachtenden Frequenzbereiches ab. Verfügt man über eine große Datenbank von Störgeräuschen, kann dies genauer angegeben werden und daher ein besseres Ergebnis der Filterung erzielen. Andernfalls ist dieser vom Benutzer zu schätzen.
- **Kriterium für die Zuordnung der Ausschnitte.** Die Güte der Filterung ist von der Wahl des Entscheidungsparameters abhängig. In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Kriterien berücksichtigt. Ob es weitere Kriterien gibt, welche sich für diesen Zweck eignen, ist weiter zu untersuchen.
- **Keine automatisierte Filterung möglich.** Es wird die Angabe von unterschiedlichen Parametern benötigt, welche sich - je nach zu filternden Messdaten - ändern können. Daher ist anhand dieser Methode keine automatisierte Filterung möglich.

Aufgrund der Abhängigkeit der Güte der Methode von mehreren Parametern ist es sinnvoll, am Ende der Filterung durch eine Auswertung der Störgeräuschausschnitte die Richtigkeit der Zuordnung zu überprüfen. Voruntersuchungen über das erfasste Messsignal und über die möglichen Störquellen können auch für die korrekte Ausführung der Methode hilfreich sein.

Außerdem ist zu bemerken, dass die Methode auf Basis von Messdaten entwickelt wurde, welche Störgeräusche mit überwiegend hochfrequenten Anteilen und nicht denselben Charakteristiken wie WEA-Schallemissionen aufweisen. Deswegen eignet sich diese Methode besser für die Filterung aller Störgeräusche, die sich mit einem abweichenden Frequenzbereich als der einer WEA auszeichnen.

Die verwendeten MATLAB Funktionen für die Entwicklung dieser Methode sind in der *Signal Processing Toolbox* enthalten und beziehen sich auf den Bereich *Machine Learning and Deep Learning for Signals - Feature Extraction* [28]. Daraus und aus der Tatsache, dass die Filterung im Zeit- und Frequenzbereich durch die traditionelle digitale Signalverarbeitung (*Digital Signal Processing*, DSP) die

Erfüllung des gewünschten Ziels nicht ermöglicht hat, ist zu schlussfolgern, dass *Machine Learning* der richtige Weg für diesen Zweck ist. Für eine komplette Automatisierung der Merkmalsextraktion und Klassifizierung ist mit *Deep Learning* zu arbeiten. Aktuell bewegen sich Untersuchungen über die Identifizierung der Störgeräusche bei WEA sowie die Erkennung der Charakteristiken von WEA-Schallemissionen in diese Richtung [26], [27].

Vorschläge für die Weiterentwicklung der Methode werden im nächsten Kapitel besprochen.

Kapitel 5.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Störgeräuschfilterung gemäß Abschnitt 4.3.2 entstanden. Das Programm basiert auf dem beschriebenen Ansatz in Abschnitt 4.2. Die Schallmessdaten für die Entwicklung der Methode wurden einer Testmessung entnommen. Die in Kapitel 3 beschriebenen Testmessungen wurden mit dem Ziel konzipiert, die Entwicklung der Methode zu unterstützen. Hierbei wurden verschiedene Messsignale mit einem Smartphone und einem Schallpegelmessgerät erfasst. Die damit gemessenen Signale wurden als Basis für die Entwicklung der Störgeräuschfilterung verwendet. Im Abschnitt 4.1 wurden die im ersten Schritt untersuchten Ansätze für eine Filterung im Frequenz- und Zeitbereich beschrieben. Dabei konnte festgestellt werden, dass keine eindeutige Festlegung der zur Filterung benötigten Parameter möglich war. Darüber hinaus konnte keine Lösung gefunden werden, um sicherzustellen, dass bei der Filterung keine Frequenzanteile des Nutzsignals gefiltert werden.

