
BACHELORARBEIT

Christoph Kirsch

Entwicklung und Test eines sekundären Windschirms einschließlich Kalibrierplatz

und

**Definition einer Abgleichvorschrift für sekundäre
Windschirme zum Einsatz bei
Schallemissionsmessungen an
Windenergieanlagen**

2017

BACHELORARBEIT

Entwicklung und Test eines sekundären Windschirms einschließlich Kalibrierplatz

und

**Definition einer Abgleichvorschrift für sekundäre
Windschirme zum Einsatz bei
Schallemissionsmessungen an
Windenergieanlagen**

Autor:

Christoph Kirsch

Studiengang:

Media and Acoustical Engineering

Seminargruppe:

MG13wC-B

Matrikelnummer:

34683

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer:

Christian Hoffmann, M.Sc.

Bargeshagen, Mai 2017

Bibliografische Angaben

Kirsch, Christoph: Entwicklung und Test eines sekundären Windschirms einschließlich Kalibrierplatz und Definition einer Abgleichvorschrift für sekundäre Windschirme zum Einsatz bei Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen, 67 Seiten, 30 Abbildungen, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Medien

Bachelorarbeit, 2017

Referat

In dieser Arbeit wird ein Messverfahren zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung von Sekundärwindschirmen nach Anhang E zu DIN EN 61400-11:2013-09 entwickelt. Dabei wird eine höhere Frequenzauflösung erreicht als bei jenem Messverfahren, das im o.g. Anhang empfohlen wird. Die Einfügungsdämpfung eines kommerziell angebotenen Windschirms und einer Eigenkonstruktion, die nach normativen Empfehlungen dimensioniert wurde, wird bestimmt. Es folgen Betrachtungen zum schalltechnischen Verhalten der untersuchten Windschirme sowie zu Messabweichungen.

Student:	Christoph Kirsch	Bearbeitungszeitraum:	14.11.2016 – 05.05.2017
Studieneinrichtung:	Hochschule Mittweida	Betreuer Hochschule:	Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt
Studienrichtung:	Akustik		
Studiengang:	Media and Acoustical Engineering		
Seminargruppe:	MG13wC-B	Betreuer WIND-consult:	C. Hoffmann (M. Eng.)
Matrikel-Nr:	34683		

Thema Bachelorarbeit

Entwicklung und Test eines sekundären Windschirms einschließlich Kalibrierplatz und Definition einer Abgleichvorschrift für sekundäre Windschirme zum Einsatz bei Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen (WEA)

Das Umdenken auf dem Energiesektor, hin zu alternativen Energiequellen wie Wind und Sonne, erfordert eine ständige Weiterentwicklung in diesem Bereich. Um die von der Bundesregierung ausgerufenen Energiewende realisieren zu können, ist der Ausbau der Windenergie unumgänglich. Dies erfordert eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung, die nur erreicht werden kann, wenn dem Immissionsschutz Rechnung getragen wird. Hierzu existieren verschiedene Normen und Richtlinien zur schalltechnischen Vermessung von WEA, die einer ständigen Weiterentwicklung unterliegen.

Eine dieser Norm ist die IEC 61400-11 in der Edition 3 (2012), die die Messung der Schallemission an WEA definiert. Entsprechend dieser Norm kann bei Messungen bei hohen Windgeschwindigkeiten und niedrigen Frequenzen ein sekundärer Windschirm verwendet werden. Dieser Windschirm verbessert das Signal-Rausch-Verhältnis bei den tiefsten und den höchsten Frequenzen durch Verringerung des windinduzierten Geräusches am Mikrofon.

Bei Verwendung eines sekundären Windschirms muss dessen Einfluss auf den Frequenzgang dokumentiert und die Messergebnisse müssen entsprechend korrigiert werden. Die Einfügungsdämpfungen des sekundären Windschirms sollten die verschiedensten Wetterbedingungen (z. B. verschiedene Grade an Luftfeuchte) abdecken.

Ziel dieser Bachelorarbeit soll es sein, einen sekundärer Windschirm entsprechend den Vorgaben der o. g. Norm zu entwickeln und eine Abgleichvorschrift zur Ermittlung der Einfügungsdämpfung dieses sekundären Windschirms und der bereits im Hause WIND-consult verwendeten sekundäre Windschirme zu definieren.

Bearbeitungsschwerpunkte sind:

- Entwicklung eines sekundärer Windschirms entsprechend IEC 61400-11 Edition 3
- Entwicklung eines Kalibrierplatzes zum Abgleich sekundärer Windschirme
- Bestimmung der Einfügungsdämpfungsmaße dieses Windschirms im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 10 kHz sowie dessen Unsicherheitsfaktoren
- Definition einer Abgleichvorschrift zur Kalibration sekundärer Windschirme im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 10 kHz
- Analyse meteorologischer möglicher Einflüsse im Frequenzverhalten sekundärer Windschirme
- Dokumentation der Entwicklung von sekundärem Windschirm und Kalibrierplatz sowie Validierung der Messergebnisse.

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Gegenstand und Ziel der Arbeit	2
1.3 Forschungsstand	2
1.4 Vorgehensweise	3
2 Grundlagen	4
2.1 Übersicht: Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen nach DIN EN 61400-11	4
2.2 Aufbau und Wirkungsweise eines Sekundärwindschirms	5
2.2.1 Windgeräusche und Gegenmaßnahmen	5
2.2.2 Empfehlungen nach DIN EN 61400-11	6
2.3 Theoretische Betrachtungen zum Sekundärwindschirm	7
2.3.1 Reflexion am Impedanzsprung	7
2.3.2 Verhalten eines hemisphärischen Hohlkörpers	9
2.4 Der Windschirm als LTI-System	10
2.4.1 Linearität	11
Additivität	11
Homogenität	11
2.4.2 Zeitinvarianz	12
2.4.3 Kausalität und Stabilität	12
2.5 Signalanalyse	12
2.5.1 Mittelwerte und Leistung	13
2.5.2 Korrelation	13
2.5.3 Fourier-Transformation	13
2.5.4 Leistungsdichte	14
2.6 Übertragungsfunktion	15
2.6.1 Definition und Darstellung der Übertragungsfunktion	15
2.6.2 Kaskadierung von Systemen	15
2.6.3 Ermittlung der Übertragungsfunktion	16
3 Entwicklung eines Messverfahrens für Sekundärwindschirme	17
3.1 Anforderungen	17
3.2 Theoretischer Ansatz	18
3.3 Beobachtungen in Vorversuchen	20
3.4 Signalakquise	21
3.4.1 Messaufbau	21

3.4.2	Testsignal	22
3.4.3	Durchführung der Messung	24
	Ablauf der Schallmessung	24
	Wahl der Lautsprecherpositionen	25
3.5	Auswertung der Messdaten	26
3.5.1	Manuelle Unterteilung der Zeitsignale	26
3.5.2	Signalanalyse und Aufbereitung der Ergebnisse	26
4	Messungen an Windschirmen	28
4.1	Beschreibung der untersuchten Windschirme	28
4.1.1	DELTA-Windschirme H012 und H101	28
4.1.2	Normgerechter Eigenbau-Windschirm CK01	28
4.2	Messreihen	29
4.3	Betrachtung der Messergebnisse	30
4.3.1	Einfluss der Schirmpositionierung	30
4.3.2	Einfluss des Schalleinfallswinkels	33
4.3.3	Einfluss von Nässe	36
4.3.4	Vergleich der Schirme	39
	H012 und H101 - Messwerte und Herstellerangaben	40
	CK01 im Vergleich zu den DELTA-Windschirmen	41
5	Fehleranalyse	44
5.1	Allgemeines zu Messabweichungen	44
5.2	Anwendung auf die Einfügungsdämpfungsmessung	45
5.3	Quantifizierung der Messabweichung	46
5.3.1	Quantifizierung der zufälligen Messabweichung	46
5.3.2	Quantifizierung der Gesamt-Messabweichung	48
5.4	Betrachtungen zu Einflussgrößen	49
5.4.1	Fremdgeräusch	49
5.4.2	Fehler bei digitaler Signalverarbeitung	50
	Fehler durch Quantisierung	50
	Abweichungen bei der Errechnung von Terzpegeln aus FFT-Werten	51
5.4.3	Wind	51
5.4.4	Positionierung von Schirm und Schallquelle	52
5.4.5	Zeitvarianzen	52
	Temperatur	52
	Feuchtigkeit	53
	Verschmutzung und Materialalterung	53
5.5	Einfluss von Unsicherheiten in Bezug auf den immissionsrelevanten Schalleistungspegel	53
6	Zusammenfassende Beurteilung	55
7	Ausblick	57

A	Tabellarische Auflistungen	58
A.1	Daten zu Abbildung 4.14	58
A.2	Rechenbeispiel: Fortpflanzung der Messunsicherheit	59
B	Quellcode	60
B.1	Auswertung in GNU Octave	60
B.2	Berechnung von Terzpegeln	61
C	Messprotokoll	63
	Literaturverzeichnis	64
	Eigenständigkeitserklärung	67

II. Abbildungsverzeichnis

2.1	Messaufbau nach DIN EN 61400-11	4
2.2	Anordnung von Mikrofon und Schirmen	7
2.3	Skizze: Schallreflexion am Schirm	9
2.4	Schalldruck am Boden einer Kuppel, exemplarisch gewählte Fremdgrafik	10
2.5	Systeme in Reihenschaltung	16
2.6	Systeme in Parallelschaltung	16
3.1	Konstellation von Signalen und Systemen zur Messung	18
3.2	Darstellung des Messaufbaus, Seitenansicht	21
3.3	Darstellung des Messaufbaus, Vogelperspektive	21
3.4	Darstellung eines Sweepsignals	23
3.5	Fremdgeräusch, typisch	23
3.6	Benennungssystem für Signaldateien	26
4.1	Windschirm H012, Gesamtansicht	29
4.2	Windschirm H012, Detail: Innenansicht	29
4.3	Windschirm H012, Detail: Oberfläche	29
4.4	Windschirm CK01, Gesamtansicht	29
4.5	Windschirm CK01, Detail: Innenansicht	29
4.6	Windschirm CK01, Detail: Schichtdicke	29
4.7	Einfügungsdämpfung H012, verschiedene Mikrofonpositionen unter dem Schirm	30
4.8	Einfügungsdämpfung H012, verschiedene Mikrofonpositionen unter dem Schirm, Terzdarstellung	32
4.9	Einfügungsdämpfung an drei Lautsprecherpositionen	34
4.10	Einfügungsdämpfung von Schirm H012, drei Lautsprecherpositionen, Terzdarstellung	35
4.11	Einfügungsdämpfung von Schirm CK01, drei Lautsprecherpositionen, Terzdarstellung	36
4.12	Mittlere Einfügungsdämpfung H012, trocken und nass	37

4.13 Mittlere Einfügungsdämpfung der Schirme H012 und CK01	
in trockenem und nassen Zustand, Terzdarstellung	38
4.14 Mittlere Einfügungsdämpfung der untersuchten Schirme,	
Herstellerangaben, Terzdarstellung	40
4.15 Einfügungsdämpfung der Schirme H012 und CK01	42
5.1 Nullmessung	46
5.2 Exemplarische Messung mit Fehlerindikatoren	49
C.1 Messprotokoll	63

III. Tabellenverzeichnis

3.1 Lautsprecherpositionen nach [DIN EN 61400-11, Anhang E.4]	25
3.2 Angepasste Lautsprecherpositionen	25
4.1 Maxima im Verlauf der Einfügungsdämpfung von Schirm H012, Mess- und Rechenwerte	33
4.2 Schalleinfallswinkel zu den Lautsprecherpositionen nach Tabelle 3.2	33
5.1 Standardabweichung, exemplarisch, zufällig	48
5.2 Standardabweichung, exemplarisch, gesamt	50
5.3 Summenpegel eines Anlagenspektrum	54
A.1 Einfügungsdämpfung: Messergebnisse im Mittel und Herstellerangaben	58
A.2 Rechenbeispiel: Auswirkung der Messunsicherheit der Einfügungsdämpfung auf den Summenpegel von typischen Betriebsgeräuschen einer Windenergieanlage	59

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Nutzung von Windenergie zur Stromerzeugung gilt gemeinhin als Notwendigkeit, um umweltpolitische Zielsetzungen bezüglich Treibhausgasausstoß und nachhaltiger Energieerzeugung einzuhalten. Da die Energiewandlung durch Windenergieanlagen keinesfalls lautlos stattfindet, ergibt sich die Notwendigkeit einer rechtlichen Grundlage, auf deren Basis die Geräuscheinwirkung sowohl in der Planungsphase als auch bei schon bestehenden Anlagen beurteilt werden kann. In Deutschland wird für die Genehmigung von gewerblichen Anlagen die [TA Lärm] herangezogen, in der Immissionsrichtwerte für unterschiedliche Umgebungen sowie Details zur Ermittlung von Beurteilungspegeln, die mit den Immissionsrichtwerten verglichen werden, gegeben sind. Bei der Genehmigung von Windenergieanlagen sind Schalleistungspegel von besonderer Bedeutung, die in der Regel von Herstellern angegeben werden und im Rahmen von Genehmigungsverfahren für die Prognose von Beurteilungspegeln an Immissionsorten herangezogen werden. Aus verschiedenen Gründen, häufig als Nachweis der schalltechnischen Konformität von neu errichteten Windenergieanlagen mit dem Genehmigungsbescheid, kann der Schalleistungspegel der Anlage messtechnisch ermittelt werden. Das Verfahren für solche Messungen ist in der [DIN EN 61400-11] beschrieben.

Innerhalb dieser Norm wird die Verwendung eines zweiten Mikrofon-Windschirms beschrieben, der zusätzlich zu einem primären Windschirm, der unmittelbar um die Mikrofonkapsel herum platziert wird, verwendet werden kann, um die Induzierung von Windgeräuschen während der Schalldruckpegelmessung, die Grundlage der Schalleistungsermittlung ist, zu minimieren. Damit soll sichergestellt werden, dass insbesondere bei tiefen Frequenzen und hohen Windgeschwindigkeiten zwischen Anlagen- und Umgebungsgeräusch unterschieden werden kann. Mit der Platzierung eines Schirmes zwischen Schallquelle und Mikrofonkapsel geht allerdings auch ein unerwünschter Einfluss auf die Geräusche, die mit dem Mikrofon gemessen werden, einher. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Einfluss, bezeichnet als Einfügungsdämpfung, frequenzabhängig sein kann. Nach o. g. Norm ist der Einfluss auf das Nutzsignal des ersten Windschirms, der unmittelbar um die Mikrofonkapsel herum platziert wird, zu vernachlässigen. Die Einfügungsdämpfung des Sekundärwindschirms hingegen wird bei der Ermittlung des Schalleistungspegels berücksichtigt. Im informativen Anhang E zu [DIN EN 61400-11] wird ein Verfahren beschrieben, um die Einfügungsdämpfung von Sekundärwindschirmen terzabhängig messtechnisch zu ermitteln.

1.2 Gegenstand und Ziel der Arbeit

Die WIND-consult Ingenieurgesellschaft für umweltschonende Energiewandlung mbH bietet neben diversen anderen Messdienstleistungen an Windenergieanlagen Schallmessungen an solchen an. Da die Messergebnisse eine maximale Präzision und Reproduzierbarkeit aufweisen müssen, wurde im Zuge der Qualitätssicherung beschlossen, die Einfügungsdämpfung der verwendeten Sekundärwindschirme als Einflussgröße bei der Ermittlung des immissionsrelevanten Schallleistungspegels von Windenergieanlagen zum Gegenstand der vorliegenden Bachelorarbeit zu erklären. Dabei sollen Erkenntnisse über die Einfügungsdämpfung der vorhandenen Sekundärwindschirme sowie die Wirkungsweise sekundärer Windschirme im Allgemeinen zu gewonnen werden. Aus der durch das so gewonnene Wissen verbesserten Einschätzbarkeit des Dämpfungsverhaltens von Sekundärwindschirmen soll eine Optimierung der Schallmessungen hinsichtlich der Präzision ihrer Ergebnisse hervorgehen.

1.3 Forschungsstand

Bei Luftschallmessungen im Freien und in Strömungskanälen ist die Verwendung eines wie auch immer gearteten Windschirms oftmals eine Notwendigkeit, um zu vermeiden, dass jene Geräusche, die messtechnisch untersucht werden sollen, von windinduzierten Geräuschen überlagert werden.

Entsprechend häufig finden sich deshalb Publikationen, die sich mit den windgeräuschmindernden Eigenschaften von Windschirmen befassen. Ein Beispiel für frühe Forschung zu dem Thema ist [Tedrick 1964], der Aufbau und Windgeräuschminderung eines unkomplizierten Windschirms für die Messung von niederfrequenten Geräuschen im Freien beschreibt. Speziell optimierte Formgebungen wurden für die Messungen in Strömungskanälen entwickelt, bei denen der Fluidstrom und der einfallende Schall immer dieselbe Richtung zu Schirm und Mikrofon haben. Die messtechnische Erfassung windgeräuschmindernder Eigenschaften ist Anlass für Diskussionen in der Fachwelt. Es gibt Erkenntnisse, die darauf hindeuten, dass sich die Windgeräusche, die durch laminaren Fluss, wie er beispielweise in Strömungskanälen oder an rotierenden Mikrofonlaggen vorherrscht, induziert werden, von denen unterscheiden, die durch Luftbewegung im Freien verursacht werden. Die Windgeräuschminderung eines Schirms unterscheidet sich also unter Laborbedingungen gegebenenfalls von der Windgeräuschminderung im Feld. [Wuttke 1988], [Werner/Heinen 1990]

Sekundärwindschirme jener Bauweise, wie sie häufig bei Schallmessungen an Windenergieanlagen zum Einsatz kommt, sind Gegenstand verschiedener Veröffentlichungen. Von [Lin et al. 2014] wird das windgeräuschmindernde Verhalten ohne Bezug auf Windenergieanlagen untersucht. [Novak et al. 2014] vergleichen die Windgeräuschminderung verschiedener Schirmkonstruktionen bei tiefen Frequenzen, ohne auf die Einfügungsdämpfung einzugehen und [Adcock et al. 2015] untersuchen sowohl Windgeräuschminderung als auch Einfügungsdämpfung, geben letztere aber lediglich in Ok-

tawerten an, wobei diese in einem Parkhaus und nicht bei freier Schallausbreitung gemessen wurden.

[Tran-Luu/Solomon 2006] messen den Frequenz- und Phasengang von Windschirmen aus porösem Material. Dabei wird insbesondere die Veränderung der akustischen Eigenschaften bei gealterten und verschmutzten Schirmen untersucht. Weil die Untersuchungen im Kontext von militärischen Anwendungen stattfinden, wird nur ein vergleichsweise schmaler Frequenzbereich betrachtet.

Die Auswirkungen von Nässe auf Windschirme aus porösem Material werden von [Ribeiro et al.] untersucht. In dem Artikel wird insbesondere auf die Standardabweichung der Einfügungsdämpfung eingegangen.

1.4 Vorgehensweise

Für die Untersuchung der Dämpfungseigenschaften von Sekundärwindschirmen ist es unerlässlich, über ein Messverfahren zu verfügen, welches eine hohe Auflösung im Frequenzbereich, hinreichende Präzision und reproduzierbare Ergebnisse und eine vergleichsweise einfache Messdurchführung, die eine größere Anzahl an Messreihen erlaubt, aufweist. Wegen der speziellen Anforderungen, die sich aus der Anwendung von Sekundärwindschirmen bei Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen ergeben, erweist es sich von vornherein als günstig, eine eigene Messvorschrift zu entwickeln. Die Analyse von Messergebnissen, die mit diesem Messverfahren gewonnen werden, soll die Eigenschaften von Sekundärwindschirmen dokumentieren.

Praktisch ist dabei eine vollständige Trennung der Entwicklung eines Messverfahrens und der Beobachtung des Dämpfungsverhaltens von Sekundärwindschirmen weder möglich noch zielführend. Da zu Beginn der Arbeit allenfalls Mutmaßungen über die Entstehung der Schirm-Einfügungsdämpfung gemacht werden konnten, fiel das Einschätzen der Plausibilität von Messergebnissen zunächst ebenso schwer wie die Optimierung des Messverfahrens in Hinsicht auf die beabsichtigte Anwendung. Auch wenn in den nachfolgenden Ausführungen die Entwicklung des Messverfahrens und Beschreibung der Einfügungsdämpfung von Sekundärwindschirmen getrennt behandelt werden, sollte sich der Leser vor Augen halten, dass der eigentliche Erkenntnisprozess eher iterativer Natur war.

Die Grundlagen, die in Abschnitt 2 aufgeführt sind, dienen der Veranschaulichung jener Ansätze, die dem Verfasser beim Lösen seiner Aufgabe hilfreich waren. Es besteht jedoch keinesfalls der Anspruch, fachliche Grundlagen systematisch „von der Pike auf“ zu erläutern. An geeigneten Stellen wird aus diesem Grund auf Fachliteratur verwiesen. Ein Aspekt, der im Rahmen dieser Arbeit außen vor gelassen wird, ist die Untersuchung windgeräuschmindernder Eigenschaften von Sekundärwindschirmen. Wie in Abschnitt 1.3 beschrieben wurde, gibt es bereits Untersuchungen zu diesem Thema. Eine Beschäftigung mit dieser Thematik hätte keinerlei direkten Nutzen bezüglich der Aufgabenstellung und wäre aufgrund begrenzter zeitlicher Ressourcen und des anzustrebenden Gesamtumfangs dieses Dokuments nicht zufriedenstellend zu bearbeiten gewesen.

2 Grundlagen

2.1 Übersicht: Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen nach DIN EN 61400-11

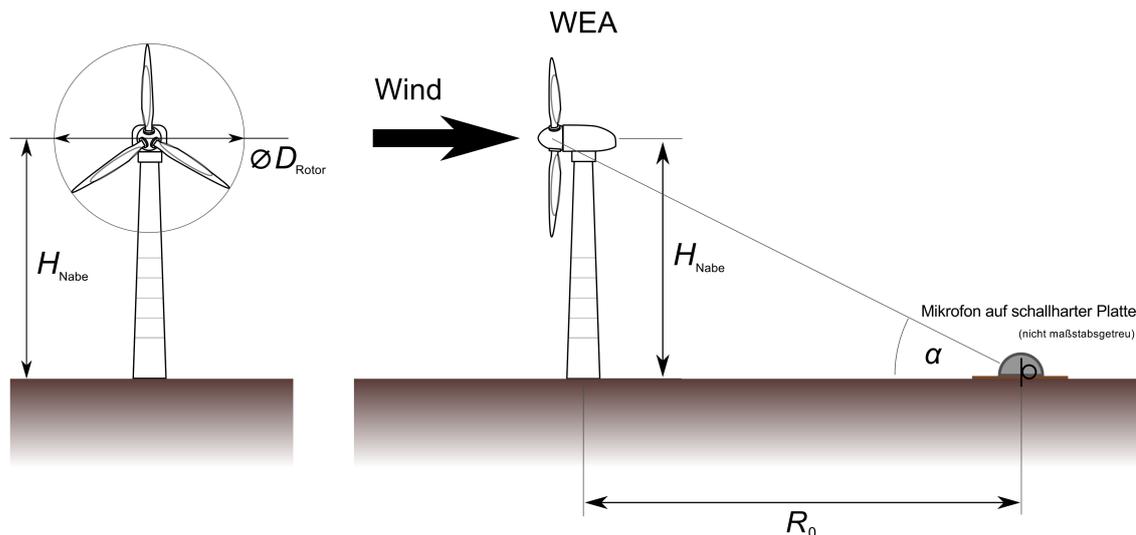


Abbildung 2.1: Messaufbau nach DIN EN 61400-11,
links: Frontalansicht Windenergieanlage,
rechts: Seitenansicht Messaufbau¹

Bei dem in [DIN EN 61400-11] beschriebenen Messverfahren handelt es sich um eine Vorgehensweise, die es ermöglichen soll, die Schallemission von Windenergieanlagen unterschiedlicher Bauart über einen Bereich von Windgeschwindigkeiten vergleichbar zu charakterisieren. Der Ansatz des Verfahrens ist, an einem festgelegten Ort lee zur Anlage den Schalldruckpegel zu messen und aus diesem, unter Berücksichtigung der Entfernung zur Gondel und anderer Einflüsse, den sogenannten immissionsrelevanten Schalleistungspegel der Gesamtanlage zu errechnen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Windenergieanlage in ausreichender Entfernung mit hinreichender Genauigkeit als akustische Punktquelle betrachtet werden kann.

Zur Messung des Schalldruckpegels wird eine schallharte Platte mit einem Mindestdurchmesser von $D_{\text{Platte}} \geq 1 \text{ m}$ auf dem Boden platziert. Mittig auf dieser Platte, in Richtung der Windenergieanlage, liegt das Mikrofon, das von einem halbkugelförmigen Windschirm aus offenporigem Schaumstoff, dem sogenannten Primärwindschirm, vor Umwelteinflüssen geschützt wird. Über dem Mikrofon auf der Platte kann ein Sekundärwindschirm platziert werden. Die Platte befindet sich in einem Bereich von $\pm 15^\circ$ zur

¹ Bildquelle: eigene Darstellung, enthält Elemente aus Wikimedia Commons
(<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windkraftanlage.svg>, Zugriff: 02.02.2017)

Mitwindrichtung der Anlage. Der Abstand R_0 der schallharten Platte zur Turmfußmittellinie ergibt sich aus der Nabhöhe H_{Nabe} und dem Rotordurchmesser D_{Rotor} :

$$R_0 = H_{\text{Nabe}} + \frac{D_{\text{Rotor}}}{2} \quad (2.1)$$

Beim Vermessen von zum Zeitpunkt dieser Arbeit typischen Windenergieanlagen bewegt sich der Abstand der schallharten Platte zum Turm in einer Größenordnung von $R_0 \approx 180$ m. Der Einfallswinkel α des Schalls von der Punktquelle, als welche die Windenergieanlage laut Norm betrachtet wird, beträgt dabei zwischen 25° und 40° .

Der bei der Messung abzudeckende Windgeschwindigkeitsbereich bezieht sich auf eine normierte Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe. Es ist notwendig, während einer normgerechten Schallmessung mindestens einen Windgeschwindigkeitsbereich von 6 m/s bis 10 m/s abzudecken. Da sich diese Werte auf die normierte Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe beziehen, sind auf Nabenhöhe je nach Größe der Anlage deutlich höhere Windgeschwindigkeiten erforderlich, um eine vollständige Messung zu ermöglichen. Die Durchführung einer Schallemissionsmessung dauert erfahrungsgemäß mindestens zwei Stunden; je nach meteorologischen Bedingungen und organisatorischen Umständen sowie Fremdgeräuscheinwirkung kann sich dieser Zeitraum auch auf ein Vielfaches verlängern. Zusätzlich nehmen Auf- und Abbau der Messapparatur jeweils ca. eine Stunde in Anspruch.

