

Abschlussbericht für das Teilvorhaben

“HiOloc - Lokalisation und Klassifikation von
Kavitationsvorgängen durch raumzeitliche Analyse
von Druckschwankungen”

im Verbundvorhaben

”HiOcav - Verbesserte Prognose der durch die Wechselwirkung zwischen
Schicht- und Spitzenwirbelkavitation bedingten Druckschwankungen
höherer Ordnung“

im Rahmenprogramm

”Maritime Technologien der nächsten Generation“



Universität Rostock (URO)
Institut für Nachrichtentechnik (INT)
Prof. Dr.-Ing. Sascha Spors
Richard-Wagner-Strasse 31
18119 Rostock

Tel.: +49 381 498 7300

Fax.: +49 381 498 7302

E-Mail: Sascha.Spors@uni-rostock.de

Rostock, 1. Januar 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	2
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	2
1.3	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele	4
1.4	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
1.5	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.6	Wissenschaftlich technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
1.7	Literatur	8
1.8	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2	Akustische Lokalisationsverfahren	13
2.1	Entwicklung Lokalisation	13
2.2	Störgeräuschunterdrückung	16
2.3	Fusion mit optischen Messungen	19
2.4	Technologietransfer	21
3	Entwicklung akustischer Klassifikationsverfahren	22
3.1	Featuregenerierung	22
3.2	Unsupervised Learning	24
3.3	Supervised Learning	26
3.3.1	Neuronale Netze	26
3.3.2	Random Forest	28
4	Messungen am Tragflügel	32
4.1	Messvorbereitungen	33
4.2	Lokalisierungsmessungen	41
4.3	Kavitationsklassifikation	44

5	Messungen am Propeller	48
5.1	Versuche mit symmetrischem Nachstrom	48
5.1.1	Versuchsaufbau	48
5.1.2	Lokalisierung	54
5.1.3	Klassifikation	58
5.2	Versuche mit verkürztem Hinterschiff	65
5.2.1	Versuchsaufbau	65
5.2.2	Kalibrierungsmessungen	65
5.2.3	Lokalisierung	72
5.2.4	Kavitationsklassifikation	76
6	Großausführungsmessungen	80
6.1	Versuchsaufbau	80
6.2	Kalibrierungsmessungen	86
6.3	Lokalisierung	93
6.3.1	Vergleich P1724 und P1889	97
6.4	Kavitationsklassifikation	102
7	Verwertung der Ergebnisse	105
8	Gegenüberstellung des Projektergebnisses zu den vorgegebenen Zielen	106
9	Veröffentlichungen	107

Abbildungsverzeichnis

1.1	Lokalisation eines Kavitationsereignisses im Kavitationskanal für verschiedene Flussgeschwindigkeiten. Bei der Messung wurden 22 Hydrophone in einer kreuzförmigen Anordnung benutzt. Die Lokalisation erfolgte mit der Straight-Ray Monte-Carlo Methode. Abbildung 3.26 aus [INT1].	8
2.1	Schematische Darstellung des Delay-And-Sum Beamformers [3]	13
2.2	Acoustic Map der Kalibrierungsversuche an der SVA Potsdam für den klassischen Beamformer (links) und CleanSC (rechts)	16
2.3	Audiosignal der akustischen Vermessung der Störgeräusche des leeren Kavitationskanals und das TKE gefilterte Signal im Zeitbereich (links) und im Frequenzbereich (rechts)	17
2.4	Akustisches Signal einer Kavitationsblase: Laserinduzierte Blasengeneration (a), wandnaher Blasenkollaps (b) Lauterborn et al [8]	18
2.5	Dirac Impuls bei $n = 1000$ überlagert mit einer Sinusfunktion und weißem Rauschen mit einem $SNR = 100$ (links) und das Ergebnis der TKE Filterung (rechts)	18
2.6	Triggersignal einer Beispielmessung am Kavitationskanal der SVA	20
2.7	Importierte STL Geometrien des Flügels (links) und des Referenzpropellers (rechts) mit beispielhafter Quellenverteilung	21
3.1	Beispielhaftes Spektrogramm der WaveletPacket Transformation für ein $t_F = 0, 1 s$ langes Audiosegment (links) und der darauf berechnete Feature Vektor mit 20 Statistikgrößen je Frequenzband (rechts)	23
3.2	Beispiel des k-Means Algorithmus in einem zweidimensionalen Feature-raum und drei Clustern	25
3.3	Spektrogramm eines TKE gefilterten Signals aus den Flügelversuchen (links) und Ergebnis der k-Means Klassifikation (rechts)	25

3.4	Typische Kavitationszeitreihen in den Messdaten, sortiert nach Häufigkeit	26
3.5	Beispielhaftes Neuronales Netzwerk mit drei Hidden Layern	27
3.6	Validation Accuracy und Validation Loss der Klassifikation der Versuchsreihen mit konstanter Geschwindigkeit mit einem Neuronalen Netzwerk	28
3.7	Confusion Matrix der akustischen Kavitationsklassifikation mit allen 1280 Features, $F_1 = 0,93$	29
3.8	Feature Importance der akustischen Kavitationsklassifikation am Kavitationskanal der SVA	30
3.9	Confusion Matrix der akustischen Kavitationsklassifikation mit den zehn wichtigsten Features, $F_1 = 0,78$	31
4.1	Kavitationskanal der Universität Rostock, LSM	33
4.2	Empfangshydrofon BKS V 8103 in Selbstkavitation (links) und akustisch transparente Vytalex Schutzkappe (rechts)	34
4.3	Einbaupositionen Hydrofon BKS V 8103: freistehend (links) und bündig (rechts)	35
4.4	Ergebnis der Messung zum Kavitationsverhalten der Hydrofone	35
4.5	Spektrogramm der Testmessung leere Anlage mit ansteigender Geschwindigkeitsrampe $2\text{ m/s} \leq v_a \leq 7\text{ m/s}$ mit frei stehendem (links) und bündig versenktem Hydrofon (rechts)	35
4.6	Hydrofonpositionen in den Plexiglasscheiben des K-21: Archimedische Spirale (links) und Underbrink Array (rechts)	36
4.7	Beamforming Output der Archimedischen Spirale in Dezibel für eine Schallquelle mit weißem Rauschen bei $P_{wn} = [0,50,50,1]\text{ m}$ in Abhängigkeit der Frequenz	37
4.8	Beamforming Output des Underbrink Arrays in Dezibel für eine Schallquelle mit weißem Rauschen bei $P_{wn} = [0,50,50,1]\text{ m}$ in Abhängigkeit der Frequenz	37
4.9	Normalisierte Hauptkeulenweite der Archimedischen Spirale für eine Schallquelle mit weißem Rauschen bei $P_{wn} = [0,50,50,1]\text{ m}$ in Abhängigkeit der Frequenz	38
4.10	Normalisierte Hauptkeulenweite des Underbrink Arrays für eine Schallquelle mit weißem Rauschen bei $P_{wn} = [0,50,50,1]\text{ m}$ in Abhängigkeit der Frequenz	38

4.11	Technische Zeichnung der Plexiglasscheibe K-21 mit Bohrfeld in Archimedischer Spirale	39
4.12	Plexiglasscheibe im eingebauten Zustand mit Hydrofonen und Tragflügel im Hintergrund	40
4.13	Kavitationsversuch mit Geschwindigkeitsrampe im K-21: Spektrogramm des Audiosignals (oben) und Kavitationszustände (unten): Flügelschluss der Spitzenwirbelkavitationsblase und Induktion der Saugseitenschichtkavitation bei $t_{exp} = 1 : 00 \text{ min}$ (links); stabile Saugseitenschichtkavitation in maximaler Ausdehnung bei maximaler Anströmgeschwindigkeit bei $t_{exp} = 2 : 00 \text{ min}$ (Mitte); pulsierende Saugseitenschichtkavitation mit wiederholtem Ablösen und Anschließen der Spitzenwirbelkavitation bei $t_{exp} = 2 : 45 \text{ min}$ (rechts)	43
4.14	Beamforming Ergebnis des Kavitationsversuchs mit Rampe für $f = 8 \text{ kHz}$ (oben links) und $f = 10 \text{ kHz}$ (oben rechts) für den intermittierenden Kavitationszustand bei $t_{exp} = 2 : 45 \text{ min}$ (unten)	44
4.15	Audiosignal und TKE gefiltertes Signal aus den Rampenversuchen (links) und Ergebnis der Wavelet Packet Decomposition (rechts)	45
4.16	Klassifikationsergebnis des k-Means Algorithmus (links) und Häufigkeit der Kavitationsmotifs (rechts)	45
4.17	Validation Accuracy und Validation Loss der Klassifikation der Versuchsreihen mit konstanter Geschwindigkeit mit einem Neuronalen Netzwerk	47
5.1	Technische Konstruktionszeichnung für die untere Kanalscheibe der Versuche mit symmetrischen Nachstrom	51
5.2	Hydrofonarray in der unteren Scheibe der kleinen Messstrecke; Bündige Hydrofonmontage	51
5.3	Messaufbau der Messungen mit symmetrischen Nachstrom; NACA 0010 Profil mit Propellerantrieb	52
5.4	Messaufbau der Messungen mit symmetrischen Nachstrom; Hydrofonarray mit Kamerasystem	52
5.5	Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 0, Kavitationszahl $\sigma = 2.8$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,372$ (Aufnahme IET)	55
5.6	Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 4, Kavitationszahl $\sigma = 1.33$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,434$ (Aufnahme IET)	55

5.7	Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 5, Kavitationszahl $\sigma = 1.71$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,434$ (Aufnahme IET)	55
5.8	Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 6, Kavitationszahl $\sigma = 2.04$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,434$ (Aufnahme IET)	56
5.9	Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 8, Kavitationszahl $\sigma = 2.8$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,612$ (Aufnahme IET)	56
5.10	Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 12, Kavitationszahl $\sigma = 1.33$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,6$ (Aufnahme IET)	56
5.11	Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 13, Kavitationszahl $\sigma = 1.71$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,6$ (Aufnahme IET)	57
5.12	Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 14, Kavitationszahl $\sigma = 2.04$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,6$ (Aufnahme IET)	57
5.13	Qualitativer Vergleich der Lokalisierungsverfahren für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ mit unterschiedlichen Formulierungen des Steeringvektors bei 16 (links) und 8 (rechts) Empfangshydrofonen	59
5.14	Ergebnis der Lokalisierungsmessungen für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für unterschiedliche Formulierungen des Steeringvektors mit 16 Hydrofonen und den 8 äußeren Hydrofonen auf dem Radienschnitt $0.95R_P$	60
5.15	Ergebnis der Lokalisierungsmessungen für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ mit CleanSC und 16 Hydrofonen auf der Propellerkreisscheibe und der Propellergeometrie	60
5.16	CleanSC Output in Betriebspunkt OP2 ($\sigma = 2,8$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 bei einer Sauerstoffsättigung von $\alpha/\alpha_s = 0,372$ (links) und $\alpha/\alpha_s = 0,612$ (rechts)	61
5.17	CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 1,33$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 bei einer Sauerstoffsättigung von $\alpha/\alpha_s = 0,434$ (links) und $\alpha/\alpha_s = 0,6$ (rechts)	61
5.18	Beispielhaftes Spektrogramm der WaveletPacket Transformation für ein $t_F = 0,1 s$ langes Audiosegment (links) und den darauf berechneten Feature Vektor (rechts)	63
5.19	Feature Importance der akustischen Kavitationsklassifikation am Kavitationskanal der SVA	64

5.20	Confusion Matrix der akustischen Kavitationsklassifikation mit allen 1280 Features, $F_1 = 0,93$ (links) und mit den zehn wichtigsten Features, $F_1 = 0,78$ (rechts)	64
5.21	Backbordseitiger Messaufbau der Versuche mit verkürztem Hinterschiff am Kavitationskanal der SVA	66
5.22	Laufzeitfehler für eine Schallgeschwindigkeit von $c_0(\theta_w = 20^\circ C) = 1484m/s$	70
5.23	Laufzeitfehler nach Korrektur der Schallgeschwindigkeit auf $c_{0,corr} = 1471 m/s$	70
5.24	Laufzeitfehler nach Korrektur der Schallgeschwindigkeit auf $c_{0,corr} = 1471 m/s$	71
5.25	Beamforming Map der Calibrierungsversuche mit konventionellem Beamformer auf der Propellerkreisscheibe für $100nZ \leq f \leq f_s/2$ des Backbordarrays mit den Hydrofonkanälen 2-8 (links) und des Steuerbordarrays mit den Hydrofonkanälen 9-15; Hydrofonpositionen: Schwarze Punkte, Sendehydrofonposition: Schwarzes Plus	71
5.26	Beamforming Map der Calibrierungsversuche mit CleanSC auf der Propellerkreisscheibe für $100nZ \leq f \leq f_s/2$ des Backbordarrays mit den Hydrofonkanälen 2-8 (links) und des Steuerbordarrays mit den Hydrofonkanälen 9-15; Hydrofonpositionen: Schwarze Punkte, Sendehydrofonposition: Schwarzes Plus	72
5.27	Messung ID=1 (links): Saugseitenschichtkavitation (selten) + Spitzenwirbelkavitation (selten); Messung ID=5 (rechts): Saugseitenschichtkavitation (stabil) + Spitzenwirbelkavitation (stabil)	74
5.28	Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 mit Kavitation ($\sigma = 1,79$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1889 ohne Nabenkappe (links) und mit Nabenkappe (rechts)	75
5.29	Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 kavitationsfrei ($\sigma = 7,00$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1889 ohne Nabenkappe (links) und mit Nabenkappe (rechts)	75
5.30	Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation: Confusion Matrix für den akustisch optimierten Propeller P1889 mit und ohne Nabenkappe mit $F_1 = 0.93$ (links) und die zehn wichtigsten Statistikgrößen, die eine Unterscheidung der Audiosignale erlauben (rechts)	77

5.31	Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation mit den zehn wichtigsten Features: Confusion Matrix für den akustisch optimierten Propeller P1889 mit und ohne Nabenkappe mit $F_1 = 0,92$	78
5.32	Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation mit allen Features für $f > 2048 Hz$: Confusion Matrix für den akustisch optimierten Propeller P1889 mit und ohne Nabenkappe mit $F_1 = 0,84$	78
5.33	Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation mit allen Features für $f > 65536 Hz$: Confusion Matrix für den akustisch optimierten Propeller P1889 mit und ohne Nabenkappe mit $F_1 = 0,72$	79
6.1	Seitenscheiben mit Bohrungen für Hydrofonpositionen; Nummerierung an der Position beschreibt den Messkanal 1-16	82
6.2	Einbaupositionen der Seitenscheiben; normaler Einbau (oben), Scheibenwechsel (unten)	83
6.3	Hydrofonhalterungen in der Scheibe (oben); Sitz der Hydrofone in der Scheibe (unten)	84
6.4	Kalibrierungsmessung: Spektrogramm des Log-Sweeps über $t = 180 s$ aus Messung 7 (Tab. 6.4); Monitorausgang des Sendesignals (oben), empfangenes Signal auf Kanal 1 (unten)	87
6.5	Raumimpulsantwort: Filterverläufe zum Ausgleich von Send- und Empfangscharakteristik	89
6.6	Laufzeitfehler für eine Schallgeschwindigkeit von $c_0(\theta_w = 20^\circ C) = 1484 m/s$ und unkorrigierte Arrayabstände	90
6.7	Laufzeitfehler nach Korrektur der Schallgeschwindigkeit auf $c_{0,corr} = 1453 m/s$ und Korrektur der Arrayabstände um $y_\Delta = 2,85 \cdot 10^{-3} m$	91
6.8	Beamforming Map der Propellerkreisscheibe für vier beliebige Frequenzen im unkorrigierten (links) und korrigierten Zustand (rechts); Hydrofonpositionen: Schwarze Punkte, Sendehydrofonposition: Schwarzes Plus	92
6.9	Messung ID=11 (links): Saugseitenschichtkavitation (stabil) + Spitzenwirbelkavitation (stabil); Messung ID=10 (rechts): Saugseitenschichtkavitation (stabil) + Spitzenwirbelkavitation (stabil)	95

6.10	Messung ID=9 (links): Saugseitenschichtkavitation (instabil) + Spitzenwirbelkavitation (stabil); Messung ID=8 (rechts): Saugseitenschichtkavitation (instabil) + Spitzenwirbelkavitation (instabil)	95
6.11	Messung ID=7 (links): Saugseitenschichtkavitation (selten); Messung ID=6 (rechts): Kavitationsfrei	96
6.12	Ergebnis der Lokalisierung für Messung ID=10 mit instantaner ($k = 32$) (links) und mittlerer Schallabstrahlung ($k = fs$) (rechts)	96
6.13	Akustischer Beamformer Output für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ auf verschiedenen Propellerradien für die Propeller P1724 und P1889 in OP3 ($\sigma = 7,0$ (links) und $\sigma = 5,0$ (rechts))	97
6.14	Akustischer Beamformer Output für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ auf verschiedenen Propellerradien für die Propeller P1724 und P1889 in OP3 ($\sigma = 2,5$ (links) und $\sigma = 2,1$ (rechts))	98
6.15	Akustischer Beamformer Output für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ auf verschiedenen Propellerradien für die Propeller P1724 und P1889 in OP3 ($\sigma = 1,7$)	98
6.16	Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 7,0$, kavitationsfrei) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	98
6.17	Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 5,0$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	99
6.18	Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 2,5$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	99
6.19	Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 2,1$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	99
6.20	Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 1,7$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	100
6.21	CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 7,0$, kavitationsfrei) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	100

6.22	CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 5, 0$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	101
6.23	CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 2, 5$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	101
6.24	CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 2, 1$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	101
6.25	CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 1, 7$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)	102
6.26	Beispielhaftes Spektrogramm der Wavelet Packet Transformation für ein $t_F = 0,1 s$ langes Audiosegment (links) und darauf berechneter Feature Vektor (rechts)	103
6.27	Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation: Confusion Matrix aller durchgeführten Versuche mit $F_1 = 0.784$ (links) und die zehn wichtigsten Statistikgrößen, die eine Unterscheidung der Audiosignale erlauben (rechts)	104
6.28	Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation mit den zehn wichtigsten Features: Confusion Matrix aller durchgeführten Versuche mit $F_1 = 0.706$	104

Tabellenverzeichnis

3.1	Berechnete Statistikgrößen	24
4.1	Flügelgeometrie	32
4.2	Versuchsparameter Kavitationsverhalten BKS V 8103	34
4.3	Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone im K-21 Kavitationskanal; Aufpunkt der Flügel erzeugenden bei $P_A = [0,0538 \ 0,150 \ 0,0] m$	39
4.4	Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone	41
4.5	Versuchsreihen der Flügelversuche	42
5.1	Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone der Messungen mit symmetrischen Nachstrom; Propellerebene bei $y = 0 m$, Lage der Propellerachse $x_a = 0 m$, $z_a = 0 m$	49
5.2	Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone in den Messungen mit symmetrischen Nachstrom	50
5.3	Versuchsprogramm der Messungen mit symmetrischen Nachstrom	53
5.4	Hydroakustisch ausgewertete Betriebspunkte	54
5.5	Berechnete Statistikgrößen	62
5.6	Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone; Propellerebene bei $y = 0 m$, Lage der Propellerachse $x = 0 m$, $z = 0,1 m$	67
5.7	Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone	68
5.8	Liste der Kalibrierungsmessungen mit Log-Sweep mit $1 Hz \leq f \leq 100 kHz$	69
5.9	Versuchsreihe der Lokalisierungsmessungen	73
5.10	Versuchsreihe der Lokalisierungsmessungen	76
6.1	Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone in der Standardvariante; Propellerebene bei $y = 0 m$, Lage der Propellerachse $x = 0 m$, $z = 0,1 m$	81

6.2	Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone für die Konfiguration Scheibenwechsel; Propellerebene bei $y = 0\text{ m}$, Lage der Propellerachse $x_a = 0\text{ m}$, $z_a = 0,125\text{ m}$	85
6.3	Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone	86
6.4	Liste der Kalibrierungsmessungen mit Log-Sweep mit $1\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	89
6.5	Versuchsreihe der Lokalisierungsmessungen	94

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens HiOcav ist es, die Genauigkeit der Simulation von Kavitationsvorgängen an der Blattspitze von Propellern zu erhöhen sowie die numerische und experimentelle Prognose der damit verbundenen Druckschwankungen höherer Ordnung (d.h. Schwankungen, die mit mindestens zweifacher Blattfrequenz auftreten) zu verbessern. Näheres ist dem gemeinsamen Leit Antrag zu entnehmen.

Im Rahmen des Teilvorhabens 5 HiOloc "Lokalisation und Klassifikation von Kavitationsvorgängen durch raumzeitliche Analyse von Druckschwankungen" werden Verfahren zur zeitaufgelösten räumlichen Lokalisation von Kavitationsereignissen entwickelt, sowie Verfahren zur automatischen Klassifikation der Kavitationsart. Ausgangsdaten sind hierbei die gemessenen Druckschwankungen an mehreren räumlich verteilten Orten im Kavitationskanal. Die Techniken werden zusammen mit den Projektpartnern in verschiedenen Anwendungsszenarien evaluiert und weiterentwickelt. Dazu ist es erforderlich, insbesondere die Wechselwirkung zwischen Schicht- und Spitzenwirbelkavitation einzubeziehen. Die notwendigen Informationen hinsichtlich dieser Wechselwirkung werden einerseits durch geeignete Experimente und andererseits durch numerische Berechnungen mit hochauflösenden Simulationsverfahren gewonnen. Weiterhin werden die im Teilprojekt 5 gewonnenen Ergebnisse mit optischen Verfahren zur Analyse von Kavitation verglichen. Im Endstand sollen die entwickelten Verfahren im industriellen Einsatz genauere Ergebnisse für das Kavitationsverhalten von Propellern und propellerinduzierten Druckschwankungen liefern.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Das Förderprogramm Maritime Technologien der nächsten Generation soll die globale Wettbewerbsfähigkeit der maritimen Industrie in Deutschland stärken. Das beantragte Teilvorhaben entspricht mit seinem Hauptziel - der Schaffung effizienter und

genauer Verfahren zur Analyse von Kavitationserscheinungen an Propellern und den daraus resultierenden Druckschwankungen höherer Ordnung - den Zielen des BMWi-Programms Maritime Technologien der nächsten Generation. Dies betrifft zum einen die **Programmziele**

- Volle Simulationsfähigkeit aller Entwurfs- und Produktionsprozesse
- Signifikante Steigerung der Produktivität und Kostensenkung durch eine genauere Bewertung von Propellerentwürfen im Entwurfsstadium
- Forschung entlang der Wertschöpfungsketten mit Vernetzung aller Partner

sowie die **Langfristziele**

- Sicherheit und Umweltverträglichkeit durch Reduzierung propellererregter Druckschwankungen und der damit verbundenen akustischen Abstrahlung
- Wirtschaftlichkeit - Konkurrenzfähigkeit durch Entwicklung von hochqualitativen Propellerentwürfen bei gleichzeitiger Reduzierung des Risikos beim Entwurf
- Nachwuchsförderung und Kompetenzentwicklung durch Einbeziehung von Wissenschaftlern an Universitäten und Weitergabe des Wissens an Studenten

Der zuletzt genannte Punkt ist relevant, da am Vorhaben sowohl Propellerhersteller und Versuchsanstalten als unmittelbar zusammenarbeitende Partner als auch universitäre Institute beteiligt sind. Zudem spricht das geplante Vorhaben den Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich Schiffstechnik an. Hier sind folgende Punkte zu erwähnen:

- Reduzierung aller prozess- und betriebsbedingten Emissionen
- Optimierung des Schiffsentwurfs
- Optimierte Produktentwicklungsprozesse und -werkzeuge

Die Reduktion von Kavitation und propellererregten Druckschwankungen sowie die Erhöhung des Propulsionswirkungsgrades sind meist zwei gegenläufige Zielstellungen beim Propellerentwurf. Mit den zu entwickelnden Verfahren ist es möglich, den Propellerentwurf hinsichtlich seines Kavitationsverhaltens präzise zu beurteilen. Dadurch können Entwurfsreserven reduziert und ein hoher Wirkungsgrad eingehalten werden.