Aus den Überlegungen, dieses Problem zu umgehen, ist der im Abschnitt 4.2 beschriebene Ansatz entstanden. Dabei wurde die Filterung im Zeit-Frequenz-Bereich durchgeführt. Schwerpunkt hierfür ist die Ermittlung der Momentanfrequenz, welche als Durchschnitt der zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhandenen Frequenzen definiert wird. Aus der Ermittlung von plötzlichen Änderungen im Verlauf der Momentanfrequenz, konnte das Signal in Ausschnitte aufgeteilt werden. Dabei wurde für jeden Ausschnitt der Prozentsatz der durchschnittlichen Gesamtleistung in bestimmten Frequenzbereichen berechnet. Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, muss der Frequenzbereich des betrachteten Störgeräusches bekannt sein. Wenn diese Frequenzanteile einen hohen Prozentsatz der Gesamtleistung im betrachteten Ausschnitt betragen, wird der Ausschnitt als Störgeräusch identifiziert und aus dem Gesamtmesssignal entfernt. Die entwickelte Störgeräuschfilterung wurde mit mehreren Messsignalen aus der konzipierten Testmessung getestet. Die in Abschnitt 4.4 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass durch die entwickelte Methode der Einfluss der Störgeräusche deutlich reduziert werden kann. Jedoch benötigt die Methode für ihre Ausführung die Angabe von den in Abschnitt 4.3.4 erläuterten Auswahlparametern, welche vom Benutzer definiert werden müssen. Bei der Bewertung der Methode hinsichtlich ihrer Qualität für die Ermittlung

von Umgebungsgeräuschen und WEA-Schallemissionen, hat sich die Methode für reduzierte Datensätze im Niederfrequenzbereich als nicht geeignet erwiesen. Werden jedoch hochaufgelöste Datensätze zugrunde gelegt, liefert die Methode durchaus gute Ergebnisse, indem die Störgeräusche reduziert werden.

Für die Weiterentwicklung der Methode können nachfolgend verschiedene Angaben der Auswahlparameter untersucht werden und gegebenenfalls kann eine Abhängigkeit zwischen diesen und den Messsignalen hergeleitet werden. Im Weiteren können Kriterien für die Definition der Parameter für die entwickelte Methode festgesetzt werden.

Darüber hinaus kann eine Identifizierung von plötzlichen Änderungen für den Verlauf der Momentanfrequenz und beispielsweise des Schallpegels simultan durchgeführt werden. Damit können zu jedem Zeitpunkt mehrere Schallcharakteristiken untersucht und ausgewertet werden und ausführliche Informationen über das mögliche Auftreten von Störgeräuschen erhalten werden.

Eine simultane Auswertung der Schallemissionen und der Messdaten von Umgebungsparametern ist auch denkbar. Damit können plötzliche Änderungen verschiedener Größen simultan untersucht werden. Hierbei ist auch die Untersuchung von Anlagenparametern wie z. B. die Rotordrehzahl oder die Leistung sinnvoll. Damit kann sichergestellt werden, dass auch außergewöhnliche Geräusche einer WEA, welche auf eine mögliche Störung der Anlage rückführbar sind, identifiziert und nicht als Störgeräusche klassifiziert und gefiltert werden.

Man kann z. B. bei einer plötzlichen Änderung der Frequenzanteile bei konstantem Verlauf der weiteren Variablen davon ausgehen, dass es sich dabei um ein Störgeräusch handelt und somit ausschließen, dass die WEA die entsprechenden Frequenzen verursacht hat. Tauchen hingegen Frequenzanteile mit hohem Energieinhalt bei einer gleichzeitigen Änderung der Windgeschwindigkeit oder der Rotordrehzahl auf, kann das entsprechende Geräusch auch auf die WEA zurückgeführt werden.

Außerdem kann die Messung und Auswertung einzelner Störgeräusche, die bei einem WEA-Standort höchstwahrscheinlich auftreten können, die Methode unterstützen. Mit Informationen über die Charakteristiken der Störgeräusche, wie Frequenzbereich und Aufteilung des Energieinhalts der Frequenzen über der Zeit, kann eine große Datenbank erstellt werden. Mit diesen Informationen können die Angaben für die Methode zur Störgeräuschfilterung präziser definiert werden. Zusätzlich kann durch diese Informationen ein Algorithmus trainiert werden, um durch Bild- bzw. Mustererkennung das Auftreten von Störgeräuschen identifizieren zu können. Weiterentwicklungen mithilfe künstlicher Intelligenz sind erforderlich, besonders zur Automatisierung der Filterung.