Eine Veränderung der Windgeschwindigkeit innerhalb eines Zeitraums von wenigen Stunden, wie sie zur Durchführung einer Schallmessung nötig ist, tritt vergleichsweise selten auf. Es sind abfallende oder ansteigende Windflanken erforderlich. Erschwerend kommt hinzu, dass an manchen Standorten die Nähe zu Störgeräuschquellen und/oder unzugänglichen Gebieten (Straßen, Wälder, Wasserflächen) dazu führt, dass nur bei einer bestimmten Windrichtung gemessen werden kann. In Deutschland treten zum Messen geeignete Windbedingungen vornehmlich in Frühjahr, Spätherbst und Winter auf. Entsprechend finden Messungen häufig bei Temperaturen knapp oberhalb des Gefrierpunkts und gelegentlichem Niederschlag statt. Dies stellt besondere Ansprüche an die Robustheit der eingesetzten Messtechnik.

2.2 Aufbau und Wirkungsweise eines Sekundärwindschirms

2.2.1 Windgeräusche und Gegenmaßnahmen

Die Windgeräuschenentstehung an Mikrofonen wird maßgeblich durch strömungsgeschwindigkeitsbedingte Luftdruckschwankungen im Bereich der Mikrofonkapsel bedingt. Dabei unterscheiden sich die Bedingungen in kontrollierten Umgebungen (z.B. Windkanal) von denen im Freien dadurch, dass im Freien ein deutlich höheres Ausmaß an Turbulenz und Vortizität, also an Schwankung der Strömungsgeschwindigkeit und -richtung,

vorherrscht (vgl. [Morgan/Raspet 1992]). Die windinduzierten Geräusche sind vorwiegend tieffrequent und i.A. lauter, je höher die Windgeschwindigkeit ist. Aufgabe eines Windschirms ist grundsätzlich, die Druckschwankungen zu mindern und dadurch die Lautstärke strömungsinduzierter Geräusche zu minimieren. Dabei gilt es jedoch, den Einfluss auf das Nutzsignal möglichst gering zu halten.

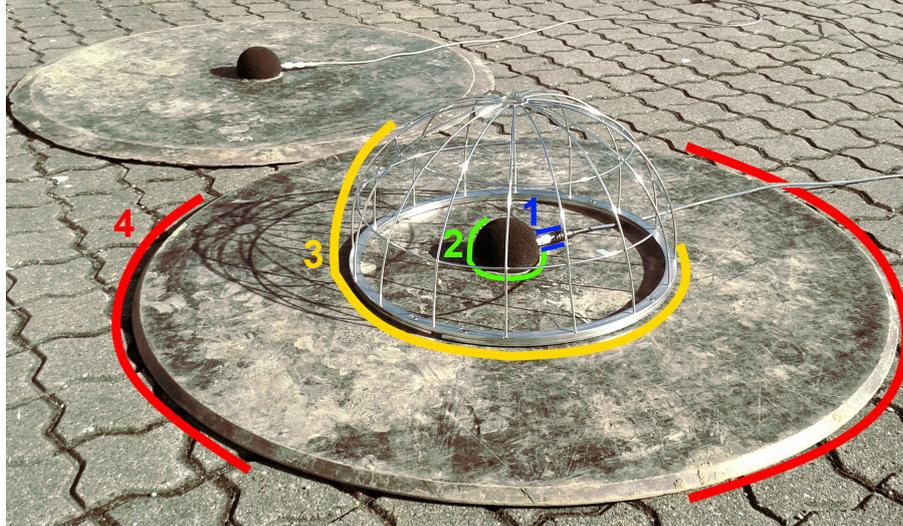
In der Praxis werden Windschirme oft realisiert, indem poröses Material um die Mikrofonkapsel herum platziert wird. Typischerweise sind diese Schirme annähernd kugelförmig und haben einen Durchmesser kleiner als 100 mm. Dieses Vorgehen führt zu einer Veränderung des Frequenzgangs des Mikrofons insbesondere bei hohen Frequenzen. Bei Anwendungen, bei denen besonders hohe Anforderungen an die Verringerung windinduzierter Geräusche gestellt werden, wird zusätzlich zu der porösen Schicht direkt um die Mikrofonkapsel herum (kurz: Primärwindschirm), eine zweite Windschirmschicht (kurz: Sekundärwindschirm) platziert, die ein Luftvolumen einschließt. Diese Sekundärwindschirme sind je nach Anwendung in verschiedenen Formgebungen und mit verschiedenen Schirmmaterialien verfügbar. Nicht nur akustische Eigenschaften spielen eine Rolle, sondern auch Eigenschaften wie der Schutz des Mikrofons gegen Feuchtigkeit, Staub und mechanische Beanspruchung. Untersuchungen, wie zum Beispiel [Novak et al. 2014] und [Lin et al. 2014], haben gezeigt, dass Sekundärwindschirme besonders günstig bezüglich der windgeräuschkindernden Eigenschaften sind. Bei Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen nach [DIN EN 61400-11] kann die Verwendung eines Sekundärwindschirms zur Verbesserung des Fremdgeräuschabstands bei tiefen Frequenzen insbesondere bei leisen Betriebsmodi der zu vermessenden Windenergieanlage beitragen.

2.2.2 Empfehlungen nach DIN EN 61400-11

Im informativen Anhang E der Norm [DIN EN 61400-11] werden Empfehlungen zur Konstruktion eines Sekundärwindschirms gegeben. Der Schirm sollte hiernach halbkugelförmig sein, einen Durchmesser von $D_{\text{Schirm}} \geq 450$ mm haben und konzentrisch über dem Mikrofon mit Primärwindschirm angeordnet werden.

Es wird weiterhin genannt, dass ein Sekundärwindschirm aus einem Drahtgestell bestehen kann, das mit offenporigem Schaumstoff mit 4 bis 8 Poren auf 10 mm Länge und einer Schichtdicke von $13 \text{ mm} \leq d_{\text{Schicht}} \leq 25 \text{ mm}$ oder textilem Material bespannt ist. Abbildung 2.2.2 dient dazu, die Größenverhältnisse von Mikrofon, Schirmen und Platte zu illustrieren. Um einen Einblick in das Innere des Sekundärwindschirms zu gewähren, wurde dessen Hülle entfernt, auf dem Bild ist also lediglich das Gestell des Schirms zu sehen. Abbildungen von Sekundärwindschirmen mit Hülle sind in Abschnitt 4.1 zu finden.

Abbildung 2.2: Anordnung von Mikrofon und Schirmen, zu Darstellungszwecken wurde die Hülle des Sekundärwindschirms entfernt, (1) - Mikrofon; (2) - Primärwindschirm; (3) - Sekundärwindschirm; (4) - schallharte Platte



2.3 Theoretische Betrachtungen zum Sekundärwindschirm

2.3.1 Reflexion am Impedanzsprung

Ein Aspekt, der bei der theoretischen Annäherung an Wirkungsweise und Einfluss eines Sekundärwindschirms, wie er in Abschnitt 2.2.2 beschrieben wurde, zu betrachten ist, ist der Einfall von Schall auf einem Übergang zwischen zwei Medien, wie er an der Außenhülle des Windschirms vorkommt.

Die schalltechnischen Eigenschaften eines Mediums können unter anderem durch die Schallkennimpedanz \underline{Z} charakterisiert werden. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\underline{Z} = \frac{p}{v} = \rho_0 \cdot c_0 \quad (2.2)$$

Dabei sei p der Schalldruck, v die Schallschnelle, ρ_0 die Dichte des und c_0 die Schallgeschwindigkeit in dem Medium. Trifft Schall aus einem Medium mit der Schallkennimpedanz \underline{Z}_1 auf ein Medium mit der Schallkennimpedanz \underline{Z}_2 auf, so kann auf den Reflexionsfaktor \underline{R} an der Angrenzung geschlossen werden. Der Reflexionsfaktor \underline{R} beschreibt das Verhältnis von reflektiertem Schalldruck \underline{p}_r zu einfallendem Schalldruck \underline{p}_e . Bei senkrechtem Schalleinfall gilt:

$$\underline{R} = \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1} = \frac{\underline{p}_r}{\underline{p}_e} \quad (2.3)$$

Für manche Betrachtungen ist es anschaulicher, mit dem Reflexionsgrad ρ zu arbeiten, der das Verhältnis von reflektierter (P_r) und einfallender Leistung P_e beschreibt.

$$\rho = \frac{P_r}{P_e} = |\underline{R}|^2 \quad (2.4)$$

Ebenfalls erwähnenswert ist die folgende Gleichung 2.5 zur einfallswinkelabhängigen Bestimmung des Reflexionsfaktors. Davon ausgehend, dass ein Winkel von $\theta = 0^\circ$ senkrechten Schalleinfall beschreibt, wird unter Berücksichtigung von Gl. 2.4 ersichtlich, dass schräger Schalleinfall immer zu einer Erhöhung des Reflexionsgrades führt. Da eine schrittweise Herleitung der Gleichung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, sei auf [Lerch et al. 2009, S. 55 ff.] verwiesen.

$$\underline{R} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \cos(\theta_1) - \underline{Z}_1 \sqrt{1 - \left(\frac{c_2}{c_1} \sin(\theta_1)\right)^2}}{\underline{Z}_2 \cdot \cos(\theta_1) + \underline{Z}_1 \sqrt{1 - \left(\frac{c_2}{c_1} \sin(\theta_1)\right)^2}} \quad (2.5)$$

Der Sekundärwindschirm, der maßgeblich aus einer Schicht porösen Materials besteht, kann nun als doppelter Impedanzsprung betrachtet werden. Reflexionen haben dabei in zweierlei Hinsicht einen Einfluss auf die Einfügungsdämpfung des Schirms. Zum einen wird die Schalleistung, die ins Schirminnere übertragen wird, neben der Dissipation innerhalb des Schirmmaterials, die für die nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigt werden soll, durch den Reflexionsgrad beim Übergang von der Luft außerhalb des Schirms in das Schirmmaterial und beim Übergang vom Schirmmaterial in die Luft innerhalb des Schirms bestimmt, zum anderen können, insbesondere aufgrund der geometrischen Anordnung des Mikrofons im akustischen Brennpunkt mittig innerhalb der hemisphärischen Schirmkonstruktion, Eigenmoden des Schirminnere, bedingt durch Reflexionen von bereits eingedrunenem Schall an der inneren Schirmwand, einen Einfluss auf die Übertragungseigenschaften haben.

Um aus den Gleichungen 2.3 und 2.4 Anforderungen an einen günstig dimensionierten sekundären Windschirm in seinen Eigenschaften als doppelter Impedanzsprung ableiten zu können, ist es zweckmäßig, den Transmissionsgrad τ als Verhältnis von transmittierter zu eingehender Schalleistung einzuführen:

$$\tau = \frac{P_{\text{aus}}}{P_{\text{ein}}} \quad (2.6)$$

Unter Vernachlässigung von Schalldissipation kann der Transmissionsgrad τ errechnet werden. Nach Gleichung 2.3 und Gleichung 2.4 ergibt sich für in Abbildung 2.3 skizzierte Konstellation:

$$\rho_1 = \left| \frac{\underline{Z}_A - \underline{Z}_L}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_L} \right|^2 = \left| \frac{\underline{Z}_L - \underline{Z}_A}{\underline{Z}_L + \underline{Z}_A} \right|^2 = \rho_2 \quad (2.7)$$

Weiterhin ergibt sich mit Gleichung 2.6 und 2.4 und unter Vernachlässigung von Mehr-

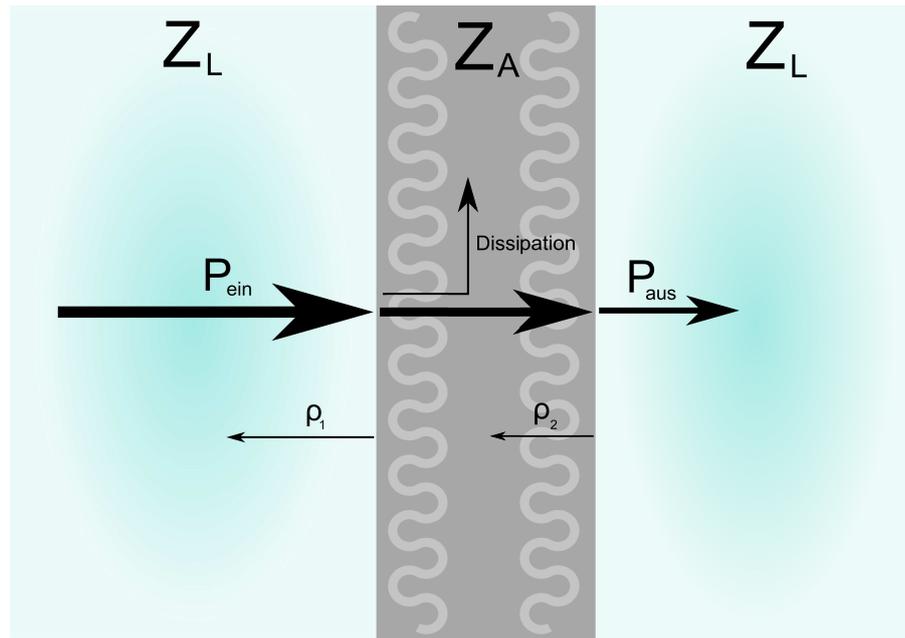


Abbildung 2.3: Skizze: Schallreflexion am Schirm

fachreflexionen:

$$\tau = \frac{P_{\text{aus}}}{P_{\text{ein}}} = (1 - \rho_1)^2 \quad (2.8)$$

Davon ausgehend, dass ein idealer Windschirm keinerlei Einfluss auf den messbaren Schalldruckpegel haben sollte, folgt die Forderung $P_{\text{ein}} = P_{\text{aus}}$. Nach Gleichung 2.6 bedeutet das, dass $\tau = 1$ sein sollte. Um dies zu erfüllen, muss beim idealen Windschirm eine Impedanzanpassung $Z_A = Z_L$ vorliegen.

2.3.2 Verhalten eines hemisphärischen Hohlkörpers

In [Mechel 2012, S.263 ff.] wird ein analytisches Verfahren zur Beschreibung des Schalldrucks am Boden halbkugelförmiger Räume mit schallhartem Boden und einer Begrenzungsfläche mit der normierten Admittanz $Z_0 G$ aufgezeigt. Außerdem wird der ortsabhängige Schalldruckpegel am Boden für verschiedene Beschallungspositionen und -frequenzen beispielhaft grafisch dargestellt. Der Autor stellt dabei fest, dass es im halbkugelförmigen Raum zwangsläufig zu einer Brennpunktbildung kommt und in keinem Fall ein Diffusfeld, entsteht. Bei anderen Raumgeometrien (z. B. quaderförmige Räume) werden ab einer von den Raumabmessungen abhängigen Frequenz annähernd die Bedingungen eines diffusen Schallfelds erfüllt, die besagen, dass die Energiedichte räumlich konstant ist und alle Schallausbreitungsrichtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten. (vgl. [Lerch et al. 2009, S. 226])

Das besondere Verhalten hinsichtlich der Diffusität legt nahe, dass die Hemisphäre als Form für einen Windschirm mit der Forderung nach einem möglichst gleichmäßigen Frequenzgang ungünstig sein könnte.

Abbildung 2.4 zeigt exemplarisch die ausgeprägten Unterschiede beim Schalldruck an verschiedenen Orten am Boden der Hemisphäre.

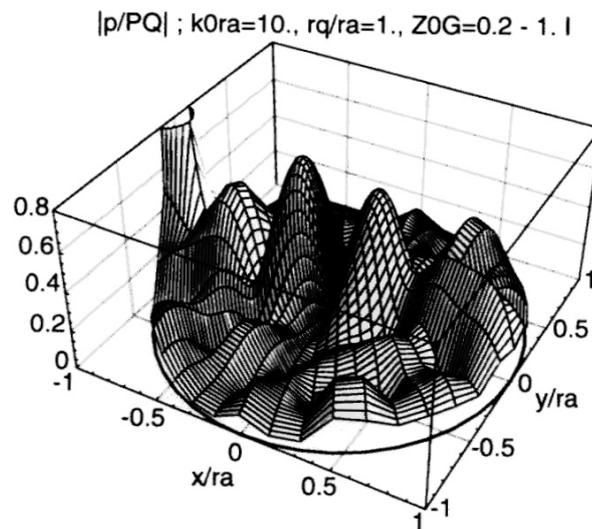


Abbildung 2.4: Schalldruck am Boden einer Kuppel, exemplarisch gewählte Fremdgrafik²

2.4 Der Windschirm als LTI-System

Um den Sekundärwindschirm messtechnisch zu untersuchen, bemüht diese Arbeit den Begriff des linearen, zeitinvarianten Systems (kurz **LTI-System**) aus der Systemtheorie. Bei dem Begriff des Systems handelt es sich allgemein um „ein mathematisches Modell für eine technische oder natürliche Anordnung, die auf Signale an Eingangspunkten, wir bezeichnen sie als Eingangssignale, in definierter Weise mit Signalen an Ausgangspunkten, bezeichnet als Ausgangssignale, reagiert“. [Kreß/Kaufhold 2010, S.148]

Ein System ist also die Beschreibung eines Gefüges, das aus einem oder mehreren Eingangsparametern ein oder mehrere determinierte Ausgangsparameter formt. Im Folgenden soll für die Übertragungseigenschaften eines Systems mit dem Eingangssignal $x(t)$ bzw. $X(\omega)$ und dem Ausgangssignal $y(t)$ bzw. $Y(\omega)$ gelten:

$$y(t) = \mathbf{Op}_t\{x(t)\} \quad \circ \bullet \quad Y(\omega) = \mathbf{Op}_f\{X(\omega)\} \quad (2.9)$$

Das LTI-System ist ein spezielles Modell, das Eigenschaften aufweist, die seine mathematische Darstellung vereinfachen. Dabei muss beachtet werden, dass ein Modell

² Übernommen aus [Mechel 2012, S. 273]. Dargestellt ist die räumliche Verteilung des Schalldrucks am Boden einer hemisphärischen Kuppel normiert auf die Schalleistung der Quelle bei Beschallung mit einer Schallquelle am Boden an Punkt $(-1|0|0)$ bei einer normierten Admittanz $Z_0 \cdot G = 0.2 - j$ und einem Verhältnis von Kuppelradius zu Wellenlänge von 10. Übertragen auf die Abmessungen eines Windschirms mit dem Radius $r_{\text{Schirm}} = 0,225 \text{ m}$ entspricht dies bei einer Schallgeschwindigkeit von $c_0 = 343 \text{ m/s}$ einer Beschallungsfrequenz von ca. 15,2 kHz.

stets die Idealisierung eines komplexen Sachverhalts bedeutet und deshalb in seiner Anwendbarkeit auf die Realität gewisse Grenzen hat. Beim LTI-System werden diese Grenzen durch die Erfüllung der idealisierten Systemeigenschaften durch die reale Konstellation, die abgebildet werden soll, charakterisiert. Im vorliegenden Fall ist die reale Konstellation der Sekundärwindschirm, dessen akustische Eigenschaften beschrieben werden. Um ein System als LTI-System beschreiben zu können, muss es folgende Kriterien erfüllen:

2.4.1 Linearität

Additivität: Ein System ist additiv, wenn gilt:

$$\mathbf{Op}_t\{x_1(t)\} + \mathbf{Op}_t\{x_2(t)\} = \mathbf{Op}_t\{x_1(t) + x_2(t)\} \quad (2.10)$$

Diese Eigenschaft ist auch als **Superpositionsgesetz** bekannt. Auf den Windschirm angewendet setzt dieses voraus, dass mehrere Signalquellen $f_i(t)$, die gleichzeitig den Schirm und das darunterliegende Mikrofon beschallen, zum selben Signal am Mikrofon führen, als wenn identische Windschirme und Mikrofone zur gleichen Zeit unabhängig voneinander von jeweils einer Signalquelle beschallt würden und das Ausgangssignal addiert würde. Den Betrachtungen in Abschnitt 2.3 entsprechend kann angenommen werden, dass dies zumindest dann gilt, wenn die hypothetischen Signalquellen dieselbe relative Position zu den jeweiligen Mikrofonen haben.

Homogenität: Sei c eine Konstante, so wird ein System als homogen bezeichnet, wenn gilt:

$$c \mathbf{Op}_t\{x(t)\} = \mathbf{Op}_t\{c x(t)\} \quad (2.11)$$

Bezogen auf den Windschirm bedeutet das, dass dieser um das Kriterium der Homogenität zu erfüllen, ein leises Signal, das durch den Schirm zum Mikrofon schallt auf gleiche Weise beeinflusst, wie ein lautes Signal. Nach Abschnitt 2.3 liegt die Vermutung nahe, dass dies auf den Windschirm zutrifft.

Kombiniert man beide Kriterien, so ergibt sich, dass ein System genau dann linear ist, wenn gilt:

$$\mathbf{Op}_t\left\{\sum_{i=1}^k c_i x_i(t)\right\} = \sum_{i=1}^k c_i \mathbf{Op}_t\{x_i(t)\} \quad (2.12)$$

Weil die Fourier-Transformierte $F(\omega)$ eines Signals $f(t)$ eine Linearkombination ist (vgl. Abschnitt 2.5.3), lassen sich die zuvor aufgeführten Eigenschaften in den Frequenzbereich übertragen.

2.4.2 Zeitinvarianz

Ein System ist genau dann zeitinvariant, wenn gilt:

$$\mathbf{Op}_t\{x(t - t_0)\} = y(t - t_0) \quad (2.13)$$

Das bedeutet, dass eine zeitliche Verschiebung t_0 des Eingangssignals ausschließlich als zeitliche Verschiebung des Ausgangssignals Einfluss hat. Auf den Schirm bezogen müsste dieser also zu jedem Zeitpunkt die gleiche Einfügungsdämpfung haben. Längerfristig kann davon nicht ausgegangen werden, weil anzunehmen ist, dass Umwelteinflüsse wie Regen, Schnee oder Verschmutzung einen Einfluss auf die Einfügungsdämpfung haben (siehe auch Abschnitt 5.4.5). Während einer einzelnen Einfügungsdämpfungsmessung bewegt sich die zeitliche Varianz jedoch in einem so geringen Maß, dass in guter Näherung von Zeitinvarianz ausgegangen werden kann.

2.4.3 Kausalität und Stabilität

Weiterhin sind Kausalität und Stabilität Voraussetzungen, um ein System unter Ausnutzung der Eigenschaften von LTI-Systemen untersuchen zu können. Für Stabilität im Kontext der Systemtheorie sind je nach Anwendung verschiedene mathematische Definitionen in Umlauf (vgl. [Meyer 2008, S. 71f.]). Stabilität beschreibt dabei die Eigenschaft eines Systems, bei einem Eingangssignal endlicher Amplitude ein Ausgangssignal endlicher Amplitude auszugeben. Da ein Windschirm, wie er in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde, dem Signal keine Energie zuführen kann, ist davon auszugehen, dass das Stabilitätskriterium erfüllt wird.

Kausalität beschreibt, dass ein korrespondierendes Ausgangssignal nie vor Eintreffen des Eingangssignals ausgegeben werden kann. Dieses Kriterium wird von allen bekannten realen Systemen erfüllt, also auch vom Windschirm. Eine gewisse Einschränkung in Hinblick auf Kausalität stellen beim Versuchsaufbau windinduzierte Geräusche an den Mikrofonen dar. Diese treten unabhängig vom Eingangssignal auf und verursachen damit u. U. fehlerhafte Messwerte (vgl. Abschnitt 5.4.3).

2.5 Signalanalyse

Unter der Prämisse, dass Sekundärwindschirme in hinreichender Näherung als LTI-System betrachtet werden können, wird im Rahmen dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, anhand des Eingangs- und Ausgangssignals die Übertragungseigenschaften des Systems „Windschirm“ zu bestimmen. Um ein System zu untersuchen, müssen also Signale analysiert werden. Im folgenden werden Begriffe genannt, die notwendig sind, um die Methode, mit der die Einfügungsdämpfung ermittelt werden soll, nachzuvollziehen. Dabei wird zugunsten von Brevität kaum auf die teilweise sehr umfangreichen Zusam-

menhänge der genannten Begrifflichkeiten eingegangen. Es sei auf die einschlägige Fachliteratur, zum Beispiel [Unbehauen 2002, S. 52 f.] verwiesen.

2.5.1 Mittelwerte und Leistung

In der Signalanalyse werden lineare und quadratische Mittelung unterschieden. Es soll auf lineare Mittelung, die den Gleichanteil eines Signals darstellt, nicht weiter eingegangen werden. Im akustischen Zusammenhang wird der Gleichanteil durch gebräuchliche Messmethoden (Messung des Schall-Wechseldrucks mittels Kondensatormikrofon) nicht erfasst.

Der quadratische Mittelwert $\overline{x^2(t)}$ beschreibt die mittlere Leistung eines Signals $x(t)$.

$$\overline{x^2(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T x^2(t) dt \quad (2.14)$$

2.5.2 Korrelation

$$\psi_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot x(t + \tau) d\tau \quad (2.15)$$

$$\psi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot y(t + \tau) d\tau \quad (2.16)$$

Korrelationsfunktionen $\psi(\tau)$ beschreiben die Ähnlichkeit eines Signals $x(t)$ zu sich selbst (Autokorrelation, Gl. 2.15) oder zu einem anderen Signal $y(t)$ (Kreuzkorrelation, Gl. 2.16) in Abhängigkeit von zeitlicher Verschiebung τ des Signals, mit dem verglichen wird. Die Autokorrelationsfunktion ist gerade und bildet an der Stelle $\tau = 0$ die Wechselleistung des Signals ab. Große Vorteile bietet die Verwendung von Auto- und Kreuzkorrelationsfunktion bei der Analyse von verrauschten Signalen.

2.5.3 Fourier-Transformation

Im Rahmen dieser Arbeit wird in vielfacher Weise Bezug auf spektraltransformierte Signaldarstellungen genommen. Da das umfassende Beschreiben der Zusammenhänge in diesem Themenbereich den Umfang dieser Arbeit sprengen würde, sollen im folgenden Abschnitt lediglich Eigenschaften genannt werden, die im weiteren Verlauf der Arbeit relevant sind.

Die grundlegende Idee ist, Zeitsignale als Summe von phasenverschobenen Cosinus-Signalen mit unterschiedlicher Amplitude vollständig zu beschreiben. Dabei ändert sich der Definitionsbereich der transformierten Funktion vom Zeitbereich in den Frequenzbereich. Diese Darstellungsform ist mathematisch für bestimmte Operationen einfacher zu handhaben als die Beschreibung des Zeitsignals. Während die Wellenform des Zeit-

signals nur eingeschränkte Schlüsse auf die spektrale Zusammensetzung eines Signals erlaubt, kann durch die Darstellung des Betrags der Fouriertransformierten in Abhängigkeit von der Frequenz, das Signal in einer Weise visualisiert werden, die oftmals Schlüsse auf die Signalentstehung zulässt. Abhängig davon, ob das transformierte Signal kontinuierlich oder diskret in Wert und/oder Zeit ist, werden verschiedene Varianten der Fouriertransformation (z.B. diskrete Fouriertransformation **DFT** und Fast Fourier Transformation **FFT**³) und davon abgeleitete Transformationen wie die Laplace- oder Z-Transformation verwendet. Ergebnis dieser Berechnungen sind Spektren, die kontinuierlich oder diskret in Amplitude und/oder Frequenz sein können. Die mathematischen Eigenschaften bleiben jedoch im Wesentlichen gleich.