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Dem Hauptziel des Vorhabens sind eine Reihe wissenschaftlicher und technischer Arbeitsziele untergeordnet, die im Folgenden aufgezählt werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der verbesserten Modellierung von Spitzenwirbelkavitation:

- Erfassung der Dynamik der im Bereich des Spitzenwirbels auftretenden Kavitation mithilfe eines Modells für Spitzenwirbelkavitation
- Zuverlässige Bestimmung der Stärke des Spitzenwirbels während des Aufrollvorgangs
- Dreidimensionale Betrachtung des kavitierenden Spitzenwirbels
- Berücksichtigung des Einflusses des Ruders auf das dynamische Verhalten des Spitzenwirbels
- Untersuchung und Modellierung der Wechselwirkung zwischen Schicht- und Spitzenwirbelkavitation, Untersuchung des Einflusses von Kavitation an der Blattspitze auf den Aufrollvorgang des Spitzenwirbels

Die an der Universität Rostock, Institut für Nachrichtentechnik (INT) entwickelten Verfahren zur Lokalisation und Klassifikation von Kavitationsergebnissen verfolgen die Arbeitsziele:

- Zeitaufgelöste Lokalisation von Kavitationsereignissen im Kavitationskanal durch den Einsatz mehrerer räumlich verteilter Hydrophone sowie Verfahren der digitalen Signalverarbeitung
- Automatische Klassifikation der Art der Kavitation anhand gemessenen Druckverteilungen mittels Verfahren der Signalklassifikation
- Erzielung einer ausreichenden Robustheit für den industriellen Einsatz

Als weitere wissenschaftliche und technische Arbeitsziele ergeben sich:

- Ausnutzung spezifischer akustischer Eigenschaften von Kavitationsereignissen sowie des Kavitationskanals zur Verbesserung der Lokalisation

- Entwicklung mehrkanaliger Verfahren zur Störgeräuschunterdrückung für typische in Kavitationskanälen auftretende Störgeräusche
- Erweiterung des Anwendungsbereiches der akustischen Analyseverfahren auf Großausführungen

Verbesserte Verfahren zur experimentellen Untersuchung von Kavitationserscheinungen sollen ein besseres Verständnis dieser fördern und damit direkt zu einer verbesserten Modellierung von Spitzenwirbelkavitation beitragen.

1.4 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Der Lehrstuhl für Signalanalyse und digitale Signalverarbeitung am Institut für Nachrichtentechnik (INT) der Universität Rostock verfügt in Lehre und Forschung über langjährige Erfahrung im Bereich der Akustik und digitalen Signalverarbeitung. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Entwicklung innovativer Verfahren der digitalen Signalverarbeitung welche explizit die physikalischen Grundlagen des zugrundeliegenden Problems berücksichtigen.

Die mehrkanalige Verarbeitung von Sensorsignalen für die zeitaufgelöste räumliche Analyse von Schallfeldern ist ein wesentliches Arbeitsgebiet. Relevante Vorarbeiten umfassen den Aufbau von Sensorarrays, Verfahren zur Formung von Richtkeulen (Beamforming) [INT7-8], Schätzung von Schalleinfallrichtungen [INT10] und der Kalibrierung von Sensorarrays [INT6]. Weiterhin verfügt der Lehrstuhl über Erfahrung in der Klassifikation von Zuständen anhand akustischer Signaturen mittels Support Vector Machines und Deep Neural Networks [INT9, INT21], sowie der audio-visuelle Datenfusion [INT22].

Im Bereich der strukturierten Algorithmen- und Softwareentwicklung wird meist MATLAB oder Python eingesetzt. Jedoch wurde eine Reihe von Verfahren auch für die Echtzeitnutzung in C++ realisiert. Das INT verfügt über eine Simulationsumgebung für akustische Schallausbreitung [INT15]. Diese wird im Rahmen des Projektes eingesetzt und erweitert.

In gemeinsamen Vorarbeiten mit der SVA wurden Messungen am Kavitationskanal K15A und in der Schlepprinne ausgewertet. Dabei wurde die Schätzung von Laufzeiten zwischen Paaren von Hydrophonen im Kavitationskanal betrachtet und eine erste

Analyse der Hintergrundgeräusche durchgeführt. Weiterhin wurden die Daten einer Vorbeifahrt eines Schiffsmodelles in der Schlepprinne auf Kavitation ausgewertet.

1.5 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Universität Rostock leistete in diesem Verbundvorhaben die Entwicklung der Verfahren und Methoden, mit denen aus RANS-LES basierten Strömungssimulationen akustische Quellfelder von Schiffen berechnet und deren Schalleintrag an beliebigen Beobachterpositionen im Fernfeld bestimmt werden kann. Durch die Implementierung der Verfahren in den freien CFD Solver OpenFOAM erhalten die Projektpartner ein Werkzeug zur akustischen Bewertung komplexer Strömungsvorgänge am Schiff.

Im Rahmen des Teilprojekts wurden 6 Arbeitspakete bearbeitet. Im Arbeitspaket 1.1 wurden die mathematischen Modelle zur akustischen Analyse der hydrodynamischen Strömungsfelder erstellt. Dabei waren nicht nur die Methoden zur Ableitung der hydroakustischen Quellfelder zu entwickeln, sondern auch geeignete Randbedingungen zu schaffen, die einerseits physikalische Wechselwirkungen an der freien Wasseroberfläche sicherstellen sollen, als auch den numerischen Einfluss der räumlich begrenzten Rechendomains auf die akustische Lösung auf ein Minimum reduzieren soll. Zusätzlich wurden Verfahren ausgearbeitet, die eine optimale Nutzung der Rechenressourcen gewährleisten. Im folgenden Arbeitspaket 1.2 fand die Implementierung der entwickelten Verfahren in das Softwarepaket OpenFOAM statt. Durch die konsequente Objektorientierung des OpenFOAM Quellcodes, die komplexen Anforderungen des Akustiksolvers und die Forderung nach einer rechentechnisch effizienten Umsetzung stellte dieses Arbeitspaket einen Schwerpunkt des Teilvorhabens dar. Die Modellierung und Initialisierung der Simulationsrechnungen wurde in Arbeitspaket 1.3 durchgeführt. Dieser Arbeitsschritt erfordert eine hohe Qualität in der hydrodynamischen Modellierung und war von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der akustischen Simulationsergebnisse. Die Arbeitspakete 1.4 und 1.5 umfassten die Simulationsdurchführung sowie die Auswertung, Validierung und Anpassung der Modelle. Sie wurden in weiten Teilen parallel ausgeführt, um etwaige Modellkorrekturen in erneuten Simulationsrechnungen zu bestätigen. Das Arbeitspaket 1.6 schließt das Teilvorhaben mit der Zusammenfassung und detaillierten Bewertung der Ergebnisse ab.

1.6 Wissenschaftlich technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die akustische Analyse von Kavitation bietet insbesondere unter dem Einsatz von Hydrophonen viel Potential, das im Rahmen des Vorhabens ausgeschöpft werden soll. Das Potential akustischer Messverfahren wird im Bereich der schiffbaulichen Kavitationsuntersuchung standardmäßig nur wenig genutzt. In den Versuchsanstalten stehen Druckmessdosen zur Verfügung, um Druckschwankungen auf beliebigen Oberflächen zu bestimmen. Dabei wurden meist nur die Druckschwankungen erster Ordnung analysiert. Es ist möglich, die Aufnahme des Drucksignals synchron mit der optischen Charakterisierung der Kavitation durchzuführen.

Im wissenschaftlichen Kontext sind einige Arbeiten zur akustischen Analyse von Kavitation publiziert worden. Die Lokalisation des Ausgangsortes von Druckschwankungen, welche durch Kavitation hervorgerufen werden, wurde in einzelnen wissenschaftlichen Untersuchungen betrachtet [INT 1-4, INT18]. Dabei kamen mehrere (8 bis 22) räumlich verteilte, zeitlich synchronisierte Hydrophone (Hydrophonarray) zum Einsatz. Bei sorgfältiger Realisierung des Laboraufbaus, manueller Optimierung der Parameter und Bereinigung der aufgenommenen Signale wurden Lokalisierungsgenauigkeiten von ca. zwei Zentimetern berichtet [INT1]. Abbildung 1.1 zeigt einige exemplarische Ergebnisse zur Lokalisation eines laserinduzierten Kavitationsereignisses in einem Kavitationskanal für verschiedene Flussgeschwindigkeiten.

Die automatische Klassifikation des Auftretens von Kavitation und der Art der Kavitation am Tragflügel oder Propeller anhand akustischer Signaturen wurde bisher in der wissenschaftlichen Literatur wenig betrachtet. Allerdings wurde die Anwendung von Verfahren des maschinellen Lernens für die Detektion von Kavitation an Ventilen [INT 11-12] und Pumpen [INT 13-14] untersucht. Die in diesem Teilprojekt zugrundeliegende Problemstellung ist als Äquivalent anzusehen.

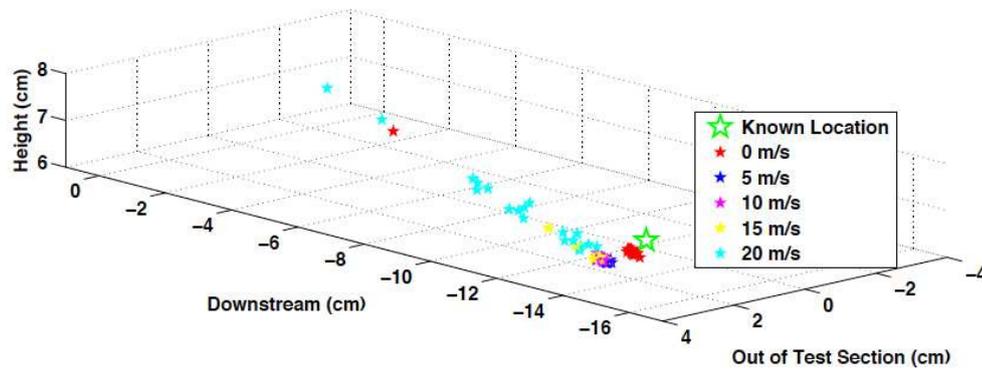


Abb. 1.1: Lokalisation eines Kavitationsereignisses im Kavitationskanal für verschiedene Flussgeschwindigkeiten. Bei der Messung wurden 22 Hydrophone in einer kreuzförmigen Anordnung benutzt. Die Lokalisation erfolgte mit der Straight-Ray Monte-Carlo Methode. Abbildung 3.26 aus [INT1].

1.7 Literatur

[INT1] Anderson, S.: "Acoustic cavitation localization in reverberant environments", Master thesis, Pennsylvania State University, 2012.

[INT2] Chang, N. and Dowling, D.: "Ray-based acoustic localization of cavitation in a highly reverberant environment", Journal of the Acoustic Society of America 125(5), May 2009.

[INT3] Kim, D., Song, W., Choo, Y. and Lee, J.: "Localization of tip vortex cavitation using ray based matched field inversion method", Journal of Sound and Vibration 354 (2015).

[INT4] Park, C., Seol, H., Kim, K. and Seong, W.: "A study on propeller noise source localization in a cavitation tunnel", Ocean Engineering 36 (2009).

[INT5] Chang, N. and Ceccio, S.: "The acoustic emissions of cavitation bubbles in stretched vortices", Journal of the Acoustical Society of America 130 (5), November 2011.

[INT6] Rettberg, T., Helwani, K., Spors, S. and Buchner, H.: "Practical aspects of

the calibration of spherical microphone arrays". In German Annual Conference on Acoustics (DAGA), March 2012.

[INT7] Rettberg, T. and Spors, S.: "On beamforming and generalized Radon transforms in sound field analysis". In German Annual Conference on Acoustics (DAGA), March 2015.

[INT8] Rettberg, T. and Spors, S.: "Spatial sub-nyquist sampling layouts for compact microphone arrays". In German Annual Conference on Acoustics (DAGA), March 2016.

[INT9] Bender, T., Sass, M., Bader, D., Kluess, D. and Spors, S.: "Körperschallanalyse zur Klassifizierung einer Lockerung in Hüftimplantaten". In German Annual Conference on Acoustics (DAGA), March 2016.

[INT10] Cobos, M., Lopez, J. J. and Spors, S.: "A sparsity-based approach to 3-D binaural sound synthesis using time-frequency array processing". *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010:1-13, 2010.

[INT11] de Giorgi, M. G., Ficarella, A. and Lay-Ekuakille, A.: "Cavitation Regime Detection by LS-SVM and ANN with Wavelet Decomposition Based on Pressure Sensor Signals". *IEEE Sensors Journal* 15(10). October 2015.

[INT12] Yang, B.-S., Hwang, W.-W., Ko, M.-H. and Lee, S.-J.: "Cavitation detection of butterfly valve using support vector machines". *Journal of Sound and Vibration* 286:25-43. 2005.

[INT13] Sakthivel, N. R., Saravanamurugan, S., Nair, B. B., Elangovan, M. and Sgumaran, V.: "Effect of Kernel Function in Support Vector Machine for the Fault Diagnosis of Pump". *Journal of Engineering Science and Technology* 11(6):826-838. 2016.

[INT14] Huhn, M.: "Diagnose hydraulischer Fehlerzustände bei axialen Tauchmotorpumpen anhand des Körperschalls". *Dissertationsschrift*. Technische Universität Berlin. 2003.

[INT15] Spors, S., Geier, M. and Wierstorf, H.: "Sound Field Synthesis Toolbox for Python". DOI: 10.5281/zenodo.49356. Version 0.3.1. <https://github.com/sfstoolbox/sfs-python/>.

[INT16] Dogan, Z., Blu, T. and Van de Ville, D.: "Finite-rate-of-innovation for the inverse source problem of radiating fields". *Sampling Theory in Signal and Image Processing* 13(3):271-294. January 2014.

[INT17] Hu, K., Sundeep, P. C. and Leus, G.: "Near-Field Source Localization using Sparse Recovery Techniques". *International Conference on Signal Processing and Communications*. 2014.

[INT18] Chang, N.: "Acoustic Characterization of Cavitation in Reverberant Environments". PhD thesis. University of Michigan. 2007.

[INT19] Choi, J. and Ceccio, S. L.: "Dynamics and noise emission of vortex cavitation bubbles". *Journal of Fluid Mechanics* 575:1-26. 2007.

[INT20] Kumar, S. and Brennen, C. E.: "A study of pressure pulses generated by travelling bubble cavitation". *Journal of Fluid Mechanics* 255:541-564. 1993.

[INT21] Bender, T., Sass, M., Bader, R., Kluess, D. and Spors, S.: "Employing a principle component analysis and support vector machine to classify different levels of loosening of a total hip system". In *Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society*, March 2016.

[INT22] Strobel, N., Spors, S. and Rabenstein, R.: "Joint audio-video object localization and tracking". *IEEE Signal Processing Magazine*, 18(1):2231, January 2001.

[INT23] McCormick, B. W.: "On Cavitation Produced by a Vortex Trailing from a Lifting Surface", *Journal of Basic Engineering*, 1962

1.8 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

thyssenkrupp Marine Systems GmbH, Werftstraße 112-114, 24143 Kiel
Dr.-Ing. Martin Greve, martin.greve@thyssenkrupp.com
Tel.: +49 431 700 126 589, Fax: +49 431 700 3659

Mecklenburger Metallguss GmbH, Teterower Str. 43/51, 17192 Waren
Dr.-Ing. Lars Greitsch, greitsch@mmg-propeller.de
Tel.: +49 3991 736 225, Fax: +49 3991 736 210

Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH, Marquardter Chaussee 100, 14469 Potsdam
Dipl.-Ing. Hans-Juergen Heinke, heinkeh@sva-potsdam.de,
Tel.: +49 331 56712 13, Fax: +49 331 56712 49

PIENING PROPELLER, Am Altendeich 83, 25348 Blomesche Wildnis
Dipl.-Ing. Naval Architect Withold Drazyk, Drazyk@piening-propeller.de
Tel.: +49 4124 9168 22, Fax: +49 4124 3716

FORTech Software GmbH, Tannenweg 22m, 18059 Rostock, Germany
Dr.-Ing. Uwe Schleichert, info@fortech.de
Tel.: +49 381 496800 0, Fax: +49 381 496800 29

Technische Universität Hamburg, Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie, Schwarzenbergstraße 95 C, 21073 Hamburg
Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud, m.abdel-maksoud@tu-harburg.de
Tel.: +49 40 42878 6052, Fax: +49 40 42878 6055

Universität Rostock, Lehrstuhl für Optoelektronik und Photonische Systeme, Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock
Prof. Dr.-Ing. Nils Damaschke, nils.damaschke@uni-rostock.de
Tel.: +49 381 498 7050, Fax: +49 381 498 7081

1. Kurzdarstellung

Universität Rostock, Lehrstuhl für Digitale Signalverarbeitung, Richard-Wagner-Str.
31, Haus 8, 18119 Rostock

Prof. Dr.-Ing. Sascha Spors, sascha.spors@uni-rostock.de

Tel.: +49 381 498 7300, Fax: +49 381 498 7302

2 Akustische Lokalisationsverfahren

2.1 Entwicklung Lokalisation

Zur akustischen Lokalisation der strömungsinduzierten Schallquellen wurden Beamforming Algorithmen verwendet. Delay-And-Sum Beamforming Verfahren verschieben die Audiosignale des mehrkanaligen Messsystems in Abhängigkeit eines Fokuspunkts so, dass durch die Superposition die Quellintensität an einem Punkt messbar wird (Abb. 2.1). Der Beamforming Output für einen Scanpunkt mit dem Vektor r für $m = 1..M$ Mikrofone folgt zu

$$b = \frac{v^T(r)Cv^*(r)}{w^T(r)1w^*(r)} \quad (2.1)$$

mit der $M \times M$ Cross-Spectral Matrix C , der $M \times M$ Einheitsmatrix 1 , dem Steering Vektor $v(r) = [v_1(r), \dots, v_M(r)]^T$ und $w(r) = [|v_1(r)|^2, \dots, |v_M(r)|^2]^T$. Die Elemente des Steering Vektors sind definiert zu

$$v_m(r) = \frac{e^{-jk|r-r_m|}}{|r-r_m|} \quad (2.2)$$

mit der Wellenzahl $k = 2\pi f/c$, der Frequenz f und der Schallgeschwindigkeit c . Zur Reduktion des strömungsinduzierten Self-Noise der Hydrofone gilt $C_{diag=0}$ nebst $1_{diag=0}$.

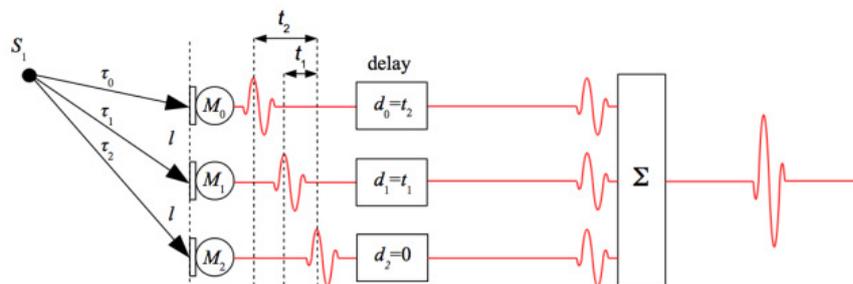


Abb. 2.1: Schematische Darstellung des Delay-And-Sum Beamformers [3]

Klassische Beamforming Verfahren wurden entwickelt zur Abtastung in Ebenen parallel zur Arrayebene. Zur Kopplung der akustischen Lokalisierung mit den optischen Verfahren wird der Beamforming-Fokus jedoch über räumlich verteilte Netze bewegt. Dies kann zu einer fehlerhaften Darstellung der Quellverteilung führen, da die Auflösung in Normalenrichtung des Hydrofonarray (Tiefenschärfe) signifikant schlechter ist als parallel zur Arrayebene. Die einfachste Lösung für dieses Problem sind Hydrofonarrays, die den Scanbereich einschließen. Dies ist in einer Vielzahl von Fällen aufgrund der baulichen Gegebenheiten der Messanordnung jedoch nicht möglich. Eine weitere Möglichkeit die räumliche Auflösung zu verbessern ist die Anwendung von Dekonvolutionstechniken wie z.B. Clean oder CleanSC [7]. Der Clean Algorithmus entfernt die berechnete Punktspreizfunktion einer Punktquelle in Abhängigkeit der gemessenen Nebenkeulen. Ausgehend von einem Beamformer Output $b^{(0)} = b$, der Cross-Spectral Matrix $D^{(0)} = C_{diag=0}$ und der Quellstärkenverteilung $Q^0 = 0$ wird die tatsächliche Quellstärke von $Q^{(n)}$ zu $Q^{(n+1)}$ iterativ bestimmt. Zunächst wird der Output des Beamformers

$$b^{(n)} = \frac{v^T(r)D^{(n)}v^*(r)}{w^T(r)\mathbf{1}_{diag=0}w^*(r)} \quad (2.3)$$

sowie dessen Maximalwert $b_{max}^{(n)}$ und Position $r^{(n+1)max}$ ermittelt. In einem nächsten Schritt wird die neue Quellstärkenverteilung berechnet zu

$$Q^{(n+1)} = Q^{(n)} + \theta b_{max}^{(n)} \phi\left(r - r_{max}^{(n+1)}\right) \quad (2.4)$$

mit dem Sicherheitsfaktor $0 \leq \theta \leq 1$ und der normalisierten Beamweite $\phi(0) = 1$. Die degradierte Cross-Spectral Matrix folgt zu

$$D^{(n+1)} = D^{(n)} - \theta b_{max}^{(n)} \left[v^*\left(r_{max}^{(n+1)}\right) v^T\left(r_{max}^{(n+1)}\right) \right]_{diag=0} \quad (2.5)$$

Der neue Beamformer Output folgt zu

$$b^{(n+1)}(r) = \frac{v^T(r)D^{(n+1)}v^*(r)}{w^T(r)\mathbf{1}_{diag=0}w^*(r)} \quad (2.6)$$

CleanSC nutzt die Tatsache, dass Quellen mit ihren Nebenkeulen in Quellenabbildungen räumlich kohärent sind und vermeidet so die Berechnung einer synthetischen

Punktspreizfunktion. Die reduzierte Cross Spectral Matrix folgt zu

$$\begin{aligned} D^{(n+1)} &= D^{(n)} - \theta G^{(n+1)} \\ G^{(n+1)} &= b_{max}^{(n)} \left[s^* \left(r_{max}^{(n+1)} \right) s^T \left(r_{max}^{(n+1)} \right) \right]_{diag=0} \end{aligned} \quad (2.7)$$

mit der aus der räumlichen Kohärenz bestimmten Cross-Spectral Matrix $G^{(n+1)}$ und der zugehörigen isolierten Schallquelle $s(r_{max}^{(n+1)})$. Zur Berechnung der isolierten Schallquellen wird zunächst das Cross-Spektrum definiert zu

$$b(r(p), r(q)) = u^T(r(p)) C_{diag=0} u^*(r(q)) \quad (2.8)$$

mit

$$u(r) = \frac{v(r)}{\sqrt{w^T(r) 1_{diag=0} w^*(r)}} \quad (2.9)$$

und den beiden Abtastpunkten $r(p)$ und $r(q)$. Dabei muss für alle möglichen r gelten

$$u^T(r) D^{(n)} u^* \left(r_{max}^{(n+1)} \right) = u^T(r) G^{(n+1)} u^* \left(r_{max}^{(n+1)} \right). \quad (2.10)$$

Dies wird erreicht, wenn gilt

$$D^{(n)} u^* \left(r_{max}^{(n+1)} \right) = G^{(n+1)} u^* \left(r_{max}^{(n+1)} \right). \quad (2.11)$$

Aus den Gleichungen 2.7 und 2.10 folgt

$$s \left(r_{max}^{(n+1)} \right) = \frac{\left[\frac{D^{(n)} u^* \left(r_{max}^{(n+1)} \right)}{b_{max}^{(n)}} + S^{(n+1)} u^* \left(r_{max}^{(n+1)} \right) \right]^*}{\sqrt{1 + u^T \left(r_{max}^{(n+1)} \right) S^{(n+1)} u^* \left(r_{max}^{(n+1)} \right)}} \quad (2.12)$$

mit der $M \times M$ Matrix $S^{(n+1)}$, die auf der Hauptdiagonale mit $\left[s^* \left(r_{max}^{(n+1)} \right) s^T \left(r_{max}^{(n+1)} \right) \right]$ besetzt ist und in allen anderen Elementen gleich Null. Gleichung 2.12 ist keine explizite Form für $s \left(r_{max}^{(n+1)} \right)$, kann aber ausgehend von $s^{(0)} \left(r_{max}^{(n+1)} \right) = v \left(r_{max}^{(n+1)} \right)$ iterativ gelöst werden. Ein Nachteil der CleanSC Methode ist, dass ein Maximum benötigt wird, auf das iteriert werden kann. Dies bedeutet, dass auch die räumlichen Filter die benötigten Eigenschaften aufweisen müssen um Maxima dreidimensional bestimmen zu können. In [6] finden sich vier unterschiedliche Formulierungen des Steering Vectors, die individuelle

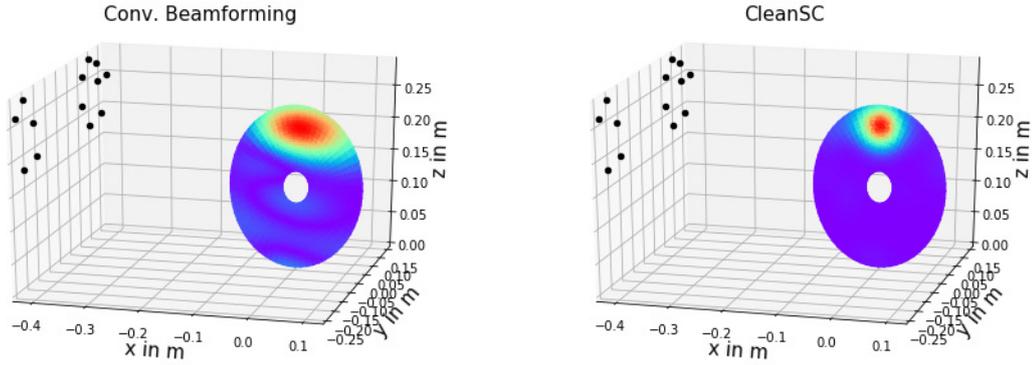


Abb. 2.2: Acoustic Map der Kalibrierungsversuche an der SVA Potsdam für den klassischen Beamformer (links) und CleanSC (rechts)

Eigenschaften in der Tiefenschärfe aufweisen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Formulierung I

$$v_m(r) = \frac{1}{M} e^{-jk|r-r_m|} \quad (2.13)$$

und die Formulierung IV

$$v_m(r) = \frac{1}{r \sqrt{M \sum_{m=1}^M (1/r_m^2)}} e^{-jk|r-r_m|} \quad (2.14)$$

die besseren Eigenschaften hinsichtlich der Lokalisierung aufweisen, während die Formulierungen II

$$v_m(r) = \frac{1}{M} \frac{r_m}{r} e^{-jk|r-r_m|} \quad (2.15)$$

und III

$$v_m(r) = \frac{1}{r_m r \sum_{m=1}^M (1/r_m^2)} e^{-jk|r-r_m|} \quad (2.16)$$

die bessere Bestimmung der Quellstärke erreicht werden kann. Einen Vergleich zwischen der Tiefenaufösung von konventionellem Beam Forming und CleanSC für die Kalibrierungsversuche im Kavitationskanal der SVA Potsdam zeigt Abb. 2.2.