Literaturverzeichnis

- [1] NTI Audio. Fast Fourier Transformation FFT - Grundlagen. <https://www.nti-audio.com/de/service/wissen/fast-fourier-transformation-fft>. (visited on 11.01.2021).
- [2] Matthias Bank. *Basiswissen Umwelttechnik: Wasser, Luft, Abfall, Lärm und Umweltrecht*. Vogel, Würzburg, 4., komplett neu bearb. Aufl. edition, 2000. ISBN 3-8023-1797-1.
- [3] Johannes Baumgart. Von der Strömung zum Druck - Schall von Windenergieanlagen. *Akustik Journal*, 2020.
- [4] Boualem Boashash. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. i. fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, 80(4):520–538, 1992.
- [5] Brüel&Kjær. *TYPE 4189 1/2"FREE-FIELD MICROPHONE, PREPOLARIZED, 6.3 Hz-20 KHZ*. (visited on 19.01.2021).
- [6] International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-11 - Windenergieanlagen - Teil 11: Schallmessverfahren (IEC 61400-11:2012)*. 2013.
- [7] S. Hafner D. Klakow, D. Grelich and M. Schott. *Grundlagen der Signalverarbeitung*. Universität des Saarlandes, Institut für Signalverarbeitung, Oktober 2011.
- [8] Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. DEGA. Akustische Wellen und Felder. Technical report, März 2006.
- [9] Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. Erneuerbare Energien sind Klimaschützer Nummer eins. <https://www.bee-ev.de/unsere-positionen/klimaschutz>. (visited on 30.12.2020).
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Erneuerbare Energien. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>. (visited on 30.12.2020).
- [11] Orhan Gazi. *Understanding digital signal processing*. Springer, 2018.
- [12] Jingnan Guo, John Macpherson, and Peter Popoff-Asotoff. Further investigations of low-frequency noise problem generated by freight trains. Australia,

- November 2012. Noise Regulation Branch, Department of Environment and Conservation, Government of Western Australia, Australian Acoustical Society.
- [13] Colin Hansen and Kristy Hansen. Recent advances in wind turbine noise research. In *Acoustics*, volume 2, pages 172–207. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020.
- [14] Colin H Hansen, Con J Doolan, and Kristy L Hansen. *Wind farm noise: measurement, assessment, and control*. John Wiley & Sons, 2017.
- [15] Erich Hau. *Windkraftanlagen: Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit*. Springer-Verlag, 2017.
- [16] Dipl.-Phys. Lorenz Herrmann. Schallemissionsmessungen /- Immissionsmessungen an Windenergieanlagen – nach welcher Vorschrift denn jetzt? 2017.
- [17] Julius O. Smith III. Spectral Audio Signal Processing. https://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/Spectral_Characteristics_Noise.html. (visited on 11.01.2021).
- [18] Lukas Kern, Johann Valentin Seebaß, and Jan Schlüter. Das potenzial von vertikalen Windenergieanlagen im Kontext wachsender Flächennutzungskonflikte und Akzeptanzprobleme der Windenergie. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 43(4):289–302, 2019. doi: 10.1007/s12398-019-00264-7.
- [19] Hans Lohninger. Fensterfunktionen in der FFT. http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/ee_fft_windowing.html. (visited on 27.01.2021).
- [20] James Manwell, Jon Mcgowan, and A.L. Rogers. *Wind Energy Systems: Environmental Aspects and Impacts*, pages 469–510. 06 2002. doi: 10.1002/0470846127.ch10.
- [21] Martin Meyer. *Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*. Springer-Verlag, 2017.
- [22] Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg Ministerium für Wirtschaft. Städtebaulische Lärmfibel Online. <https://www.staedtebauliche-laermfibel.de/?p=5&p2=2.2>. (visited on 28.11.2020).
- [23] Michael Möser. *Technische Akustik*, volume 8. Springer, 2005.
- [24] Michael Möser. *Digitale Signalverarbeitung in der Messtechnik*. Springer-Verlag, 2018.