Die Fouriertransformierte $F(\omega)$ eines allgemeinen Signals $f(t)$ lässt sich errechnen:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.17)$$

Dabei beschreibt der Betrag $|F(\omega)|$ die Amplitude und der Phasenwinkel $\phi_F(\omega)$ (siehe Gl. 2.21) die zeitliche Verschiebung des jeweiligen Frequenzanteils. Die Verschiebung eines Signals im Zeitbereich äußert sich also nicht in dessen Betragsspektrum.

Auf den Anwendungsfall im Rahmen dieses Dokuments bezogen ist das **Parseval'sche Theorem** von großer Bedeutung. Es beschreibt die Beziehung der Energie eines Signals $f(t)$ im Zeitbereich und seiner Fouriertransformierten $F(\omega)$ im Frequenzbereich:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (2.18)$$

2.5.4 Leistungsdichte

Durch Fouriertransformation (vgl. Gl. 2.17) der Autokorrelationsfunktion $\psi_{xx}(\tau)$ ergibt sich nach dem Wiener-Chintschin-Theorem die spektrale Leistungsdichte $\Psi_{xx}(\omega)$. Analog kann ein Leistungsdichtespektrum $\Psi_{xy}(\omega)$ aus der Kreuzkorrelationsfunktion $\psi_{xy}(\tau)$ gebildet werden.

$$\Psi_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{xx}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau = |F(\omega)|^2 \quad (2.19)$$

Dabei wird die Leistung des Signals aufgefächert über den Frequenzbereich dargestellt. Ein großer Vorteil ist, dass die Werte der Auto-Leistungsdichtefunktion stets positiv und reell sind (vgl. [Kreß/Kaufhold 2010, S. 327 f.]).

³ Eine Besonderheit diskreter Varianten der Fouriertransformation ist der diametrale Zusammenhang zwischen Frequenz- und Zeitauflösung. Eine Erhöhung der Frequenzauflösung führt zu einer Verringerung der Zeitauflösung der Spektren und umgekehrt.

2.6 Übertragungsfunktion

2.6.1 Definition und Darstellung der Übertragungsfunktion

Die in Abschnitt 2.4 erwähnte Systemoperation $\mathbf{Op}_t\{\}$ wird im Zeitbereich durch eine Faltung der Zeitfunktion mit der Gewichtsfunktion $g(t)$ beschrieben. Im Frequenzbereich dagegen wird $\mathbf{Op}_f\{\}$ durch eine Multiplikation des Eingangssignals mit einem frequenzabhängigen Faktor $G(\omega)$ mathematisch umgesetzt. Das heißt, ein kontinuierliches System mit dem Eingangssignal $X(\omega)$ und dem Ausgangssignal $Y(\omega)$ kann durch seine Übertragungsfunktion $G(\omega)$, die als Verhältnis von Ausgangssignal zu Eingangssignal definiert ist, vollständig beschrieben werden.

$$G(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (2.20)$$

$G(\omega)$ hat bei dynamischen Systemen (solchen mit zeitverzögernden Eigenschaften) einen komplexen Anteil. Aus diesem ergibt sich die sog. **Phasencharakteristik** $\phi_G(\omega)$, die die zeitliche Verzögerung des Signals durch ein System beschreibt.

$$\phi_G(\omega) = \arctan \frac{\mathbf{Im}(G(\omega))}{\mathbf{Re}(G(\omega))} \quad (2.21)$$

Die Systemeigenschaften hinsichtlich der Veränderung der Signalamplitude werden durch die **Betragscharakteristik** $|G(\omega)|$ beschrieben. Besonders übersichtlich kann $G(\omega)$ also durch die Eulersche Relation dargestellt werden. In dieser Darstellungsweise lässt sich der Einfluss der Systemoperation auf Betrag und Phase ablesen:

$$G(\omega) = |G(\omega)| e^{j\phi_G(\omega)} \quad (2.22)$$

2.6.2 Kaskadierung von Systemen

Für eine Reihenschaltung zweier LTI-Systeme (Abb. 2.5) mit den Übertragungsfunktionen $G_1(\omega)$ und $G_2(\omega)$ mit dem Eingangssignal $X(\omega)$ und dem Ausgangssignal $Y(\omega)$ ergibt sich in Anlehnung an Gl. 2.20 folgender Zusammenhang:

$$Y(\omega) = X(\omega) \cdot G_1(\omega) \cdot G_2(\omega) \quad (2.23)$$

Bei einer Parallelschaltung (Abb. 2.6) folgt aus Gl. 2.10:

$$Y(\omega) = X(\omega) \cdot (G_1 + G_2) \quad (2.24)$$

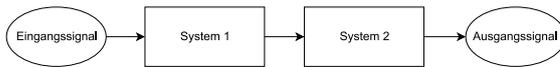


Abbildung 2.5: Systeme in Reihenschaltung

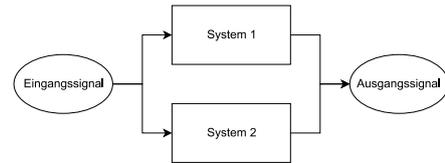


Abbildung 2.6: Systeme in Parallelschaltung

2.6.3 Ermittlung der Übertragungsfunktion

Wie in Abschnitt 2.6.1 erwähnt kann die Charakterisierung eines Systems sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich erfolgen. Dabei kann zu verschiedenen Zeitpunkten mittels Fouriertransformation (vgl. Abschnitt 2.5.3) ein Übergang zwischen den Bereichen vorgenommen werden. Dementsprechend gibt es zur messtechnischen Erfassung einer Übertragungsfunktion verschiedene Möglichkeiten, die je nach Anwendungsfall und den daraus hervorgehenden Rahmenbedingungen mehr oder weniger günstig sein können.

Im Zeitbereich kann beispielsweise die Gewichtsfunktion $g(t)$ dadurch ermittelt werden, dass ein Anregungssignal in ein LTI-System gegeben wird, und das Ausgangssignal mit einer invertierten (punktgespiegelten) Version des Zeitsignals gefaltet wird. Eine weitere Möglichkeit ist, $g(t)$ im Zeitbereich „direkt“ dadurch zu messen, dass das Zeitsignal bei Anregung des Systems durch einen Dirac-Stoß gemessen wird. Durch Fouriertransformation der Gewichtsfunktion $g(t)$ wird im Anschluss die Übertragungsfunktion $G(\omega)$ errechnet. Da jedoch das Generieren eines hinreichend diracartigen Impulses große Ansprüche an die verwendete Signalquelle stellt und sich bezüglich Systembelastung und Störabstand als problematisch erweisen kann, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein anderer Ansatz verfolgt. Dabei erfolgt die Anregung des Systems mit einem weitgehend beliebigen Testsignal, dessen Bandbreite den zu untersuchenden Frequenzbereich abdeckt. Die Ermittlung der Übertragungsfunktion erfolgt grundsätzlich dadurch, dass aus den Fouriertransformierten des Eingangs- und Ausgangssignals die Übertragungsfunktion im Frequenzbereich nach Gl. 2.20 errechnet wird. Anstelle der Fouriertransformierten können mit gewissen Vor- und Nachteilen auch die Auto- bzw. Kreuzleistungsdichtespektren verwendet werden. [Vorländer 2009, S. 564]

Details zum im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Verfahren sind in Abschnitt 3.2 beschrieben.

3 Entwicklung eines Messverfahrens für Sekundärwindschirme

3.1 Anforderungen

In [DIN EN 61400-11, Abschnitt 6.1.5] heißt es wörtlich:

„Bei Verwendung eines zweiten Windschirmes muss dessen Einfluss auf den Frequenzgang dokumentiert werden, und die Messwerte sind entsprechend in Terzbändern zu korrigieren. Ein Kalibrierverfahren für den zweiten Windschirm kann gemeinsam mit Empfehlungen für die Auslegung und Anforderungen an die Einfügungsdämpfung Anhang E entnommen werden.“

Ebendieser Einfluss des zweiten Windschirms auf den Frequenzgang, im Folgenden Einfügungsdämpfung D genannt, soll durch das in diesem Kapitel beschriebene Messverfahren bestimmt werden.

Um Schlüsse auf die Wirkungsweise des Windschirms in seinen (nicht windgeräuschmindernden, sondern nutzsignaldämpfenden) Eigenschaften zu erlauben, ist es von Vorteil, wenn das Messverfahren eine feinere Frequenzauflösung als die in der Norm geforderten Terzen bietet.

Es ist außerdem vonnöten, dass die ermittelte Einfügungsdämpfung reproduzierbar ist. Einschränkungen besteht hinsichtlich Messapparatur und der Messumgebung. Die Maxime ist, bestmögliche Ergebnisse mit bereits verfügbaren Gerätschaften zu erzielen. Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen finden in einer Umgebung statt, die in guter Näherung als Halbfreifeld zu betrachten ist. Da kein Akustiklabor zur Verfügung steht, muss das Messverfahren insoweit unempfindlich gegenüber Störgeräuschen und anderen Umwelteinflüssen sein, als dass es auch im Freien auf dem Parkplatz des Firmengeländes durchgeführt werden kann. Weil die Einfügungsdämpfung von Sekundärwindschirmen sehr spezifisch im Kontext von Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen ermittelt werden soll, bieten sich Möglichkeiten zur Vereinfachung in bestimmten Aspekten. So ist die Ermittlung des Phasengangs der Schirme nicht erforderlich. Ebenfalls ergibt sich eine Einschränkung der möglichen Schalleinfallrichtung. Außerdem sorgt die spektrale Zusammensetzung der Geräusche, die beim Betrieb von Windenergieanlagen gemessen werden, dafür, dass Unsicherheiten in Bezug auf die Einfügungsdämpfung in bestimmten Frequenzbereichen einen geringeren Einfluss auf das Endergebnisse der Schallemissionsmessung haben als in anderen (vgl. Abschnitt 5.5).

3.2 Theoretischer Ansatz

Die Prämisse, dass die zu untersuchende Art von Sekundärwindschirmen, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, die Eigenschaften eines LTI-Systems in hinreichender Weise erfüllt, eröffnet die Möglichkeit, die Einfügungsdämpfung des Schirms in einer Weise zu ermitteln, die vom Vorschlag in Anhang E zu [DIN EN 61400-11] abweicht. Das nachfolgend beschriebene Verfahren wurde mit Hinblick darauf entwickelt, die zuvor genannten Kriterien zu erfüllen und dabei hinsichtlich der Anforderungen an Messgeräte und Messumgebung möglichst anspruchslos zu sein.

Der bezüglich Ausführung und Auswertung simpelste Ansatz zur messtechnischen Bestimmung der Einfügungsdämpfung eines Windschirmes ist das Bilden der Differenz zwischen einer Messung eines wie auch immer gearteten Testsignals ohne Windschirm und einer Messung mit Verwendung des Windschirmes. Dabei kann die Differenz aus den Summenpegeln oder in Filterbändern, wie sie beispielweise als Terzfilter in viele Schallpegelmesser integriert sind, gebildet werden. Jedoch bietet dieses Verfahren nur eine geringe Frequenzauflösung und ist sehr anfällig gegenüber Störgeräuschen sowie zeitlicher Varianz der akustischen Eigenschaften der Signalquelle.

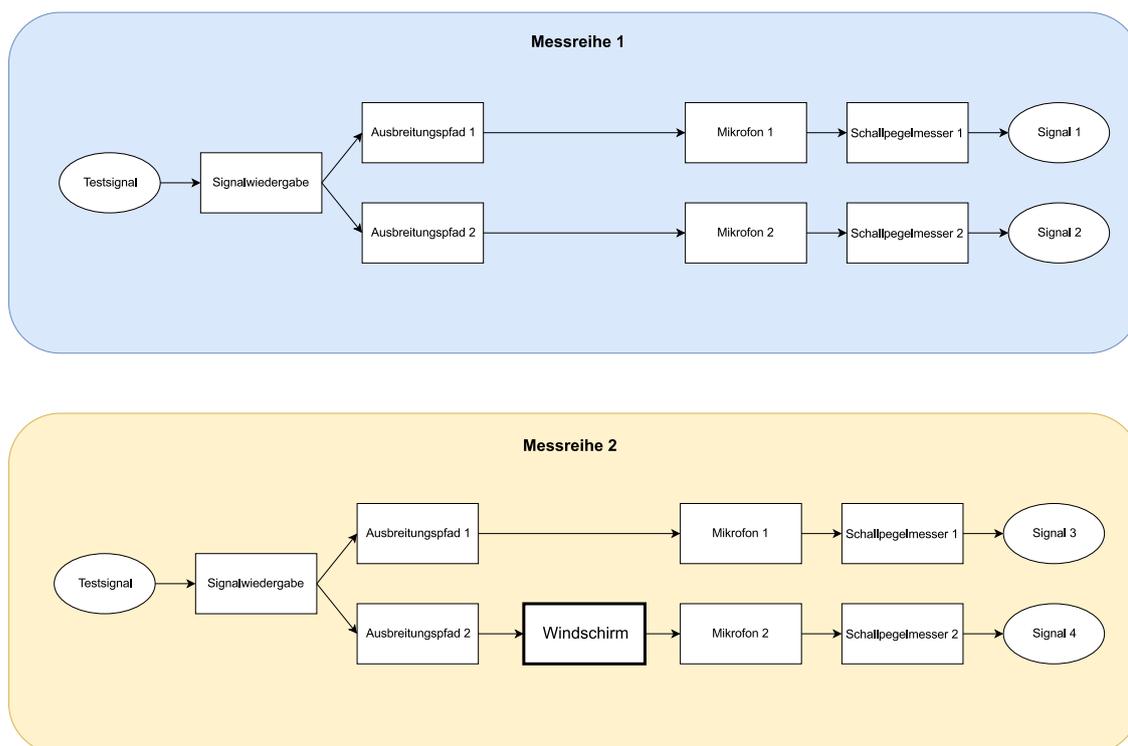


Abbildung 3.1: Konstellation von Signalen und Systemen zur Messung⁴

⁴ Aus den Begrifflichkeiten dieser Grafik sind die Parameter der Gleichungen 3.1 bis 3.4 abgeleitet: Auto-Leistungsdichte des Testsignals Ψ_{TT} und der gemessenen Signale $\Psi_{(11-44)}$, Übertragungsfunktionen G der Signalwiedergabe (Wdg), der Ausbreitungspfade (AP), des Windschirms (WS), der Mikrofone (Mic) und der Schallpegelmesser (SPM).

Es liegt deshalb nahe, dem Messaufbau ein zweites Mikrofon hinzuzufügen. Dieses könnte zur Normierung der Anregungspegel in einem Verfahren, das, wie das soeben genannte, auf der Bildung von Pegeldifferenzen basiert, dienen. Viel geschickter ist es jedoch, die zeitlichen Verläufe des Schalldrucks mittels FFT-Technik auszuwerten. Dazu wird von beiden Mikrofonen mittels eines Schallpegelmessers ein Audiosignal aufgezeichnet. Weiterhin sind zwei Messdurchgänge erforderlich; einer ohne die Verwendung des zu untersuchenden Windschirms (kurz: Prüfobjekt) und einer mit der Verwendung des Windschirms auf einem der Mikrofone.

$$\Psi_{TT}(\omega) \cdot |G_{Wdg}(\omega)|^2 \cdot |G_{AP1}(\omega)|^2 \cdot |G_{MicA}(\omega)|^2 \cdot |G_{SPMA}(\omega)|^2 = \Psi_{11}(\omega) \quad (3.1)$$

$$\Psi_{TT}(\omega) \cdot |G_{Wdg}(\omega)|^2 \cdot |G_{AP2}(\omega)|^2 \cdot |G_{MicB}(\omega)|^2 \cdot |G_{SPMB}(\omega)|^2 = \Psi_{22}(\omega) \quad (3.2)$$

$$\Psi_{TT}(\omega) \cdot |G_{Wdg}(\omega)|^2 \cdot |G_{AP1}(\omega)|^2 \cdot |G_{MicA}(\omega)|^2 \cdot |G_{SPMA}(\omega)|^2 = \Psi_{33}(\omega) \quad (3.3)$$

$$\Psi_{TT}(\omega) \cdot |G_{Wdg}(\omega)|^2 \cdot |G_{AP2}(\omega)|^2 \cdot |G_{WS}(\omega)|^2 \cdot |G_{MicB}(\omega)|^2 \cdot |G_{SPMB}(\omega)|^2 = \Psi_{44}(\omega) \quad (3.4)$$

Um die Begrifflichkeiten zu vereinheitlichen, sei im Verlauf des Textes die Rede von **Mikrofon A** als dem Mikrofon, welches zu keinem Zeitpunkt mit dem zu untersuchenden Windschirm bestückt wird und **Mikrofon B** als dem Mikrofon, welches bei einem der Messdurchgänge mit dem Prüfobjekt bestückt wird. Weiterhin sei **Messreihe 1** der Messdurchgang, bei dem die Wiedergabe des Testsignals von beiden Mikrofonen aufgezeichnet wird, während das Prüfobjekt nicht Bestandteil des Messaufbaus ist, und **Messreihe 2** der Messdurchgang, bei dem die Wiedergabe des Testsignals von beiden Mikrofonen aufgezeichnet wird, während Mikrofon B mit dem Prüfobjekt bestückt ist.

Von den aufgezeichneten Signalen wird jeweils das Auto-Leistungsdichtespektrum Ψ_{xx} gebildet. In Abbildung 3.1 und den korrespondierenden Gleichungen 3.1 bis 3.4 ist skizziert, wie der Messaufbau in zusammenhängenden Signalen und Systemen aufgefasst werden kann. Die Nennung konkreter Systeme wie dem „Ausbreitungspfad“ ist dabei als exemplarisch für allerlei Einflüsse auf den Signalweg zu sehen. Die Kategorisierung der Einflüsse ist nicht von Bedeutung, wichtig ist nur, dass diese in hinreichender Weise als LTI-System behandelt werden können. Unter Ausnutzung der in Abschnitt 2.6.2 aufgeführten Eigenschaften kann nach Gleichung 3.5 der Betrag $|G_{WS}(\omega)|$ der Übertragungsfunktion des Prüfobjektes berechnet werden.

$$|G_{WS}(\omega)| = \sqrt{\frac{\Psi_{11}(\omega)}{\Psi_{22}(\omega)} \cdot \frac{\Psi_{44}(\omega)}{\Psi_{33}(\omega)}} \quad (3.5)$$

$|G_{WS}(\omega)|$ kann als Maß für die Einfügungsdämpfung des Schirms interpretiert werden. Allerdings führt der Begriff „Dämpfung“ dazu, dass positive Dämpfungswerte mit $|G(\omega)| < 1$ assoziiert werden.

Zur Pegelschreibweise der Einfügungsdämpfung $D(\omega)$ wird deshalb der Kehrwert der Übertragungsfunktion logarithmiert:

$$D(\omega) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{|G_{WS}(\omega)|} \right) \text{ dB} \quad (3.6)$$

In der Praxis erfolgt die Aufzeichnung der Signale S1 bis S4 in zeit- und wertdiskreter Form. Daraus folgt, dass die Dämpfungswerte frequenz- und wertdiskret sind. Da das Ziel nach Abschnitt 3.1 ist, Korrekturwerte als Terzpegel anzugeben, hat eine Summation der mittels FFT ermittelten Dämpfungswerte konstanter absoluter Bandbreite in Terzwerte konstanter relativer Bandbreite zu erfolgen. Weil die Anzahl der zu summierenden FFT-Werte pro Terz nicht konstant ist, muss zunächst eine logarithmische Wichtung erfolgen, bevor die gewichteten FFT-Werte, die innerhalb der Grenzfrequenzen der jeweiligen Terz liegen, per energetischer Addition zum Terzpegel zusammengefasst werden.

Weil die Signalauswertung mittels der spektralen Auto-Leistungsdichten erfolgt, entfallen jegliche Informationen über die Phasencharakteristik des Prüfobjekts. Bezogen auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit sind diese nicht essentiell. Ein ausschlaggebender Grund für die Vernachlässigung ist zudem, dass eine präzise Synchronisierung der beiden Schallpegelmessers unverhältnismäßigen Aufwand nach sich ziehen würde.

Um möglichst repräsentative Messergebnisse zu erhalten, werden je Messreihe mehrere Sinus-Gleittonsignale aufgezeichnet, die eine Mittelung der Ergebnisse erlauben. Auf die Zusammensetzung des Testsignals wird in Abschnitt 3.4.2 genauer eingegangen. Weiterhin erfolgt eine Mittelung über Messungen, bei denen aus einem unterschiedlichen Winkel beschallt wird.

3.3 Beobachtungen in Vorversuchen

Im Zuge der Entwicklung eines geeigneten Messverfahrens zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung von Sekundärwindschirmen wurden Vorversuche durchgeführt. Eine erwähnenswerte Beobachtung, die im Rahmen dieser Versuche gemacht wurde, ist die, dass die Einfügungsdämpfung der sekundären Windschirme im diffusen Schallfeld stets geringer war als im Halbfreifeld. Weil bei Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen immer näherungsweise Halbfreifeldbedingungen vorhanden sind, fiel die Entscheidung, schwerpunktmäßig die anwendungsrelevante Einfügungsdämpfung im Freien zu untersuchen. Es wurde von weiteren Versuchen in geschlossenen Räumen abgesehen. Eine Erklärung für die Unterschiede im Verhalten des Schirms ist möglicherweise in dem in Abschnitt 4.3 postulierten Einfluss von Eigenmoden innerhalb des Schirms auf die Einfügungsdämpfung zu suchen.

Eine weitere Beobachtung aus den Vorversuchen, die bei der Gestaltung des nachfolgend beschriebenen Messverfahrens berücksichtigt wurde, waren signifikante Änderungen im Verlauf der Einfügungsdämpfung bei hohen Frequenzen bei Änderung des Schalleinfallswinkels (vgl. Abschnitt 4.3.2).

3.4 Signalakquise

3.4.1 Messaufbau

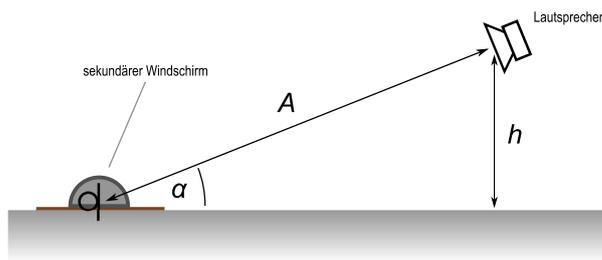


Abbildung 3.2: Darstellung des Messaufbaus, Seitenansicht

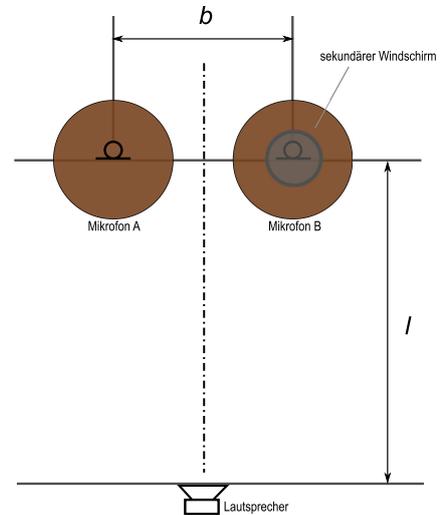


Abbildung 3.3: Darstellung des Messaufbaus, Vogelperspektive

Der Messaufbau erfolgt in einer Umgebung mit freier Schallausbreitung. Zur Messung der Einfügungsdämpfung von Sekundärwindschirmen werden zwei Mikrofone, deren Signal von Schallpegelmessern aufgezeichnet wird, auf schallharten Platten, wie sie in [DIN EN 61400-11, Abschnitt 6.1.5] beschrieben sind, platziert.

Die Position der Mikrofone befindet sich nahe der akustischen Hauptachse eines Lautsprechers, der zur Testsignalwiedergabe dient. Dabei haben beide Mikrofone den gleichen Abstand zur Signalquelle (vgl. Abb. 3.2 und Abb. 3.3). Durch Variation der Entfernung l zwischen der Achse, auf der die Mikrofone liegen und der Signalquelle werden verschiedene Schalleinfallswinkel untersucht. Zusammen mit dem Abstand b der Mikrofone voneinander kann nach dem Satz des Pythagoras der Abstand A zwischen Mikrofonen und Signalquelle errechnet werden:

$$A = \sqrt{l^2 + h^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (3.7)$$

Daraus folgt für den Schalleinfallswinkel α :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h}{A}\right) \quad (3.8)$$

Es muss sichergestellt werden, dass die Signalwiedergabekette aus Lautsprecher und Endstufe das Testsignal über die gesamte zu untersuchende Bandbreite mit ausreichender Lautstärke wiedergibt. Je größer der Abstand zwischen Lautsprecher und Mikrofonen ist, desto leistungsfähiger muss die Wiedergabekette sein. Bei den Messungen

im Rahmen dieser Arbeit wurde eine 18W-Endstufe gepaart mit einem Zwei-Wege-Lautsprecher verwendet. Es erwies sich als notwendig, diese mit maximaler Aussteuerung zu betreiben.

3.4.2 Testsignal

Für die in Abschnitt 3.2 beschriebene Analyseverfahren muss über den zu untersuchenden Frequenzbereich eine Anregung erfolgen, sodass aus den Signalen der Mikrofone die Übertragungsfunktion ausgewertet werden kann. Eine breitbandige Anregung kann dabei durch Impuls-, Rausch- oder Gleittonsignale erfolgen. Die Wahl bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen fiel auf Sinus-Gleittonsignale⁵, im folgenden **Sweep** genannt. Der Vorteil der Anregung durch Sweeps liegt darin, dass bei gleicher Wiedergabehardware ein besserer Signal-Rausch-Abstand als bei anderen Formen der Anregung erreicht werden kann und dass sie für Entwicklung von experimentellen Auswertungsalgorithmen geeignet sind. Außerdem ist bei Inaugenscheinnahme der gemessenen Zeitsignale eine erste Plausibilisierung der Datenbasis möglich.

Im Vorfeld wurde als Ziel definiert, die Einfügungsdämpfung im Bereich von 50Hz bis 10000 Hz zu bestimmen. Um die Terzen nach [DIN EN ISO 266], deren Mittenfrequenzen in diesen Bereich fallen, untersuchen zu können, läuft der Sweep von 42Hz bis 11500 Hz.