2.2 Störgeräuschunterdrückung

An Propelleranlagen des Schiffsbetriebs können eine Reihe von Störgeräuschen auftreten. Dies sind neben tieffrequenten Geräuschen, z.B. durch Wellenschlag, insbesondere korrelierte harmonische Komponenten der Hauptmaschine und des Propellerantriebs als

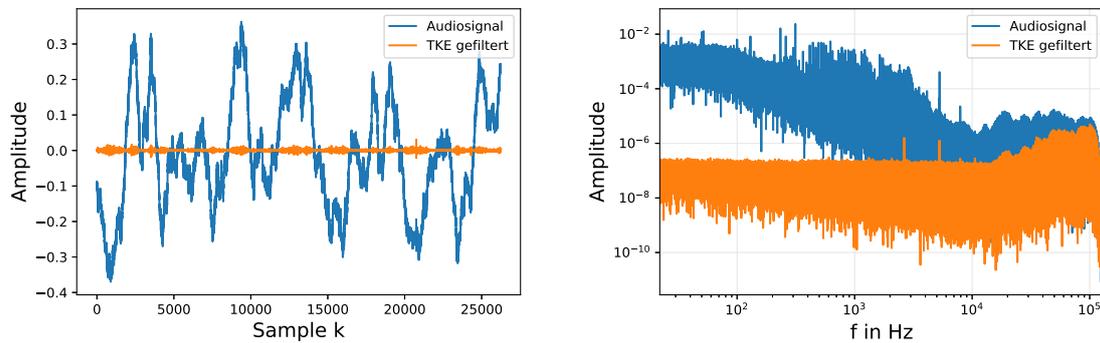


Abb. 2.3: Audiosignal der akustischen Vermessung der Störgeräusche des leeren Kavitationskanals und das TKE gefilterte Signal im Zeitbereich (links) und im Frequenzbereich (rechts)

Vielfache der Flügelordnung, genauer dem Produkt aus Wellendrehzahl und Flügelzahl nZ . Diese zeichnen sich insbesondere auch durch starke Vibrationseinflüsse am Messort im Propellerbrunnen ab. Zusätzlich entstehen unkorrelierte Störgeräusche durch Aggregate und Maschinen an Bord, wie z.B. den Hilfsdieseln. Neben den akustischen Störungen sind auch elektrische Störungen zu erwarten. So können Einkopplungen des Bordnetzes, Netzteile benachbarter Verbraucher oder auch andere Messeinrichtungen das Messergebnis stören. Ähnliche Störungen sind in der Versuchsanstalt zu erwarten. Neben den akustischen Störungen aus der Hauptharmonischen des Propellers und des Propellerantriebs zeichnet sich das Antriebsgeräusch des Impellers deutlich in den Messdaten ab. Zusätzlich ist mit Fremdgeräuschen durch die Unterdruckpumpe des Kavitationskanals zu rechnen. Auch tieffrequente akustische Störungen durch begleitende Arbeiten um den Versuchskanal oder Trittschall können nicht ausgeschlossen werden. Gleichzeitig sind die Quellen elektrischer Störungen im Kavitationskanal weitaus zahlreicher als an Bord, die sich beispielsweise aus den Schaltnetzteilen der vorhandenen Messtechnik ergeben. Eine beispielhafte Darstellung des Messsignals für eine Messung im leeren Kavitationskanal (Unterdruck, eingeschalteter Impeller, eingeschalteter Antrieb ohne Propeller) zeigt Abb. 2.3.

Die erwarteten Störungen elektrischer und akustischer Natur zeigen also im Wesentlichen harmonische Eigenschaften unterschiedlicher Frequenz. Im Gegensatz dazu sind kavitationsinduzierte Schallquellen des Blasenkollapses durch eine kurze Transiente mit deutlichem Decay charakterisiert (Abb. 2.4). Ein geeignetes Filter zur Minderung

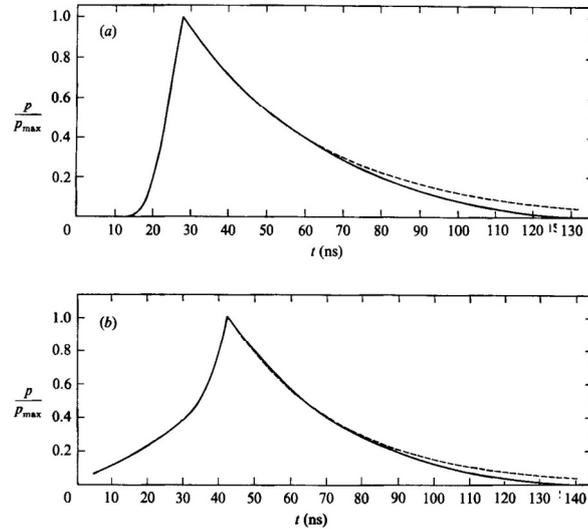


Abb. 2.4: Akustisches Signal einer Kavitationsblase: Laserinduzierte Blasengeneration (a), wandnaher Blasenkolllaps (b) Lauterborn et al [8]

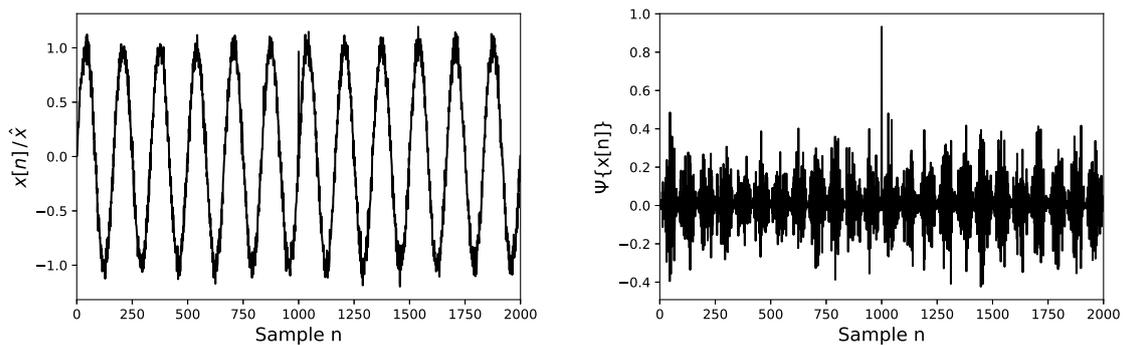


Abb. 2.5: Dirac Impuls bei $n = 1000$ überlagert mit einer Sinusfunktion und weißem Rauschen mit einem $SNR = 100$ (links) und das Ergebnis der TKE Filterung (rechts)

harmonischer Schwingungen und Verstärkung der Transienten stellt der Teager-Kaiser Energy (TKE) Operator dar [2]. Der TKE Operator

$$\Psi[x, k] = x[k]^2 - x[k - 1]x[k + 1] \quad (2.17)$$

stellt durch Faltung des Signals mit sich selbst eine nichtlineare Operation dar, die das Ausgangssignal verändert. Die Transienten des Ausgangssignals entsprechen nicht mehr den Transienten des Eingangssignals. Zwar verfügt der TKE Operator auch über eine Hochpasscharakteristik, jedoch geht die Filteroperation durch die Überzeichnung der Transienten über die reine Filterung der harmonischen Bestandteile hinaus. Eine beispielhafte Anwendung des TKE Operators zeigt Abb. 2.5: Ein Dirac Impuls der Amplitude 1 wird mit einer Sinusschwingung der gleichen Amplitude und weißem Rauschen mit einem Signal-Rausch-Verhältnis von $SNR = 100$ überlagert. Die TKE Filterung entfernt das harmonische Störsignal und verstärkt den Dirac Impuls.

2.3 Fusion mit optischen Messungen

Die Fusion mit den optischen Verfahren unterteilt sich in zwei Abschnitte. Zum Einen müssen die optischen und die akustischen Verfahren so zusammengeführt und synchronisiert werden, dass eine nachträgliche Auswertung erfolgen kann. Dies bedeutet insbesondere eine Synchronisation der unterschiedlichen Abtastraten der Systeme, die auch zwischen verschiedenen Messungen, je nach Anwendungsfall variieren können. Da die Messsysteme über die Projektlaufzeit einer ständigen Evolution unterlagen, wurde Wert auf eine möglichst robuste Kopplung gelegt. Das Mehrkanalkamerasystem verfügte über eine eigene Steuerung, die zentral die Framerate der Kameras steuert. Dies erfolgte in Abhängigkeit der Messaufgabe synchronisiert zu Drehzahl und Flügelposition des Propellers. Dieses Triggersignal wird über einen analogen Ausgang seitens des Kamerasystems bereitgestellt. Im Audiosystem wurde ein zusätzlicher Kanal registriert, um die Ausgangsspannung samplesynchron aufzuzeichnen. Zusätzlich wurde ein Signalwächter installiert, der in Abhängigkeit des Spannungspegels des Triggersignals die Audiomessung automatisiert startet, sobald der erste Frame im Kamerasystem ausgelöst wurde. Dies erlaubt die Zuordnung einzelner visuell bzw. akustisch wahrnehmbarer Kavitationsereignisse auf dem jeweils anderen Messsystem. Ein Beispielsignal einer Messung im Kavitationskanal der SVA Potsdam zeigt Abb. 2.6.

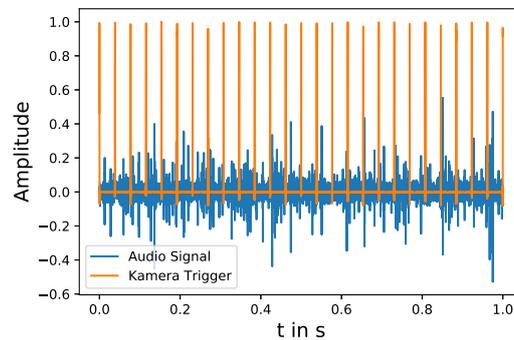


Abb. 2.6: Triggersignal einer Beispielmessung am Kavitationskanal der SVA

Zur Kopplung der Audio- und Videodaten wurde eine STL Geometrieschnittstelle entwickelt. Da die Geometrie des Propellers und dessen Position zu jedem Zeitpunkt durch das Triggersignals bekannt ist, kann für jeden Messzeitpunkt und somit auch für jedes Kamerabild der gesamte Raum hinsichtlich verteilter Schallquellen abgetastet werden. Dazu wird die Propellergeometrie per STL Datei geladen und basierend auf dem Kameratrigger in die visuell beobachtete Position verdreht. Der Beamforming Algorithmus tastet die Vertices des STL Files ab liefert die zugehörige Beamforming Map. Die Darstellung erfolgt für jedes Face der STL Datei über das arithmetische Mittel der drei Aufpunkte. Abbildung Der besondere Vorteil dieser Lösung ist, dass beliebige Hinterschiffs- und Propellergeometrien geladen werden können, sowie auch Rasterpunkte aus der Spitzenwirbelvermessung und -rekonstruktion seitens des Partners Fortech.

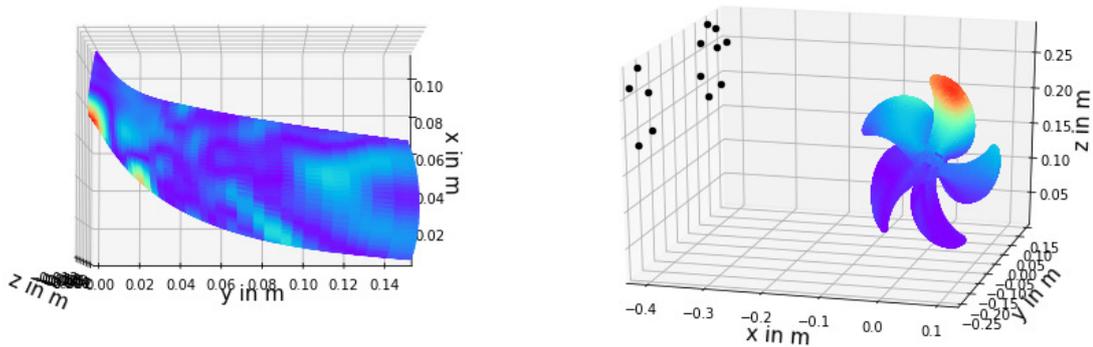


Abb. 2.7: Importierte STL Geometrien des Flügels (links) und des Referenzpropellers (rechts) mit beispielhafter Quellenverteilung

2.4 Technologietransfer

Neben einer schlanken Softwarearchitektur und den geringen Anforderungen an die Rechenressourcen lag der Fokus der Softwareentwicklung auf einer vollständigen Nutzbarkeit bei den Projektpartnern sowie uneingeschränkte Erweiterungsmöglichkeiten. Um den lizenzfreien Zugang sicherzustellen und den unterschiedlichen infrastrukturellen Voraussetzungen der Projektpartner Rechnung zu tragen, wurden die Verfahren in Python in Form von Jupyter Notebooks verfasst. Die Methoden wurden übersichtlich aufbereitet und kommentiert. Die mitgelieferten Beispielrechnungen, die den Funktionsumfang der Routinen an realen Simulationsrechnungen abbilden, erlauben einfache Anpassungen an die individuellen Aufgabenstellungen der Projektpartner, um die direkte Anwendung in der Praxis zu gewährleisten.

3 Entwicklung akustischer Klassifikationsverfahren

Die Entwicklung der Klassifikationsverfahren erfolgte unter der Prämisse, dass sich unterschiedliche Kavitationsarten in charakteristischen akustischen Eigenschaften wiederfinden. Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass auch unterschiedliche Intensitäten gleicher Kavitationsarten die akustischen Merkmale beeinflussen. Dabei galt die Annahme, dass die Eigenschaften des akustischen Kavitationssignals a priori unbekannt sind, so dass unterschiedliche Ansätze verfolgt wurden.

3.1 Featuregenerierung

Um die akustischen Signale durch Klassifikationsverfahren unterscheidbar zu machen, müssen ausdrucksstarke Features generiert werden. Aus der Störgeräuschunterdrückung ist bekannt, dass Kavitationssignale charakteristische Verläufe annehmen, die neben dem zeitlichen Verlauf, der Intensität oder Wiederholfrequenz auch individuelle Merkmale im Frequenzbereich annehmen. Deshalb wurde das Audiosignal zunächst TKE gefiltert um es von den Störgeräuschen zu befreien. Im nächsten Schritt wurde das Signal in einzelne Segmente der Länge $t_F = 0,1 s$ mit einem Overlap von 0,5 unterteilt. Jedes dieser Segmente wurde mit einer Wavelet-Packet Dekomposition mit einem Daubechies Wavelet dritter Ordnung in 64 Frequenzbänder zerlegt. Für die gegebene Samplefrequenz von $f_s = 262144 Hz$ folgten für jedes Audiosegment der Länge $t_F = 0,1 s$ Spektrogramminformationen der Form 410×64 (Zeit \times Frequenz) (Abb. 3.1). Zum Aufbau des tatsächlichen Featurevektors aus den Spektrogramminformationen wurden zwei Strategien verfolgt. Der erste Ansatz verwendete die reinen Zeit- und Frequenzinformationen des Spektrogramms. Dazu wurden alle 410 Zeitvektoren der Länge 64 aneinandergereiht und für jedes Audiosegment als Liste der Länge 26240 an die Klassifikationsverfahren übergeben. Diese straight-forward Generierung der Features stellt insbesondere für Verfahren, die keine tiefgreifende Analyse der Netzwerkstruktur erlauben, wie zum Beispiel Neural Networks, eine robuste Variante zum Aufbau einer Datenbasis dar. Um jedoch tiefer in die charakteristischen Merkmale der Kavitation vorzudringen, wurde

3. Entwicklung akustischer Klassifikationsverfahren

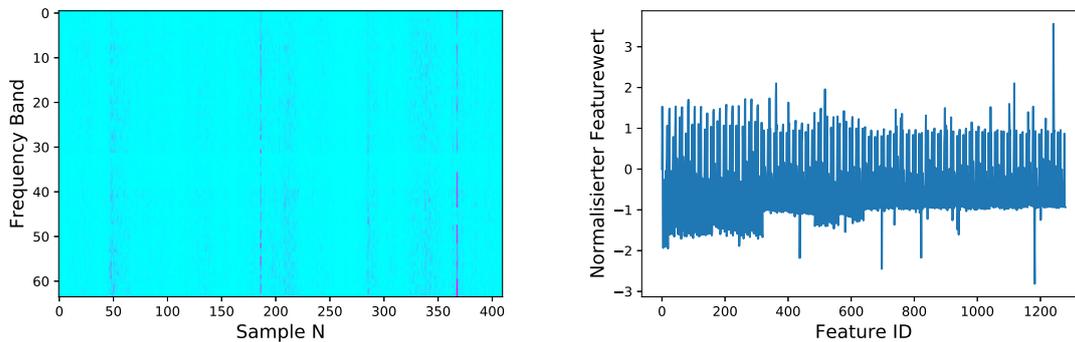


Abb. 3.1: Beispielhaftes Spektrogramm der WaveletPacket Transformation für ein $t_F = 0,1 s$ langes Audiosegment (links) und der darauf berechnete Feature Vektor mit 20 Statistikgrößen je Frequenzband (rechts)

ein weiterer Ansatz gewählt: Statt den Featurevektor durch ein Aneinanderreihen die Zeitvektoren zu bilden, wurden die statistischen Eigenschaften der 64 Frequenzbereiche ermittelt. Da die akustischen Eigenschaften der Kavitation weiterhin als unbekannt gelten sollen, wurden für jedes der 64 Frequenzbänder 20 beliebige Statistikgrößen berechnet (Tab. 3.1). Diese 20 Werte für alle 64 Frequenzbänder aneinandergereiht ergeben die Liste des Featurevektors der Länge 1280. Neben der Reduzierung der Datenmenge um den Faktor 20 ergeben sich so auch Möglichkeiten zur High-Level Analyse.

Tab. 3.1: Berechnete Statistikgrößen

#	Statistikgröße
0	Entropie
1	Anzahl der Nulldurchgänge
2	Anzahl der Mittelwertdurchgänge
3-6	Perzentil (n5, n25, n75, n95)
7	Median
8	Mittelwert
9	Standardabweichung
10	Varianz
11	Quadratischer Mittelwert
12	Kurtosis
13	Quadrat des Absolutwerts
14	Normalisierte Entropie
15	Skewness
16	CPT5
17	Vorzeichen des Anstiegs
18	Wellenlänge
19	Generalisierter Mittelwert

3.2 Unsupervised Learning

Die entwickelten Verfahren verfolgen neben der Unterscheidung der Kavitationsarten das Ziel, einen tieferen Einblick in die physikalischen Mechanismen der Kavitation zu erlauben. Dazu soll im ersten Ansatz im Kaviationsignal nach typischen Zeitreihen gesucht werden. Ein gut validiertes Verfahren ist der k-Means Algorithmus (Abb.3.2). Auf Basis der Featuresets werden für eine vorher festgelegte Anzahl von Klassen auf Basis des Least-Squares Algorithmus Cluster im Featureraum gebildet. Als Eingangsparameter des k-Means Klassifikators werden die 64 Frequenzbänder eines jeden Zeitschritts des Audiosignals verwendet. Zur Erkennung von Zeitreihen wird eine Anzahl von fünf Klassen verwendet werden. Aus der Anwendung des k-Means Algorithmus folgt für jeden Zeitschritt die Zuordnung zu einer der fünf Klassen. unter der Annahme, dass einzelne Kavitationsevents in ihrem Ablauf charakteristisch sind und kavitationsfreien Abschnitten voneinander getrennt sind, können charakteristische Kavitationspattern erkannt werden. Die Motif Auswertung zeigt, dass die Klasse "2" das häufigste Einzelereignis darstellt, gefolgt von "22". Erst später folgen die Klassenfolgen "44", "444",

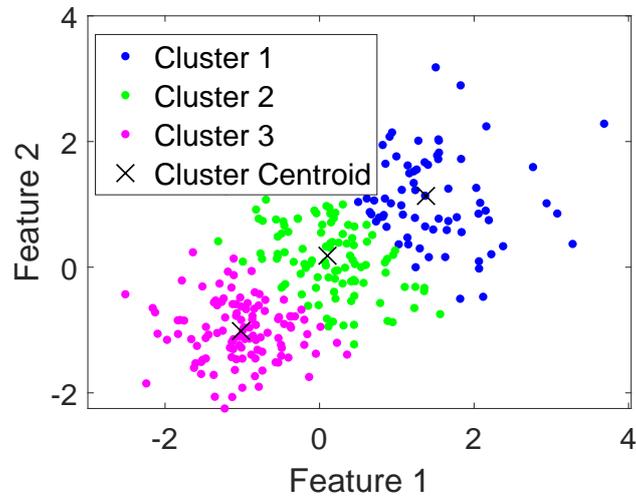


Abb. 3.2: Beispiel des k-Means Algorithmus in einem zweidimensionalen Featureerraum und drei Clustern

”4” und ”222” (Abb. 3.4).