- [25] Gerhard Müller and Michael Möser. *Akustische Messtechnik*. Springer-Verlag, 2017.
- [26] Duc Phuc Nguyen, Kristy Hansen, Bastien Lechat, Peter Catcheside, and Branko Zajamsek. A machine learning approach for detecting wind farm noise amplitude modulation. 2020.
- [27] Preihs Martens Bergner Rofels und Peissing Poschadel, Gill. Machine Learning basierte Klassifikation von Außenschallszenen für Lärmmessungen an Windenergieanlagen. *DAGA 2020 Hannover*, 2020.
- [28] MATLAB R2020b. *Signal Processing Toolbox - User's Guide*. The MathWorks Inc., 2020.
- [29] Repowering-InfoBörse. Hintergrundpapier: Schallimmissionen von Windenergieanlagen. Technical report, Kommunale Umwelt-Aktion U.A.N. e.V., 2011.
- [30] 2021 Statistisches Bundesamt (Destatis). Bruttostromerzeugung Deutschland. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/_Grafik/_Interaktiv/bruttostromerzeugung-erneuerbare-energien.html, 2020. (visited on 02.01.2021).
- [31] Dominik Surek and Silke Stempin. *Grundlagen der Akustik und Aeroakustik*, pages 451–491. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017. ISBN 978-3-658-18757-6. doi: 10.1007/978-3-658-18757-6_11.
- [32] PCB SYNOTECH. *Sensoren und Instrumente zur Schallmessung*. (visited on 19.01.2021).
- [33] Renzo Tonin. Sources of wind turbine noise and sound propagation. *Acoustics Australia*, 40(1), 2012.
- [34] P. Brachat M. Hoffmann K. Jänke K.-J. Kiesel C. Mehnert Dr. C. Scheck U. Ratzel, O. Bayer. Tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen. Technical report, LUBW, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Februar 2016.
- [35] Martin Werner. *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB®: Grundkurs mit 16 ausführlichen Versuchen*. Springer-Verlag, 2019.
- [36] Wikipedia. Kondensatormikrofon — Wikipedia, die freie Enzyklopädie. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensatormikrofon>, . (visited on 27.01.2021).

- [37] Wikipedia. Spektrale Leistungsdichte — Wikipedia, die freie Enzyklopädie. https://de.wikipedia.org/wiki/Spektrale_Leistungsdichte, . (visited on 27.01.2021).
- [38] Willian Zamora, Carlos T Calafate, Juan-Carlos Cano, and Pietro Manzoni. Accurate ambient noise assessment using smartphones. *Sensors*, 17(4):917, 2017.

Anhang A.

Messsignale aus der Testmessung

Im Folgenden werden die aus der Testmessung erfassten Messsignale abgebildet. Hierbei handelt es sich um Signale, welche vom Laptop abgespielt und mittels Smartphone erfasst wurden.

Testmesssignal

Das Testmesssignal dient zur Einarbeitung in die digitale Signalverarbeitung in MATLAB. Die Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich sowie die Veranschaulichung des Spektrogramms sind in Abb. A.1 zu sehen.