Nach Vorversuchen unter Realbedingungen erwies es sich aufgrund der spektralen Zusammensetzung des am Messort vorhandenen Störgeräusches (vgl. Abbildung 3.5) als günstig, anstelle eines logarithmisch die Frequenz ändernden Sweeps, der zwar gute Aussteuerung bei tiefen Frequenzen bietet, aber zu hohen Frequenzen an Leistung verliert, oder eines linearen Sweeps, der bei tiefen Frequenzen nicht genug Störabstand bot, ein Hybrid aus beiden Verfahren zu nutzen. Durch lautere Signalwiedergabe wird der Störabstand über den gesamten Frequenzbereich verbessert. Jedoch wird die Signallautstärke limitiert durch die Eigenschaften des Wiedergabesystems sowie die Leisendfähigkeit Unbeteiligter, die sich in der Nähe des Messortes aufhalten.

Das Signal, das für die Messungen verwendet wird, setzt sich aus einem Rechteckimpuls, der später zur Synchronisierung der Signale beider Schallpegelmesser verwendet werden kann (vgl. Abschnitt 3.5.1), und vier Sweeps unterschiedlicher Gesamtdauer, 0,5s, 2s, 5s und 1,2s, zusammen. Das Verhältnis der Dauer des logarithmischen Teils des Sweeps zur Dauer des linearen Teils beträgt jeweils etwa $1/3$. Um die Auswertung zu vereinfachen, beginnen die Signale jeweils 10s bzw. 20s nach Beginn des vorhergegangenen Signals. Eine verzerrungsfreie Signalwiedergabe bei möglichst hoher Aussteuerung wird dadurch gewährleistet, dass die Amplitude der Sweeps minimal kleiner ist als die digitale Maximalamplitude.

⁵ Sweeps (teilweise auch als Chirps bezeichnet) sind sinusartige Signale konstanter Amplitude, deren Frequenz sich kontinuierlich ändert. Ein Vorteil dieser Signalform liegt darin, dass über das Variieren des Frequenzinkrements Testsignale generiert werden können, die trotz konstanter Amplitude eine angepasste Energiegewichtung haben (vgl. [Vorländer 2009, S. 561 f.]).

In Abbildung 3.4 wird ein Sweep mit 2 s Länge, wie er für die Messungen Verwendung fand, visualisiert. Für die FFT wurde eine Fensterlänge von 1024 Samples verwendet, die Fensterung erfolgte mittels Hanning-Fenster, die Überlappung beträgt 50 %.

Es ist zu erkennen, dass die Wiedergabefrequenz im tief-frequenten Bereich bis 0,75 s logarithmisch steigt und dann in einen linearen Verlauf übergeht. Zum Zeitpunkt des Übergangs ist eine vertikale Linie im Spektrum-Zeit-Verlauf zu erkennen.

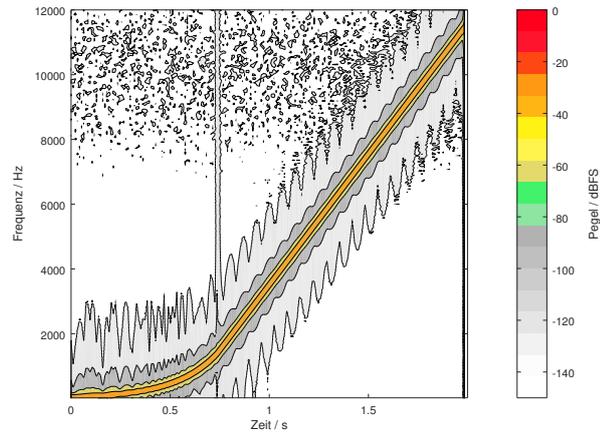


Abbildung 3.4: Darstellung eines Sweepsignals

In Abbildung 3.5 ist ein Zeitabschnitt mit typischem Fremdgeräusch am Messort dargestellt. Für die FFT wurde eine Fensterlänge von 1024 Samples verwendet, die Fensterung erfolgte mittels Hanning-Fenster, die Überlappung beträgt 50 %.

Es ist ersichtlich, dass das Fremdgeräusch seinen Hauptanteil zu den tiefen Frequenzen hin hat. Durch subjektive Beurteilung konnten eine nahegelegene Bundesstraße sowie die Lüftungsanlage einer benachbarten Lackiererei als für das Fremdgeräusch maßgebliche Schallquellen identifiziert werden. Der mittlere Abwertete Fremdgeräuschpegel lag während den Messungen typischerweise zwischen 45 dB(A) und 55 dB(A).

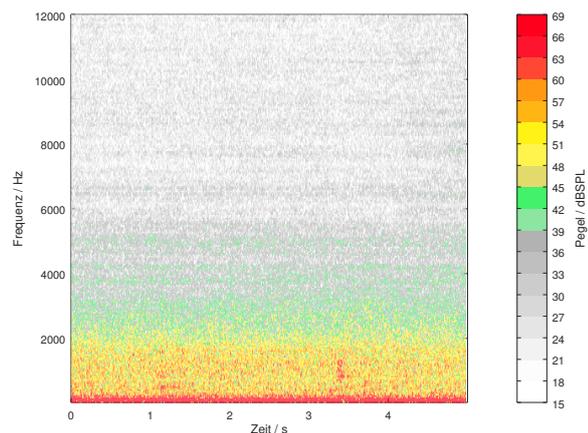


Abbildung 3.5: Fremdgeräusch, typisch

3.4.3 Durchführung der Messung

Ablauf der Schallmessung

Zur Messung der Einfügungsdämpfung werden pro geometrischer Konstellation (Abstand und Höhe des Lautsprechers) zwei Messreihen durchgeführt. Dabei befindet sich nur bei **einer** der beiden Messreihen der zu untersuchende Windschirm auf einem der Mikrofone. Nachdem der Messaufbau nach Abschnitt 3.4.1 aufgebaut ist, werden zunächst beide Schallpegelmesser kalibriert. Bei den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten geeichten Schallpegelmesser der Genauigkeitsklasse 1 nach [DIN EN 61672-1] handelt es sich Geräte vom Typ „Norsonic Nor140“, die auf 113,8 dB bei einer Frequenz von 1000 Hz kalibriert werden. Die Kalibrierung ist für die Messmethode, die in Abschnitt 3.2 beschrieben wurde, nicht zwingend erforderlich, hilft aber bei der Analyse möglicher Fehlerquellen bei manueller Betrachtung der Zeitsignale, falls die Messergebnisse unplausibel erscheinen. Im Messprotokoll, das in Anhang C beigelegt ist, werden beide Kalibrierwerte vermerkt. Nachdem die Daten zur geometrischen Konfiguration, der Zuordnung der Schallpegelmesser zu den Mikrofonpositionen, der Mikrofonposition, auf die der Windschirm aufgelegt wird, und allgemeine Daten wie Zeitpunkt der Messung und meteorologische Bedingungen notiert sind, kann mit der Durchführung von Messreihen begonnen werden. Ob dabei zuerst mit dem Windschirm auf einer der Platten oder ohne den Windschirm begonnen wird, hat keinen Einfluss auf das Endergebnis, muss aber bei der Protokollführung beachtet werden. Davon ausgehend, dass sich zunächst kein Windschirm auf den Mikrofonen befindet, gestaltet sich der Ablauf der beiden Messreihen wie folgt:

Es wird die Audioaufzeichnung bei beiden Schallpegelmessern gestartet. Anschließend wird das Testsignal über den Lautsprecher wiedergegeben. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine objektive Aussage über den Einfluss des Fremdgeräusches getroffen werden kann, ist eine möglichst hohe Wiedergabelautstärke zweckdienlich. Nach vollständiger Wiedergabe des Testsignals ist die Audioaufzeichnung der Schallpegelmesser zu stoppen und der Name der soeben geschriebenen Datei ins Protokollblatt einzutragen. Nun wird der Windschirm entsprechend dem Protokollblatt konzentrisch auf einem der Mikrofone platziert und die zuvor beschriebene Routine wiederholt.

Aus den so gewonnenen Daten kann die Einfügungsdämpfung des Windschirms für diese eine Konstellation ausgewertet werden. Da der Einfallswinkel α des Schalls (siehe Abschnitt 4.3) einen signifikanten Einfluss auf die Einfügungsdämpfung hat, müssen zum Bilden eines repräsentativen Mittelwerts mehrere dieser Messreihen mit variierenden Lautsprecherpositionen durchgeführt werden.

Wahl der Lautsprecherpositionen

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben beträgt der Einfallswinkel des Anlagengeräusches bei Schallmessungen an Windenergieanlagen unter der Annahme, dass die Anlage mit hinreichender Genauigkeit als Punktschallquelle an der Gondel betrachtet werden kann, zwischen 25° und 40° .

Das Abstrahlverhalten von Windenergieanlagen ist dabei in der Realität weitaus komplexer, so tragen zum Beispiel die Rotorblätter signifikant zur Schallabstrahlung bei (vgl. [Hau 2006, S. 541 ff.]). Weil die Gestalt der zu vermessenden Windenergieanlagen eine Vielzahl von Schalleinfallswinkel bedingen kann, ist die Wahl der Lautsprecherpositionen nur der Vereinheitlichung von Messungen dienlich. Das in [DIN EN 61400-11, Anhang E.4] informativ beschriebene Messverfahren zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung sekundärer Windschirme sieht Messungen mit 3 Lautsprecherpositionen vor:

Tabelle 3.1: Lautsprecherpositionen nach [DIN EN 61400-11, Anhang E.4]

Entfernung l / m	Höhe h / m	Abstand A / m	Einfallswinkel α / $^\circ$
4,8	4	6,2	40
6	4	7,2	34
7,2	4	8,2	29

In Vorversuchen wurde beobachtet, dass die Einfügungsdämpfung vom Einfallswinkel α abhängt und der Abstand A eine nur eine untergeordnete Rolle spielt. Es erschien nicht sinnvoll, die in der Norm vorgeschlagenen Lautsprecherpositionen beizubehalten, weil es mit großem Aufwand verbunden ist, einen Lautsprecher in 4 Meter Höhe zu positionieren und auszurichten. Außerdem erfordert der große Abstand A zwischen Lautsprecher und Mikrofonen eine hohe Wiedergabelautstärke. Um den logistischen Aufwand zu minimieren, wurde für die Versuchsreihen, die im Rahmen der Bachelorarbeit durchgeführt wurden, von einer Lautsprecherhöhe von $h = 4$ m abgesehen und für die Messungen zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung nach verschiedenen Vorversuchen angepasste Lautsprecherpositionen definiert. Die Schalleinfallswinkel unterscheiden sich hierbei von denen beim in der Norm vorgeschlagenen Verfahren, um auch den Einfluss auf Schall zu berücksichtigen, der beispielweise von Rotorblattspitzen abgestrahlt wird. Zusätzlich kann wegen der größeren Spreizung der Einfallswinkel der Einfluss selbiger in den Messergebnissen deutlicher identifiziert werden.

Tabelle 3.2: Angepasste Lautsprecherpositionen

Lautsprecherposition	Entfernung l / m	Höhe h / m	Breite b / m	Abstand A / m	Einfallswinkel α / $^\circ$
1	2,5	2,50	1	3,6	44
2	3,0	2,20	1	3,8	35
3	3,5	1,85	1	4,0	27

3.5 Auswertung der Messdaten

3.5.1 Manuelle Unterteilung der Zeitsignale

Vor der weitergehenden Verarbeitung müssen zunächst die Audioaufzeichnungen aufbereitet werden. Pro Lautsprecherkonstellation wurden insgesamt vier Dateien aus zwei Messreihen aufgezeichnet. Aus den Dateien werden (sofern das Testsignal nach Abschnitt 3.4.2 verwendet wurde) die jeweils vier Sweeps mit möglichst wenig Fremdgeräuschanteil ausgeschnitten. Dabei ist darauf zu achten, dass die vier Dateien, die Sweeps gleicher Dauer enthalten, aufs Sample genau gleich groß sind. Ergebnis der Unterteilung sind 16 Dateien, die jeweils ein aufgezeichnetes Sweepsignal enthalten. Durch sinnvolle Dateibenennung kann die Entstehung des enthaltenen Signals nachvollzogen werden. Eine mögliche Namenssyntax ist in Abbildung 3.6 dargestellt:

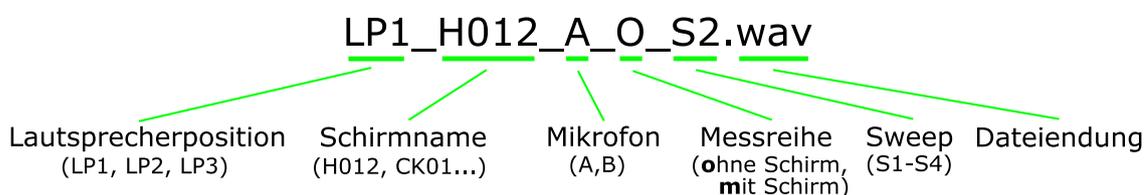


Abbildung 3.6: Benennungssystem für Signaldateien

Da in den von den Schallpegelmessern aufgezeichneten Dateien Frequenzanteile enthalten sind, deren Periodendauer größer ist als die manche der Ausschnitte, kann durch diese ein Gleichanteil in den Ausschnitten verbleiben, der im weiteren Verlauf der Auswertung zu Fehlern bei der Darstellung tiefer Frequenzen führt. Es ist deshalb sinnvoll, alle Audiofiles mit einem Hochpassfilter zu bearbeiten. Ein Butterworthfilter zweiter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 30 Hz hat sich als geeignet erwiesen, diesem Verhalten entgegenzuwirken.

3.5.2 Signalanalyse und Aufbereitung der Ergebnisse

Zur Auswertung mit dem in Anhang B dargestellten Skript, das mit GNU Octave auszuführen ist, werden die Signal 1 bis 4 zuzuordnenden Audiodateien vom Benutzer deklariert. Bei Ausführung des Skripts wird nach dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Verfahren die Dämpfung des Schirms errechnet und über der Frequenz grafisch dargestellt. Die Fensterlänge der FFT kann dabei nach individuellen Bedürfnissen angepasst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle Messungen mit einer Fensterlänge von 16384 Samples ausgewertet; die Frequenzauflösung beträgt daher ca. 2,9 Hz. Um Terzwerte zu erhalten, wird im Anschluss ein (ebenfalls im Anhang beigelegtes Skript) ausgeführt. Dieses stellt die Einfügungsdämpfung pro Terz grafisch in einem Balkendiagramm dar und legt die numerischen Werte in einer Excel-Tabelle ab.

Der eben beschriebene Prozess wird für alle drei weiteren Sweeps dieser Lautsprecherposition sowie für alle weiteren Lautsprecherpositionen wiederholt. Durch energetische Mittelung der terzabhängigen Dämpfungspegel werden Mittelwerte je Lautsprecherposition und ein Mittelwert je Terz über alle Positionen, welcher als der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Korrekturwert interpretiert werden kann, sowie statistische Kenngrößen gebildet.

4 Messungen an Windschirmen

Im Kontext dieser Arbeit werden Messungen zu zweierlei Zweck durchgeführt: Zum einen gilt es, die Brauchbarkeit des in Abschnitt 3 beschriebenen Verfahrens zu dokumentieren, zum anderen soll das Verhalten der vorhandenen Sekundärwindschirme untersucht werden. Dabei gilt das Augenmerk sowohl dem Dämpfungsverhalten der Schirme unter verschiedenen klimatischen Bedingungen, als auch der grundsätzlichen Wirkungsweise von hemisphärischen Sekundärwindschirmen. Es sollen Aussagen über die Verwendbarkeit der konkreten Schirme für Schallmessungen nach Abschnitt 2.1 und über generelle Eigenschaften des untersuchten Schirmtypus getroffen werden.

4.1 Beschreibung der untersuchten Windschirme

4.1.1 DELTA-Windschirme H012 und H101

Zwei kommerziell angebotene Sekundärwindschirme der dänischen Firma DELTA waren während der Bearbeitungszeit des vorliegenden Projektes vorhanden. Diese wurden mit Kalibrierzertifikaten geliefert, in denen der Hersteller die nach dem im Anhang E zu [DIN EN 61400-11] beschriebenen Verfahren ermittelte Einfügungsdämpfungen nennt. Die Windschirme bestehen aus einem halbkugelförmigen, vernickelten Stahlgestell, das mit einem textilen Material bezogen ist (vgl. Abb. 4.2). Dieses Material besteht aus einer innen liegenden Stoffschicht, an deren Außenseite etwa zwei Zentimeter lange Kunsthaare befestigt sind, die eine fellartige Oberfläche bilden (vgl. Abb. 4.3). Der Bezug liegt dicht am Gestell an und bildet auf diese Weise präzise die hemisphärische Formgebung ab. Weil Windschirm H012 und Windschirm H101 morphologisch große Ähnlichkeit aufweisen, ist darauf verzichtet worden, in den nachfolgenden Abbildungen 4.1 bis 4.3 Bilder beider Schirme darzubieten. Die einzigen Unterschiede zwischen beiden Schirmen bestehen in marginalen Abweichungen bei Schnittmuster des Bezugs und Gestellkonstruktion.

4.1.2 Normgerechter Eigenbau-Windschirm CK01

Auf Basis eines der Stahlgestelle der DELTA-Windschirme wurde mittels eines selbstentwickelten Bezugs ein eigener Windschirm hergestellt. Dieser orientiert sich streng an den Empfehlungen nach [DIN EN 61400-11]. Als Bezugsmaterial wurde ein offenporiger Polyurethan-Schaumstoff gewählt. Dieser erfüllt mit einer Porendichte von 20 ppi und einer Schichtdicke von 2 cm die normative Empfehlung (vgl. Abb. 4.6). Der Schaumstoff wurde zu einer hemisphärischen Hülle vernäht. Um möglichst homogene Übergänge zu schaffen, wurden die einzelnen Schaumelemente entlang der Meridiane abgefast, so-



Abbildung 4.1: Windschirm
H012,
Gesamtansicht



Abbildung 4.2: Windschirm
H012,
Detail:
Innenansicht



Abbildung 4.3: Windschirm
H012,
Detail:
Oberfläche

dass eine Überlappung im Bereich der Naht vorhanden ist. Schlusselement und Saum wurden mittels überwendlicher Naht auf Stoß befestigt. Auch wenn die Herstellung des Schirms unter großer Sorgfalt erfolgte, muss vermerkt werden, dass CK01 ein höheres Maß an Formtoleranz besitzt als die Schirme H012 und H101. Dies ist sowohl auf die mechanischen Eigenschaften des Materials als auch auf die Verarbeitung zurückzuführen.



Abbildung 4.4: Windschirm
CK01,
Gesamtansicht



Abbildung 4.5: Windschirm
CK01,
Detail:
Innenansicht



Abbildung 4.6: Windschirm
CK01,
Detail:
Schichtdicke

4.2 Messreihen

Um eine Aussage über die Korrektheit des Messverfahrens nach Abschnitt 3 treffen zu können, bietet es sich an, zusätzlich zu der Vermessung von Sekundärwindschirmen Messreihen mit einem bekannten wahren Wert im Sinne der Metrologie durchzuführen. Deshalb wurden zu verschiedenen Zeitpunkten Messungen durchgeführt, bei denen kein Prüfobjekt auf dem Mikrofon platziert wurde. Die gemessene Einfügungsdämpfung hat in solch einem Fall für alle Frequenzen null zu betragen. Die Ergebnisse dieser Mes-

sungen können dazu genutzt werden, einzuschätzen, inwieweit das genutzte Messverfahren zu plausiblen Ergebnissen führt.

Weiterhin wurden die Einfügungsdämpfung der Windschirme aus Abschnitt 4.1 an verschiedenen Tagen ermittelt. Aus diesen Daten können Aussagen über Quantität der jeweiligen Einfügungsdämpfung, über die Varianzen der Dämpfungsmaße, die zu verschiedenen Zeitpunkten und unter verschiedenen Bedingungen ermittelt wurden, und über qualitative Eigenschaften beziehungsweise wiederkehrende Muster in Abhängigkeit verschiedener Bedingungen abgeleitet werden.

Da bei der Durchführung der Messungen eine große Menge an Daten angefallen ist, soll im Folgenden anstelle einer sequentiellen Diskussion aller gewonnenen Dämpfungsverläufe, die auf große Redundanz und mangelhafte Übersichtlichkeit hinauslaufen würde, eine exemplarische Betrachtung bestimmter Messergebnisse erfolgen, mithilfe derer Aussagen über relevante Sachverhalte getroffen werden können.

4.3 Betrachtung der Messergebnisse

4.3.1 Einfluss der Schirmpositionierung

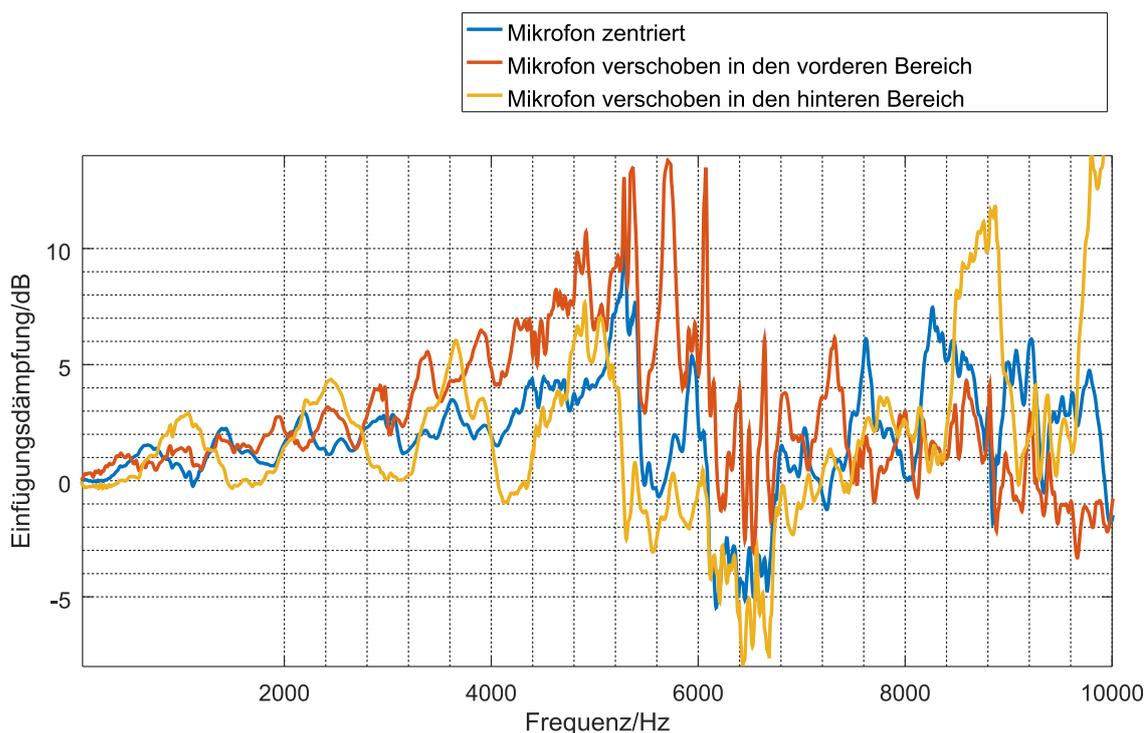


Abbildung 4.7: Einfügungsdämpfung von Schirm H012 in Abhängigkeit der Frequenz, verschiedene Mikrofonpositionen unter dem Sekundärwindschirm, Schalleinfallswinkel: $\alpha = 24^\circ$

In Abbildung 4.7 sind die Einfügungsdämpfungskurven dreier Messreihen dargestellt, bei denen bei konstanter Position der Testsignalquelle unterschiedliche Mikrofonpositionen innerhalb des Schirms gewählt wurden. Dabei wurde die Schalleinfallrichtung

als Referenz genutzt. Der „vordere Bereich“ beschreibt also die Hälfte der Grundfläche des Schirms, der bei der Messung zum Lautsprecher hingewandt ist. Der „hintere Bereich“ beschreibt analog dazu die dem Lautsprecher abgewandte Hälfte. Die verschobenen Mikrofonpositionen lagen dabei dabei auf der Schalleinfallssachse jeweils ein Viertel des Schirmdurchmessers vom Mittelpunkt entfernt. Die Beschallung erfolgte mit einem Einfallswinkel von $\alpha = 24^\circ$, weil zum Zeitpunkt der Messung noch keine Lautsprecherbefestigungsvorrichtung vorhanden war, mit der höhere Winkel hätten erreicht werden können.

Der Verlauf der Kurven ist bis zu einer Frequenz von ca. 5 kHz tiefpass- und kammfilterartig. Es sei auf die lineare Skalierung der Frequenzachse hingewiesen. Evident ist ebenfalls, dass in dem o.g. Frequenzbereich die Extrema der einzelnen Dämpfungsverläufe jeweils in einem annähernd konstanten Frequenzabstand auftreten. Dieser beträgt für die Maxima der Einfügungsdämpfung des Windschirms mit zentriertem Mikrofon ca. 740 Hz, für die Messreihe mit dem Mikrofon im vorderen Bereich ca. 500 Hz und für die Messreihe mit dem Mikrofon im hinteren Bereich ca. 1200 Hz. Der Wertunterschied zwischen lokalen Extrema des Kurvenverlaufs erscheint umso größer, je größer die Bandbreite der Kämme ist. Der Amplitudenhub nimmt bei allen Messreihen zu hohen Frequenzen hin zu.

Bei ca. 5,5 kHz bricht bei allen drei Messreihen das zuvor beschriebene Schema ab und die Kurven durchlaufen einen Bereich negativer Einfügungsdämpfung bei ca. 6300 Hz. Ab ca. 7000 Hz verläuft die Einfügungsdämpfung an allen Positionen weitgehend im positiven Bereich und die Kurven erscheinen unkorreliert.

In Abbildung 4.8 sind die zu den Kurven aus Abbildung 4.7 korrespondierenden Terzwerte dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Terzdarstellung logarithmisch skaliert ist. Mit steigender Terzmittenfrequenz wird der Terzwert also aus mehr FFT-Werten errechnet, was sich optisch in einer Glättung des Verlaufs äußert. Die einzelnen Kurvenverläufe unterscheiden sich signifikant voneinander. Besonders stark divergieren die Werte bei 10 kHz. Der kammfilterartige Verlauf der Dämpfung lässt sich in der Terzdarstellung bestenfalls noch erahnen, ist jedoch nicht so ersichtlich wie in FFT-Darstellung. Auffällig ist ein paralleler Verlauf der Kurven bis zu einer Terzmittenfrequenz von 250 Hz, bei dem die Einfügungsdämpfung bei zentriertem Schirm in guter Näherung 0 dB beträgt, und bei den dezentralen Mikrofonpositionen einen Offset von ca. 0,2 dB bzw. $-0,2$ dB hat.

Die zuvor beschriebenen Besonderheiten im Verlauf der Dämpfungskurven deuten auf die Ausprägung von Eigenmoden innerhalb des Sekundärwindschirms hin. Insbesondere das kammfilterartige Verhalten im Frequenzbereich unterhalb von 5 kHz legt nahe, dass die geometrischen Gegebenheiten einen Einfluss auf die Qualität des Kurvenverlaufes haben.