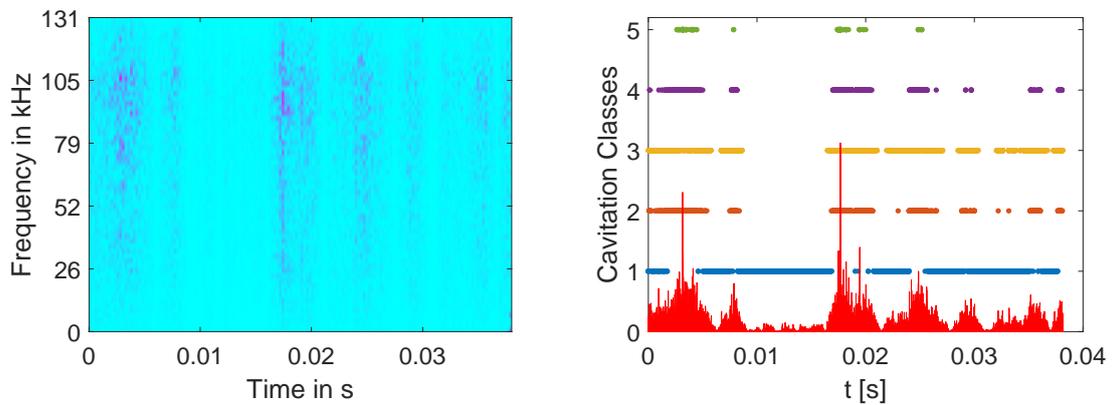


Abb. 3.3: Spektrogram eines TKE gefilterten Signals aus den Flügelversuchen (links) und Ergebnis der k-Means Klassifikation (rechts)

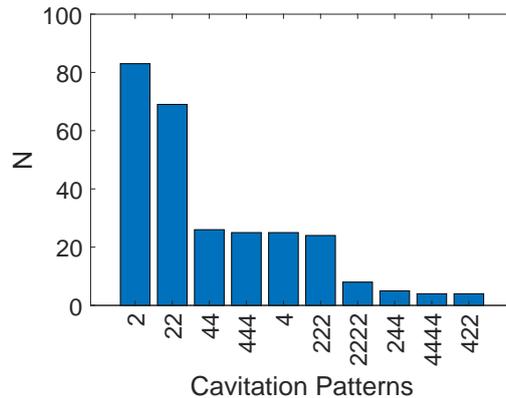


Abb. 3.4: Typische Kavitationszeitreihen in den Messdaten, sortiert nach Häufigkeit

3.3 Supervised Learning

3.3.1 Neuronale Netze

Ein typischer Anwendungsfall für die Kavitationsklassifikation kann neben der Erkennung im Kavitationskanal auch die Detektion erwünschter oder unerwünschter Kavitationszustände im Schiffsbetrieb sein. Sind die zu detektierenden Kavitationsarten bekannt, kann auf Basis akustischer Messdaten eine Prognose des Kavitationstyps durchgeführt werden. Besonders geeignet für diese Art der Klassifikation sind neuronale Netze, die hochgradig nichtlineare Zusammenhänge aus den Audiodaten erkennen können. Vereinfacht ausgedrückt bestehen Neuronale Netze aus geschichteten Layern künstlicher Neuronen, die miteinander vollständig oder teilweise vernetzt sind und als simple Recheneinheiten gemäß einer Activation Function agieren. Die Struktur besteht üblicherweise aus einem Input Layer, einem oder mehreren Hidden Layers und einem Output Layer. Trainiert werden die Gewichte der neuronalen Verknüpfungen, indem auf Basis bekannter Trainingsdaten Predictions erstellt werden. Aus den Predictions lassen sich für die Gewichte die Gradienten der Fehlerfunktion berechnen, so dass diese in einer Backward Propagation aktualisiert werden. Neuronale Netze benötigen für den Trainingsprozess große Mengen annotierter Daten. Die Datensätze werden im Verhältnis 60/20/20 in einen Trainingsdatensatz, einen Developmentdatensatz und einen Testdatensatz geteilt. Auf dem Trainingsdatensatz wird das eigentliche Training des Netzes durchgeführt. Der Developmentdatensatz dient zur Verbesserung des Modells und der Validierung des Trainingsprozesses und der Testdatensatz der finalen

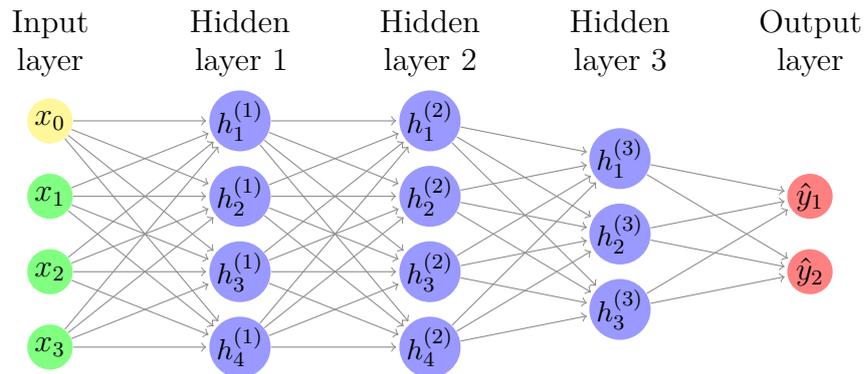


Abb. 3.5: Beispielhaftes Neuronales Netzwerk mit drei Hidden Layern

Prüfung des trainierten Modells. Zum Aufbau des Klassifikators wurde Tensorflow Keras verwendet, das eine leistungsfähige Umgebung für ein breites Spektrum an Machine-Learning Verfahren bereitstellt. Es wurden verschiedene Netzwerkarchitekturen am Beispiel der Flügelversuche untersucht. Ziel war die Unterscheidung von zehn Versuchsreihen mit unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit, die zehn unterschiedliche Kavitationsausprägungen aufwiesen. Die Annotation erfolgte mit der Versuchsnummer. Verwendet wurden zwischen zwei und vier Hidden Layer mit bis zu 256 Neuronen und einer Rectified-Linear Activation Function. Im Output Layer wurde eine Softmax Function verwendet. Neuronale Netze neigen zum Overfitting. Dies bedeutet, dass das Netz den Trainingsdatensatz zwar nahezu perfekt abbilden kann (Low Bias), auf neuen, unbekanntem Testdaten jedoch eine sehr schlechte Prediction erzeugt (High Variance). Um dem vorzubeugen wurde ein Early Stopping auf Basis des Validation Loss verwendet. Dies führt dazu, dass bei wiederholtem Anstieg des Validation Loss zwischen einzelnen Trainingsepochen das Training abgebrochen wird. Bei den Berechnungen wurde für die Klassifikation von zehn Kavitationsklassen eine maximale Model Accuracy von 0,43 erreicht. Diese liegt zwar mit dem Faktor 4,3 über der statistischen Wahrscheinlichkeit, für eine belastbare Prognose des Kavitationszustandes schien das Verfahren in der untersuchten Konfiguration jedoch nicht geeignet, so dass weitere Forschungsarbeiten unternommen wurden.

3. Entwicklung akustischer Klassifikationsverfahren

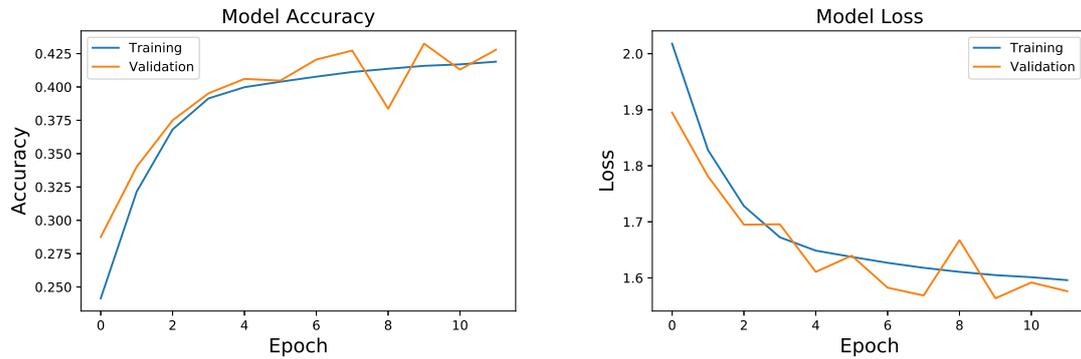


Abb. 3.6: Validation Accuracy und Validation Loss der Klassifikation der Versuchsreihen mit konstanter Geschwindigkeit mit einem Neuronales Netzwerk

3.3.2 Random Forest

Random Forest ist ein Verfahren das eine Vielzahl unterschiedlicher Entscheidungsbäume kombiniert und eine Klassifikation auf Basis eines Majority Votes durchführt. Vorteil des Verfahrens sind eine sehr gute Generalisierung und hervorragende Eigenschaften zur nachträglichen Datenanalyse. Random Forests überwinden das Problem klassischer Decision Trees, das unflexible Verhalten gegenüber neuen Daten, das gewöhnlicherweise zu einer sehr schlechten Prognosegenauigkeit führt (Low Bias, High Variance). Random Forests verwenden Bootstrapped Datasets, die aus den Trainingsdaten willkürlich Samples auswählen. Einzelne Datenreihen können dabei auch wiederholt ausgewählt werden. Zum Aufbau der Decision Trees werden aus dem Bootstrapped Dataset lediglich einzelne Featuresubsets beliebig als Unterscheidungsmerkmale ausgewählt. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis eine vorgegebene Menge an völlig beliebigen Entscheidungsbäumen erstellt ist, der sogenannte Random Forest. Diese Menge an völlig beliebigen Entscheidungsbäumen macht den Random Forest wesentlich flexibler als konventionelle Decision Tree Verfahren. Trainiert wurden die Random Forests mit den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Features, die auf Basis der beliebig ausgewählten Statistikgrößen (Tab. 3.1) auf den Frequenzbändern des Audiosignals erstellt wurden. Klassifiziert wurden 16 Modellversuche am Kavitationskanal der SVA, die sich durch Sauerstoffgehalt α/α_s und Kavitationszahl σ und dementsprechen auch in Art und Intensität der Kavitation unterschieden. Verwendet wurde ein relativ kleiner Datensatz mit 28970×1280 Features, die im Verhältnis 60/40 als Trainingsdatensatz und Testdatensatz unterteilt wurden. Abbildung 3.7 zeigt das Ergebnis der akustischen Ka-

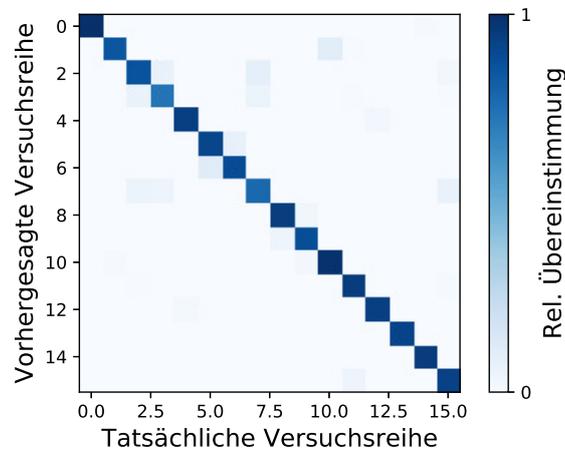


Abb. 3.7: Confusion Matrix der akustischen Kavitationsklassifikation mit allen 1280 Features, $F_1 = 0,93$

vitationsklassifikation als Confusion Matrix. Die Confusion Matrix zeigt das Ergebnis des Blindtests des trainierten Random Forest Klassifikators, indem untersucht wird, ob ein vorliegendes Audiosignal korrekt erkannt wird (true positive tp), ein falsches Audiosignal in einer Klasse erkannt wird (false positive fp) oder das Audiosignal fälschlicherweise einer anderen Klasse zugeordnet wird (false negative fn). Die stark besetzte Hauptdiagonale zeigt, dass ein Großteil der Audiosignale korrekt den tatsächlichen Messreihen zugeordnet werden können. Elemente abseits der Hauptdiagonale deuten auf Fehlinterpretationen des Klassifikators hin, deren Ursache gleiche akustische Eigenschaften zwischen den Kavitationsarten sein können. Die Genauigkeit des trainierten Random Forest Klassifikators mit allen 1280 Features beträgt

$$F_1 = \frac{tp}{tp + 0,5(fp + fn)} = 0,93 \quad (3.1)$$

Mit dieser Genauigkeit ist der Algorithmus in der Lage verschiedene Kavitationsarten nur auf Basis ihrer akustischen Eigenschaften voneinander zu unterscheiden und eignet sich z.B. zur automatisierten akustischen Kavitationsdetektion im Schiffsbetrieb oder in Modellversuchen.

Der große Vorteil des Random Forest Klassifikators sind neben der hohen Prognosegenauigkeit die umfassenden Analysemöglichkeiten. So können auf Basis der Gini Impurity, die ein Maß für die Aussagekraft bestimmter Features darstellt, die Eigenschaften

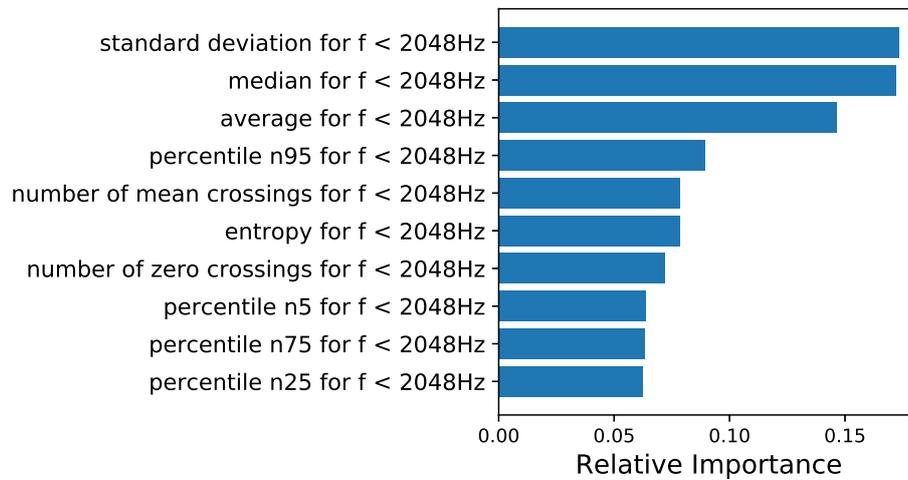


Abb. 3.8: Feature Importance der akustischen Kavitationsklassifikation am Kavitationskanal der SVA

gewählt werden, an denen sich die Audiomessungen bestmöglich unterscheiden lassen (Abb. 3.8). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass einerseits nicht alle 1280 Features für die Klassifikation benötigt werden. Zusätzlich kann aus dem Ergebnis geschlossen werden, in welchen statistischen Größen sich die Kavitationsarten ähneln und in welchen sie sich unterscheiden. Dies erlaubt Rückschlüsse auf Ähnlichkeiten und Unterschiede in den physikalischen Prozessen. Abbildung 3.9 zeigt das Ergebnis der akustischen Klassifikation mit den zehn wichtigsten Features. Deutlich kommen abseits der Hauptdiagonalen Felder zum Vorschein, die auf Misclassification hindeuten. Dies bedeutet, dass die akustischen Eigenschaften ähnlich sind und mit den verwendeten Features nicht mehr vollständig unterschieden werden können. Trotzdem wird für die Klassifikation mit den zehn wichtigsten Features immer noch eine Genauigkeit von $F_1 = 0,73$ erreicht. Es gilt zu beachten, dass auch die 20 statistischen Größen zur Featuregenerierung völlig beliebig gewählt wurden. Mit zunehmendem Kenntnisstand zu den Wirkmechanismen der Kavitation können diese auch gezielter ausgewählt werden, um das Verfahren individuell zu optimieren.

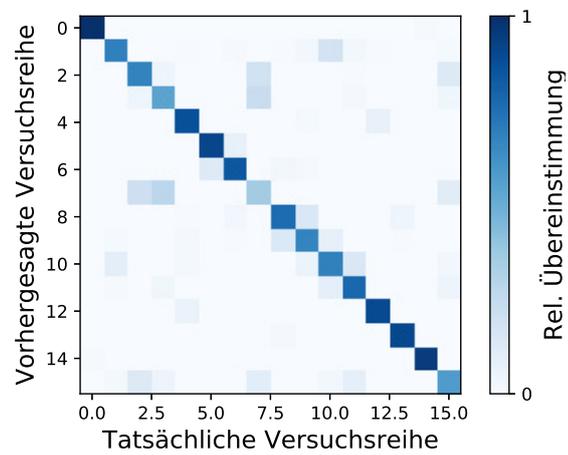


Abb. 3.9: Confusion Matrix der akustischen Kavitationsklassifikation mit den zehn wichtigsten Features, $F_1 = 0,78$

4 Messungen am Tragflügel

Ziel des Arbeitspakets war die Durchführung und Auswertung von Kavitationsstudien, um in einer kontrollierten Versuchsumgebung die entwickelten Methoden und Verfahren zu testen. Untersucht wurde der vom Partner TUHH entwickelte Tragflügel, der in einer Reihe von Kavitationsberechnungen hydrodynamisch umfangreich validiert wurde und somit über eine breite Datenbasis verfügt. Der untersuchte Flügel hat ein Seitenverhältnis von $\Lambda = 4,0$ eine Spannweite von $b = 0,15\text{ m}$ und eine Wurzelchordlänge von $C = 0,063\text{ m}$. Die Flügelgeometrie baut sich aus vier verschiedenen 4-ziffrigen NACA Profilen auf und verfügt mit Bezug auf den geometrischen Anstellwinkel α über einen theoretischen Auftriebsbeiwert von $c_L = 0,073\alpha$. Zur Gewährleistung eines stark ausgeprägten Spitzenwirbels mit einem definierten Ablösepunkt wurde der Flügel mit einer starken Spitzenbelastung ausgelegt. Die Erzeugende liegt parallel zur y-Achse mit dem Aufpunkt in $P_A = [0,05380, 1500]\text{ m}$. Eine detaillierte Auflistung der Flügelgeometrie zeigt Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Flügelgeometrie

y/b	NACA	c [m]	α [°]
0	8518	0.0630	8
0.5	7516	0.0563	10
0.74	0012	0.0420	12
1	0010	0.0375	16

Die Messungen wurden im Kavitationskanal K-21 des Lehrstuhls Strömungsmechanik der Universität Rostock durchgeführt (Abb.4.1). Der Kavitationskanal verfügt über einen Querschnitt von $0,3\text{ m} \times 0,3\text{ m}$ und erlaubt Messungen mit Umgebungsdrücken von $p_{abs} = 0,4\text{ bar}$ bei einer turbulenten Intensität am Einströmrand der Messstrecke von $T_u = 1,5\%$ für Bulkgeschwindigkeiten von $v_i < 9,5\text{ m/s}$.

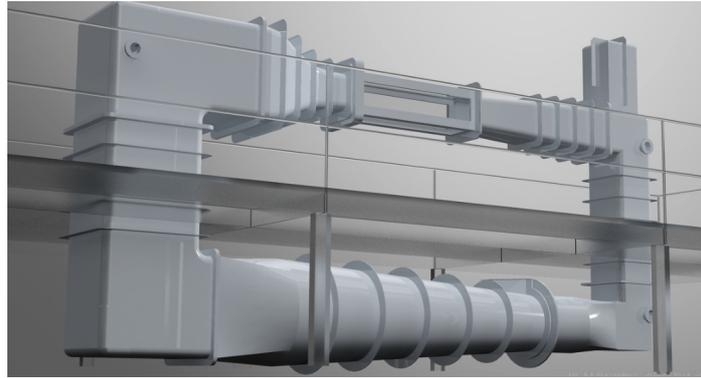


Abb. 4.1: Kavitationskanal der Universität Rostock, LSM

4.1 Messvorbereitungen

Die erste Herausforderung bestand in der Entwicklung einer geeigneten Montageposition der Empfangshydrofone innerhalb des Kanals, da eine Messposition zu realisieren war, die einen freien akustischen Zugang zum Messobjekt gewährleistet aber gleichzeitig nicht von der Kanalströmung beeinflusst wird. Dazu wurden in Erkundungsmessungen unterschiedliche Einbaupositionen mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Kavitationszahlen untersucht (Tab. 4.2). Dabei zeigte sich, dass die Hydrofone in der freien Strömung zum Ausbilden eines Ablösegebiets mit zusätzlicher Selbstkavitation neigen (Abb. 4.2). In diesem Ablösegebiet werden in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit bei einer Strouhal-Zahl eines halbumendlichen Zylinders von $St = 0,14$ [5] unterschiedliche Ablösefrequenzen der Wirbel induziert, die sich im gemessenen Audiosignal wiederfinden. Gleichzeitig erzeugt der kavitierende Nachstrom des Hydrofons ein breitbandiges Rauschen, das sich deutlich im Spectrum abzeichnet (Abb. 4.4, 4.5). Deshalb wurden Möglichkeiten untersucht um diesen Effekt zu minimieren. Eine verfolgte Lösung war die der Guss einer akustisch transparenten Schutzkappe aus Vytaflex (Abb. 4.2, rechts). Diese Kappe löste zwar die Gefahr einer erosiven Schädigung des Hydrofons durch Selbstkavitation, die akustischen Wirkungen der Ablösung wurden jedoch nicht behoben. Stattdessen wurde untersucht, welche Effekte sich erreichen lassen, wenn das Hydrofon außerhalb der freien Strömung positioniert wird. Durch eine geeignete Halterung wurden die Hydrofone so in der Scheibe des Kavitationskanals versenkt, dass trotzdem durch einen Ring weitestgehend ruhenden Wassers umgeben sind (Abb. 4.3). Dies sichert die hydroakustische Kopplung und reduziert die akustischen

Tab. 4.2: Versuchsparameter Kavitationsverhalten BKS V 8103

v	σ	Re	f_d
m/s	-	-	Hz
1.65	43.6	$1.6 \cdot 10^4$	24.3
4.0	7.4	$3.8 \cdot 10^4$	59.0
5.0	4.7	$4.7 \cdot 10^4$	73.7
6.0	3.3	$5.7 \cdot 10^4$	88.4
6.25	3.0	$5.9 \cdot 10^4$	92.1
6.5	2.8	$6.2 \cdot 10^4$	95.8
6.75	2.6	$6.4 \cdot 10^4$	99.5

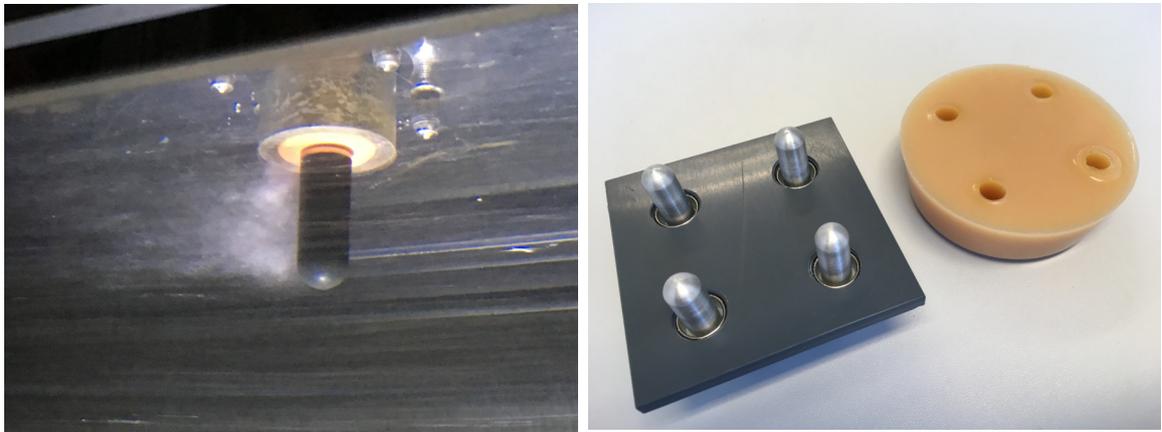


Abb. 4.2: Empfangshydrofon BKS V 8103 in Selbstkavitation (links) und akustisch transparente Vytacflex Schutzkappe (rechts)

und hydrodynamischen Störungen (Abb. 4.4, rechts). Ein Nachteil dieser Methode ist die stärkere Direktivität der Hydrofone als Folge der Umbauung durch die Kanalwand. Deshalb sind bei der Wahl der Position des Hydrofonarrays freie akustische Achsen zum Quellort sicherzustellen.