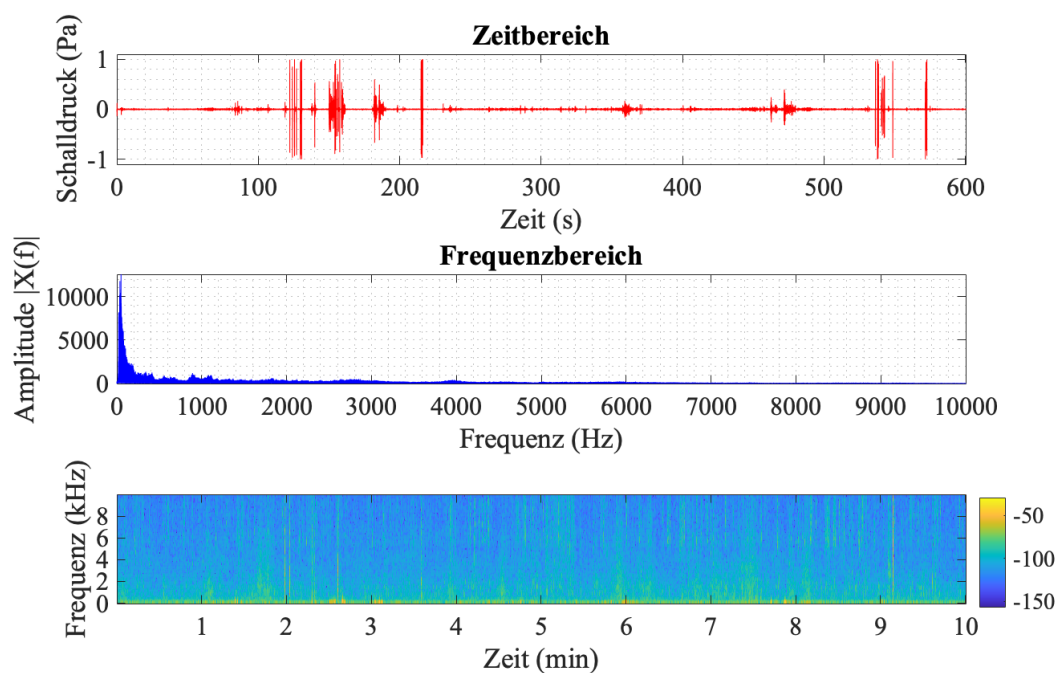


Abbildung A.1.: Darstellung des Testmesssignals im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm

Windenergieanlage

Um eine Vorstellung des Frequenzspektrums über die Schallemissionen einer Windenergieanlage zu haben, wird das Geräusch einer sich drehenden WEA aufgenommen. Für die Untersuchungen der möglichen Ansätze wird dieses Signal als Nutzsignal bezeichnet und mit den Messsignalen von typischen Störgeräuschen kombiniert. Die Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich sowie die Veranschaulichung des Spektrogramms sind in Abb. A.2 zu sehen.