Die Extrema im Kurvenverlauf bis ca. 5 kHz können mit den Schirmabmessungen in Verbindung gebracht werden. In Tabelle 4.1 werden die aus dem in Abbildung 4.7 darge-

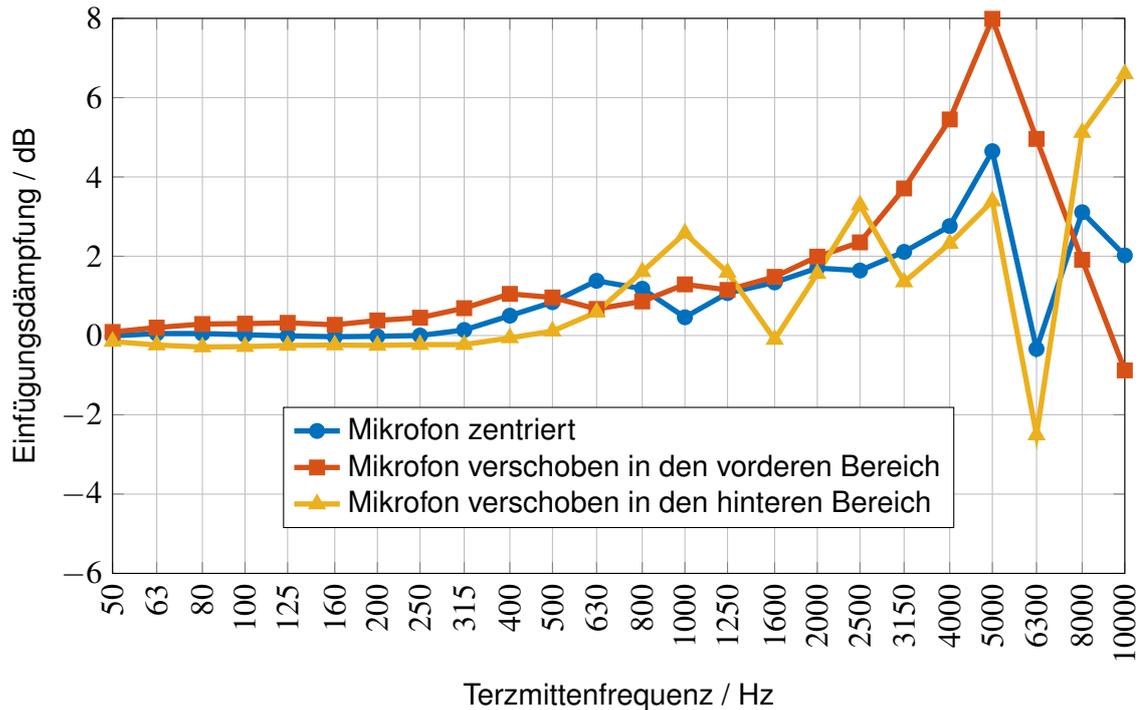


Abbildung 4.8: Einfügungsdämpfung von Schirm H012, Terzwerte, verschiedene Mikrofonpositionen unter dem Sekundärwindschirm, Schalleinfallswinkel $\alpha = 24^\circ$

stellten Verlauf der Einfügungsdämpfung bei zentrierter Mikrofonposition abgelesenen Frequenzen, bei denen Maxima auftreten, sowie die dazu korrespondierenden Wellenlängen aufgeführt. Da die Messreihe bei einer Umgebungstemperatur knapp über dem Gefrierpunkt stattgefunden hat, wurde für die Errechnung der Wellenlängen eine Schallgeschwindigkeit in der Luft von $c_1 = 332 \text{ m/s}$, wie sie bei einer Umgebungstemperatur von 1°C vorhanden ist, angesetzt. Die errechneten Werte ergeben sich aus der Beschreibung stehender elastischer Wellen (vgl. [Gerthsen 2006, S. 184 f.]). Für diese gilt bei beidseitig „festem Ende“ und einer Saitenlänge L für die Wellenlängen der Eigenschwingungen λ_n :

$$\lambda_n = \frac{2}{n} \cdot L \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (4.1)$$

Im vorliegenden Fall wurde für L der Schirmradius eingesetzt. Dieser beläuft sich auf $r_{\text{Schirm}} = d_{\text{Schirm}}/2 = 0,225 \text{ m}$. Für n wurde die Ordnungszahl der entsprechenden Maxima eingesetzt. Die Frequenzen, bei denen Maxima im Kurvenverlauf der Einfügungsdämpfung auftreten, können auf diese Weise abgeschätzt werden.

Tabelle 4.1: Maxima im Verlauf der Einfügungsdämpfung von Schirm H012, Mess- und Rechenwerte

Maximum <i>n</i>	abgelesen		errechnet	
	Frequenz / Hz	Wellenlänge / m	Frequenz / Hz	Wellenlänge / m
1	690	0,48	738	0,45
2	1430	0,23	1476	0,23
3	2190	0,15	2213	0,15
4	2950	0,11	2951	0,11
5	3620	0,09	3689	0,09
6	4390	0,08	4427	0,08

Es kann festgehalten werden, dass für die Einfügungsdämpfung des Schirms Moden innerhalb der Schirmhülle von entscheidender Bedeutung sind. Deren Vorhandensein scheint durch Reflexionen innerhalb des Schirms bedingt zu werden. Dieses Verhalten wird möglicherweise auch dadurch begünstigt, dass die untere Begrenzungsfläche des Schirmvolumens eine „schallharte“ Platte ist. Weiterhin lässt sich in Hinblick auf die Reproduzierbarkeit von Messreihen sagen, dass, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, auf die zentrale Positionierung des Mikrofons innerhalb des Schirms höchstes Augenmerk zu legen ist.

4.3.2 Einfluss des Schalleinfallswinkels

Der Einfluss des Schalleinfallswinkels auf den Einfügungsdämpfungsverlauf hemisphärischer Windschirme wird im Folgenden anhand des Vergleichs von Dämpfungskurven, die mit den Lautsprecherpositionen nach Abschnitt 3.4.3 gemessen wurden, illustriert und diskutiert werden. Zunächst sollen die Einfallswinkel nach Tabelle 3.2 in Erinnerung gerufen werden. Die folgende Tabelle 4.2 enthält daher keinerlei neue Information und dient lediglich zur Verbesserung der Lesbarkeit des Textes.

Tabelle 4.2: Schalleinfallswinkel zu den Lautsprecherpositionen nach Tabelle 3.2

Lautsprecherposition	Einfallswinkel $\alpha/^\circ$
1	44
2	35
3	27

In Abbildung 4.9 sind die Dämpfungsverläufe der Windschirme H012 und CK01 dargestellt, die bei Beschallung von den jeweiligen Lautsprecherpositionen gemessen wurden. Ein Vergleich der Dämpfungseigenschaften beider Schirme wird in Abschnitt 4.3.4 erfolgen. An dieser Stelle interessiert zunächst lediglich das Verhalten, das bei Ände-

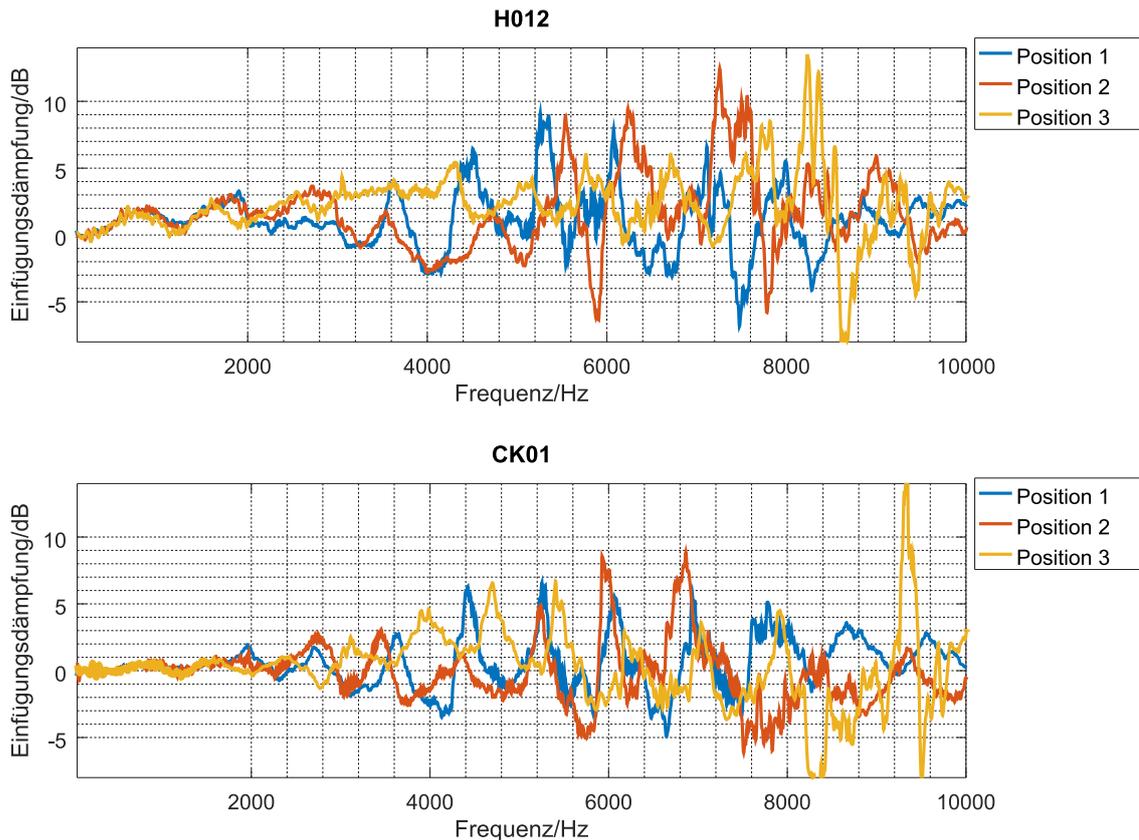


Abbildung 4.9: Einfügungsdämpfung der Schirme H012 und CK01, frequenzabhängig, dreierlei Lautsprecherpositionen

rung des Schalleinfallswinkels beobachtet werden kann. Alle Kurven sind von kammfilterartiger Gestalt. Zu höheren Frequenzen hin ist eine zunehmende Verrauschung der Kurven zu beobachten, die auf Störgeräuscheinfluss während der Messungen zurückzuführen ist. Die Kurven in den jeweiligen Diagrammen stimmen im tieffrequenten Bereich bis zum ersten lokalen Minimum bei ca. 1200 Hz weitgehend überein. Im weiteren Verlauf ist sowohl eine Verschiebung der Kämmen zueinander als auch eine Abweichung der relativen Amplitudenänderung der jeweiligen „Zinken“ sowie der über die Frequenz gemittelten Einfügungsdämpfung ersichtlich.

Zur Systematisierung dieses Verhaltens ist die Betrachtung der Verläufe der korrespondierenden Terzpegel hilfreich. Diese sind in den Abbildungen 4.10 und 4.11 dargestellt. Es muss beachtet werden, dass bei der Terzdarstellung im höherfrequenten Bereich ab der 4000 Hz - Terz mehrere Zinken des kammfilterartigen Verlaufs in die einzelnen Terzen fallen und deshalb eine grobe Mittelung der Dämpfung stattfindet. Dieser Zusammenhang führt dazu, dass eine Verschiebung des Kammfilters entlang der Frequenzachse, wie sie schon durch kleinste Abweichungen bei der Zentrierung des Windschirms verursacht werden kann, zu großen Änderungen in den einzelnen Terzwerten führt.

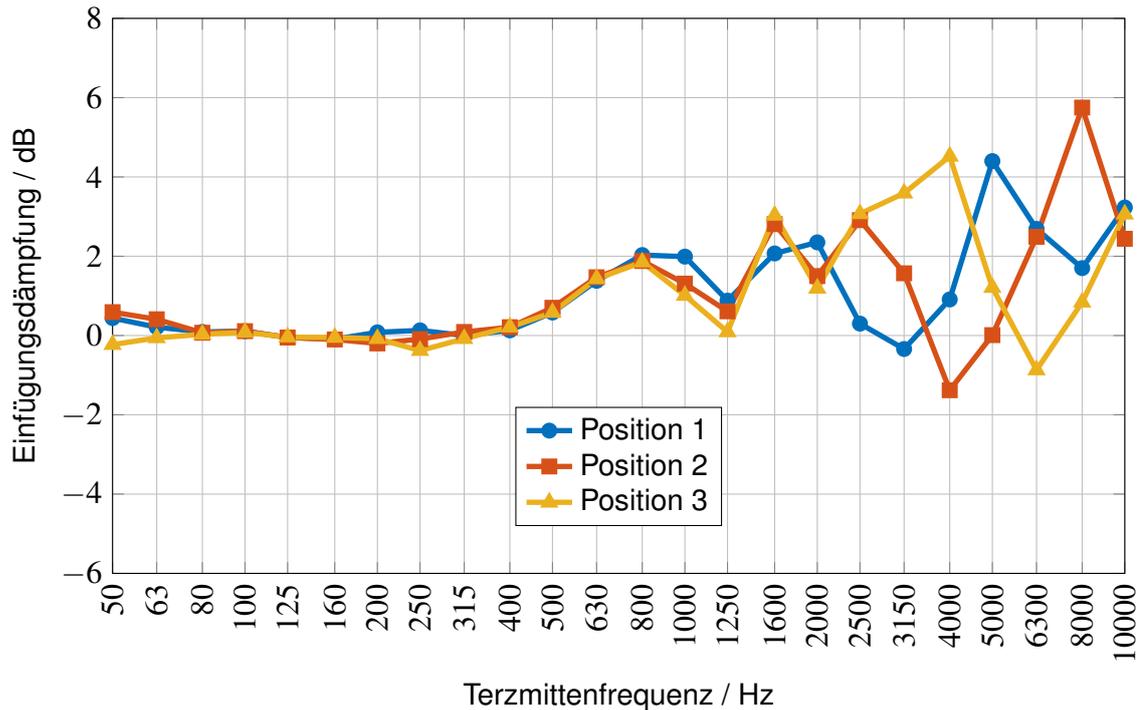


Abbildung 4.10: Einfügungsdämpfung von Schirm H012, drei Lautsprecherpositionen, Terzdarstellung

In den 50 Hz- und 63 Hz- Terzen sind auf beiden Abbildungen Abweichungen um die Nulllinie herum zu erkennen, die auf mangelhafte Testsignalaussteuerung sowie den Einfluss von Wind während der Messung zurückzuführen sind. Im Bereich bis 315 Hz ist die Einfügungsdämpfung annähernd null. Die weiteren Terzen bis 1250 Hz bilden den ersten Zinken des Kammfilters ab. Der Anstieg der Dämpfungswerte in den nächsthöheren Terzen erfolgt ungleichmäßig. In beiden Abbildungen ist im weiteren Kurvenverlauf ein Rückgang der Einfügungsdämpfung bis hin zu negativen Werten, die eine Verstärkung des gemessenen Schalldruckpegels durch den Schirm bedeuten, zu erkennen. Dabei erfolgt diese umso niederfrequenter, je höher der Einfallswinkel α ist. Für $\alpha = 44^\circ$ (Lautsprecherposition 1) ist der Dämpfungseinbruch in der Terz mit der Mittenfrequenz 3150 Hz zu erkennen, für $\alpha = 35^\circ$ (Lautsprecherposition 2) liegt der Einbruch bei 4000 Hz, für $\alpha = 27^\circ$ (Lautsprecherposition 3) bei 6300 Hz bzw. 8000 Hz. In den Terzen oberhalb der zuvor beschriebenen Dämpfungseinbrüche steigen die Werte jeweils wieder an, zeigen im weiteren Verlauf allerdings kein monotonen Verhalten, sondern weitere Extrema.

Das soeben beschriebene Verhalten wurde wiederkehrend bei Messreihen beobachtet, die unter gleichen Bedingungen in engster zeitlicher Abfolge durchgeführt wurden. Es ist ersichtlich, dass abhängig vom Schalleinfallswinkel die Einfügungsdämpfung des jeweiligen Schirms innerhalb mancher Terzen um Werte der Größenordnung 6 dB variiert. Ursächlich für dieses Verhalten könnte sein, dass bei unterschiedlichen Schalleinfallswinkeln andere Moden innerhalb des Schirmkörpers angeregt werden.

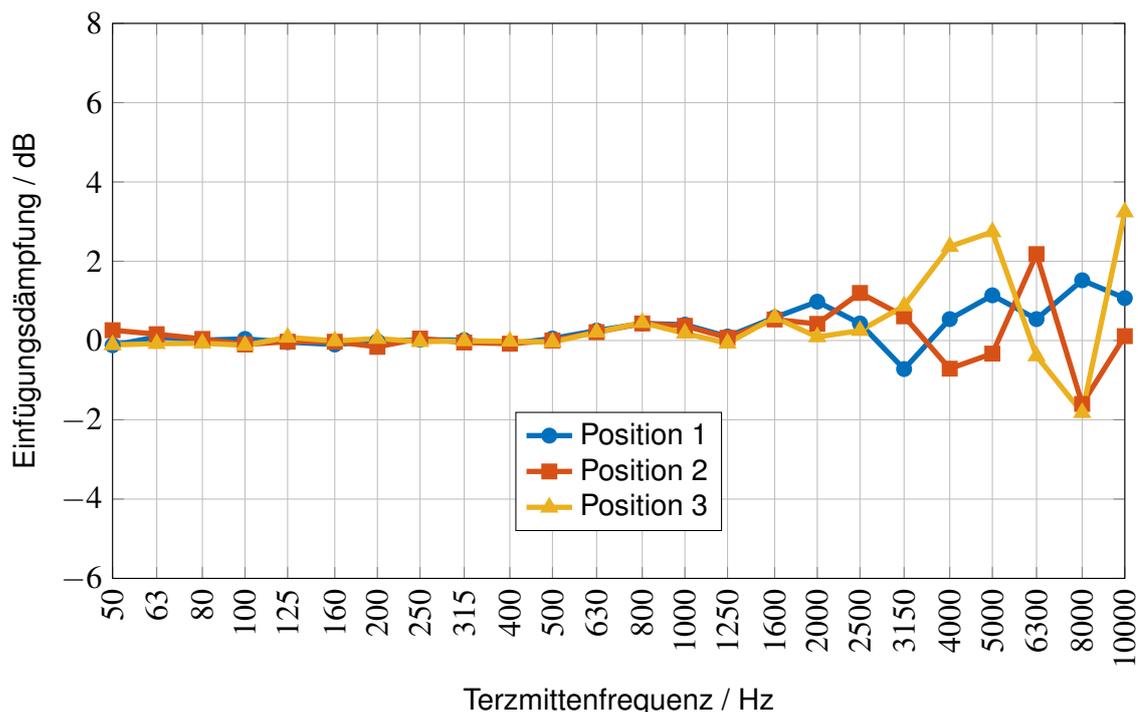


Abbildung 4.11: Einfügungsdämpfung von Schirm CK01, drei Lautsprecherpositionen, Terzdarstellung

4.3.3 Einfluss von Nässe

Bei Schallmessungen nach Abschnitt 2.1 kommt es erfahrungsgemäß nicht selten vor, dass der Messaufbau Nässe ausgesetzt ist. Aus diesem Grund wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der zunächst die Einfügungsdämpfung der trockenen Schirme H012 und CK01 nach Abschnitt 3 ermittelt wurde. Um maximale Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden unmittelbar im Anschluss Messungen mit den Schirmen im nassen Zustand durchgeführt. Die Nassheit wurde dadurch herbeigeführt, dass beide Schirme mit jeweils einem Liter Leitungswasser übergossen wurden. Die Benetzung der Schirmoberflächen erfolgte graduell und das Wasser wurde, um anfänglichem Abperlen der Flüssigkeit entgegenzuwirken und somit eine längere Regenexposition zu simulieren, per Hand eingerieben.

Betrachtet werden soll zunächst Abbildung 4.12. Die beiden Kurvenverläufe wurden exemplarisch aus den eben genannten Messreihen gewählt. Es ist die Einfügungsdämpfung des Windschirms H012 in trockenem und nassem Zustand, die bei Beschallung von Lautsprecherposition 3 nach Tabelle 3.2 gemessen wurde, dargestellt. Der Windschirm im trockenen Zustand zeigt das bereits zuvor beschriebene kammfilterartige Dämpfungsverhalten über den gesamten dargestellten Frequenzbereich. Nass ergibt sich ein abweichender Verlauf. Der erste Zinken des Kammverlaufs bis ca. 1000 Hz ist annähernd deckungsgleich mit der Dämpfungskurve des trockenen Windschirms.

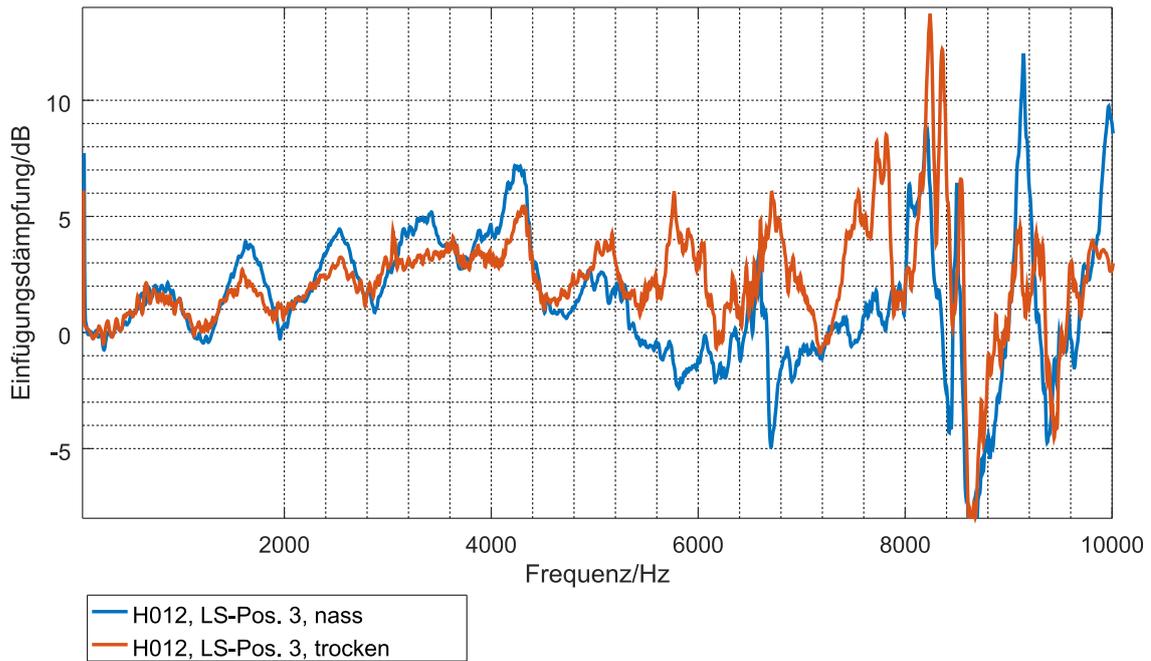


Abbildung 4.12: Einfügungsdämpfung von Schirm H012 in Abhängigkeit der Frequenz, Schirm im trocken und Nassen Zustand, Lautsprecherposition 3: Schalleinfallswinkel: $\alpha = 27^\circ$

Im weiteren Verlauf bis ca. 4500 Hz sind die Extrema beider Kurven bei den gleichen Frequenzen zu finden, unterscheiden sich jedoch in den Amplituden. Bei nassem Schirm sind insbesondere die lokalen Maxima ausgeprägter als bei trockenem Schirm. Die Minima sind in nicht symmetrischer Weise ähnlich den Maxima deutlicher ausgeprägt; sie haben bei nassem Windschirm nur geringfügig kleinere Werte als bei trockenem Schirm. Zwischen ca. 4500 Hz und ca. 8500 Hz ist divergierendes Verhalten zu beobachten. Der Kurvenverlauf des trockenen Schirms verläuft weiter kammfilterartig mit Minima der Einfügungsdämpfung in der Größenordnung von 0 dB und positiv ausgeprägten Maxima. Der nasse Schirm zeigt in diesem Frequenzbereich ein abweichendes Verhalten, welches sich darin äußert, dass die Einfügungsdämpfung in den negativen Bereich verläuft, also eine Verstärkung durch den Schirm stattfindet. In diesem Bereich ist auch das kammfilterartige Verhalten nicht ausgeprägt und die Extrema im Kurvenverlauf treten bei anderen Frequenzen als bei trockenem Schirm auf. Der Verlauf erinnert mit seinem Dämpfungseinbruch an die in Abbildung 4.7 dargestellten Dämpfungsverläufe, die bei einem niedrigeren Schalleinfallswinkel von $\alpha = 24^\circ$ gemessen wurden. Oberhalb von 8500 Hz weisen die Dämpfungsverläufe von trockenem und nassem Schirm wieder große qualitative Ähnlichkeit auf. Ähnlich wie im Bereich unterhalb von ca. 4500 Hz treten die Extrema im Kurvenverlauf bei nassem Schirm deutlicher in Erscheinung.

Um das Verhalten des Schirms bei Nässe zu erklären, kann auf die in Abschnitt 4.3.1 eingeführte und mittels der in Abschnitt 2.3 genannten Zusammenhänge zumindest teilweise beschreibbare Hypothese zurückgegriffen werden, dass für das Einfügungsdämpfungsverhalten des Sekundärwindschirms Eigenmoden innerhalb des Schirmkör-

pers von maßgeblicher Bedeutung sind. Es ist zu vermuten, dass durch den Flüssigkeitseintrag die Impedanz bzw. Admittanz der den Schirm begrenzenden Schicht verändert wird. Dabei kann angenommen werden, dass die Differenz zwischen der Impedanz der den Schirmkörper umgebenden Luft und der Impedanz des schirmbegrenzenden Mediums zunimmt. Nach Abschnitt 2.3.1 führt dieser Umstand zu einer Vergrößerung der an Schirmoberfläche äußerseitig wie innerseitig reflektierten Anteile, was wiederum eine deutlichere Ausprägung der Moden innerhalb des Schirms nach sich zieht. Der Hub der Kammfilterkurven unterhalb von 4500 Hz ist auf den höheren reflektierten Anteil an der Innenseite der Schirmwand zurückzuführen. Der Offset der beiden Kurven weist darauf hin, dass bei nassem Schirm bereits beim Eindringen des Schalls ins Schirminnere ein höherer Anteil nach außen hin reflektiert wird.

Der deutlich zu erkennende Einbruch der Dämpfung bei nassem Schirm kann als Hinweis darauf gedeutet werden, dass bei den speziellen geometrischen Gegebenheiten innerhalb eines hemisphärischen Hohlkörpers in einem bestimmten Frequenzbereich eine Brennpunktbildung stattfindet, bei der der Schirmkörper verstärkend wirkt. Dieser Frequenzbereich liegt im vorliegenden Fall zwischen ca. 5000 Hz und ca. 7000 Hz. Ab ca. 8500 Hz weisen beide Kurven erneut große Ähnlichkeit auf.