Neben der Direktivität infolge der bündigen Hydrofonmontage ist auch die optimale Auflösung des Frequenzbereichs entscheidend für das Design und die Anordnung des Hydrofonarrays. Für eine optimale Darstellung sollte der Hydrofonabstand im Bereich der halben Wellenlänge der beobachteten Frequenz liegen. Aus diesem Grund wurden für die Messanordnung des Kavitationskanals unterschiedliche Arrays mit beliebigen Quellen simuliert. Betrachtet wurden Konfigurationen der Archimedischen Spirale und des Underbrink Arrays [4] (Abb. 4.6). Zusätzlich zu den 8 Hydrofonpositionen des Arrays sind

4. Messungen am Tragflügel

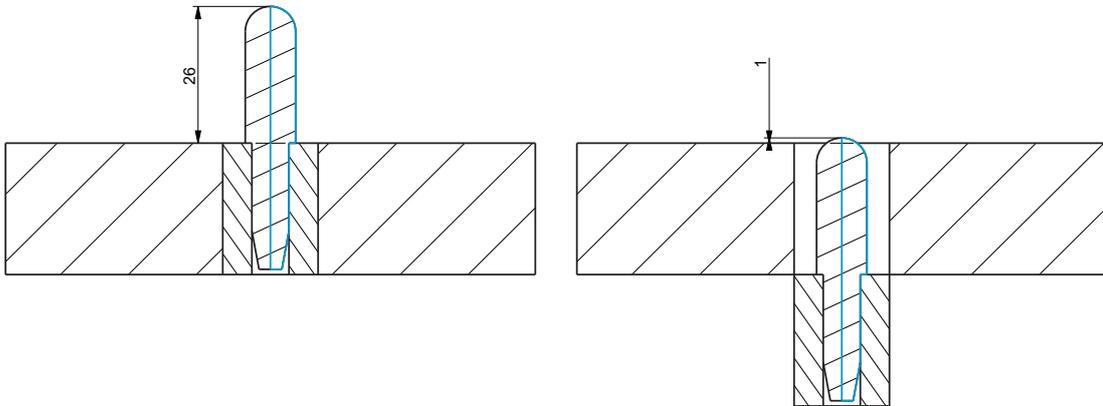


Abb. 4.3: Einbaupositionen Hydrofon BKS 8103: freistehend (links) und bündig (rechts)

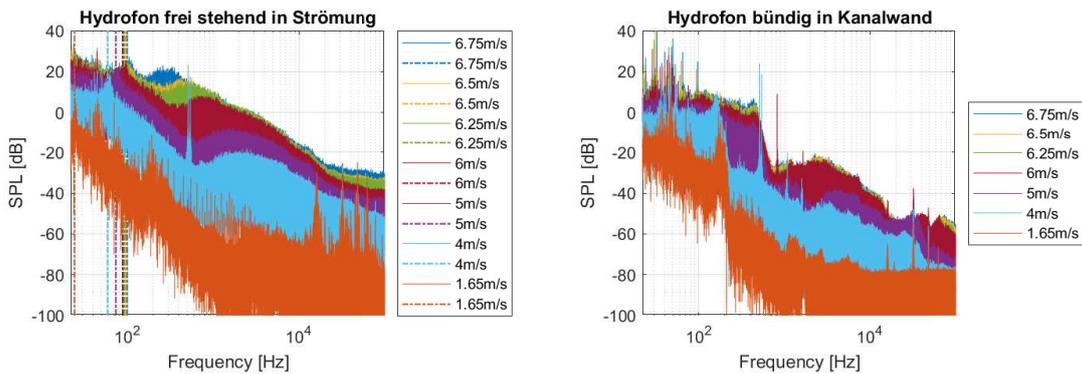


Abb. 4.4: Ergebnis der Messung zum Kavitationsverhalten der Hydrofone

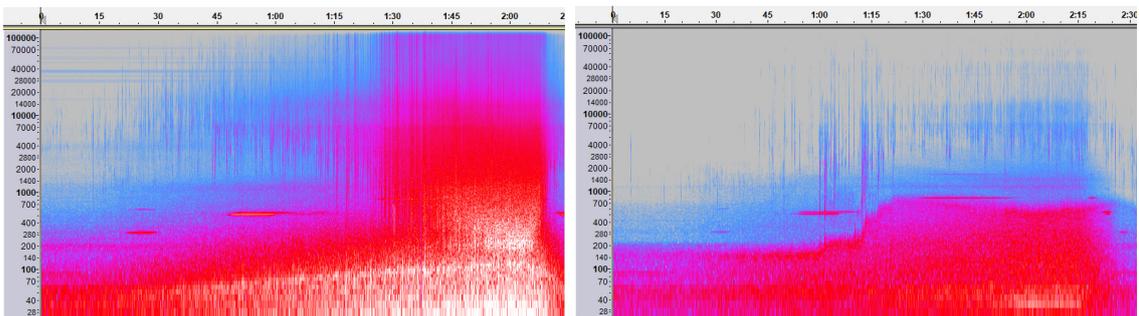


Abb. 4.5: Spektrogramm der Testmessung leere Anlage mit ansteigender Geschwindigkeitsrampe $2 \text{ m/s} \leq v_a \leq 7 \text{ m/s}$ mit frei stehendem (links) und bündig versenktem Hydrofon (rechts)

4. Messungen am Tragflügel

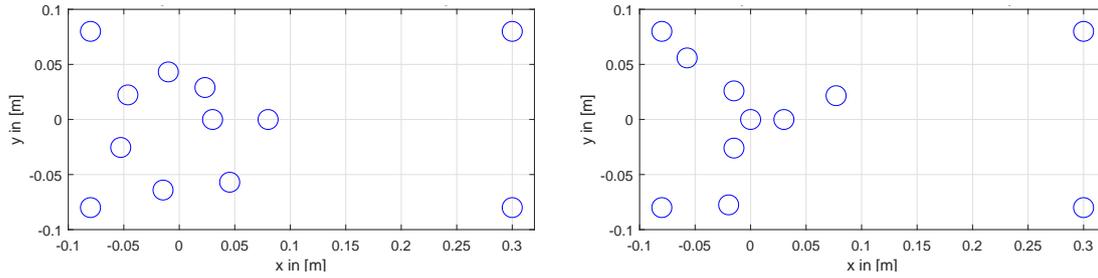


Abb. 4.6: Hydrofonpositionen in den Plexiglasscheiben des K-21: Archimedische Spirale (links) und Underbrink Array (rechts)

in der Scheibe in den Ecken 4 Hydrofone eingebracht, die für Versuche mit der Inversen Methode. Diese werden in die Arraysimulation mit einbezogen. Bewertet wurden für einen Quellenabstand von $z = 2$ über der Plexiglasscheibe die Array Antwort und die normalisierte Hauptkeulenweite $BW = 2l_{max}/\lambda$. Für die untersuchten Konfigurationen konnte für die Archimedische Spirale eine bessere Array Response (Abb. 4.7, 4.8) und eine geringere Hauptkeulenweite (Abb. 4.9, 4.10) nachgewiesen werden. Deshalb wurde im Versuchsaufbau die Archimedische Spirale umgesetzt (Abb. 4.11). Bestückt wurde die Steuerbordseite, die der Saugseite des Flügels zugewandt, da für die gewählte Flügelkonfiguration ausschließlich Saugseiten- und Spitzenwirbelkavitation zu erwarten ist. Zusätzlich zu den 12 Hydrofonen der Seitenscheibe sind vier Hydrofone in der Bodenscheibe eingebracht. Eine komplette Auflistung aller Hydrofonpositionen zeigt Tab. 4.3.

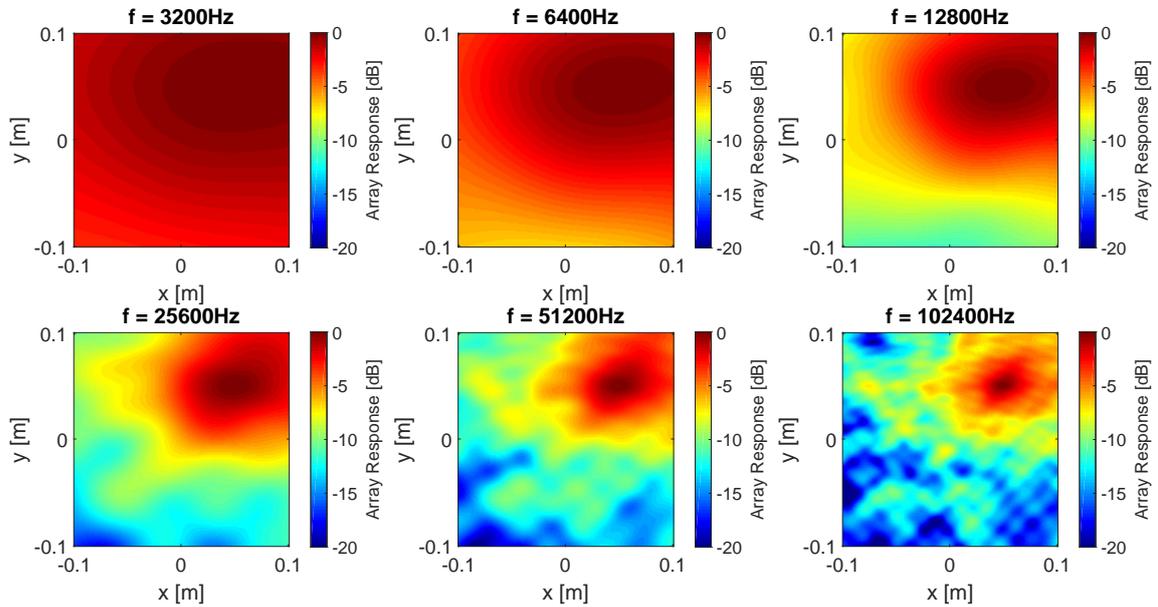


Abb. 4.7: Beamforming Output der Archimedischen Spirale in Dezibel für eine Schallquelle mit weißem Rauschen bei $P_{wn} = [0, 50, 50, 1] m$ in Abhängigkeit der Frequenz

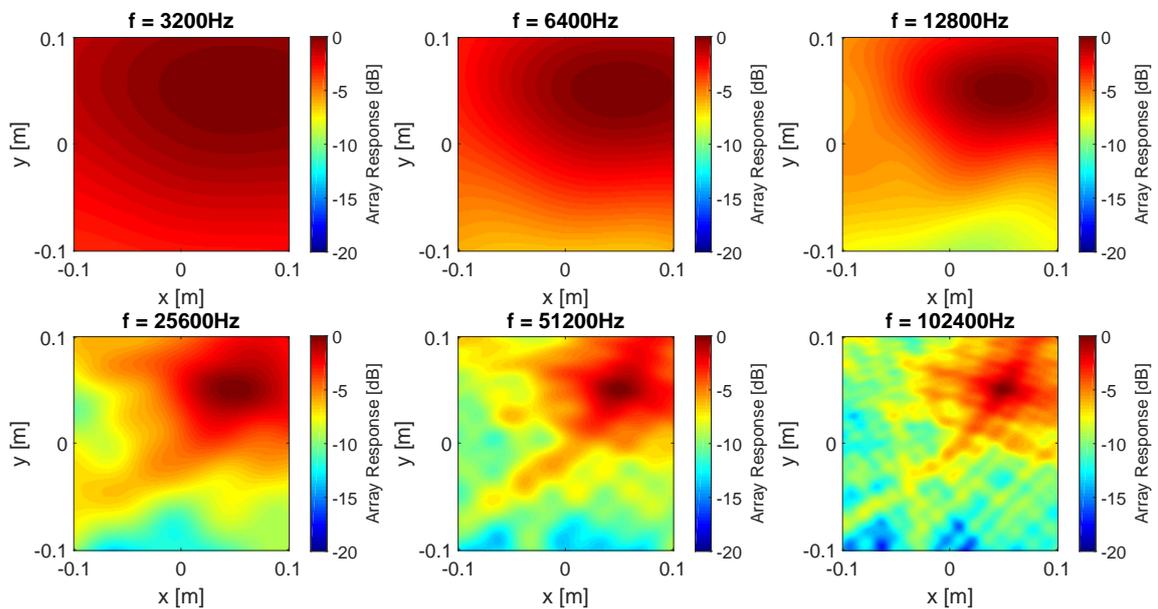


Abb. 4.8: Beamforming Output des Underbrink Arrays in Dezibel für eine Schallquelle mit weißem Rauschen bei $P_{wn} = [0, 50, 50, 1] m$ in Abhängigkeit der Frequenz

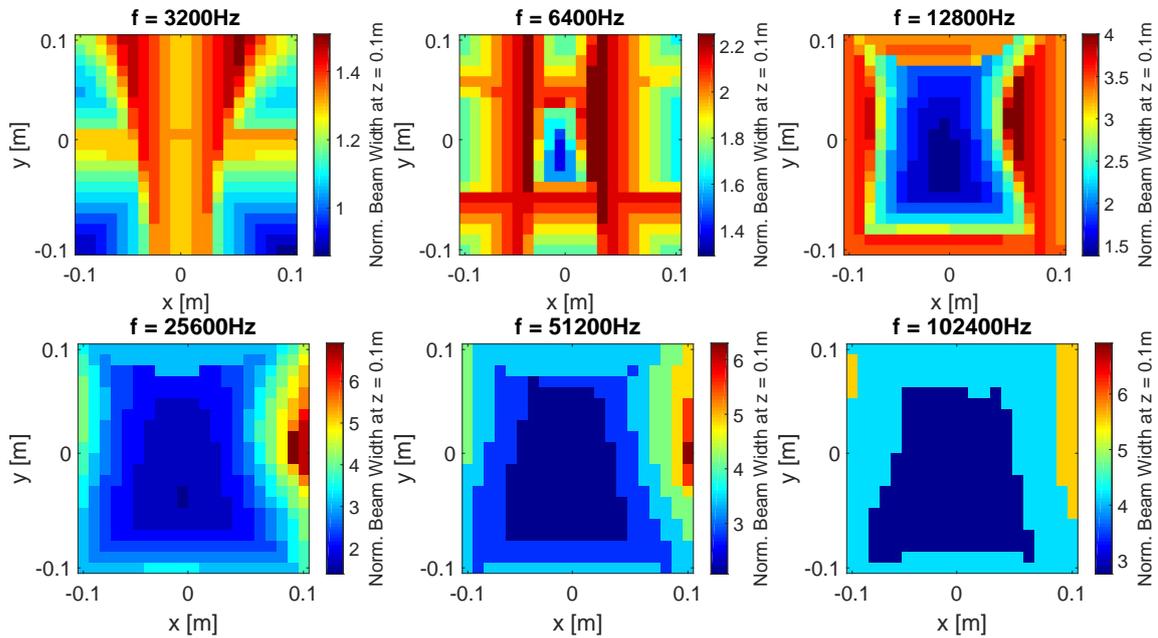


Abb. 4.9: Normalisierte Hauptkeulenweite der Archimedisches Spirale für eine Schallquelle mit weißem Rauschen bei $P_{wn} = [0, 50, 50, 1] m$ in Abhängigkeit der Frequenz

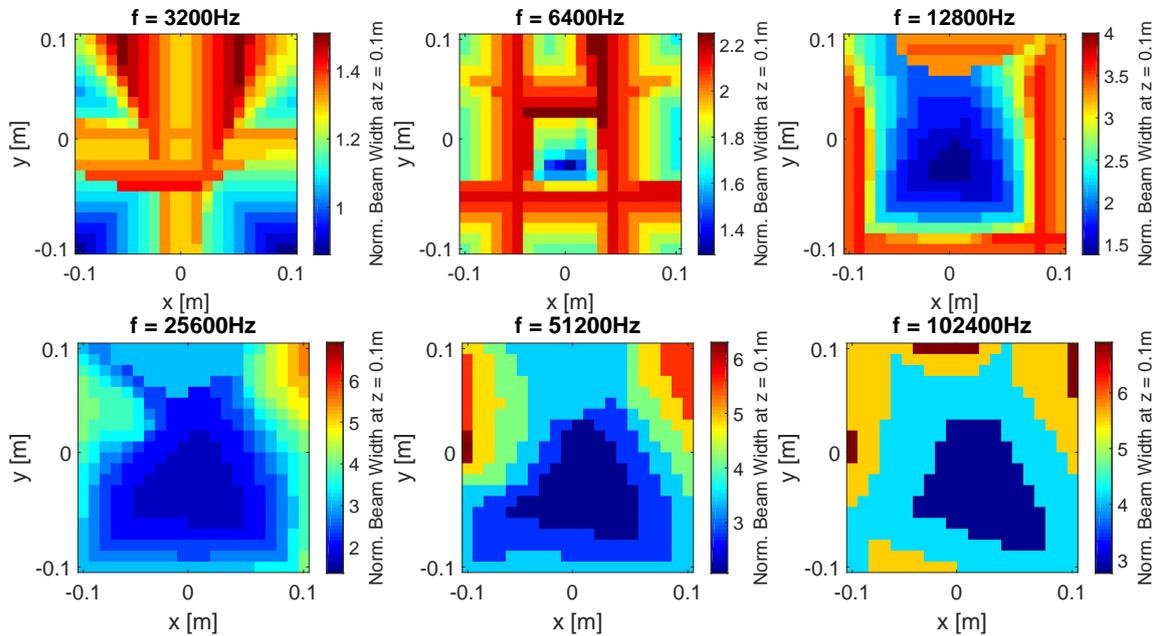


Abb. 4.10: Normalisierte Hauptkeulenweite des Underbrink Arrays für eine Schallquelle mit weißem Rauschen bei $P_{wn} = [0, 50, 50, 1] m$ in Abhängigkeit der Frequenz

4. Messungen am Tragflügel

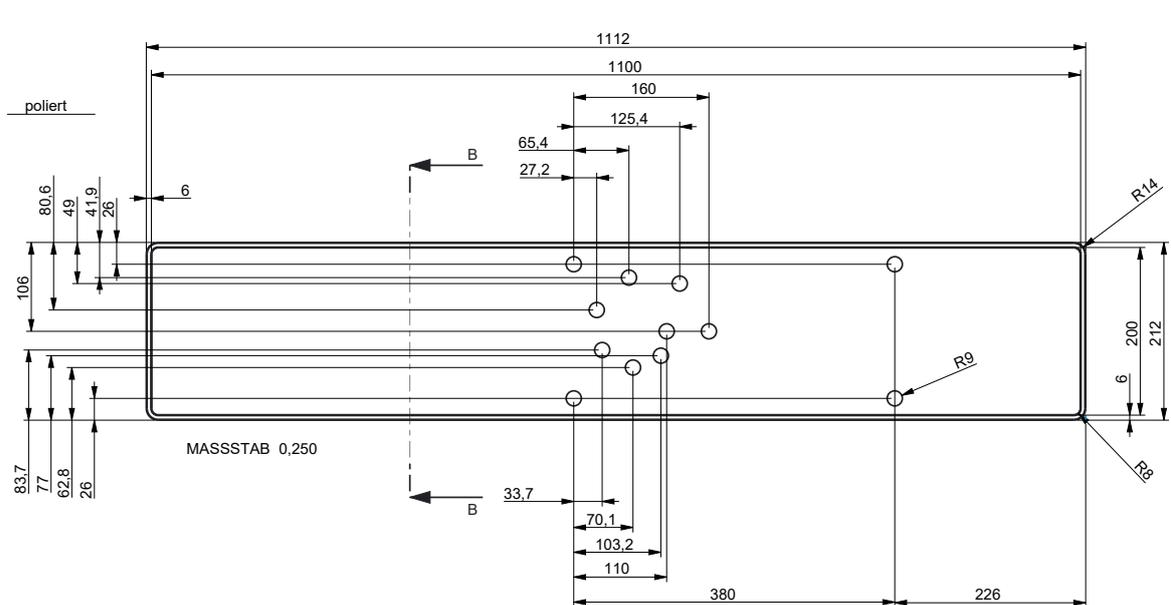


Abb. 4.11: Technische Zeichnung der Plexiglasscheibe K-21 mit Bohrfeld in Archimedischer Spirale

Tab. 4.3: Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone im K-21 Kavitationskanal; Aufpunkt der Flügel erzeugenden bei $P_A = [0, 0538 \ 0, 150 \ 0, 0] \text{ m}$

Ch. Nr.	x	y	z
-	m	m	m
1	0	0.0800	-0.1590
2	0	-0.0800	-0.1590
3	0.3800	0.0800	-0.1590
4	0.3800	-0.0800	-0.1590
5	0	-0.1590	0.0800
6	0	-0.1590	-0.0800
7	0.3800	-0.1590	-0.0800
8	0.3800	-0.1590	0.0800
9	0.1100	0	-0.1590
10	0.1032	0.0290	-0.1590
11	0.0701	0.0432	-0.1590
12	0.0337	0.0223	-0.1590
13	0.0272	-0.0254	-0.1590
14	0.0654	-0.0641	-0.1590
15	0.1254	-0.0570	-0.1590
16	0.1600	0	-0.1590

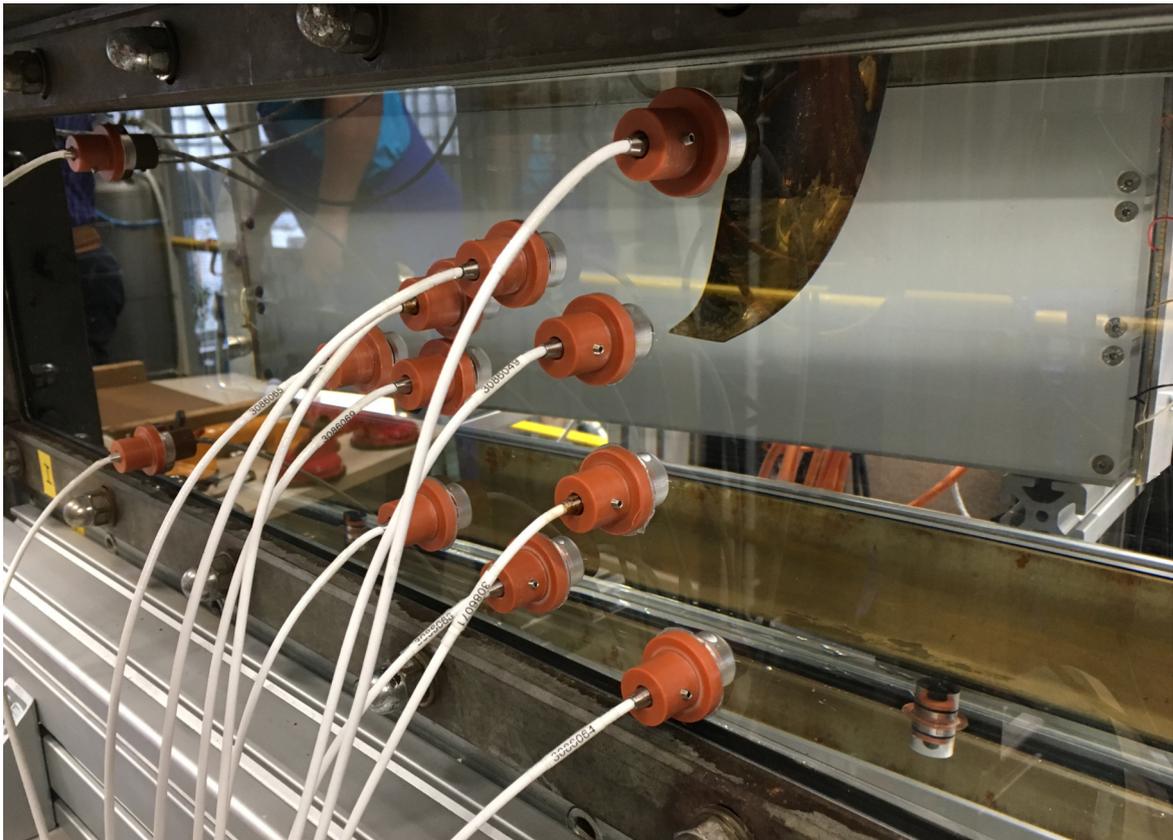


Abb. 4.12: Plexiglasscheibe im eingebauten Zustand mit Hydrofonen und Tragflügel im Hintergrund