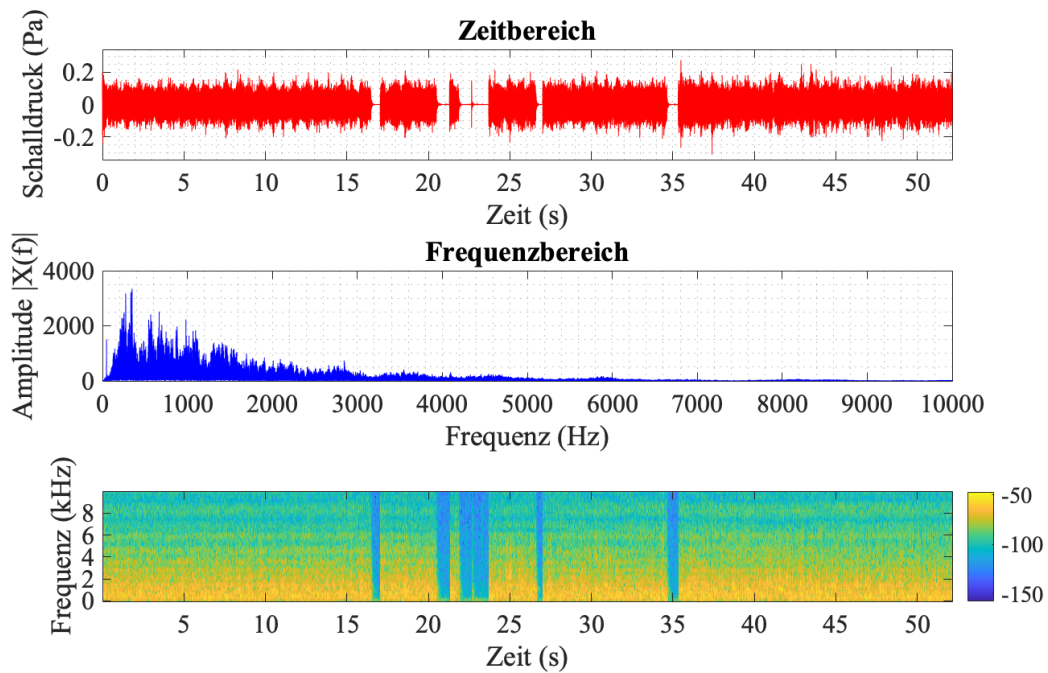


Abbildung A.2.: Darstellung des Signals 'WEA' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm

Vogelgezwitscher

Das Signal 'Vogelgezwitscher' zeichnet sich für hohe Frequenzanteile aus. Sein Frequenzspektrum lässt sich von dem charakteristischen WEA-Frequenzbereich leicht unterscheiden. Aus diesem Grund erfolgen die Untersuchungen der möglichen Ansätze für die Entwicklung der Störgeräuschfilterung mithilfe dieses Signals als typisches Störsignal. Die Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich sowie die Veranschaulichung des Spektrogramms sind in Abb. A.3 zu sehen.

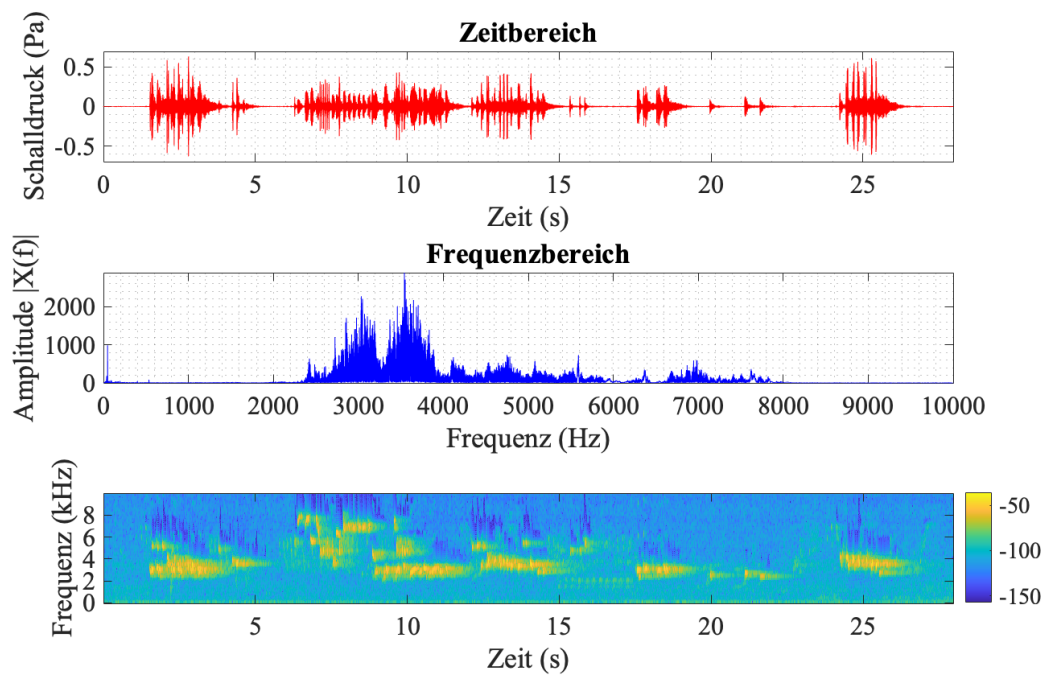


Abbildung A.3.: Darstellung des Signals 'Vogelgezwitscher' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm

Verkehr

Das Signal 'Verkehr' wird als typisches Störgeräusch bei der Entwicklung der Störgeräuschfilterung verwendet. Die Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich sowie die Veranschaulichung des Spektrogramms sind in Abb. A.4 zu sehen.