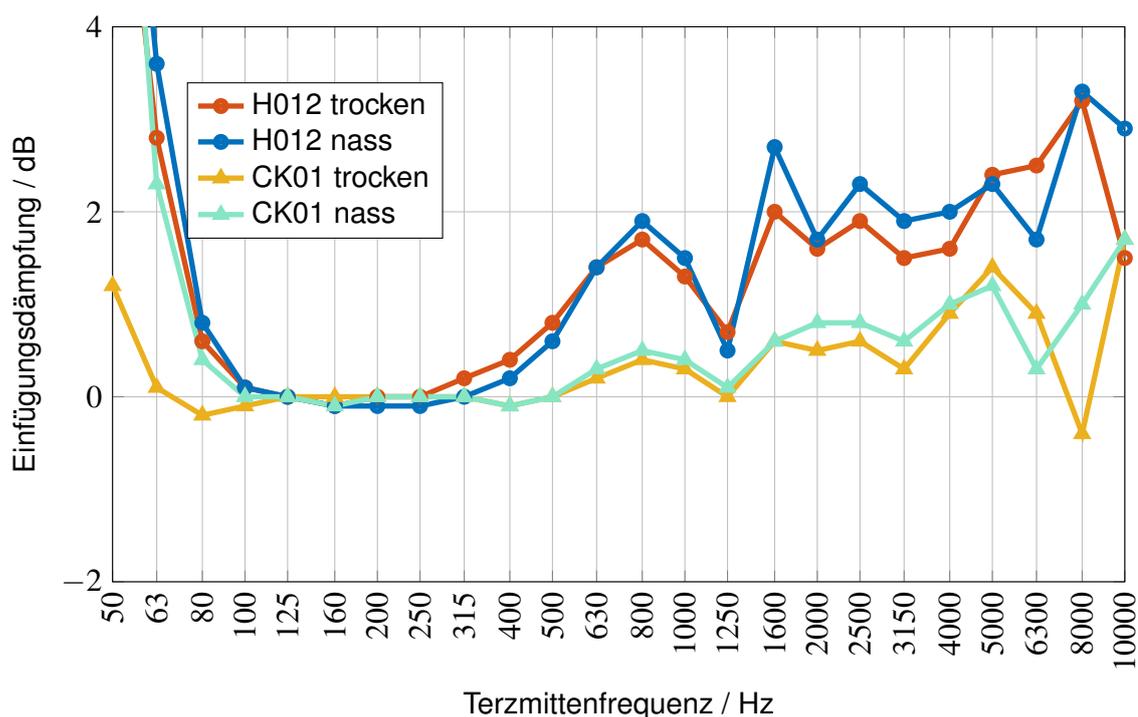


Abbildung 4.13: Mittlere Einfügungsdämpfung der Schirme H012 und CK01 in trockenem und nassem Zustand, Terzdarstellung

Abbildung 4.13 stellt die Messergebnisse in Terzen dar. Dabei wurden die Dämpfungswerte der jeweils drei Lautsprecherpositionen energetisch gemittelt. Zunächst sei darauf hingewiesen, dass die hohen Werte unterhalb der 100 Hz-Terz auf Windeinfluss zurückzuführen sind. Das Problem wird in Abschnitt 5.4.3 detailliert beschrieben.

Aus dem Verlauf der Kurven kann abgeleitet werden, dass Nässe einen signifikanten Einfluss auf die Einfügungsdämpfung der Schirme hat. Verglichen mit den deutlichen Abweichungen, die beim Vergleich derselben Lautsprecherposition mit unterschiedlichem Schirmzustand in Abbildung 4.12 sichtbar wurden, fallen die Unterschiede quantitativ wie qualitativ bei den Mittelwerten aller drei Lautsprecherpositionen weniger ins Gewicht. Gründe hierfür sind sowohl in der Umrechnung von FFT-Schmalbanddämpfungswerten in Terzwerte, welche (grafisch ausgedrückt) die FFT-Kurve glättet, als auch in der Mittelung der Terzwerte der drei Lautsprecherpositionen zu finden. Die energetische Mittelung führt dazu, dass Werte, die stark von Null abweichen, bestimmend für den Mittelungspegel sind. Da die Einbrüche in den Dämpfungskurven abhängig von der Lautsprecherposition bei verschiedenen Frequenzen auftreten (vgl. Abschnitt 4.3.2), gehen diese in der Mittelung mehrerer Lautsprecherpositionen unter.

Die Einfügungsdämpfung der nassen Schirme fällt tendenziell, aber nicht in jedem einzelnen Frequenzband, höher aus als bei trockenem Schirm. Die Nassheit eines Schirmes lässt sich unter realen Einsatzbedingungen nur schwer quantifizieren und ist zudem stark zeitabhängig. Aus der Erfahrung heraus entsprach der Zustand der Schirme bei der Durchführung der Einfügungsdämpfungsmessung einem solchen, der nahe am Maximum der bei typischen Schallemissionsmessungen erreichten Nässe liegt. Aus Sicht des Verfassers ist es in Anbetracht der geringfügigen Abweichungen der terzabhängigen Einfügungsdämpfungspegel und des Nichtvorhandenseins einer nachvollziehbaren in-situ Bestimmung der Schirmnassheit nicht sinnvoll, Schallemissionsmessungen, die mit vermeintlich nassem Windschirm durchgeführt worden sind, mit anderen Dämpfungswerten zu korrigieren als solchen, bei denen von einem trockenem Windschirm ausgegangen wird.

4.3.4 Vergleich der Schirme

Die in Abbildung 4.14 dargestellten Kurvenverläufe wurden durch energetische Mittelung der Ergebnisse verschiedener Messreihen (jeweils drei Lautsprecherpositionen an unterschiedlichen Tagen) der jeweiligen Sekundärwindschirme gewonnen. Dabei muss angemerkt werden, dass die verschiedenen Schirme unterschiedlich häufig vermessen wurden. Obwohl dieses Vorgehen in Hinblick auf die Methodik nicht von maximaler Sauberkeit ist, ist es im Rahmen des Vergleichs der Schirme untereinander zielführend. Wie in Abschnitt 5 detaillierter ausgeführt werden wird, ist beim Vergleich der Mittelwerte, die aus Messreihen mit drei Lautsprecherpositionen gewonnen werden, eine Streuung der Messwerte oberhalb von 2500 Hz zu erkennen. Um die Schirme aussagekräftig vergleichen zu können, wurde daher durch die Mittelung alles an Daten zunutze gemacht, was verfügbar war. Zusätzlich sind die Herstellerangaben zu beiden DELTA-Windschirmen dargestellt. Die numerischen Werte aller Graphen sind in Tabelle A.1 im Anhang beigelegt.

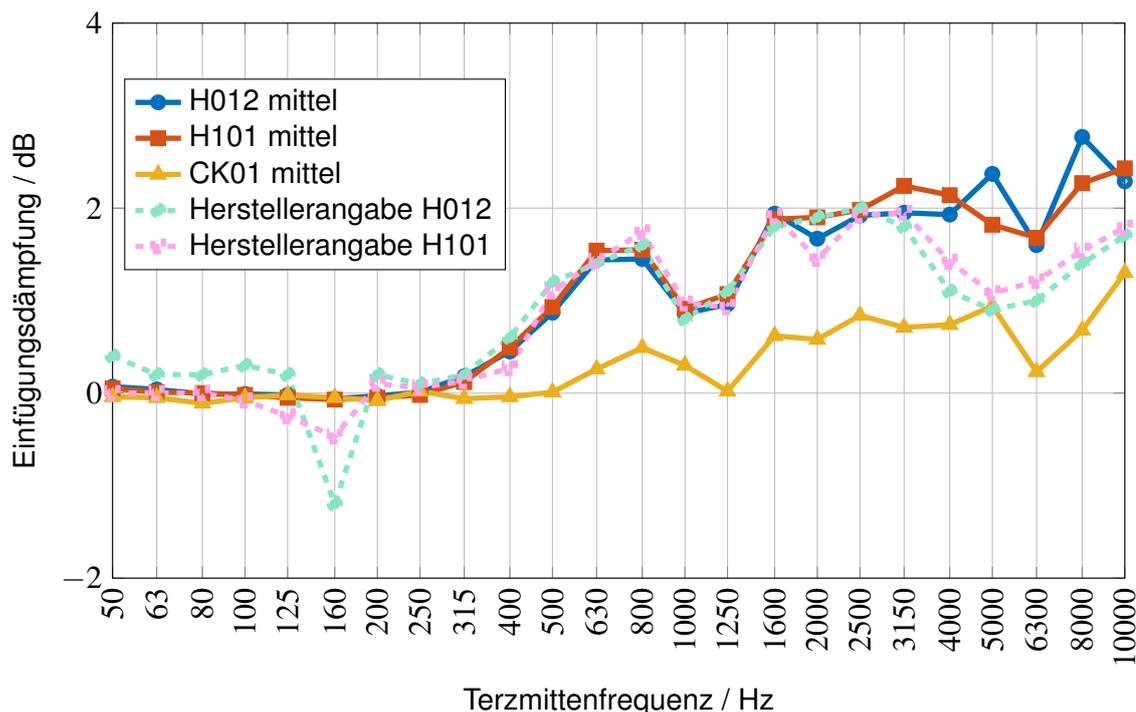


Abbildung 4.14: Mittlere Einfügungsdämpfung der untersuchten Schirme, Herstellerangaben, Terzdarstellung

H012 und H101 - Messwerte und Herstellerangaben

Die beiden DELTA-Fabrikate H012 und H101 ähneln sich in ihren akustischen Eigenschaften stark. Die Kurven der mittleren Terz-Dämpfungswerte verlaufen annähernd deckungsgleich bis zu einer Terzmittenfrequenz von 1600 Hz. Bei höheren Frequenzen treten Abweichungen von bis zu 0,6 dB auf. Möglicherweise können diese auf einen unterschiedlichen Alterungs- und Verschmutzungszustand der Schirme zurückgeführt werden. Es ist nicht auszuschließen, dass auch die minimalen konstruktiven Unterschiede zwischen beiden Schirmen eine Rolle spielen. Weiterhin sind Messunsicherheiten als Ursache für die abweichenden Werte anzunehmen.

Vergleicht man die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Dämpfungswerte (kurz: Messwerte) der DELTA-Windschirme mit denen, die vom Hersteller angegeben werden, fallen mehrere diskussionswürdige Aspekte auf:

Im Bereich zwischen den Terzmittenfrequenzen von 250 Hz bis 1600 Hz sind sowohl die Herstellerangaben der beiden Schirme miteinander, sowie die Messwerte untereinander, als auch Herstellerangabe und Messwerte zueinander, in guter Näherung übereinstimmend. Dies stützt die These, dass beide Schirme von akustisch großer Ähnlichkeit sind. Außerdem ist die Übereinstimmung der Werte ein Indiz, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messverfahren zur Ermittlung der Einfügungsdämpfung von Sekundärwindschirmen Ergebnisse liefert, die dem Stand der Technik und den in [DIN EN 61400-11] geforderten Terzpegel-Korrekturwerten entsprechen.

Bei einer Terzmittenfrequenz von 2000 Hz stimmt der gemessene Dämpfungswert von

H101 mit der Herstellerangabe von H012 überein, während der Messwert von H012 das gleiche Einbruchverhalten gegenüber den benachbarten Terzen zeigt, wie es in der Herstellerangabe zu H101 zu erkennen ist. Diese diametrale Übereinstimmung deutet darauf hin, dass sowohl mit der Messmethode, die zur Ermittlung der Herstellerangaben genutzt worden ist, als auch beim Verfahren nach Abschnitt 3 gleichermaßen eine Streuung der Messergebnisse bei höheren Frequenzen vorliegt. In Abschnitt 5 wird eine tiefergehende Analyse durchgeführt.

Bei Frequenzen oberhalb von 3150 Hz verläuft die Dämpfungskurve laut Herstellerangabe „cosinusartig“. Dabei soll sich der Begriff „cosinusartig“ lediglich auf den optischen Eindruck und keineswegs auf physikalische Zusammenhänge beziehen. Die Dämpfungskurve von H101 ist zur H012-Kurve um ca. 0,2 dB parallelverschoben. Im wellenförmigen Kurvenverlauf ist keine klare Tendenz zu erkennen

Die Messwerte weichen in ihrem Verlauf ab. Dabei liegt die Abweichung, um die die jeweiligen Messwerte höher sind als die Herstellerangaben, in der Größenordnung von einem Dezibel. Anders als bei den Herstellerangaben ist keine klare Ähnlichkeit der Kurvenverläufe zu erkennen. Die bereits erwähnten Alterungs- und Verschmutzungseffekte können möglicherweise nicht nur für die Unähnlichkeit der gemessenen Dämpfungskurven, sondern auch für die Abweichung von den Herstellerangaben, die die Schirme in neuem Zustand charakterisieren sollen, verantwortlich gemacht werden. Zu beachten ist ebenfalls, dass die Schalleinfallswinkel der jeweiligen Lautsprecherpositionen sich je nach Messverfahren unterscheiden (vgl. Abschnitt 3.4.3). Im tieffrequenten Bereich bei Terzmittenfrequenzen von 50 Hz bis 200 Hz unterscheiden sich die Herstellerangaben deutlich von den Messwerten. Laut Herstellerangabe haben beide Schirme in diesem Frequenzbereich unterschiedliche Dämpfungsverläufe, die von 0dB abweichen. Bei beiden Kurven fällt ein Dämpfungsminimum mit deutlich negativer Amplitude bei 160 Hz auf. Abweichend zur Herstellerangabe ist die messtechnisch ermittelte Einfügungsdämpfung bis zur Terzmittenfrequenz von 200 Hz für beide Schirme annähernd 0dB. Ein Verstärkungseffekt durch den Schirm bei 160 Hz, wie ihn die Herstellerangaben suggerieren, konnte nicht nachgewiesen werden.

Über die Hintergründe der recht deutlichen Abweichungen im tieffrequenten Bereich kann nur gemutmaßt werden. Da die Wellenlänge bei tiefen Frequenzen groß im Vergleich zu den Abmessungen des Windschirms ist, erscheint die laut Messwerten nicht vorhandene Einfügungsdämpfung akustisch plausibel. Ein Grund für die Abweichungen bei den Werten, die der Hersteller angibt, könnte ein mangelnder Fremdgeräuschaustand sein, der darauf zurückzuführen sein könnte, dass die Signalquelle, die zur Messung verwendet wurde, tieffrequent nicht leistungsfähig genug war.

CK01 im Vergleich zu den DELTA-Windschirmen

In Abbildung 4.14 sind auch die mittleren Dämpfungswerte vom in seiner Konstruktion streng nach normativen Empfehlungen ausgelegten, selbstgebauten Sekundärwindschirm CK01 dargestellt. Um einen detaillierteren Vergleich zu ermöglichen, wurden in

Abbildung 4.15 Messreihen der Schirme H012 und CK01, die in unmittelbarer zeitlicher Nähe durchgeführt wurden, dargestellt. Es wird lediglich exemplarisch die Einfügungsdämpfung an einer einzelnen Lautsprecherposition aufgezeigt.

Die Terzwerte der Einfügungsdämpfung von CK01 verlaufen in ihrer Gestalt ähnlich wie die messtechnisch ermittelten Kurven der DELTA-Fabrikate, im Sinne dessen, dass bei tiefen Frequenzen die Einfügungsdämpfung vernachlässigbar gering ist und zu höheren Frequenzen hin nicht monoton ansteigt, sondern im Verlauf mehrere Einbrüche der Dämpfung aufweist. Die Werte bewegen sich dabei in einem Bereich zwischen 0 dB und 1,3 dB. Damit ist die mittlere Einfügungsdämpfung in jeder Terz deutlich geringer als die der DELTA-Windschirme H012 und H101.

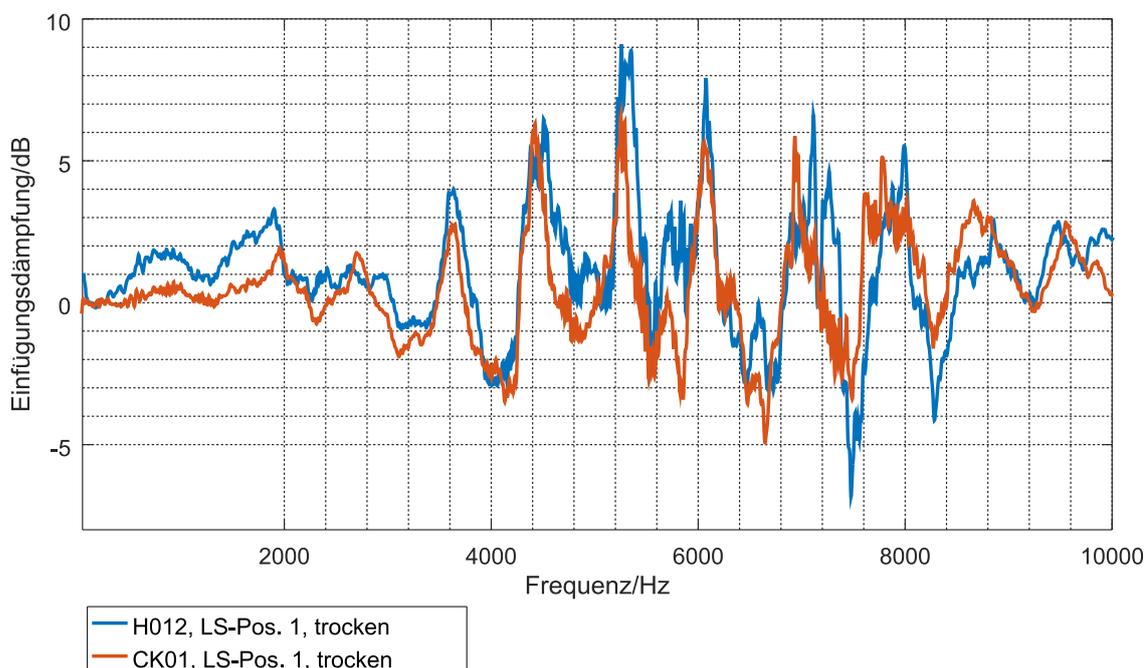


Abbildung 4.15: Einfügungsdämpfung der Schirme H012 und CK01, Schirme in trockenem Zustand, Lautsprecherposition 1: Schalleinfallswinkel: $\alpha = 44^\circ$

Bei der Betrachtung von Abbildung 4.15 wird ersichtlich, dass trotz unterschiedlichen Schirmmaterials bei CK01 und den DELTA-Windschirmen ein ähnlicher, von Moden geprägter Verlauf der Dämpfung über die Frequenz vorhanden ist. Die Extrema in den Kurvenverläufen liegen annähernd bei den gleichen Frequenzen. Geringe Abweichungen können auf Unsicherheiten bei der Zentrierung der Schirme während der Messungen und Formtoleranzen insbesondere von CK01 zurückgeführt werden.

Ein quantitativer Unterschied zwischen den Kurven fällt besonders im Bereich unterhalb von 2000 Hz auf. Hier weist der CK01 eine sichtbar geringere Einfügungsdämpfung als H012 auf. Da etwa $\frac{2}{3}$ der Terzen innerhalb des messtechnisch untersuchten Frequenzbereichs (obere Grenzfrequenz der 1600 Hz - Terz: 1778 Hz) in eben genannten Bereich fallen, ist die Auswirkung dieses Verhaltens auf die Einfügungsdämpfung in Terzenwer-

ten besonders gravierend.

Im weiteren Verlauf sind bei beiden Extrema zu finden, bei denen die Differenz zwischen den jeweiligen Maxima und Minima bei beiden Schirmen in einer ähnlichen Größenordnung liegt. Jedoch hat der Dämpfungsverlauf von CK01 einen geringen negativen Offset, und die Form des Kurvenverlaufs gestaltet sich derartig, dass breitere Bereiche der Kurve niedrige bzw. negative Dämpfungswerte haben, als dies bei H012 der Fall ist. Berücksichtigt man die mittelnden Eigenschaften der Terz-Dämpfungswerte, spiegelt sich in diesem Verhalten die im Vergleich zu den DELTA Windschirmen geringere mittlere Einfügungsdämpfung bei höheren Frequenzen, die in Abbildung 4.14 ersichtlich ist, wider.

5 Fehleranalyse

5.1 Allgemeines zu Messabweichungen

Laut [DIN 1319-1] ist eine Messung definiert als „Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich einer Messgröße mit einer Einheit“. Die Ermittlung der Terz-Korrekturwerte, die das Ergebnis des in Abschnitt 3 beschriebenen Verfahrens sind, fällt unter diese Definition, weil die Korrekturwerte, die in der Pseudo-Einheit dB angegeben werden, aber im Grunde dimensionslos sind, indirekt durch das Messen von Schalldrücken ermittelt werden.

Aus dem Einhergehen realer Messungen mit Abweichungen vom wahren Wert der Messgröße ergibt sich die Notwendigkeit, nicht nur die Messgröße, sondern auch die Messabweichung zu quantifizieren, um Schlüsse auf die Qualität der Messung zu erlauben (vgl. [Parthier 2016, S. 72]). Die Quantifizierung der Messabweichung soll im folgenden Abschnitt auf den Gegenstand dieser Arbeit bezogen erläutert werden. Dabei ist zu beachten, dass zur statistischen Aufarbeitung von Messergebnissen keineswegs Einigkeit in der Fachwelt herrscht. Als eines der Standardwerke, die dieses Thema behandeln, ist der Leitfaden zur Angabe von Unsicherheiten [GUM 2008] zu nennen, in dem Methoden beschrieben werden, die Prinzipien aus verschiedenen Bereichen der Statistik kombinieren (vgl. [Elster 2014]). Es existieren abweichende Ansätze, wie sie beispielsweise in [Willink 2006] oder [Grabe 2011] beschrieben werden.

Das Aufzeigen von Einflüssen auf die Messung sowie die mathematische Beschreibung und Systematisierung droht angesichts der großen Anzahl dieser Einflüsse und der uneindeutigen, teilweise auf philosophische Fragestellungen hinauslaufenden Behandlung von Messabweichungen und Fehlerfortpflanzung, die Rolle einer ausufernden Tätigkeit einzunehmen, deren Umfang den Rahmen dieser Arbeit sprengen und nur eingeschränkt zum Erkenntnisgewinn im Bereich der Akustik beitragen würde. Aus diesem Grund werden die folgenden Ausführungen auf zwei Primärziele eingeschränkt: Zum einen werden Fehlerquellen und deren potenzieller Einfluss auf die Messung sowie auf die Anwendbarkeit der Messergebnisse genannt, zum anderen wird versucht, durch pragmatische Betrachtung der gemessenen Daten plausible Zahlenwerte für die Messunsicherheit zu quantifizieren.

Es soll auf die Begrifflichkeiten nach [DIN 1319-1] gefußt werden. Als zentrales Element sei die Betrachtungsweise genannt, dass die Ausgabe eines Messgerätes, ein *Messwert* x , sich immer aus dem *wahren Wert* x_w sowie einer *zufälligen (stochastischen) Messabweichung* e_r und einer *systematischen Messabweichung* e_s zusammensetzt.

$$x = x_w + e_r + e_s \quad (5.1)$$

Dabei ist die systematische Messabweichung e_s die Summe aus der *bekannt systematischen Messabweichung* $e_{s,b}$ und der *unbekannt systematischen Messabweichung* $e_{s,u}$.

chung $e_{s,u}$ (vgl. [DIN 1319-1, Tabelle 3.2]).

$$e_s = e_{s,b} + e_{s,u} \quad (5.2)$$

Die zufällige Messabweichung bedingt eine Streuung des Messwertes um den wahren Wert herum, die zu einer *Unsicherheit* führt. Das heißt, dass ein anderer Wert gemessen wird, wenn die Messung unter gleichen Bedingungen wiederholt wird. Solcherlei Abweichungen können beispielsweise durch das Rauschen elektrischer Schaltungen verursacht werden. Je öfter eine Messung, die nur mit zufälliger Abweichung, nicht jedoch systematischer Abweichung, behaftet ist, wiederholt wird, desto mehr nähert sich das arithmetische Mittel aller Messwerte dem wahren Wert an.

Die systematische Messabweichung hingegen verändert sich bei gleichbleibenden Messbedingungen nicht und bildet somit eine Art Offset zum wahren Wert. Sie sorgt für eine *Unrichtigkeit* der Messergebnisse. Sofern sichergestellt ist, dass Messungen unter Bedingungen durchgeführt werden, für die die systematische Messabweichung zumindest zum Teil bekannt ist, kann die systematische Messabweichung korrigiert werden.

Abgeleitet von dieser Betrachtungsweise ist der Begriff der *Wiederholbedingungen*, der aussagt, dass Messungen nacheinander so durchgeführt werden, dass der systematische Fehler konstant ist, also weitestgehend gleiche Bedingungen bei jeder Messung vorliegen.

Der Begriff *Vergleichbedingungen*, der in [DIN 55350-13, Tabelle 2.1.2.3] dadurch definiert ist, dass am selben Messobjekt in verschiedenen Labors mit verschiedener Messapparatur durch verschiedene Beobachter Messungen durchgeführt werden, muss im Kontext dieser Arbeit angepasst werden. In Ermangelung verschiedener Messlabore und Beobachter gelten nachfolgend als Vergleichbedingungen, dass Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten an unterschiedlichen Orten im selben „Labor“ vom Verfasser durchgeführt werden. Dabei verändern sich Teile der Messapparatur sowie diverse andere Bedingungen, beispielweise klimatische Bedingungen und geometrische Konfiguration der Messapparatur.

5.2 Anwendung auf die Einfügedämpfungsmessung

Die soeben eingeführten Begrifflichkeiten lassen sich unter Berücksichtigung von in Abschnitt 4.3 beobachteten Eigenschaften auf Ergebnisse des in Abschnitt 3 beschriebenen Messverfahrens anwenden.

Dabei ist zu beachten, dass aus der Aufzeichnung mehrerer Schalldruck-Zeitsignale frequenzabhängige Werte relativer Bandbreite (Terzkorrekturwerte) gebildet werden. Es findet im Rahmen der Ermittlung der Einfügedämpfung je Terz sowohl eine Mittelung „auf der Frequenzachse“ im Rahmen der Bildung der Terzwerte statt, als auch eine Mittelung der Amplituden der einzelnen Werte je Terzmittenfrequenz, die aus der paarweisen Auswertung einzelner Sweeps der Testsignale gewonnen werden. Letzte-

res kann als Messdurchführung unter Wiederholbedingungen interpretiert werden. Dadurch, dass die vier Sweeps, die nacheinander im Testsignal enthalten sind, unter gleichen Bedingungen aufgezeichnet werden, aber separat ausgewertet werden können, kann aus der Betrachtung der Werte für die Einfügungsdämpfung je Terz, von denen im Verlauf dieser Arbeit durch das Testsignal bedingt immer jeweils vier ermittelt worden sind, auf die zufällige Abweichung der Terzwerte geschlossen werden, in dem die Standardabweichung der Messwerte errechnet wird (siehe Abschnitt 5.3.1). Eine weitere Ansatz, um auf die Präzision des Messverfahrens nach Abschnitt 3 zu schließen, ist die Durchführung von sog. „Nullmessungen“, bei denen das Messverfahren ohne Beteiligung eines Sekundärwindschirms durchgeführt wurde. Da kein Schirm vorhanden war, ist der wahre Wert für das Messergebnis bekannt: Die Einfügungsdämpfung hat bei jeder Frequenz null zu sein. Diese Erkenntnis führt dazu, dass nicht nur Terzwerte, sondern auch die FFT-Kurven bezüglich ihrer Fehlerhaftigkeit eingeschätzt werden können. In Abbildung 5.1 sind die FFT-Werte für die Einfügungsdämpfung dargestellt, die aus einer kompletten Messreihe aus drei Lautsprecherpositionen mit jeweils vier Sweeps ermittelt wurden. Es ist zu erkennen, dass die Kurve zu höheren Frequenzen hin zunehmend verrauscht ist. Der Graph oszilliert um die Nulllinie.