Tab. 4.4: Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone

Ch. Nr.	S.Nr	Charge Sensitivity	Capacity	Kommentar
-	-	pC/Pa	pF	-
1	3086066	0,0985	3724	
2	3086064	0,0942	3729	
3	3086054	0,0988	3794	
4	3086072	0,0987	3760	
5	3086067	0,0956	3660	
6	3086070	0,0972	3731	
7	3086052	0,0941	3640	
8	3086050	0,0966	3712	
9	3086069	0,0953	3759	
10	3086048	0,0962	3786	
11	3086053	0,0971	3756	
12	3086049	0,097	3733	
13	3086071	0,0983	3767	
14	3086068	0,0932	3692	
15	3086051	0,0958	3736	
16	3086065	0,0961	3705	

4.2 Lokalisierungsmessungen

Zum Test der entwickelten Lokalisierungs- und Klassifikationsalgorithmen wurden verschiedene Messreihen durchgeführt. Dazu wurden konstante Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsrampen mit gefahren. In den Geschwindigkeitsrampen wurde die Geschwindigkeit linear über einen Zeitraum von $t_{ru} = 150\text{ s}$ von $v_i = 2\text{ m/s}$ auf $v_i = 7\text{ m/s}$ angehoben und danach über $t_{rd} = 150\text{ s}$ wieder auf $v_i = 2\text{ m/s}$ abgesenkt. Die zugehörigen Kavitationszahlen am Flügel liegen im Bereich von $2,54 < \sigma < 31,16$ (Abb. 4.5). Die Rampenversuche fahren durch verschiedene Kavitationszustände des Flügels. Beginnend mit dem vollständig kavitationsfreien Betrieb, bildet sich mit zunehmender Geschwindigkeit abgelöste Spitzenwirbelkavitation, die stromaufwärts in Richtung der Flügelspitze wächst. Mit weiter zunehmender Strömungsgeschwindigkeit und Schluss der Spitzenwirbelkavitationsblase mit der Flügelspitze bildet sich auf der Saugseite eine stabile Schichtkavitation am äußersten Ende der Flügelspitze. Diese Kavitationsblase wächst mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit entlang der Eintrittskante weiter in Richtung des Flügelfußes und erreicht bei $v_i = 7\text{ m/s}$ ihre stärkste Ausdehnung mit

Tab. 4.5: Versuchsreihen der Flügelversuche

ID	V_i	n	σ	f_s	Dateiname
-	m/s	min^{-1}	-	kHz	-
1	3,54	750	9,94	131	constant n750-1.wav
2	3,77	800	8,77	131	constant n800-1.wav
3	3,01	850	7,75	131	constant n850-1.wav
4	4,25	900	6,90	131	constant n900-1.wav
5	4,48	950	6,21	131	constant n950-1.wav
6	4,72	1000	5,59	131	constant n1000-1.wav
7	4,19	1100	4,63	131	constant n1100-1.wav
8	5,66	1200	3,89	131	constant n1200-1.wav
9	5,13	1300	3,32	131	constant n1300-1.wav
10	6,60	1400	2,86	131	constant n1400-2.wav
11	7,00	1500	2,54	131	constant n1500 00-1.wav
12	2,0..7,0	424..1500	31,16..2,54	262	Rampe-n424-n1500 100kHz-1.wav
13	2,0..7,0	424..1500	31,16..2,54	262	Rampe-n424-n1500 100kHz-2.wav
14	2,0..7,0	424..1500	31,16..2,54	262	Rampe-n424-n1500 100kHz-3.wav
15	2,0..7,0	424..1500	31,16..2,54	262	Rampe-n424-n1500 100kHz-4.wav

einer starken Kavitationsblase über die gesamte Flügelspannweite. Auch wächst die Saugseitenschichtkavitation mit zunehmender Geschwindigkeit von der Eintrittskante stromabwärts in Sehnenrichtung. In ihrer stärksten Ausdehnung bei $v_i = 7 m/s$ hüllte die Kavitationsblase den Flügel von der Eintrittskante bis 60% der Chordlänge ein. Mit wieder sinkender Strömungsgeschwindigkeit bildet sich die Saugseitenschichtkavitation wieder zurück. Im Unterschied zur ansteigenden Geschwindigkeitsrampe reduziert sich die Kavitationsblase jedoch nicht bis zur Flügelspitze, sondern zeigt ein instationäres pulsierendes Verhalten und weist starke Interaktion mit dem Spitzenwirbel auf: Die Saugseitenschichtkavitation bricht mit vollständig zusammen und der Spitzenwirbel löst ab. Durch Re-Attachement des Spitzenwirbels wird die Saugseitenschichtkavitation wieder induziert und die Blase entsteht erneut. Dieser Prozess findet mit hoher Häufigkeit und ohne klare Frequenz statt. mit sinkender Geschwindigkeit nimmt die Häufigkeit und Intensität des Vorgangs ab, bis die Saugseitenblase und die Spitzenwirbelkavitation vollständig zusammenbrechen und der Flügel wieder in den kavitationsfreien Betrieb übergeht. Typische Kavitationsformen zeigt Abb. 4.13.

4. Messungen am Tragflügel

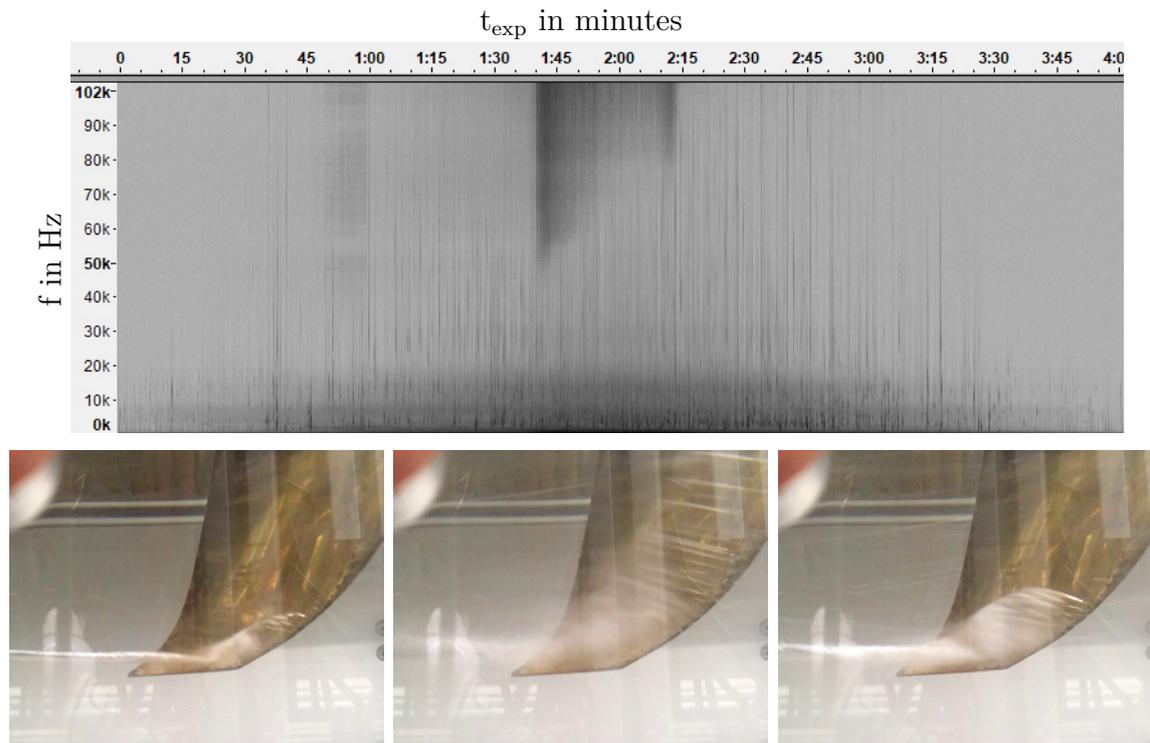


Abb. 4.13: Kavitationsversuch mit Geschwindigkeitsrampe im K-21: Spektrogramm des Audiosignals (oben) und Kavitationszustände (unten): Flügelschluss der Spitzenwirbelkavitationsblase und Induktion der Saugseitenschichtkavitation bei $t_{exp} = 1 : 00 \text{ min}$ (links); stabile Saugseitenschichtkavitation in maximaler Ausdehnung bei maximaler Anströmgeschwindigkeit bei $t_{exp} = 2 : 00 \text{ min}$ (Mitte); pulsierende Saugseitenschichtkavitation mit wiederholtem Ablösen und Anschließen der Spitzenwirbelkavitation bei $t_{exp} = 2 : 45 \text{ min}$ (rechts)

Wie bereits aus dem Vergleich der optischen Kavitationsausdehnung mit den spektralen Bestandteilen des Audiosignals hervorgeht, ist das messbare Audiosignal stark geprägt von Art und Intensität der Kavitation. Dies spiegelt sich auch in der Lokalisierung der räumlich verteilten Schallquellen wieder, die im kavitierenden Bereich die größte Intensität aufweisen (Abb. 4.14). Zusätzlich können unterschiedliche Bereiche identifiziert werden, die je nach beobachteter Frequenz unterschiedliche Beiträge liefern. So werden beispielsweise für den Fall der instationären Saugseitenschichtkavitation für eine Frequenz von $f = 8 \text{ kHz}$ der Eintrittsbereich der Flügelspitze und für eine Frequenz von $f = 10 \text{ kHz}$ der äußerste Bereich der Flügelspitze, dort wo der aufgerollte Spitzenwirbel vom Flügel ablöst, als lauteste Regionen bestätigt.

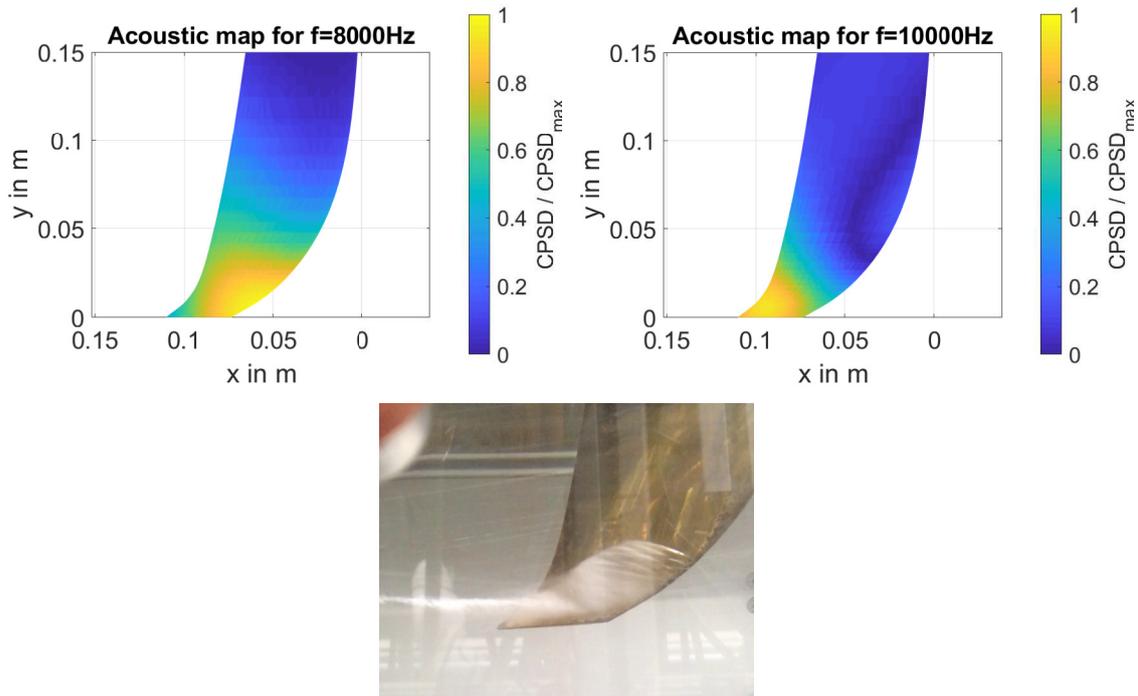


Abb. 4.14: Beamforming Ergebnis des Kavitationsversuchs mit Rampe für $f = 8\text{ kHz}$ (oben links) und $f = 10\text{ kHz}$ (oben rechts) für den intermittierenden Kavitationszustand bei $t_{exp} = 2 : 45\text{ min}$ (unten)

4.3 Kavitationsklassifikation

Unterschiedliche Kavitationseigenschaften lassen auf unterschiedliche Kavitationsarten bzw. unterschiedliche zugrundeliegende Prozesse schließen. Aus diesem Grund wurde untersucht, in wie weit auf akustischen Wege in die Kavitationsstrukturen vorgedrungen werden kann. Dazu wurde zunächst das Audiosignal mit dem TKE Algorithmus gefiltert um harmonische Störgeräusche der Anlage zu eliminieren (Abb. 4.15). In einem nächsten Schritt wurde das Audiosignal mit Hilfe einer Wavelet Packet Decomposition in 64 Frequenzbereiche zerlegt, so dass für jeden Messpunkt die spektralen Eigenschaften des Signals bekannt sind. Diese spektralen Eigenschaften stellen die Eingangsparameter des Klassifikationsalgorithmus dar.

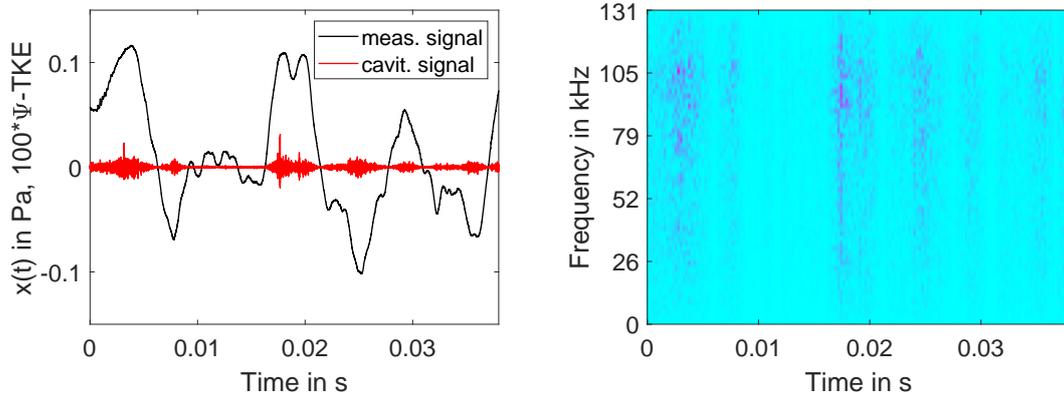


Abb. 4.15: Audiosignal und TKE gefiltertes Signal aus den Rampenversuchen (links) und Ergebnis der Wavelet Packet Decomposition (rechts)

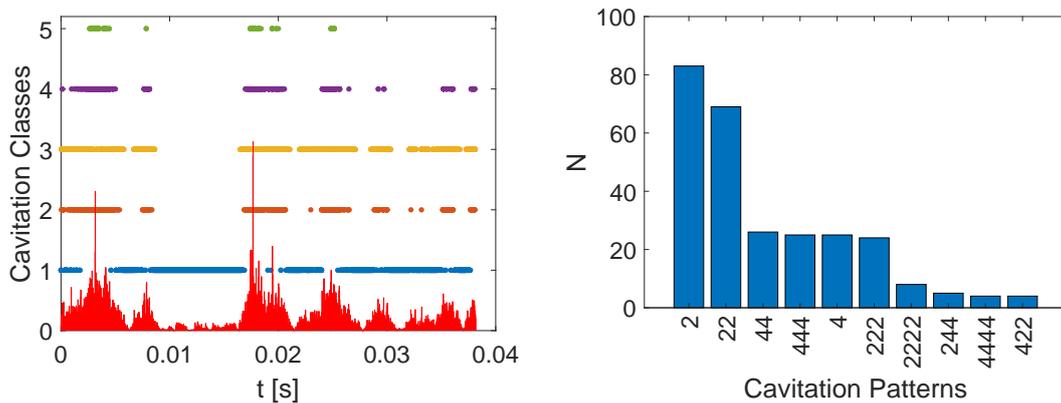


Abb. 4.16: Klassifikationsergebnis des k-Means Algorithmus (links) und Häufigkeit der Kavitationsmotifs (rechts)

Die Klassifikation des spektral zerlegten Kavitationssignals wurde Unsupervised mit einem k-Means Algorithmus durchgeführt. Unsupervised bedeutet, dass keine Informationen zu möglichen Labels und Klassen der Signale von Nutzerseite eingebracht werden. Der k-Means Algorithmus versucht eine mehrdimensionale Clusterbildung im Featureraum auf Basis des Least-Squares Algorithmus. Eine beispielhafte Zerlegung zeigt Abb. 4.16. Bei detaillierter Betrachtung zeigt sich, dass typischen Klassenfolgen auftreten. Unter der Annahme, dass das Audiosignal einer kollabierenden Kavitationsblase ein Einzelsignal ist, das einen charakteristischen Verlauf hat und durch nicht kavitierende Abschnitte von anderen Signalen getrennt ist, wurde eine Motif-Zerlegung

durchgeführt um typische Klassenabfolgen zu identifizieren. Auf Basis der Signalverläufe wurde die Klasse 1 als kavitationsfreie und somit trennende Klasse gewählt. Aus dieser Festlegung folgt, dass alle Klassen abweichend von der Klasse 1 ein Kavitationsereignis darstellen. Die Motif Auswertung zeigt, dass die Klasse "2" das häufigste Einzelereignis darstellt, gefolgt von "22". Erst später folgen die Klassenfolgen "44", "444", "4" und "222" (Abb. 4.16). In wie weit dieser Ansatz den realen physikalischen Gegebenheiten Rechnung trägt kann nicht beantwortet werden. Dieser Ansatz bietet jedoch die Möglichkeit über akustische Messdaten tiefer in die Prozessfolgen der Kavitation einzudringen. Zusätzlich wurde eine Klassifikation hinsichtlich des Kavitationszustandes mit einem neuronalen Netz in Tensorflow/Keras durchgeführt. Zur Gewinnung der Featurevektoren wurden die gemessenen Audiosignale TKE gefiltert und danach mit einem Rechteckfenster der Länge $t_f = 0,05\text{ s}$ und einem Overlap von 0,5 in einzelne Segmente unterteilt. Danach wurden die Fenster per Wavelet Packet Transformation in 64 Frequenzbänder zerlegt. Aufgrund der zeitlichen Mittelung über $N_{wp} = 64$ Abtastpunkte entstanden so Spektrogrammmatrizen mit der Dimension 205×64 (Zeit \times Frequenz), die über die Aneinanderreihung aller 205 Zeitspalten den Featurevektor mit der Länge 13120 ergaben. Untersucht wurden zehn Messreihen mit konstanter Anströmgeschwindigkeit (ID 2-11). Die Annotation erfolgte mit der Messreihen-ID, unter der Annahme, dass unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten unterschiedliche Kavitationszahlen bedingen und somit auch unterschiedliche Kavitationsformen nach sich ziehen. Der Datensatz umfasste 2,5 Millionen Featurevektoren, die mit der Teilung 60/20/20 in einen Trainingsdatensatz mit 1,5 Millionen Featurevektoren, einen Developmentdatensatz mit 0,5 Millionen Featurevektoren und einen Testdatensatz, ebenfalls mit 0,5 Millionen Featurevektoren. Verwendet wurden drei fully-connected Dense Layer mit je 64/128/256 Neuronen und Rectified-Linear Activation Function und ein Output Layer mit 10 Neuronen und SoftMax Activation Function. Das Netzwerk wurde über maximal 100 Epochs trainiert, mit dem Validation Loss des Development Datensatzes als Abbruchbedingung zur Vermeidung von Overfitting (Abb. 4.17). Das Ergebnis der Klassifikation mit 10 Klassen ergab eine Genauigkeit von 0,43. Zwar übersteigt diese Genauigkeit die statistische Probenwahrscheinlichkeit um den Faktor 4, jedoch ist der Ansatz für eine zuverlässige Klassifikation der akustischen Versuchsdaten nur bedingt brauchbar. Eine Variation der Netzwerkstruktur erbrachte keine Besserung des Ergebnisses, so dass ausgehend von diesen Erkenntnissen für die Propeller- und Großausführungsversuche weitere Klassifikationsverfahren entwickelt wurden.

4. Messungen am Tragflügel

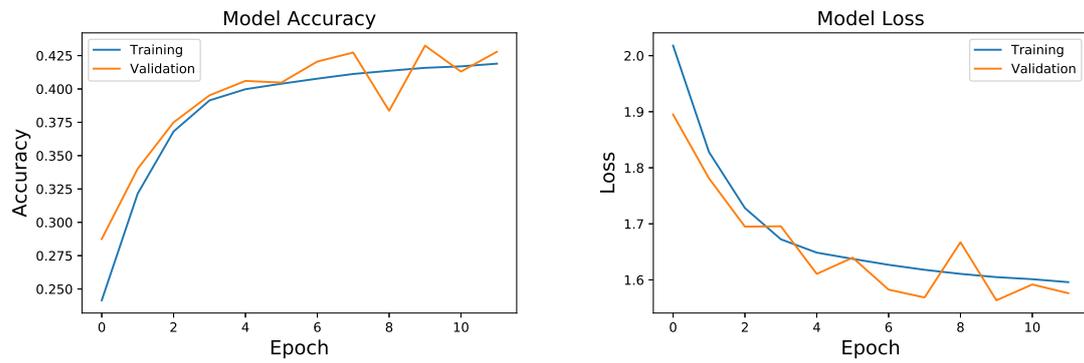


Abb. 4.17: Validation Accuracy und Validation Loss der Klassifikation der Versuchsreihen mit konstanter Geschwindigkeit mit einem Neuronalen Netzwerk

5 Messungen am Propeller

In den Versuchen mit Modellpropeller wurden zwei Konfigurationen untersucht: Propeller mit symmetrischem Nachstrom und mit schiffsähnlichem Nachstrom am verkürzten Hinterschiff. Die Versuche hatten das Ziel das Zusammenspiel der entwickelten Messverfahren unter realitätsnahen Bedingungen im Modellmaßstab zu erproben. Die Versuche wurden am Kavitationskanal K15A der SVA Potsdam durchgeführt. Untersucht wurden der Referenzpropeller P1724 und die hydroakustisch optimierte Variante P1889.