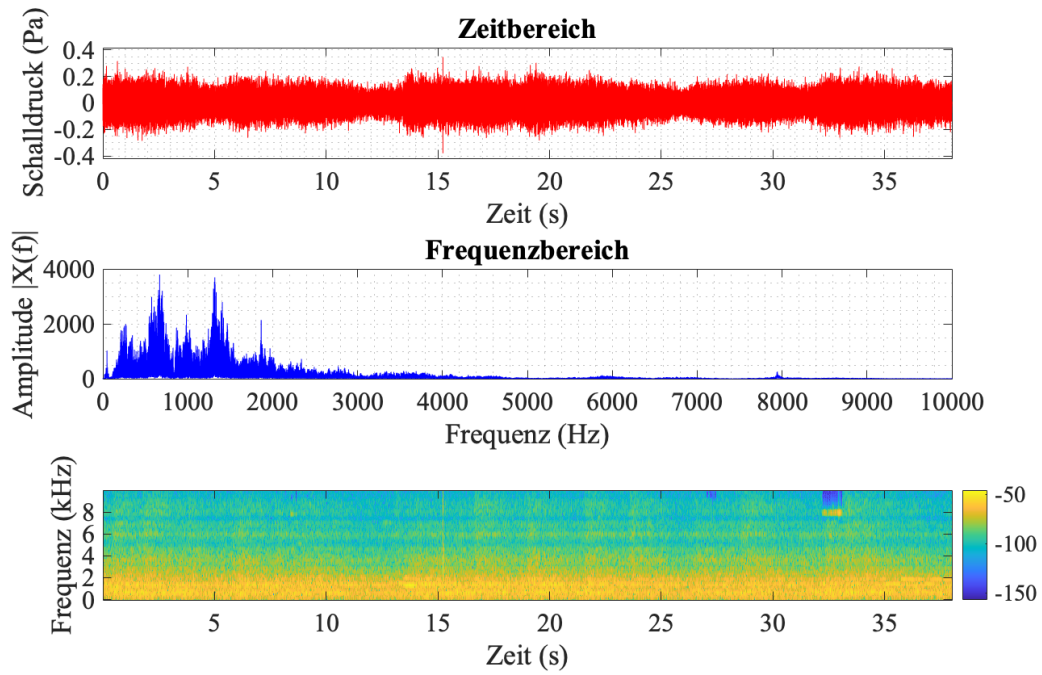


Abbildung A.4.: Darstellung des Signals 'Verkehr' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm

Traktor

Das Signal 'Traktor' wird als typisches Störgeräusch bei der Entwicklung der Störgeräuschfilterung verwendet. Die Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich sowie die Veranschaulichung des Spektrogramms sind in Abb. A.5 zu sehen.