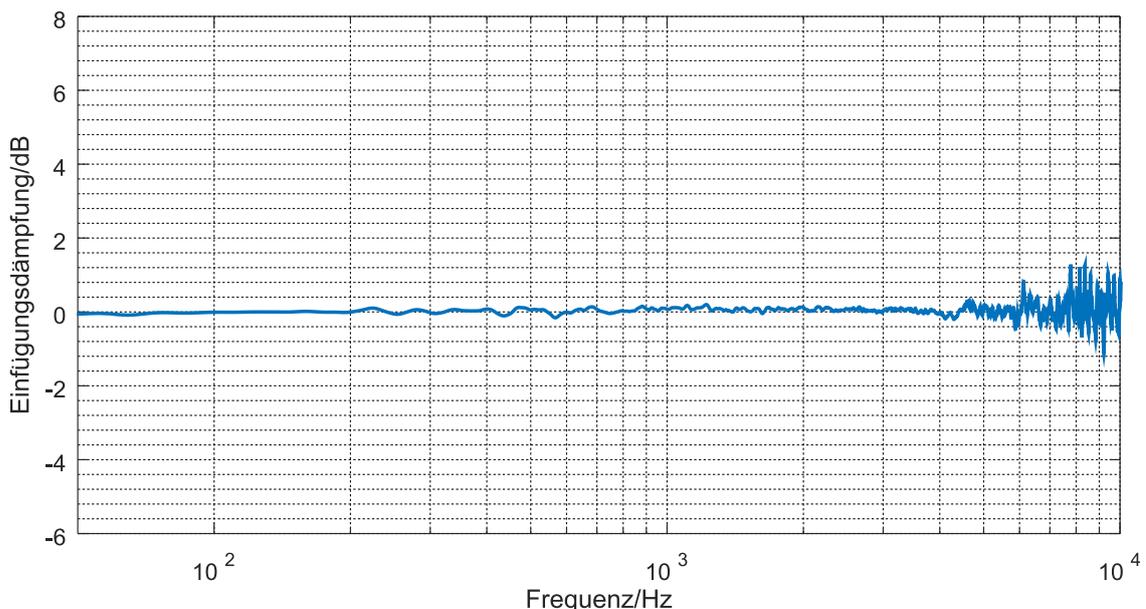


Abbildung 5.1: frequenzabhängige Einfügungsdämpfung,
Messung ohne Schirm (Nullmessung),
Mittel aus drei Lautsprecherpositionen

5.3 Quantifizierung der Messabweichung

5.3.1 Quantifizierung der zufälligen Messabweichung

Davon ausgehend, dass die Einfügungsdämpfungsverläufe, die aus den Sweeps einer Messreihe ausgewertet werden, als Messwerte, die unter Wiederholbedingungen ge-

wonnen wurden, betrachtet werden können, kann die Standardabweichung dieser Werte als Maß für die zufällige Abweichung der Messung interpretiert werden. Die Definition der empirischen Standardabweichung s lautet laut [DIN 1319-1, Tabelle 3.8]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.3)$$

Dabei ist n die Anzahl der Messwerte x_i , die unter Wiederholbedingungen gewonnen wurde und \bar{x} das arithmetische Mittel der Messwerte.

Um den Einfluss zufälliger Abweichungen auf die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt Messungen abschätzen zu können, sollen die Terz-Dämpfungswerte, die aus der Auswertung eines Sweepsignals gewonnen wurden, als Messwert betrachtet und eine empirische Standardabweichung pro Terz angegeben werden. Dabei muss beachtet werden, dass es sich bei den Dämpfungswerten um Pegelgrößen handelt. Die Standardabweichung muss also aus den linearen Dämpfungsfaktoren errechnet werden und führt bei Terz-Dämpfungswerten $\neq 0$ zu asymmetrischen Abweichungspegeln.

Weil vier Proben je Messung unter Wiederholbedingungen nur eine unzureichende Datenbasis darstellen, soll für die nachfolgenden Berechnungen die Interpretation der Parameter aus Gl. 5.3 erweitert werden: Da das Messergebnis einer Einfügungsdämpfungsmessung nach Abschnitt 3 ein Mittelwert aus den Werten dreier Lautsprecherpositionen ist, an denen je vier Messungen unter Wiederholbedingungen durchgeführt wurden, soll, um den Einfluss lediglich zufälliger Abweichungen zu untersuchen, die empirische Standardabweichung aller Messwerte bezogen auf zufällige Abweichung gebildet werden, wobei, abweichend von der ursprünglichen Interpretation, der arithmetische Mittelwert \bar{x}_j , das Mittel aller Werte der mit dem Messwert $x_{j,i}$ korrespondierenden Lautsprecherposition j ist.

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{m \cdot n - 1} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{j,i} - \bar{x}_j)^2} \quad (5.4)$$

Diese Berechnungsmethode soll dazu dienen, zu illustrieren, in wie weit Abweichungen der Messergebnisse durch zufällige Einflüsse bedingt sind, und einen Vergleich mit der Standardabweichung nach Gl. 5.3 ermöglichen.

In Tabelle 5.1 sind die Messergebnisse einer Einfügungsdämpfungsmessung an Schirm H012 und die empirischen Standardabweichungen s_r gemäß Gl.5.4 dargestellt. Dazu korrespondieren die blauen Fehlerindikatoren in Abbildung 5.2, die das 95 % - Konfidenzintervall (vgl. [Elpelt/Hartung 2004, S. 116 ff.]), das sich aus der 1,96-fache Standardabweichung ergibt, darstellen.

Es ist erkennbar, dass zufällige Abweichungen schwerpunktmäßig bei tiefen Frequenzen ≤ 125 Hz auftreten, sich im mittelfrequenten Bereich auf einem niedrigen Niveau bewegen und zu hohen Frequenzen hin zunehmen. Die höchsten Werte werden zwischen 4 kHz und 10 kHz erreicht. Die auf zufällige Abweichung bezogene Standardabweichung s_r bewegt sich dabei über weite Teile des Frequenzbereichs in einer Grö-

Benordnung von $s_r \leq 0,1$ dB. Dass die Werte zu tiefen und zu hohen Frequenzen hin zunehmen, lässt sich möglicherweise auf einen bei den betroffenen Frequenzen abnehmenden Fremdgeräuschabstand während der Messung zurückführen, der durch den Frequenzgang des Lautsprechers, der zur Testsignalwiedergabe genutzt wurde, bedingt ist.

Tabelle 5.1: auf zufällige Abweichung bezogene Standardabweichung s_r einer exemplarisch ausgewählten Messreihe (Schirm H012 trocken)

Terzmittenfrequenz / Hz	50	63	80	100	125	160	200	250
Einfügungsdämpfung / dB	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,1
$s_{r, (+)}$ / dB	0,10	0,11	0,05	0,02	0,05	0,03	0,03	0,02
$s_{r, (-)}$ / dB	0,11	0,11	0,05	0,02	0,05	0,03	0,03	0,02
Terzmittenfrequenz / Hz	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k
Einfügungsdämpfung / dB	0,2	0,6	1,0	1,4	1,4	0,8	1,0	1,8
$s_{r, (+)}$ / dB	0,03	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05	0,06	0,06
$s_{r, (-)}$ / dB	0,3	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05	0,06	0,06
Terzmittenfrequenz / Hz	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k
Einfügungsdämpfung / dB	1,8	1,8	2,0	2,4	2,6	0,7	2,1	2,8
$s_{r, (+)}$ / dB	0,08	0,10	0,11	0,17	0,16	0,20	0,26	0,18
$s_{r, (-)}$ / dB	0,08	0,10	0,11	0,17	0,17	0,21	0,27	0,18

5.3.2 Quantifizierung der Gesamt-Messabweichung

In Tabelle 5.2 ist die Standardabweichung s nach Gl. 5.3 derselben Messreihe, auf die in Abschnitt 5.3.1 eingegangen wird, aufgeführt. Die orangefarbenen Fehlerindikatoren in Abbildung 5.2 stellen das 95 %-Konfidenzintervall dar.

Bei dieser Betrachtungsweise wird, anders als zuvor, die Standardabweichung der Messwerte nach Gleichung 5.3 bezogen auf den Mittelwert aller Lautsprecherpositionen berechnet. Dies führt zu höheren Werten für die Standardabweichung. Es ist erkennbar, dass systematische Abweichungen, wie sie beispielsweise durch unterschiedliche Schalleinfallswinkel an den einzelnen Lautsprecherpositionen bedingt werden, erst ab einer Terzmittenfrequenz von 2500 Hz zu einer deutlichen Vergrößerung der Standardabweichung führen. Die zunehmenden Unsicherheiten bei höheren Frequenzen sind also nicht ausschließlich auf Schwächen im Messverfahren, sondern maßgeblich das Verhalten des Schirms zurückzuführen.

Beim Betrachten der Standardabweichungen der Herstellerangaben und der gemittelten Messwerte der untersuchten Schirme, die in Tabelle A.1 zu finden sind, ist erkennbar, dass die Ergebnisse der verschiedenen Messreihen in fast allen Terzen mit einer geringeren Standardabweichung behaftet sind, als die Herstellerangaben. Die geringsten Abweichungen sind in einem Bereich zwischen 100 Hz und 1000 Hz zu finden. In

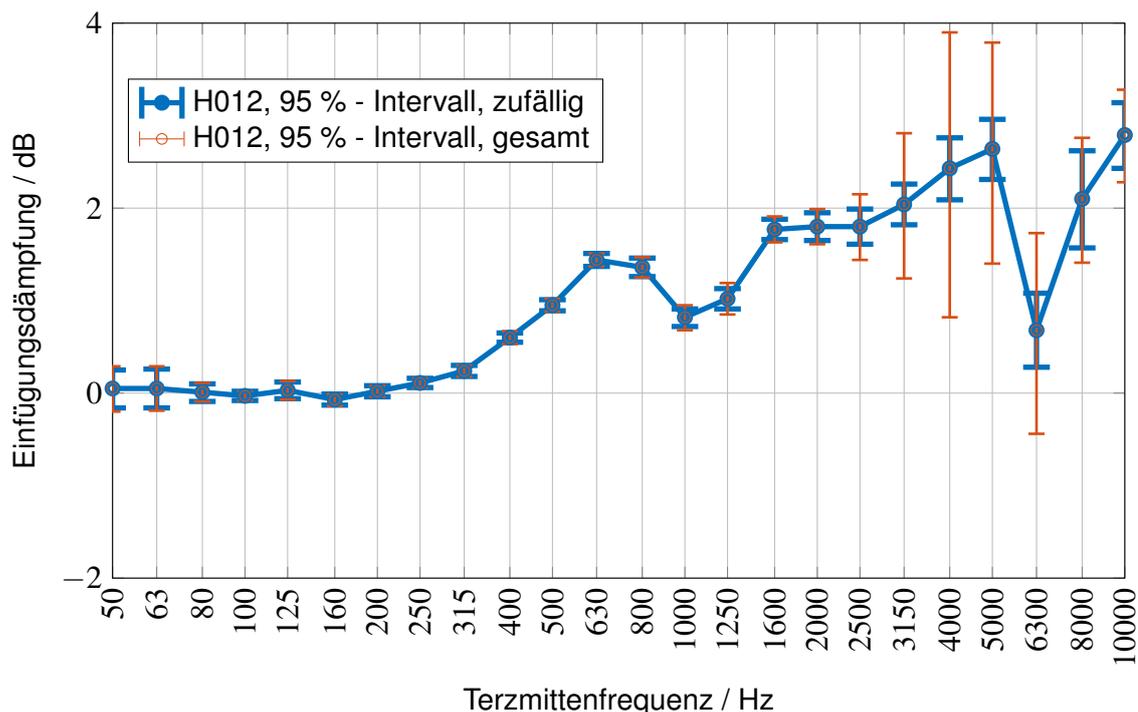


Abbildung 5.2: Exemplarische Messung: H012, Mittelwert über drei Positionen
Fehlerindikatoren 95 % - Konfidenzintervall

diesem Frequenzbereich ist die Einfügungsdämpfung weniger stark vom Schalleinfallswinkel abhängig als bei höheren Frequenzen. Außerdem ist die Bandbreite der Terzen in diesem Bereich klein gegen die in Abschnitt 4.3.1 beobachteten „Zinken“ des kammfilterartigen Einfügungsdämpfungsverlaufs. Besonders hohe Werte nimmt die Standardabweichung dagegen zwischen 3150 Hz und 6300 Hz an. Es ist anzunehmen, dass in diesem Bereich die Anzahl der schalleinfallswinkelabhängigen Moden innerhalb einer Terz eine besonders kritische Größe annimmt und sich die Terzwerte, die an den einzelnen Lautsprecherpositionen gemessen wurden, sich besonders stark unterscheiden.

5.4 Betrachtungen zu Einflussgrößen

5.4.1 Fremdgeräusch

Fremdgeräusche haben einen unerwünschten Einfluss auf die Messergebnisse. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass der Schalleinfallswinkel des Fremdgeräusches i. d. R. nicht dem entspricht, der an der betroffenen Lautsprecherposition untersucht werden soll und sich somit auf das Schirmverhalten auswirkt. Außerdem führt der abweichende Schallausbreitungspfad der häufig instationären Fremdgeräusche (z. B. vorbeifahrende LKW) zu einer Verfälschung der akustischen Übertragungsfunktion, die „zwischen beiden Mikrofonen“ gemessen wird. Weil die Mikrofone beim Messverfah-

Tabelle 5.2: Standardabweichung s bezogen auf den Gesamt-Mittelwert einer exemplarisch ausgewählten Messreihe (Schirm H012 trocken)

Terzmittenfrequenz / Hz	50	63	80	100	125	160	200	250
Einfügungsdämpfung / dB	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,1
$s_{(+)}$ / dB	0,12	0,12	0,05	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02
$s_{(-)}$ / dB	0,13	0,12	0,05	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02
Terzmittenfrequenz / Hz	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k
Einfügungsdämpfung / dB	0,2	0,6	1,0	1,4	1,4	0,8	1,0	1,8
$s_{(+)}$ / dB	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,09	0,07
$s_{(-)}$ / dB	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	0,09	0,07
Terzmittenfrequenz / Hz	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k
Einfügungsdämpfung / dB	1,8	1,8	2,0	2,4	2,6	0,7	2,1	2,8
$s_{(+)}$ / dB	0,09	0,18	0,39	0,75	0,59	0,54	0,34	0,25
$s_{(-)}$ / dB	0,10	0,18	0,41	0,82	0,63	0,57	0,35	0,26

ren auf schallharten Platten auf dem Boden platziert sind, liegt eine besonders hohe Empfindlichkeit gegenüber Vibrationen vor. Für Messungen ist eine möglichst fremdgeräuscharme Umgebung zu bevorzugen.

Eine Begrenzung des Fremdgeräuschabstands setzt das Eigenrauschen der Messkette, das durch die Eigenschaften von Mikrofon und Vorverstärker bedingt ist.

5.4.2 Fehler bei digitaler Signalverarbeitung

Mannigfaltig sind die Fehlerquellen bei der digitalen Signalverarbeitung. Neben den Fehlern bei der Digitalwandlung, von denen nachfolgend lediglich auf Quantisierung eingegangen werden soll, sind diverse Fehlerquellen in digitalen Rechenalgorithmen zu finden. Ein Problem ist dabei zum Beispiel die Rundung von Zwischenergebnissen. Eine weitere Problemstelle ist die FFT, bei der die Fensterung zu Amplitudenfehlern und Aliasing-Effekten führen kann. Weil weitere Ausführungen zu solchen Fehler im vorliegenden Anwendungsfall wenig zum Erkenntnisgewinn beitragen würde, sei auf die Ausführungen in [Meyer 2008, S. 188 ff.] verwiesen. Auf die Unsicherheiten bei FFT-basierter Audio-Leistungsgrößen geht [Blau 2000] ein.

Fehler durch Quantisierung

Bei der Quantisierung, also der Wandlung eines wertkontinuierlichen Signals in ein wertdiskretes, entsteht zwangsläufig eine Abweichung zwischen Eingangswert und quantisiertem Wert. Diese beträgt maximal eine halbe Quantisierungsstufe. Die zu den Messungen verwendeten Schallpegelmessers vom Typ „Norsonic Nor140“ zeichnen Audiofiles mit einer Auflösung von 24 Bit auf. Es ergibt sich nach [Kammeyer 2004, S. 214 f.] ein theoretischer Signal-Rauschabstand von 145,8 dB. Dieser Rechenwert bezieht sich

jedoch lediglich auf ein Sinussignal mit Vollaussteuerung. Da der Nor140 Audiodateien lediglich als PCM-Signal und nicht in Gleitkommawerten ablegt, ist der Rauschabstand in der Praxis geringer.

Abweichungen bei der Errechnung von Terzpegeln aus FFT-Werten

Bei der Berechnung von Terzpegeln aus FFT-Werten sind die endliche Flankensteilheit realer Filter und, insbesondere bei tiefen Frequenzen, die Überschneidung von FFT-Bändern und Terz-Grenzfrequenzen als Fehlerquellen zu beachten. Detaillierte Angaben zur Quantifizierung von Fehlern und Abweichungen werden bei [Schmidt/Jeschke 1997] gemacht. Weil bei Messungen der Einfügungsdämpfung in einem weiten Frequenzbereich gute Übereinstimmungen der Messwerte mit den Herstellerangaben vorlagen, wurde darauf verzichtet, die endliche Flankensteilheit realer Filter beim Berechnungsalgorithmus für Terzwerte, der in dem Skript in Anhang B.2 aufgeführt wird, zu berücksichtigen.

5.4.3 Wind

Starker Wind während der Messung der Einfügungsdämpfung führt zu Abweichungen, wie sie in Abbildung 4.13 unterhalb von ca. 100 Hz zu erkennen sind. Erklären lassen sich derartige Anomalien durch die windgeräuschemindernden Eigenschaften der untersuchten Sekundärwindschirme. Bei der Signalauswertung wird simplifiziert ausgedrückt verglichen, welche Energiemenge die Eingangssignale in einem bestimmten Frequenzbereich haben. Werden in beide Messmikrofone Windgeräusche, die in ihrer (scheinbaren) Lautstärke in der Größenordnung derer des Testsignals liegen, induziert, führt die Verminderung der Windgeräusche durch das Prüfobjekt dazu, dass im tieffrequenten Bereich weniger Energie im Signal erhalten ist. Bei der Auswertung wird also die Windgeräuscheminderung des Sekundärwindschirms als Einfügungsdämpfung missinterpretiert.

Die windinduzierten Geräusche verletzen das in Abschnitt 2.4.3 beschriebene Kausalitätsprinzip, weil sie ohne Eingabe eines Signals im zu untersuchenden Sinne am Mikrophon auftreten. Dadurch werden nicht die LTI-Eigenschaften des Windschirms kompromittiert, sondern die des Mikrofons. Da der Messaufbau (wie in Abschnitt 3.2 beschrieben) als eine Verkettung von LTI-Systemen interpretiert wird, kommt es zu fehlerhaften Ergebnissen, weil die LTI-Bedingungen von Bestandteilen des Aufbaus nicht hinreichend erfüllt werden. Fehler durch Windgeräusche können dadurch weitestgehend eliminiert werden, dass mit hoher Testsignallautstärke in einer Umgebung mit wenig Luftbewegung gemessen wird.

5.4.4 Positionierung von Schirm und Schallquelle

Abweichungen in Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Messungen können u. a. durch Ungenauigkeiten bei der Platzierung des Messaufbaus bedingt sein. In Abschnitt 4.3.1 wird beobachtet, dass die Position des Mikrofons relativ zum Sekundärwindschirm einen großen Einfluss auf den Verlauf der Einfügungsdämpfung hat. Es ergibt sich also die Platzierung des Schirms über dem Mikrophon als potenzielle Fehlerquelle während der Messung. Weiterhin können Abweichungen bei den Abständen der Mikrofone von der Schallquelle sowie der Schallquelle über dem Boden und Unebenheiten im Gelände zu einer Veränderung des Schalleinfallswinkels α führen. Diese wirken sich auf das Messergebnis aus. Auch die Signalquelle selbst kann problematisch sein: Da ein breiter Frequenzbereich untersucht werden soll, haben gebräuchliche Lautsprecher, die diesen abdecken, typischerweise ein Mehrwegesystem, das über eine wie auch immer geartete Frequenzweiche mehrere Lautsprecherchassis ansteuert. Dies führt dazu, dass die Signalquelle strenggenommen nicht als akustische Punktquelle betrachtet werden kann. Es ist allerdings zu vermuten, dass der Einfluss vernachlässigbar klein ist.

5.4.5 Zeitvarianzen

Auch wenn zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung ausgenutzt wird, dass Sekundärwindschirme während einer Messung als LTI-System betrachtet werden können, ist diese Näherung für den praktischen Gebrauch, zumindest was Zeitinvarianz betrifft, nicht plausibel. Weil die Schirme bei ihrem typischen Gebrauch außerhalb von Laborbedingungen diversen Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, stellt die messtechnisch ermittelte Einfügungsdämpfung lediglich eine Momentaufnahme dar.

Temperatur

Auch wenn eine Untersuchung des schalltechnischen Verhaltens von Sekundärwindschirmen bezüglich einer Temperaturabhängigkeit nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, deutet die Tatsache, dass Eigenmoden im Schirm für einen maßgeblichen Anteil der Einfügungsdämpfung verantwortlich sind, darauf hin, dass eine solche Abhängigkeit vorhanden ist. Da die Schallgeschwindigkeit in Luft proportional zur Quadratwurzel der Temperatur ist, ist zu vermuten, dass sich die Ausprägung der Moden wegen des Zusammenhangs zwischen Wellenlänge und Schallgeschwindigkeit verändert, was sich im Frequenzgang der Einfügungsdämpfung niederschlägt. Möglich wäre, dass eine Veränderung der Terzwerte vor allem durch die Stauchung der Extrema des Einfügungsdämpfungsverlaufs entlang der Frequenzachse bedingt werden wird, die die Lage der Extrema innerhalb der Terzbänder verändert. Eine Quantifizierung dieser Veränderungen könnte messtechnisch durchgeführt werden.

Feuchtigkeit

Feuchtigkeit ist eine in der Praxis schwer zu quantifizierende Größe, die einen, wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert wurde, signifikanten Einfluss auf die akustischen Eigenschaften von Sekundärwindschirmen hat. Gemeint ist dabei weniger die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung, auf deren Einfluss im Rahmen dieser Arbeit kein gezieltes Augenmerk gerichtet wird, als die „Nassheit“ der winddämmenden Schirmschicht. Weil nicht zu verhindern ist, dass Sekundärwindschirme während des bestimmungsgemäßen Gebrauchs bei Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen Niederschlag ausgesetzt sind, ist der Einfluss von Feuchtigkeit zwar während der Bestimmung der Einfügungsdämpfung handhabbar, wirkt jedoch auf die Anwendung der gemessenen Korrekturwerte auf Messungen im Feld einen Schatten der Unsicherheit.

Verschmutzung und Materialalterung

Sekundärwindschirme sind bei ihrem Gebrauch im Feld Feuchtigkeit, UV-Bestrahlung, Schlamm, Staub und mechanischer Beanspruchung ausgesetzt. [Tran-Luu/Solomon 2006] beschreiben Veränderungen der akustischen Eigenschaften von Primärwindschirmen aus Schaumstoff, die einigen der o. g. Einflüsse ausgesetzt waren. Es ist davon auszugehen, dass auch Sekundärwindschirme ihr akustisches Verhalten mit der Zeit ändern. Dies kann insofern zu Unsicherheit führen, als dass nicht klar sein kann, ob Veränderungen der Einfügungsdämpfung, die zu verschiedenen Zeitpunkten messtechnisch nachgewiesen werden, auf klimatische Einflüsse während der Messung oder aber auf Exposition während eines Einsatzes bei Schallemissionsmessungen, die im Zeitraum zwischen den Einfügungsdämpfungsmessungen durchgeführt wurden, zurückzuführen sind.

5.5 Einfluss von Unsicherheiten in Bezug auf den immissionsrelevanten Schalleistungspegel

Um einen Eindruck zu gewinnen, in welcher Größenordnung der Einfluss der Einfügungsdämpfung des Sekundärwindschirms auf den immissionsrelevanten Schalleistungspegel liegt, soll an dieser Stelle eine überschlagsartige Rechnung durchgeführt werden. Grundlage für die Betrachtungen bildet ein A-bewertetes Terzspektrum, welches repräsentativ für die Geräusche ist, die während einer Schallemissionsmessung bei laufender Windenergieanlage in Referenzentfernung R_0 mit dem Mikrofon auf der schallharten Platte gemessen werden. Solche Spektren sind die Grundlage der Schalleistungspegelermittlung.

Es wird angenommen, dass mit dem Windschirm H012 gemessen wurde. In Tabelle A.2 wird die Korrektur der Terzen sowohl mit den Werten vorgenommen, die in Tabelle A.1 als Messergebnisse für die Einfügungsdämpfung von H012 angegeben sind, als auch

mit den sich aus der Addition bzw. Subtraktion 1,96-fachen Standardabweichung ergebenden Grenzen des 95 %- Konfidenzintervalls der jeweiligen Dämpfungswerte. Es wird von jedem der Spektren ein Summenpegel gebildet. Aus der Differenz dieser Summenpegel kann abgeschätzt werden, in wie weit sich Unsicherheiten bei der Ermittlung der Einfügungsdämpfung des Schirmes bei der Auswertung von Schallemissionsmessungen fortpflanzen. Die Summenpegel sind in Tabelle 5.3 zu finden.