5.1 Versuche mit symmetrischem Nachstrom

5.1.1 Versuchsaufbau

Die Versuche mit symmetrischem Nachstrom wurden nur für den Referenzpropeller P1724 ohne Hinterschiff in der kleinen Messstrecke durchgeführt. Die kleine Messstrecke verfügt über einen Querschnitt von $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$. Der Propeller ist in der Kanalmitte an einem vertikal stehendem NACA 0010 Profil befestigt, das stromaufwärts des Propellers vom Boden bis zur Decke der Messstrecke reicht. Durch die Umströmung des NACA Profils bildet sich eine vertikale Nachstromdelle in der Zuströmung des Propellers. Dementsprechend ist insbesondere im oberen und unteren Totpunkt aufgrund nicht mehr stoßfreien Anströmung mit Kavitation. Zwar unterscheiden sich die hydrostatischen Drücke im oberen und unteren Totpunkt geringfügig, jedoch kann eine nahezu symmetrische Kavitationsausdehnung erwartet werden. Ausgehend von den Betrachtungen der Flügelversuche und den theoretischen Vorbetrachtungen wurden $N = 16$ Hydrofone in Form der Archimedischen Spirale in der unteren Kanalscheibe angebracht, die in unmittelbarer Nähe des kavitierenden Bereichs liegt (Abb. 5.1, 5.2). Die Propellerkreisscheibe mit dem Radius $R_P = 0,125\text{ m}$ befindet sich bei $y = 0\text{ m}$. Die Lage der Propellerachse ist in der Kanalmitte bei $x_a = 0\text{ m}$, $z_a = 0\text{ m}$, die Strömungsrichtung des Kanals ist in negative y -Richtung. Das Array wurde mit Hydrofonen vom Typ Brüel&Kjaer 8103 bestückt, die bündig in der Scheibe versenkt wurden (Tab. 5.1). Gemessen wurde mit einer Samplefrequenz von $f_s = 262144\text{ Hz}$. Um Einflüsse durch

Tab. 5.1: Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone der Messungen mit symmetrischen Nachstrom; Propellerebene bei $y = 0\text{ m}$, Lage der Propellerachse $x_a = 0\text{ m}$, $z_a = 0\text{ m}$

Ch. Nr.	x	y	z
-	m	m	m
1	0.0	-0.015	-0.3092
2	0.0245	0.0026	-0.3092
3	-0.0071	0.0336	-0.3092
4	-0.0418	-0.0136	-0.3092
5	0.0218	-0.049	-0.3092
6	0.0548	0.0317	-0.3092
7	-0.0429	0.0591	-0.3092
8	-0.0614	-0.0553	-0.3092
9	0.0686	-0.0618	-0.3092
10	0.06	0.0825	-0.3092
11	-0.0967	0.0558	-0.3092
12	-0.0494	-0.1108	-0.3092
13	0.1246	-0.0405	-0.3092
14	0.0292	0.1376	-0.3092
15	-0.1495	0.0157	-0.3092
16	-0.0	-0.16	-0.3092

Trittschall oder parallele Arbeiten in der Versuchseinrichtung zu minimieren wurde ein Hochpassfilter bei $f_{HP} = 22\text{ Hz}$ verwendet. Als Messverstärker kamen 4-Kanal Messverstärker vom Typ Nexus der Marke Brüel&Kjaer zum Einsatz. Die installierte Kanalbelegung zeigt Tab. 5.1.

Untersucht wurden zwei Betriebspunkte OP2 und OP3 mit den Schubbeiwerten von $K_T = 0,1851$ bzw. $K_T = 0,1963$. Variiert wurden die Drehzahl n , die Kavitationszahl σ , und der relative Gasgehalt α/α_s . Eine detaillierte Darstellung der Betriebspunkte zeigt Tab. 5.3. In Abhängigkeit der beobachteten Kavitationsausdehnung wurden die Einzelmessungen mit alternativen Kamerawinkeln wiederholt.

In den Modellversuchen konnten je nach Betriebsparametern unterschiedliche Kavitationsformen beobachtet werden. Diese umfassten neben dem vollständig kavitationsfreien Betrieb insbesondere Saugseiten-Schichtkavitation im Bereich der Flügelspitze im oberen und unteren Totpunkt des Propellers sowie Spitzen- und Nabenwirbelkavitation. Die Kavitationsformen zeigten sowohl bei der Drehzahlvariation als auch bei der Va-

Tab. 5.2: Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone in den Messungen mit symmetrischen Nachstrom

Ch. Nr.	S.Nr	Charge Sensitivity pC/Pa	Capacity pF
-	-		
1	3086053	0,0971	3756
2	3086064	0,0942	3729
3	3086049	0,0970	3733
4	3086048	0,0962	3786
5	3086050	0,0966	3712
6	3086066	0,0985	3724
7	3086069	0,0953	3759
8	3086072	0,0987	3760
9	3086052	0,0941	3640
10	3086068	0,0932	3692
11	3086065	0,0961	3705
12	3086051	0,0958	3736
13	3086070	0,0972	3731
14	3086067	0,0956	3660
15	3086071	0,0983	3767
16	3086054	0,0988	3794

5. Messungen am Propeller

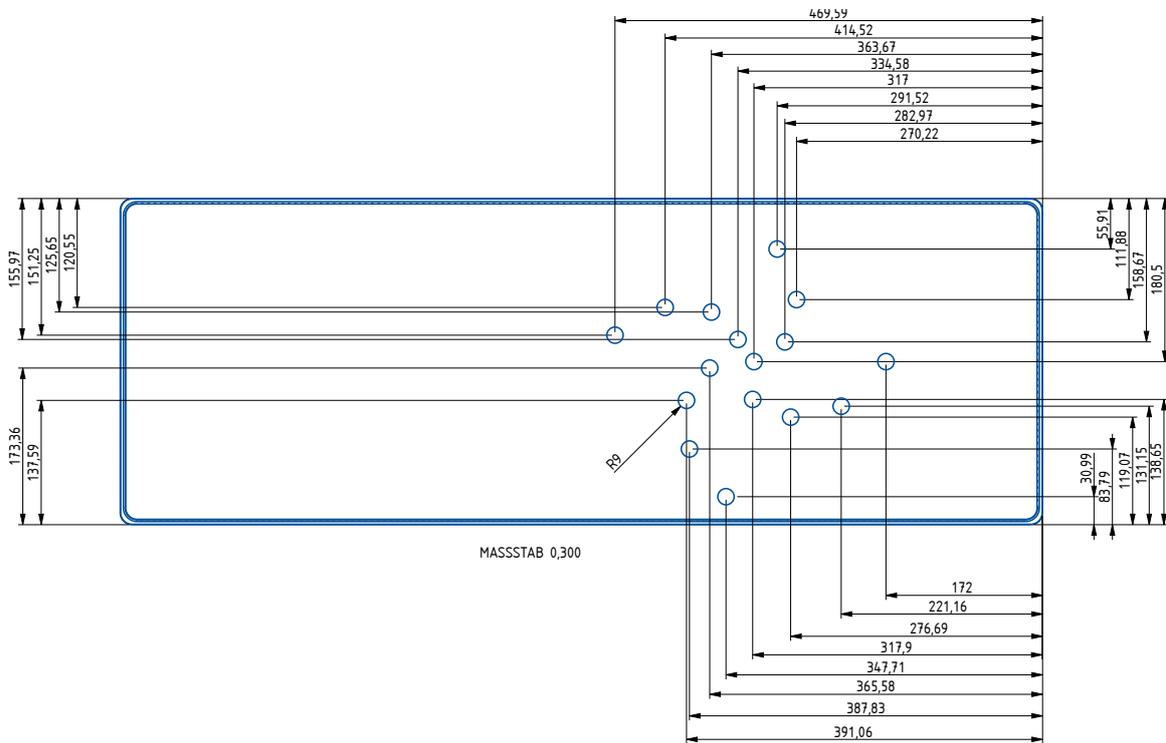


Abb. 5.1: Technische Konstruktionszeichnung für die untere Kanalscheibe der Versuche mit symmetrischen Nachstrom



Abb. 5.2: Hydrofonarray in der unteren Scheibe der kleinen Messstrecke; Bündige Hydrofonmontage

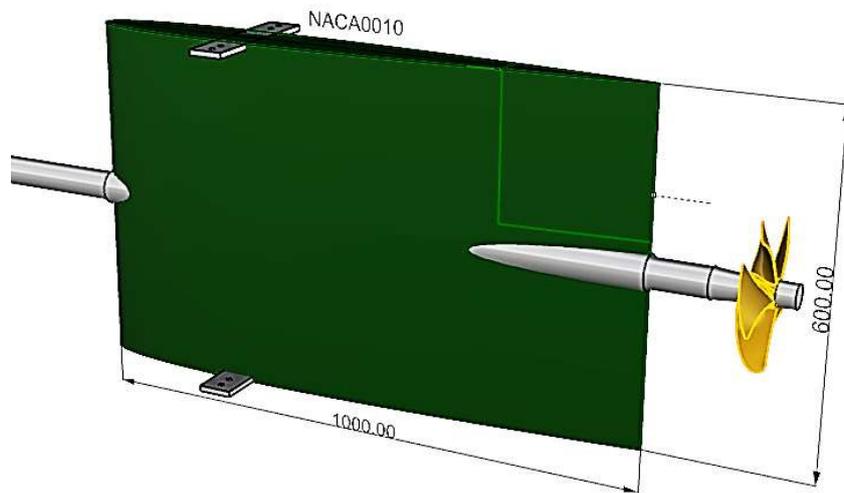


Abb. 5.3: Messaufbau der Messungen mit symmetrischen Nachstrom; NACA 0010 Profil mit Propellerantrieb

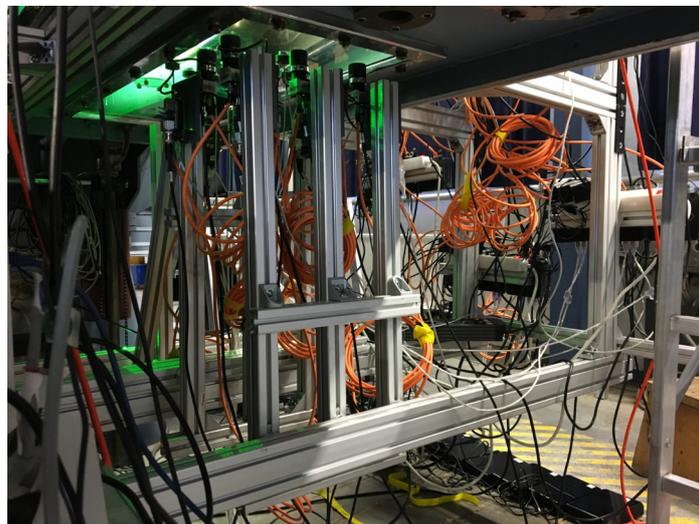


Abb. 5.4: Messaufbau der Messungen mit symmetrischen Nachstrom; Hydrofonarray mit Kamerasystem

Tab. 5.3: Versuchsprogramm der Messungen mit symmetrischen Nachstrom

Versuch	OP	K_T	α/α_s	n	σ
-	-	-	-	s^{-1}	-
399	OP2	0,1851	0,372	23	3,20
				26	
				29	
				32	
400	OP2	0,1851	0,372	26	3,83
					3,45
					3,18
					2,80
401	OP3	0,1963	0,372	23	1,70
				26	
				29	
				32	
402	OP3	0,1963	0,434	26	5,00
					2,42
					2,04
					1,71
					1,33
403	OP2	0,1851	0,611	23	3,20
				26	
				29	
				32	
404	OP2	0,1851	0,612	26	3,83
					3,45
					3,18
					2,80
405	OP3	0,1963	0,612	23	1,70
				26	
				29	
				32	
406	OP3	0,1963	0,600	26	5,00
					2,42
					2,04
					1,71
					1,33

Tab. 5.4: Hydroakustisch ausgewertete Betriebspunkte

ID	Versuch	α/α_s	n	σ	Kavitation
-	-	-	s^{-1}	-	
0	400	0.372	26	2.80	ja
1				3.18	nein
2				3.45	nein
3				3.83	nein
4	402	0.434	26	1.33	ja
5				1.71	ja
6				2.04	ja
7				5.00	nein
8	404	0.612	26	2.80	ja
9				3.18	nein
10				3.45	nein
11				3.83	nein
12	406	0.60	26	1.33	ja
13				1.71	ja
14				2.04	ja
15				5.00	nein

riation der Kavitationszahl ähnliche Kavitationsausprägungen. Deshalb wurde sich aufgrund der hydroakustisch weniger komplexen Problemstellung bei der Lokalisation und Klassifikation auf die Messreihen mit konstanter Drehzahl $n = 26 s^{-1}$ und Variation der Kavitationszahl beschränkt (Tab. 5.4). Eine Darstellung der beobachteten Kavitationszustände zeigen die Abb. 5.5 - 5.12.

5.1.2 Lokalisierung

Die Anwendung der Lokalisierungsverfahren hat gezeigt, dass eine technisch optimale Anordnung nicht zwangsläufig auch zu optimalen Messergebnissen führen muss. Die Hydrofone waren in direkter Nähe des kavitierenden Bereichs installiert mit optimalem akustischen Zugang. Die Größe des Arrays war so gewählt, dass das Kavitationsgebiet weit umfasst wurde. Jedoch zeigten sich deutlich die negativen Eigenschaften zur Darstellung der Tiefenschärfe. Diese wurden durch den symmetrischen Nachstrom und die symmetrischen Schallquellen auf der gegenüberliegenden Seite des Propellers sogar noch verstärkt. Die erwarteten Abschattungseffekte durch die Propellernabe

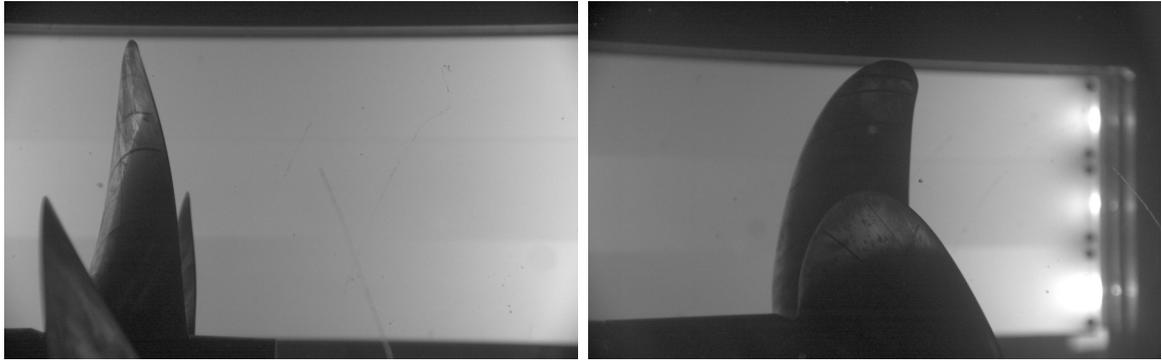


Abb. 5.5: Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 0, Kavitationszahl $\sigma = 2.8$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,372$ (Aufnahme IET)

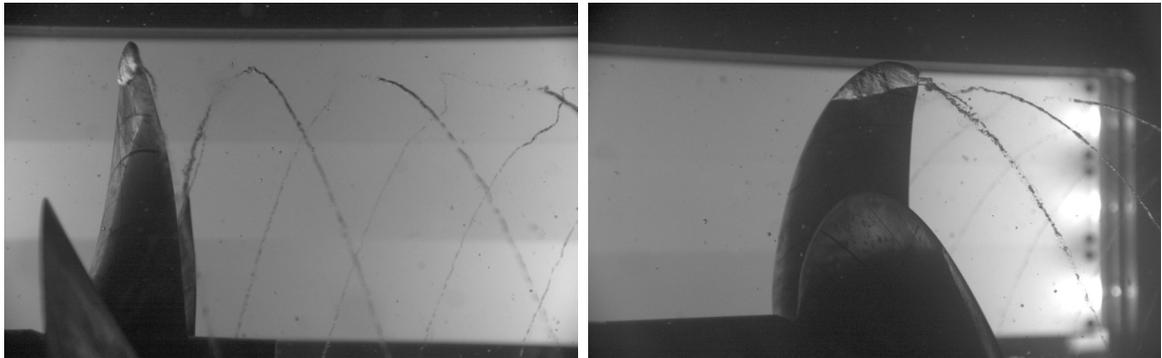


Abb. 5.6: Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 4, Kavitationszahl $\sigma = 1.33$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,434$ (Aufnahme IET)

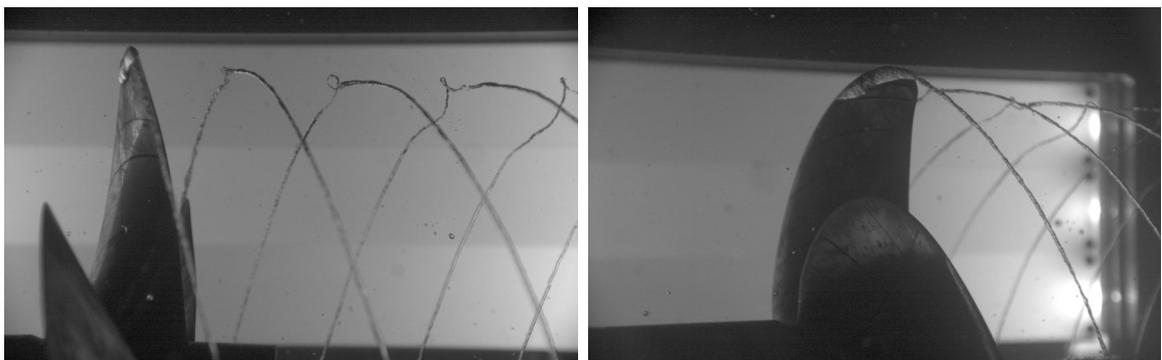


Abb. 5.7: Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 5, Kavitationszahl $\sigma = 1.71$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,434$ (Aufnahme IET)

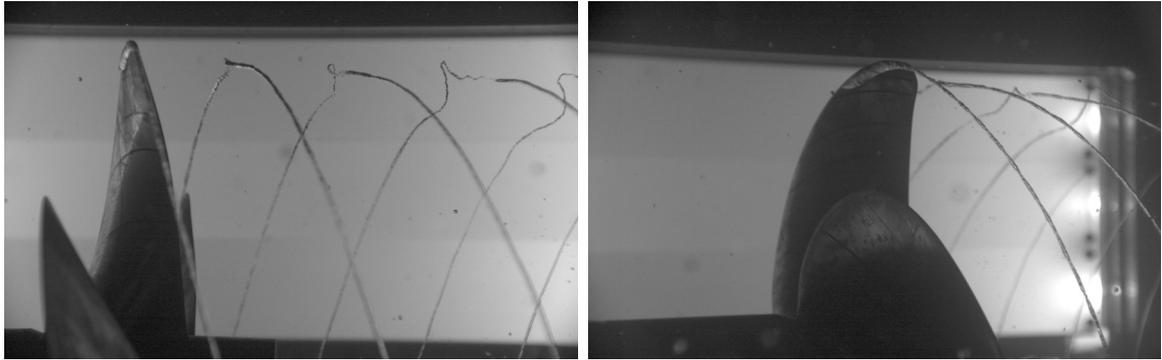


Abb. 5.8: Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 6, Kavitationszahl $\sigma = 2.04$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,434$ (Aufnahme IET)

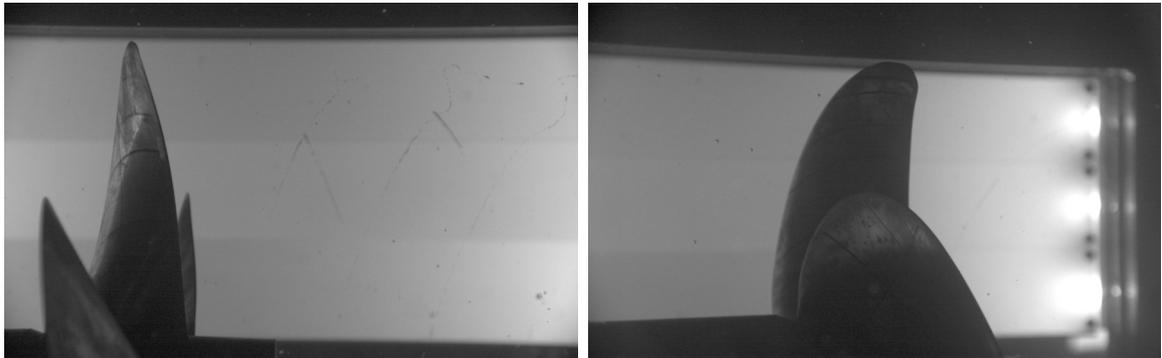


Abb. 5.9: Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 8, Kavitationszahl $\sigma = 2.8$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,612$ (Aufnahme IET)

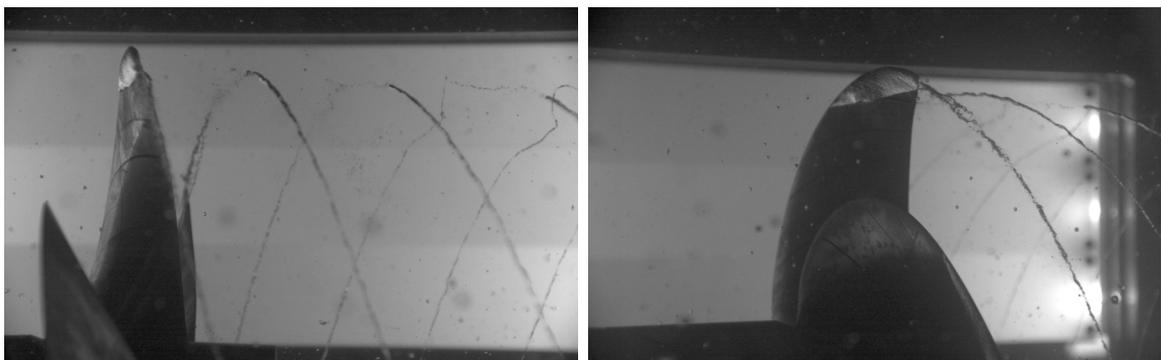


Abb. 5.10: Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 12, Kavitationszahl $\sigma = 1.33$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,6$ (Aufnahme IET)

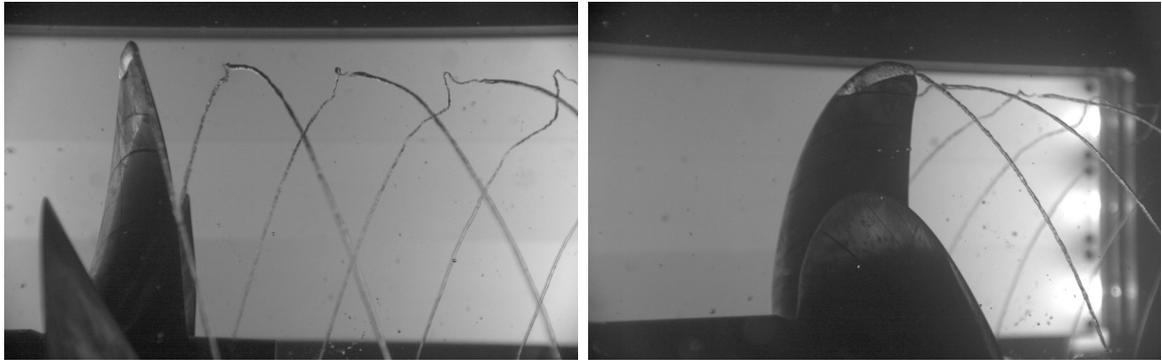


Abb. 5.11: Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 13, Kavitationszahl $\sigma = 1.71$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,6$ (Aufnahme IET)

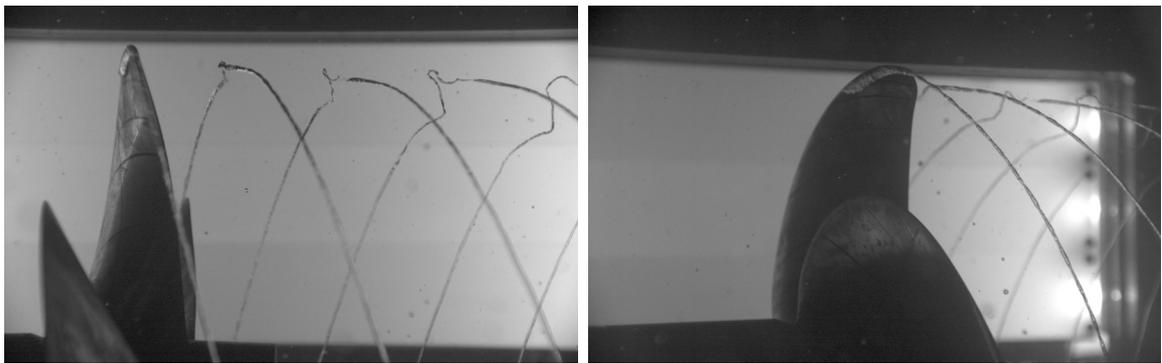


Abb. 5.12: Kavitationsausdehnung von Versuchsreihe ID 14, Kavitationszahl $\sigma = 2.04$, Sauerstoffsättigung $\alpha/\alpha_s = 0,6$ (Aufnahme IET)

traten aufgrund der Arrayausdehnung nicht ein. Zwar wurde der untere Totpunkt als der Ort der maximalen Schallentstehung erkannt, die Tiefe der Hauptkeule zieht sich jedoch durch den gesamten Propeller (Abb. 5.13). Deshalb wurden zusätzliche Formen des Steeringvektors und abweichende Arrayzusammensetzungen überprüft. Dabei zeigte sich, dass durch eine geeignete Wahl des Steeringvektors die Tiefenschärfe signifikant verbessert werden kann. Eine weitere Verbesserung der Tiefenschärfe kann erreicht werden durch eine stärkere Gewichtung der äußeren das Array umfassenden Hydrofone. Abbildung 5.14 zeigt eine direkte Gegenüberstellung der Ergebnisse für den beispielhaften Radienschnitt $0,95R_P$. Dabei gilt zu beachten, dass die Position $\phi = 180^\circ$ unteren Totpunkt in direkter Nähe des Arrays darstellt. Es wird deutlich, dass durch eine stärkere Gewichtung der acht äußeren Hydrofone die Hauptkeulenweite reduziert werden kann. Zusätzlich wird auch der Pegelabstand zwischen lokalisierten Schallquellen und emissionsfreien Gebieten vergrößert. Die Formulierung des Steeringvektors wirkt im wesentlichen auf den Pegel im lokalisierten Emissionsgebiet bei $\phi = 180^\circ$ mit der stärksten Wirkung der Formulierungen 2 und 3. Die deutlichste Verbesserung der Tiefenschärfe kann erreicht werden durch die Formulierung 3 mit Gewichtung der äußeren Hydrofone.