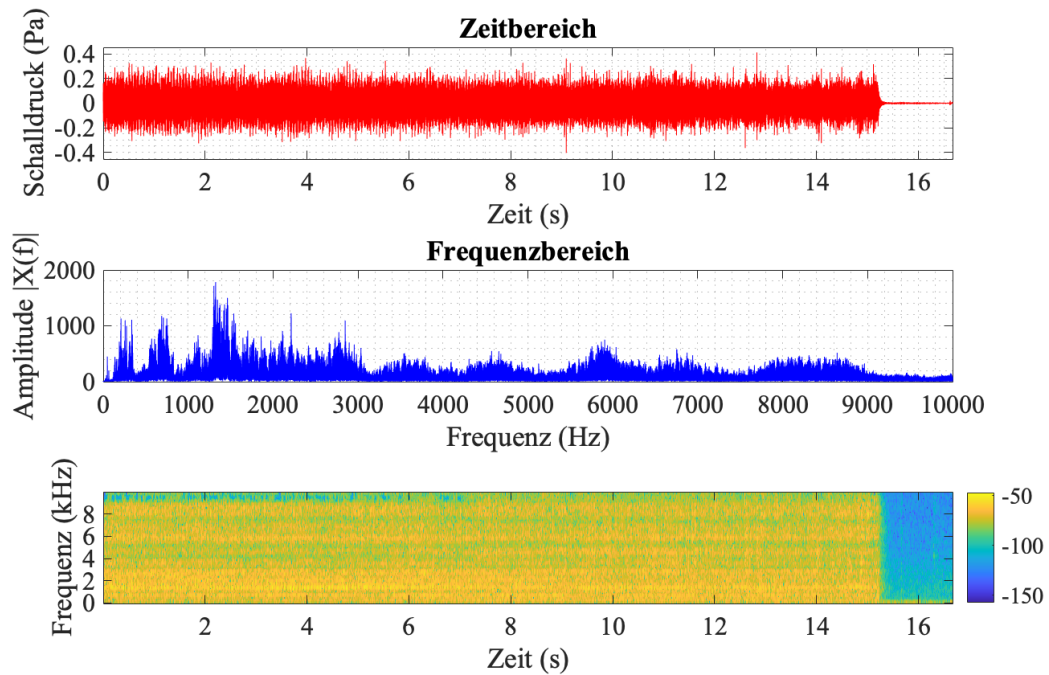


Abbildung A.5.: Darstellung des Signals 'Traktor' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm

Sportwagen

Das Signal 'Sportwagen' wird als typisches Störgeräusch betrachtet und untersucht. Die Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich sowie die Veranschaulichung des Spektrogramms sind in Abb. A.6 zu sehen.

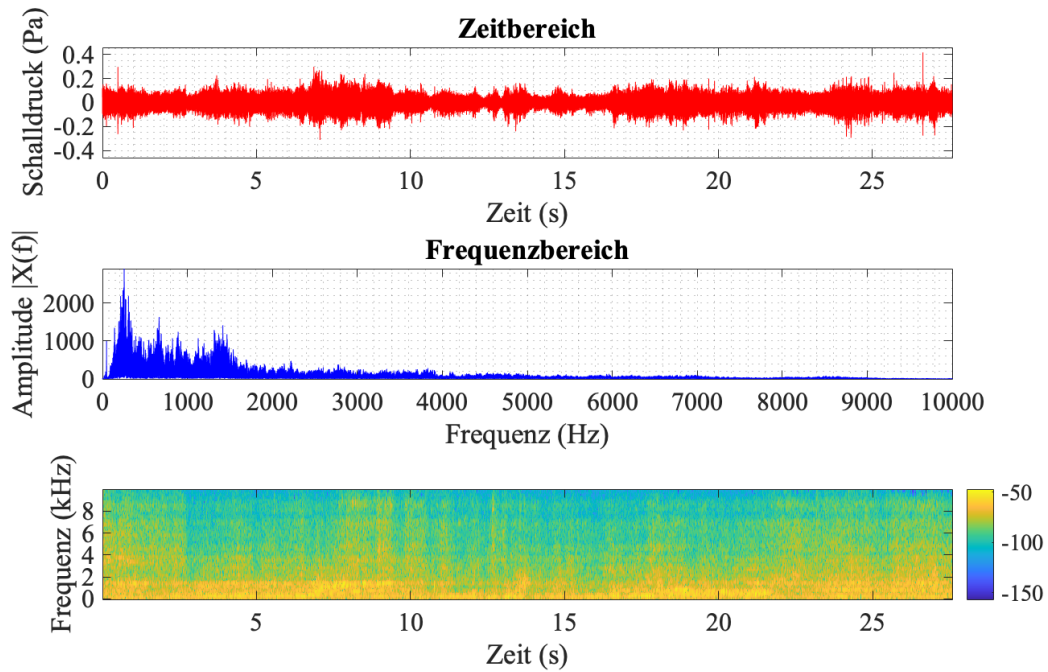


Abbildung A.6.: Darstellung des Signals 'Sportwagen' im Zeit- und Frequenzbereich und Spektrogramm