Tabelle 5.3: Summenpegel eines Anlagenspektrums, unkorrigiert und mit Windschirmkorrekturen, frequenzabhängige Werte: siehe Tab. A.2

Anlagengeräusch in dB				
	L_{aeq}	$L_{aeq} + D$	$L_{aeq} + D + 1,96 \cdot s_{(+)}$	$L_{aeq} + D - 1,96 \cdot s_{(-)}$
Σ	53,7	54,3	54,4	54,2

Es wird ersichtlich, dass im Falle dieses konkreten Beispiels die Addition bzw. Subtraktion der 1,96-fachen Standardabweichung der terzabhängigen Einfügungsdämpfung im Summenpegel zu Abweichungen von lediglich 0,1 dB gegenüber dem einfügungsdämpfungskorrigierten Summenpegel führen. Die Abweichung ist also gering gegenüber den 0,7 dB Unterschied zwischen dem unkorrigierten Summenpegel L_{aeq} und dem korrigierten Summenpegel $L_{aeq} + D$. Dies lässt darauf zurückzuführen, dass die hohen Frequenzen, bei denen die Dämpfungswerte eine vergleichsweise hohe Standardabweichung haben, nur in geringem Maße zum Summenpegel der Windenergieanlage beitragen. Natürlich kann diese Art der Betrachtung nicht für alle Messsituationen pauschalisiert werden, weil eine veränderte spektrale Zusammensetzung des gemessenen Geräusches zu einer anderen Auswirkung der Abweichungen auf den Summenpegel führt. Es soll lediglich eine illustriert werden, in welcher Größenordnung sich der Einfluss bewegen kann.

6 Zusammenfassende Beurteilung

Die vorliegende Arbeit ist der Findung eines Messverfahrens zur Bestimmung des Einflusses eines Sekundärwindschirms auf den Frequenzgang (Einfügungsdämpfung) bei Schallemissionsmessungen nach [DIN EN 61400-11] sowie der Untersuchung der Dämpfungscharakteristik solcher Schirme gewidmet.

Im Verlaufe der Untersuchungen konnten beide Aspekte mit Erfolg bearbeitet werden. Es wurde ein Messverfahren entwickelt, welches darauf basiert, die Leistungsdichtespektren von Sweepsignalen mittels eines Computers auszuwerten und so den Betrag der Übertragungsfunktion bzw. den Verlauf der Einfügungsdämpfung in Schmalbandspektren konstanter absoluter Bandbreite sowie mittels einer Umrechnung als Terzpegel darzustellen. Mithilfe dieses Messverfahrens wurde sowohl das Verhalten zweier Schirme, die als kommerzielles Produkt erhältlich sind, als auch das einer Eigenkonstruktion, die sich streng an normativen Empfehlungen orientiert, untersucht. Außerdem wurden Betrachtungen zu Messabweichungen gemacht.

Für die messtechnische Bestimmung der Einfügungsdämpfung hat sich das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren als geeignet erwiesen. Der theoretische Ansatz, das Prüfobjekt als LTI-System zu behandeln, lässt sich in hinreichender Weise auf die Realität übertragen. Nur dort, wo die LTI-Bedingungen nicht erfüllt sind (Beispiel: Kausalität - Windgeräusche, vgl. Abschnitt 5.4.3) kommt es zu unplausiblen Messergebnissen.

Eine zentrale Erkenntnis, die aus der Untersuchung verschiedener Sekundärwindschirme gewonnen werden konnte, betrifft das modenartige Verhalten, welches den Verlauf der Einfügungsdämpfung prägt. Die regelmäßigen Extrema in den Kurvenverläufen und die starke Abhängigkeit der Frequenzen dieser Extrema deuten auf das Vorhandensein von Raummoden innerhalb des hemisphärischen Hohlkörpers hin, der gemäß normativer Vorgabe den Schirm bildet. Dieses Verhalten steht ebenfalls im Verdacht, für die großen Abweichungen der Einfügungsdämpfung im Bereich hoher Frequenzen bei unterschiedlicher vertikaler Schalleinfallrichtung verantwortlich zu sein. Die Einfügungsdämpfung sekundärer Windschirme wird maßgeblich also nicht durch Schalldissipation innerhalb der Schirmwand bestimmt, sondern durch Reflexionen.

Die Einfügungsdämpfung der beiden annähernd baugleichen DELTA-Windschirme wurde messtechnisch bestimmt. Die Messergebnisse beider Schirme unterscheiden sich nur marginal. Abweichend von den Herstellerangaben konnte nachgewiesen werden, dass die Einfügungsdämpfung beider Schirme bei Terzmittenfrequenzen ≤ 250 Hz von zu vernachlässigendem Ausmaß ist. Im Bereich zwischen 315 Hz und 2500 Hz stimmen die messtechnisch ermittelten Werte mit den Herstellerangaben in guter Näherung überein; oberhalb dessen wurden höhere Dämpfungswerte gemessen, als vom Hersteller angegeben sind. Dies lässt sich möglicherweise auf Alterung und Verschmutzung der Schirme sowie auf die vergleichsweise hohe Messunsicherheit in jenem Frequenzbereich zurückführen.

Es wurden Untersuchungen zum Einfluss von Nässe auf die Einfügungsdämpfung der

Schirme gemacht. Dabei ließ sich eine Tendenz zu höherer Dämpfung bei nassem Schirm beobachten. Jedoch ist die Veränderung der Einfügungsdämpfung nicht gravierend und deshalb zu vernachlässigen, besonders im Verhältnis zu dem Aufwand, den eine Quantifizierung der Feuchtigkeit der Schirmwand und die Verknüpfung dieser Feuchtigkeit zu anderen Korrekturwerten in der Praxis bedeuten würden.

Die Untersuchung des selbstkonstruierten Windschirms CK01 zeigte ein qualitativ ähnliches Verhalten wie bei den DELTA-Fabrikaten. Jedoch ist die Einfügungsdämpfung je Terz in allen Frequenzbereichen wesentlich geringer. Inwieweit die Konstruktion für Schallmessungen an Windenergieanlagen geeignet ist, ist davon abhängig, welche windgeräuschkindernden Eigenschaften der Schirm besitzt. Diese wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit völlig außenvorgelassen und sind ein möglicher Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Messunsicherheiten treten vornehmlich im Bereich oberhalb von 2000 Hz auf. Bei der Standardabweichung innerhalb einer vollständigen Messung mit drei Lautsprecherpositionen ist maßgeblich die systematische Abweichung, die durch den Einfluss des Schalleinfallswinkels auf Einfügungsdämpfung bedingt wird, für vergleichsweise große Werte in diesem Frequenzbereich verantwortlich.

Es wurde anhand eines beispielhaften Betriebsgeräuschkennlinien einer Windenergieanlage gezeigt, dass dabei diejenigen Frequenzanteile, bei denen eine hohe Unsicherheit bezüglich der Einfügungsdämpfung des Windschirms herrscht, einen geringeren Anteil an für die Bestimmung des immissionsrelevanten Schalleistungspegels maßgeblichen äquivalenten Schalldruckpegel haben, als die, in denen die Standardabweichung gering ist. Dies führt zu einem geringen Beitrag der Unsicherheit der Einfügungsdämpfung des Sekundärwindschirms an der Messunsicherheit bei der Bestimmung des immissionsrelevanten Schalleistungspegels einer Windenergieanlage.

7 Ausblick

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelten Aspekte bezüglich des akustischen Verhaltens von Sekundärwindschirmen können als Diskussionsgrundlage für weitere Bemühungen auf diesem Gebiet gesehen werden. Das Messverfahren kann mit kleinen Anpassungen auch zur Bewertung der Einfügungsdämpfung anderer Windschirmtypen eingesetzt werden. Es wäre dabei möglich, den Ablauf der Messungen in Hinblick auf eine zügigere Messdurchführung und Auswertung zu optimieren, indem anstelle zweier unabhängiger Schallpegelmesser und einer Testsignalquelle ein computerbasiertes System zum Einsatz kommt, was sowohl die Testsignalwiedergabe als auch die Audioaufzeichnung übernimmt und darauf basierend ohne manuelle Arbeitsschritte die Auswertung der Daten durchführt.

Das in Abschnitt 2.3.2 erwähnte Rechenmodell nach [Mechel 2012, S. 263 ff.] könnte möglicherweise dahingehend angepasst werden, das Dämpfungsverhalten von Sekundärwindschirmen analytisch zu beschreiben. Ob dies jedoch einen hilfreichen Beitrag zur Debatte bezüglich der Anwendung solcher Schirme bei Schallemissionsmessungen an Windenergieanlagen darstellt, obliegt dem Urteil des Betrachters.

Eine Möglichkeit, einen Windschirm zu entwickeln, dessen Einfügungsdämpfung weniger von systematischen Einflussgrößen wie der Positionierung des Mikrofons innerhalb des Schirms und dem Schalleinfallswinkel abhängt, kann darin liegen, die geometrische Formgebung des Schirmkörpers dahingehend zu verändern, eine Figur zu wählen, die weniger zu Brennpunktbildung und ausgeprägten Raummoden bei im Verhältnis zum Schirm kleinen Wellenlängen neigt. Dem Verfasser kam diesbezüglich spontan der Tetraeder als praktisch geeignete Form in den Sinn. Jedoch müssen bei Entwicklungen in dieser Richtung Untersuchungen nicht nur bezüglich der Einfügungsdämpfung, sondern auch bezüglich der windgeräuschmindernden Eigenschaften derartiger Konstruktionen gemacht werden.

Für den ingenieurstechnischen Realbetrieb ist entscheidend, dass neue Erkenntnisse, die über Sekundärwindschirme als Einflussfaktor bei Schallmessungen an Windenergieanlagen gewonnen werden, in den betreffenden nationalen und internationalen Normen berücksichtigt werden. Während Anhang E zu [DIN EN 61400-11] lediglich informativen Charakter hat, wäre es aus Sicht des Verfassers begrüßenswert, wenn in zukünftigen Versionen der Norm unter Berücksichtigung weiterer Forschung zum schalltechnischen Verhalten von Sekundärwindschirmen normative Festlegungen zu deren Bauart getroffen werden. Solange nicht in einem anerkannten Regelwerk eine Grundlage für die Verwendung von Sekundärwindschirmen, deren Form von der bislang empfohlenen Hemisphäre abweicht, zu finden ist, ist es unwahrscheinlich, dass Unternehmen andersartige Windschirme bei Schallemissionsmessungen verwenden. Ein möglicher Gewinn an Präzision bei den Messergebnissen wird durch eine Anfechtbarkeit der ausgestellten Messgutachten, die sich in einer Abweichung von der gültigen normativen Empfehlung begründet, aufgewogen.

Anhang A: Tabellarische Auflistungen

A.1 Daten zu Abbildung 4.14

Tabelle A.1: Einfügungsdämpfung D je Terz mit der Mittenfrequenz f_{tm} , empirische Standardabweichung s
Messergebnisse im Mittel und Herstellerangabe
Die Werte von D sind lediglich auf eine Nachkommastelle angegeben, um die Suggestion nicht vorhandener Präzision zu vermeiden.

f_{tm} / Hz	Messwerte / dB									Herstellerangabe / dB			
	H012			H101			CK01			H012		H101	
	D	$s_{(+)}$	$s_{(-)}$	D	$s_{(+)}$	$s_{(-)}$	D	$s_{(+)}$	$s_{(-)}$	D	s	D	s
50	0,1	0,05	0,05	0,1	0,07	0,07	0,0	0,24	0,24	0,4	0,2	k.A.	k.A.
63	0,0	0,03	0,03	0,0	0,04	0,04	-0,1	0,06	0,06	0,2	0,3	k.A.	k.A.
80	0,0	0,02	0,02	0,0	0,04	0,04	-0,1	0,05	0,05	0,2	0,2	k.A.	k.A.
100	0,0	0,02	0,02	0,0	0,04	0,04	0,0	0,02	0,02	0,3	0,1	-0,1	0,19
125	0,0	0,01	0,01	0,0	0,02	0,02	0,0	0,02	0,02	0,2	0,1	-0,3	0,11
160	-0,1	0,01	0,01	-0,1	0,02	0,02	0,0	0,02	0,02	-1,2	0,2	-0,5	0,09
200	0,0	0,02	0,02	-0,1	0,02	0,02	-0,1	0,03	0,03	0,2	0,2	0,1	0,12
250	0,0	0,02	0,01	0,0	0,02	0,02	0,0	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,07
315	0,2	0,02	0,02	0,1	0,02	0,02	-0,1	0,03	0,03	0,2	0,1	0,1	0,07
400	0,5	0,02	0,02	0,5	0,04	0,04	0,0	0,02	0,02	0,6	0,2	0,3	0,15
500	0,9	0,02	0,02	0,9	0,04	0,04	0,0	0,02	0,02	1,2	0,1	1,1	0,10
630	1,4	0,02	0,02	1,5	0,02	0,02	0,3	0,02	0,02	1,4	0,1	1,4	0,09
800	1,4	0,04	0,04	1,6	0,09	0,09	0,5	0,02	0,02	1,6	0,3	1,7	0,16
1000	0,9	0,06	0,06	0,9	0,10	0,11	0,3	0,04	0,04	0,8	0,4	1,0	0,33
1250	1,0	0,05	0,05	1,1	0,11	0,11	0,0	0,05	0,05	1,1	0,3	0,9	0,34
1600	1,9	0,06	0,06	1,9	0,12	0,13	0,6	0,02	0,02	1,8	0,3	1,9	0,17
2000	1,7	0,06	0,06	1,9	0,10	0,10	0,6	0,11	0,11	1,9	0,6	1,5	0,27
2500	1,9	0,14	0,14	2,0	0,28	0,29	0,8	0,13	0,13	2,0	0,6	1,9	0,56
3150	2,0	0,26	0,26	2,2	0,48	0,51	0,7	0,26	0,27	1,8	1,0	2,0	0,67
4000	1,9	0,42	0,44	2,1	0,44	0,47	0,7	0,52	0,55	1,1	0,5	1,4	0,87
5000	2,4	0,33	0,35	1,8	0,69	0,75	0,9	0,42	0,40	0,9	0,6	1,1	0,35
6300	1,6	0,30	0,31	1,7	0,22	0,22	0,2	0,43	0,46	1,0	0,6	1,2	1,20
8000	2,8	0,28	0,29	2,3	0,34	0,36	0,7	0,37	0,38	1,4	0,5	1,5	0,73
10000	2,3	0,20	0,20	2,4	0,17	0,17	1,3	0,37	0,38	1,7	0,4	1,8	0,81

A.2 Rechenbeispiel: Fortpflanzung der Messunsicherheit

Tabelle A.2: Rechenbeispiel: Auswirkung der Messunsicherheit der Einfügungsdämpfung auf den Summenpegel von typischen Betriebsgeräuschen einer Windenergieanlage

f_{tm} / Hz	Anlagengeräusch in dB			
	gemessen L_{aeq}	$L_{aeq} + D$	mit Schirmkorrektur $L_{aeq} + D + 1,96 \cdot s_{(+)}$ $L_{aeq} + D - 1,96 \cdot s_{(-)}$	
50	27,5	27,6	27,8	27,4
63	28,8	28,8	29,0	28,6
80	30,1	30,1	30,2	30,0
100	31,6	31,6	31,6	31,5
125	36,4	36,4	36,5	36,3
160	47,3	47,2	47,2	47,1
200	37,8	37,8	37,9	37,8
250	40,4	40,4	40,5	40,4
315	42,9	43,1	43,2	43,1
400	43,8	44,3	44,4	44,2
500	43,6	44,5	44,5	44,4
630	44,3	45,7	45,8	45,7
800	43,2	44,6	44,7	44,5
1000	42,1	43,0	43,2	42,9
1250	40,3	41,3	41,5	41,1
1600	38,2	40,1	40,3	40,0
2000	34,8	36,5	36,7	36,3
2500	31,6	33,5	33,8	33,1
3150	26,4	28,4	29,2	27,6
4000	21,2	23,1	24,6	21,5
5000	16,4	18,8	20,0	17,6
6300	14,0	15,6	16,7	14,5
8000	14,0	16,8	17,5	16,1
10000	14,5	16,8	17,3	16,3
Σ	53,7	54,3	54,4	54,2

Anhang B: Quellcode

B.1 Auswertung in GNU Octave

```

%auswertung_17-03-06
clear all
pkg load signal

N=16384;           % Fensterlaenge
fs= 48000;        % Samplerate
fnyq=fs/2;        % Nyquist-
                  % Frequenz
U=0.95;           % Ueberlappung

                  % Einlesen der
                  % Audiofiles
s1= audioread("samples/LP3_CK01_A_0_S4.wav"); %
    Mikrofon A (Referenz) MR1
s2= audioread("samples/LP3_CK01_B_0_S4.wav"); %
    Mikrofon B (Test) MR1 OHNE SCHIRM
s3= audioread("samples/LP3_CK01_A_M_S4.wav"); %
    Mikrofon A (Referenz) MR 2
s4= audioread("samples/LP3_CK01_B_M_S4.wav"); %
    Mikrofon B (Test) MR 2 MIT SCHIRM

f_1= 0 : (fs/N) : (fs/2); % Frequenzachse

P11=cpsd(s1,s1,[],U,N); % Bildung der
    Autoleistungsdichtespektren
P22=cpsd(s2,s2,[],U,N);
P33=cpsd(s3,s3,[],U,N);
P44=cpsd(s4,s4,[],U,N);

G1=P22./P11; % Errechnen
    Uebertragungsfkt Referenzmik. zu Mik. im Schirm
G2=P33./P44; % Errechnen
    inversen Uebertragungsfkt ohne Schirm
G=sqrt(G1.*G2); % Multiplikation
    im f-Bereich entspricht Faltung im t-Bereich
H=20*log10(G'); %
    Pegeldifferenzschreibweise

```

```

figure;                                     %grafische
    Ausgabe
semilogx(f_1,H);
grid minor;
xlabel("Frequenz/Hz");
ylabel("Einfuegungsdaempfung/dB")
axis([50,10000,-6,6])

```

B.2 Berechnung von Terzpegeln

```

% Terzmittenfrequenzen im zu untersuchenden
% Frequenzbereich
pkg load io
ftm
    =[50,63,80,100,125,160,200,250,315,400,500,630,800,1000,
        1250,1600,2000,2500,3150,4000,5000,6300,8000,10000];

fu=ftm.*(1/pow2(1/6));                       % untere
    Grenzfrequenzen
fo=ftm.*(pow2(1/6));                         % obere
    Grenzfrequenzen

name='ausgabe001.xlsx';                      % Dateiname
    fuer Excel-Export der Ergebnisse
sheet = 1;                                   %
ort1 = 'A1';                                  %

A=zeros(1,1);                                %
    Initialisierungen
W=zeros(1,1);

for i=1:(length(G))                          % Erstellen
    eines Vektors fuer logarithmische Wichtung
    W(1,i)=(log10(i)/log10(length(G)+1));
end
W=fliplr(W);

HW=G.*W;                                     %Anwendung der
    log. Wichtung auf den linearen Frequenzgang

```

```
% jeder Terz werden Werte aus dem HW-Vektor zugewiesen, diese werden in A sortiert, dabei ist jede Zeile eine Terz
for k = 1 : length(ftm)
    for i = round((fu(k)*(N/fs))):round((fo(k)*(N/fs)))
        A(k,(i+1-round((fu(k)*(N/fs)))))=HW(i);
    end
end

for k= 1 : length(ftm)
    B(k)=20*log10(sum(A(k,:))/(round((fo(k)*(N/fs)))-round((fu(k)*(N/fs))+1))); %Terzpegel wird aus der Summe der gewichteten Einzelwerte ermittelt
end

% grafische Darstellung als Balkendiagramm
figure;
bar(log10(ftm),real(B),"c");
set(gca,'XScale','log');
set(gca,'Xtick',log10(ftm(1:3:end)));
set(gca,'Xticklabel',10.^get(gca,'Xtick'));
grid minor;
xlabel("Frequenz/Hz");
ylabel("Einfuegungsdaempfung_je_Terz/dB");
axis([log10(45),log10(11500),-3,6])

% Ausgabe der Werte in Excel-Datei
erg=[ftm',real(B')];
xlswrite(name,erg,sheet,ort1);
```

Anhang C: Messprotokoll

Messprotokoll Windschirmkalibrierung

VV3-Reihe

	MP 1	MP 2	MP 3
Mikrofon A			
Mikrofon B			

Messzeit: _____ Temperatur: _____
 rel. Luftfeuchtigkeit: _____ Luftdruck: _____

Anmerkungen:

Datum: _____

Mikrofon A Schirm:

Mikrofon B Schirm:

Testsignalwiedergabe:

Messpunkt _____	FF / DF	b :	l :	h :	K(A):	K(B):
Ort:	_____					
Testsignal:	_____					
Windschirm:	Mikrofon A			Mikrofon B		
	Speichernummer	Dateiname	Speichernummer	Dateiname		
Messung ohne Schirm						
Messung mit Schirm						

Messpunkt _____	FF / DF	b :	l :	h :	K(A):	K(B):
Ort:	_____					
Testsignal:	_____					
Windschirm:	Mikrofon A			Mikrofon B		
	Speichernummer	Dateiname	Speichernummer	Dateiname		
Messung ohne Schirm						
Messung mit Schirm						

Messpunkt _____	FF / DF	b :	l :	h :	K(A):	K(B):
Ort:	_____					
Testsignal:	_____					
Windschirm:	Mikrofon A			Mikrofon B		
	Speichernummer	Dateiname	Speichernummer	Dateiname		
Messung ohne Schirm						
Messung mit Schirm						

Seite _____ von _____

Abbildung C.1: Messprotokoll

Literaturverzeichnis

- [Adcock et al. 2015] Adcock, Justin; Delaire, Christophe; Griffin, Daniel; Jiggins, Mark: *Study of secondary wind shield performance in the field*, 6th International Conference on Wind Turbine Noise, Glasgow, 2015
- [Blau 2000] Blau, Matthias: *Zur Quantifizierung statistischer Fehler des Betrages FFT-basierter Kreuzleistungsdichteschätzer*, Fortschritte der Akustik - DAGA 2000, Oldenburg
- [DIN 1319-1] DIN 1319-1:1995-1, *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*
- [DIN 55350-13] DIN 55350-13:1987-07, *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik: Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen*
- [DIN EN 61400-11] DIN EN 61400-11:2013-09, *Windenergieanlagen - Teil 11: Schallmessverfahren (IEC 61400-11:2012); Deutsche Fassung EN 61400-11:2013*
- [DIN EN 61672-1] DIN EN 61672-1:2014-07, *Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013); Deutsche Fassung EN 61672-1:2013*
- [DIN EN ISO 266] DIN EN ISO 266:1997-08, *Akustik - Normfrequenzen (ISO 266:1997); Deutsche Fassung EN ISO 266:1997*
- [Elpelt/Hartung 2004] Elpelt, Bärbel; Hartung, Joachim: *Grundkurs Statistik: Lehr- und Übungsbuch der angewandten Statistik*, 3. Aufl., München, Wien 2004
- [Elster 2014] Elster, Clemens: *Bayesian uncertainty analysis compared with the application of the GUM and its supplements*, Metrologia 51 (2014), S. 159 - S. 186
- [Gerthsen 2006] Meschede, Dieter (Hrsg.): *Gerthsen Physik*, 23. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, 2006
- [Grabe 2011] Grabe, Michael: *Grundriss der Generalisierten Gauß'schen Fehlerrechnung*, 1. Aufl., Berlin, Heidelberg, 2011
- [GUM 2008] JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*
- [Hau 2006] Hau, Erich: *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Second Edition, Berlin, Heidelberg, 2006

- [Kammeyer 2004] Kammeyer, Karl-Dirk: *Nachrichtenübertragung*, 3. Aufl., Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2004
- [Kreß/Kaufhold 2010] Kreß, Dieter ; Kaufhold, Benno: *Signale und Systeme verstehen und vertiefen : Denken und Arbeiten im Zeit- und Frequenzbereich*, 1. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, 2010
- [Lerch et al. 2009] Lerch, Reinhard ; Sessler, Gerhard M. ; Wolf, Dietrich: *Technische Akustik : Grundlagen und Anwendungen*, 1. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, 2009
- [Lin et al. 2014] Lin, I-Chun; Hsieh, Yein-Rui et. al. (2014): *The Effekt of Wind on Low Frequency Noise*, inter.noise 2014, Melbourne
- [Novak et al. 2014] Novak, Colin; Sjöström, Anders; Ule, Helen et al. (2014): *An Investigation of Different Secondary Noise Wind Screen Designs for Wind Turbine Noise Applications*, inter.noise 2014, Melbourne
- [Mechel 2008] Mechel, Fridolin P.: *Formulas of Acoustics*, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, 2008
- [Mechel 2012] Mechel, Fridolin P.: *Room Acoustical Fields*, 1. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, 2012
- [Meyer 2008] Meyer, Martin: *Signalverarbeitung : Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*, 7. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, 2014
- [Morgan/Raspet 1992] Morgan, Scott; Raspet, Richard (1992): *Investigation of low-frequency wind noise generation outdoors*, Journal of the Acoustic Society of America, 92(20), S. 1180 - S. 1183
- [Möser 2012] Möser, Michael: *Technische Akustik*, 9., aktual. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, 2012
- [Parthier 2016] Parthier, Rainer: *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*, 8. Aufl., Wiesbaden, 2016
- [Ribeiro et al.] Ribeiro, Carlos; Ecotièrre, David; Cellard, Patrick; Rosin, Christophe: *Uncertainties of the frequency response of wet microphone windscreens*, Applies Acoustics 78, S. 11 - S. 18, 2014
- [Schmidt/Jeschke 1997] Schmidt, A.; Jeschke, D.: *Parameterstudie zur Terzfilterung mittels der Fast-Fourier-Transformation*, IMW - Institutsmittteilung Nr. 22, 1997

- [Siebert 2006] Siebert, Bernd R. L.: *Ermittlung der Messunsicherheit, Teil 1: Grundlegende Konzepte*, Fortschritte der Akustik - DAGA 2006, Braunschweig
- [TA Lärm] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm, TA Lärm*, 26.08.1998
- [Tedrick 1964] Tedrick, R. N., *Small Foamed Polystyrene Shield Protects Low-Frequency Microphones from Wind Noise*, NASA Tech Brief 63-10579, Mai 1964
- [Tran-Luu/Solomon 2006] Tran-Luu, Duong; Solomon, Latasha (2006): *Analysis of Windscreen Degradation on Acoustic Data*, US Army Research Laboratory Adelphi, Online abrufbar: <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA481504>, Zugriff: 23.11.2016
- [Unbehauen 2002] Unbehauen, Rolf: *Systemtheorie 1 : Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich*, S. 52 f., Berlin, 2002
- [Vorländer 2009] Vorländer, Michael: *Digitale Signalverarbeitung in der Messtechnik*, erschienen in: Möser, Michael (Hrsg.): *Messtechnik der Akustik*, 1. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, 2009
- [Werner/Heinen 1990] Werner, E.; Heinen, R.: *Zur Messung der Windempfindlichkeit von Mikrofonen*, Fortschritte der Akustik - DAGA 1990, Wien
- [Willink 2006] Willink, Robin: *Principles of probability and statistics for metrology*, Metrologia 43 (2006), S. 211 - S. 219
- [Wuttke 1988] Wuttke, Jörg: *Der Schutz von Mikrofonen verschiedener Arbeitsweise gegen Wind*, Fortschritte der Akustik - DAGA 1988, Braunschweig

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Bargeshagen, 07.05.2017