Trotz der Verbesserung der Tiefenschärfe reicht diese für eine klar eingegrenzte Lokalisierung des Kavitationsbereichs nicht aus. Eine deutliche Verbesserung kann durch den Einsatz der Dekonvolutionsmethode CleanSC erreicht werden. Durch die unterschiedlichen Abstände der dem Array zu- und abgewandten Propellertotpunkte werden die Schallquellen des unteren Totpunktes als lauteste Schallquellen identifiziert und iterativ eingegrenzt (Abb. 5.15). Die Auswertung der Messdaten zu den verschiedenen Sauerstoffsättigungen zeigt, dass sowohl für Betriebspunkt OP2 als auch für Betriebspunkt OP3 die Schallemissionen mit Zunahme der Sauerstoffsättigung wachsen. Dabei nimmt sowohl der Pegel als auch die emittierende Fläche mit höherer Sauerstoffsättigung zu (Abb. 5.16, 5.17).

5.1.3 Klassifikation

Die Klassifikation der Flügelversuche hat gezeigt, dass es möglich ist die Kavitationsarten an ihren akustischen Merkmalen zu unterscheiden. Dabei traten zwei Problemstellungen zu Tage: Erstens, war die Model Accuracy mit etwas über 40% für eine verlässliche Prognose des vorherrschenden Kavitationszustandes nicht ausreichend.

5. Messungen am Propeller

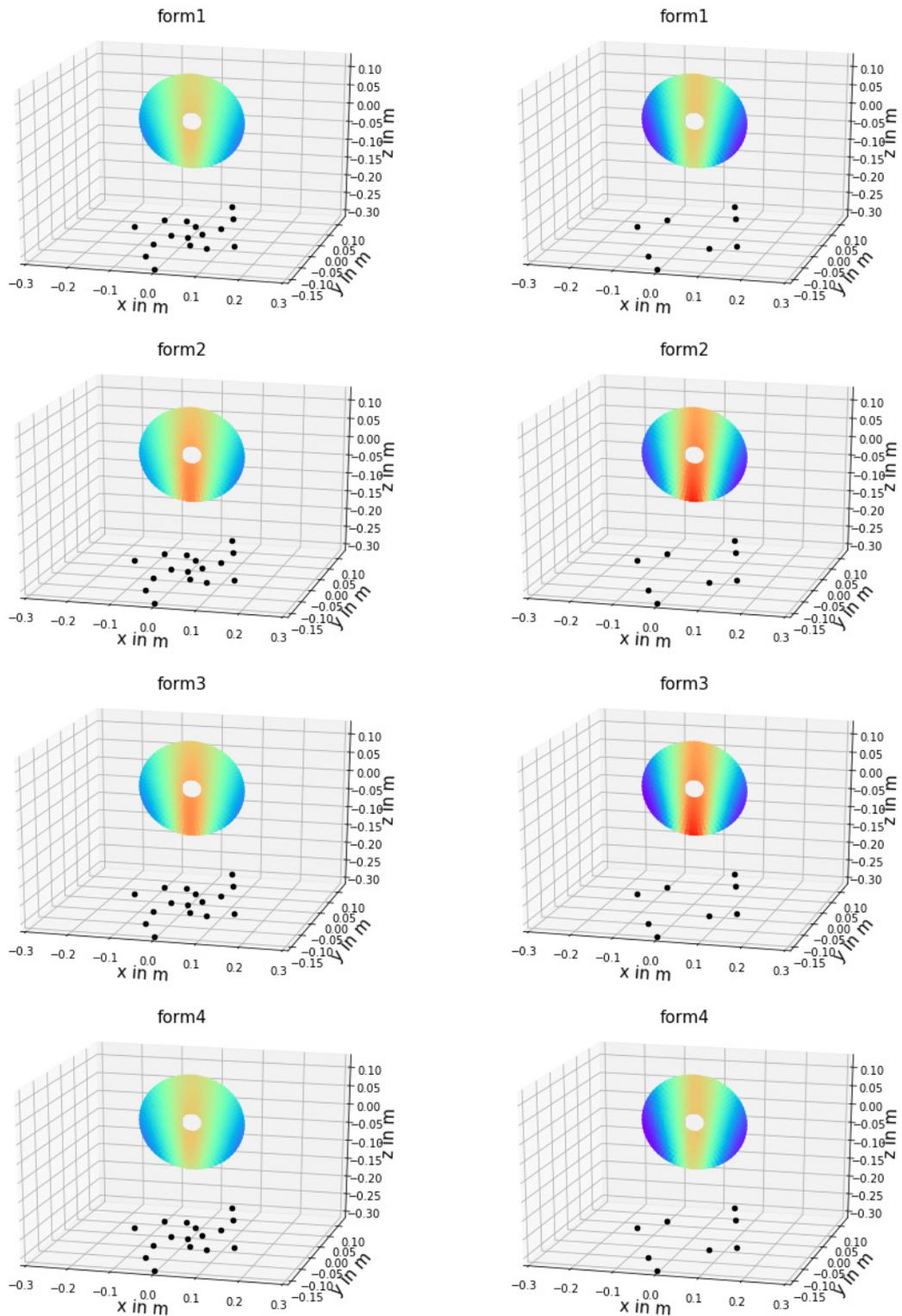


Abb. 5.13: Qualitativer Vergleich der Lokalisierungsverfahren für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ mit unterschiedlichen Formulierungen des Steeringvektors bei 16 (links) und 8 (rechts) Empfangshydrofonen

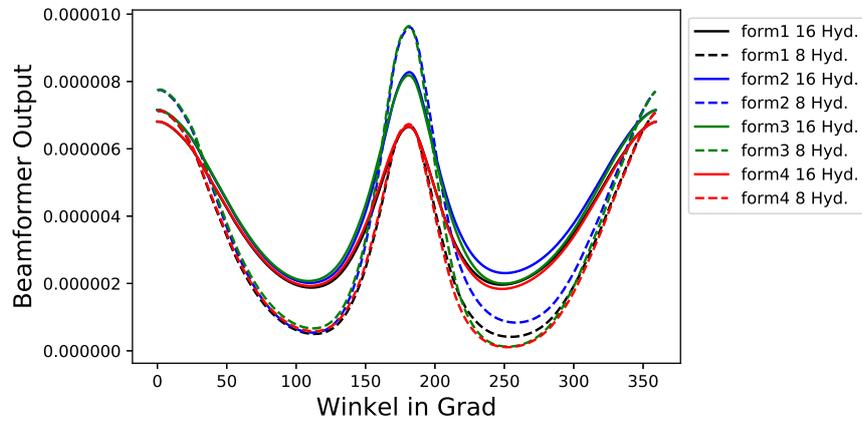


Abb. 5.14: Ergebnis der Lokalisierungsmessungen für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für unterschiedliche Formulierungen des Steeringvektors mit 16 Hydrofonen und den 8 äußeren Hydrofonen auf dem Radienschnitt $0.95R_P$

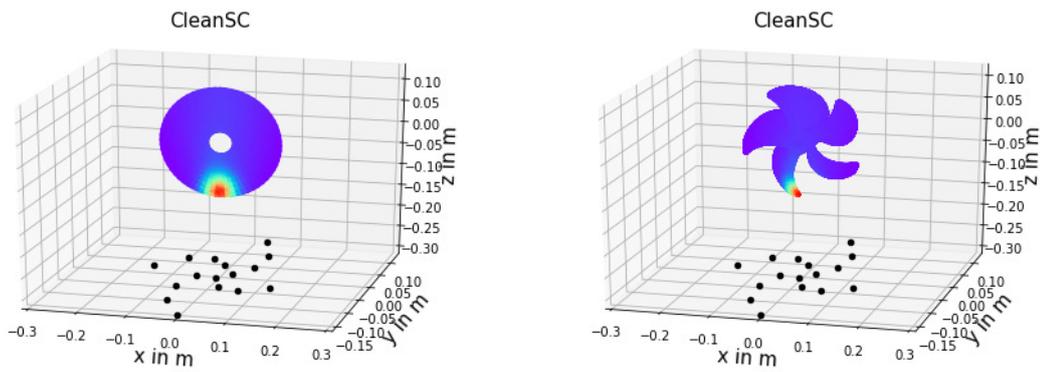


Abb. 5.15: Ergebnis der Lokalisierungsmessungen für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ mit CleanSC und 16 Hydrofonen auf der Propellerkreisscheibe und der Propellergeometrie

5. Messungen am Propeller

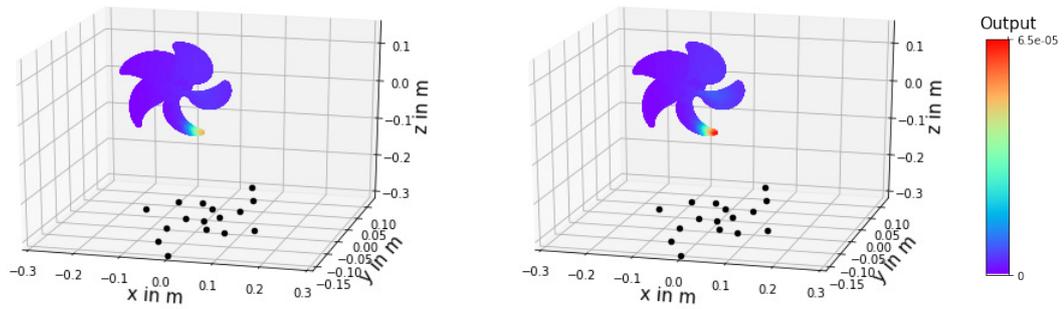


Abb. 5.16: CleanSC Output in Betriebspunkt OP2 ($\sigma = 2,8$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 bei einer Sauerstoffsättigung von $\alpha/\alpha_s = 0,372$ (links) und $\alpha/\alpha_s = 0,612$ (rechts)

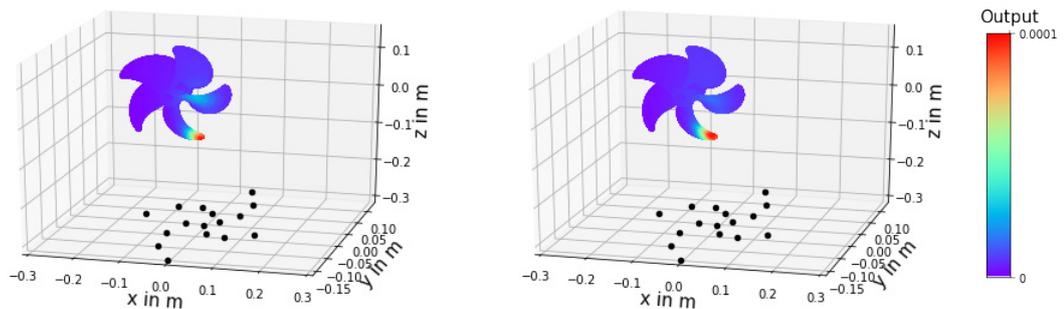


Abb. 5.17: CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 1,33$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 bei einer Sauerstoffsättigung von $\alpha/\alpha_s = 0,434$ (links) und $\alpha/\alpha_s = 0,6$ (rechts)

Tab. 5.5: Berechnete Statistikgrößen

#	Statistikgröße
0	Entropie
1	Anzahl der Nulldurchgänge
2	Anzahl der Mittelwertdurchgänge
3-6	Perzentil (n5, n25, n75, n95)
7	Median
8	Mittelwert
9	Standardabweichung
10	Varianz
11	Quadratischer Mittelwert
12	Kurtosis
13	Quadrat des Absolutwerts
14	Normalisierte Entropie
15	Skewness
16	CPT5
17	Vorzeichen des Anstiegs
18	Wellenlänge
19	Generalisierter Mittelwert

Zweitens erlaubt das Neuronale Netz keine Rückschlüsse auf die charakteristischen Größen, die die einzelnen Kavitationsarten unterscheidbar machen. Deshalb wurde eine Klassifikation auf Basis eines Random Forest Algorithmus durchgeführt. Zur Featureberechnung wurde das Audiosignal zunächst TKE gefiltert um Störgeräusche der Anlage zu eliminieren. Im nächsten Schritt wurde das Audiosignal in Zeitabschnitte von $t_w = 0,1 s$ mit einem Overlap von 0,5 unterteilt. Jeder der Zeitabschnitte wurde mit einer Wavelet Packet Decomposition in 64 Frequenzbänder zerlegt. Da a priori keine Informationen zu den Eigenschaften des Kavitationssignals vorliegen, wurden für jedes der 64 Frequenzbänder 20 beliebige Statistikgrößen berechnet (Tab. 5.5). Diese 1280 Werte bilden jeweils ein Featureset eines Zeitsegments. Zur Optimierung des Trainingsverhaltens wurden die Featuresets zusätzlich skaliert. Eine typische Darstellung eines Featurevektors zeigt Abb. 5.18. Der Datensatz für alle 16 Signale umfasst insgesamt 28790 Featuresets, die im Verhältnis 60/40 in Trainingsdaten und Testdaten unterteilt wurden. Das Modell wurde mit einem Random Forest mit 500 Trees trainiert. Die Validierung des trainierten Random Forest Modells auf dem Testdatensatz ergab einen F_1 -Score von $F_1 = 0,93$ mit einer stark besetzten Hauptdiagonale (Abb. 5.20).

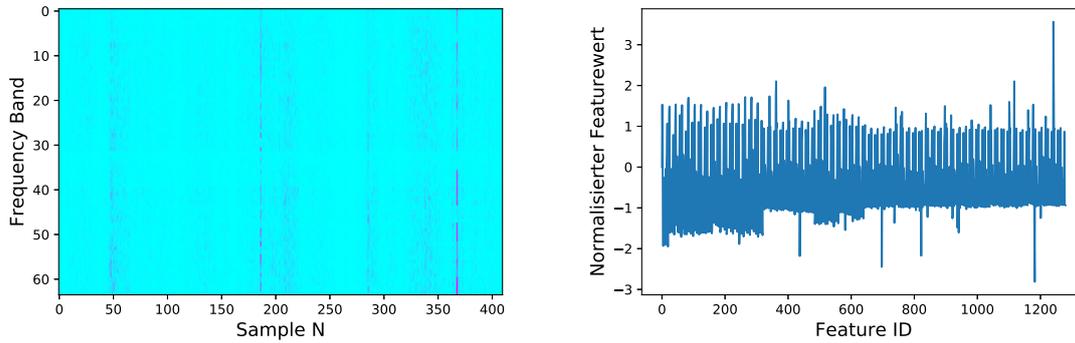


Abb. 5.18: Beispielhaftes Spektrogramm der WaveletPacket Transformation für ein $t_F = 0,1$ s langes Audiosegment (links) und den darauf berechneten Feature Vektor (rechts)

Durch die hohe Genauigkeit eignet sich das Verfahren zur automatisierten Kavitationsdetektion. Geringe Fehlklassifikation lässt sich beispielsweise zwischen den Messreihen mit der ID 2 und 3 untereinander, sowie mit der ID 7 und den Messreihen ID 2,3 erkennen. Dies deutet auf ähnliche akustische Eigenschaften hin. Ein Blick auf die ausgewerteten Betriebspunkte (tab. 5.4) zeigt, dass für alle drei Messreihen optisch keine Kavitation feststellbar war, so dass die Messpunkte einander akustisch sehr ähnlich waren. Das gleiche gilt für die Versuchsreihen mit der ID 7 und der ID 15. Um tiefer in die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Kavitationsarten vorzudringen, wurde eine Reduktion der Featuredimension durchgeführt. Abbildung 5.19 zeigt die zehn wichtigsten Features, an denen sich die akustischen Messreihen bestmöglich unterscheiden lassen. Bei Reduktion der 1280 Features auf die zehn wichtigsten sinkt die Genauigkeit des Klassifikators auf $F_1 = 0,73$. Die bereits zuvor beschriebenen Fehlklassifikationen kommen noch stärker zum Vorschein (Abb. 5.20). Zusätzlich zeigen sich auch stärker die Ähnlichkeiten zwischen allen kavitationsfreien Messreihen. Durch weitere Umgestaltungen des Feature-raums können so tiefgreifende Untersuchungen zu den Kavitationsarten auf Basis ihrer akustischen Eigenschaften durchgeführt werden.

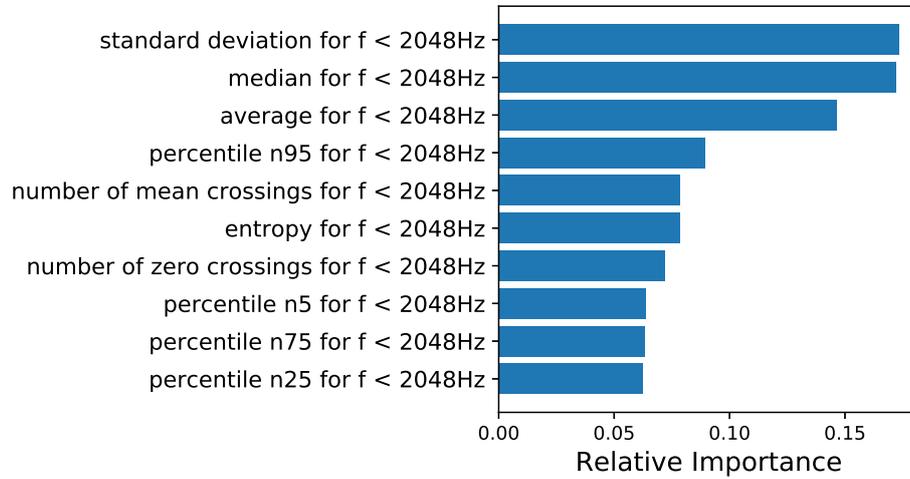


Abb. 5.19: Feature Importance der akustischen Kavitationsklassifikation am Kavitationskanal der SVA

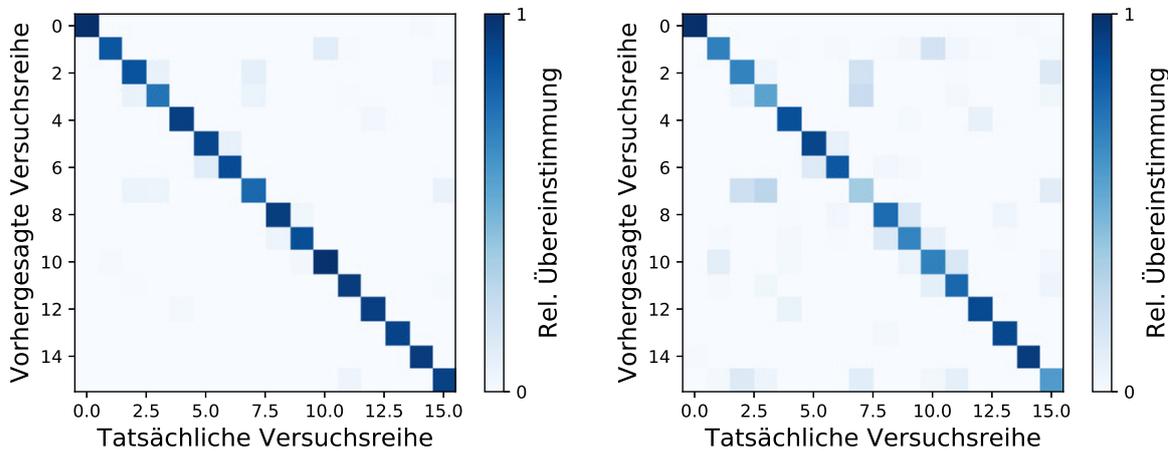


Abb. 5.20: Confusion Matrix der akustischen Kavitationsklassifikation mit allen 1280 Features, $F_1 = 0,93$ (links) und mit den zehn wichtigsten Features, $F_1 = 0,78$ (rechts)

5.2 Versuche mit verkürztem Hinterschiff

5.2.1 Versuchsaufbau

Die Versuche mit verkürztem Hinterschiff zur Abbildung eines realitätsnahen Modellnachstroms wurden im Kavitationskanal der SVA an der großen Messstrecke durchgeführt. Die Messungen fanden nach den Ersatzmessungen der Großausführungsversuche statt, so dass die für die Großausführungsversuche entwickelten Messvorrichtungen wiederverwendet werden konnten (siehe Abschnitt 6). Da die Messungen zusammen mit den optischen Messverfahren des Partners IAE durchgeführt wurden, waren die baulichen Gegebenheiten im Vergleich zu den vorherigen Messungen noch einmal deutlich eingeschränkter. Es wurden die gleichen Scheiben wie in den Ersatzmessungen der Großausführungsversuche verwendet, jedoch einander gegenüberliegend angeordnet. Ziel der neuen Anordnung war die Tiefenschärfe des Hydrofonarrays deutlich zu erhöhen. Verwendet wurden $N = 16$ Hydrofone vom Typ Brüel&Kjaer 8105, die in zwei Arrays zu je acht Hydrofonen aufgeteilt wurden (Abb. 6.1). Ein Array wurde auf der Backbordseite positioniert (Abb. 5.21) und das zweite Array auf der Steuerbordseite. Aus dem Kanalquerschnitt der großen Messstrecke von $825\text{ mm} \times 825\text{ mm}$ ergeben sich die neuen Hydrofonpositionen (Tab. 5.6). Die Aufnahme der Hydrofone in den Scheiben erfolgt durch passend konstruierte Buchsen, die die Hydrofone versenkt in den Scheiben geschützt von der freien Strömung festhalten (Abb. 6.3). Gleichzeitig waren die Hydrofone vollständig getaucht um die hydroakustische Kopplung sicherzustellen. Die Propellerkreisscheibe mit dem Radius $R_P = 0,125\text{ m}$ befindet sich bei $y = 0\text{ m}$, die Lage der Propellerachse befindet sich oberhalb der Kanalmitte bei $x = 0\text{ m}$, $z = 0,125\text{ m}$, die Strömungsrichtung des Kanals ist in negative y -Richtung. Gemessen wurde mit einer Samplefrequenz von $f_s = 262144\text{ Hz}$. Um Einflüsse durch Trittschall und andere Einflüsse durch parallele Arbeiten in der Versuchseinrichtung zu minimieren wurde ein Hochpassfilter bei $f_{HP} = 22\text{ Hz}$ verwendet. Es wurden 4-Kanal Messverstärker vom Typ Nexus der Marke Brüel&Kjaer verwendet. Die Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone zeigt Tab. 5.7.

5.2.2 Kalibrierungsmessungen

Wie in den Ersatzmessungen der Großausführungsversuche wurden zur Kalibrierung des Versuchsaufbaus, der Überprüfung der Abmessungen der Anordnung und Feststellung



Abb. 5.21: Backbordseitiger Messaufbau der Versuche mit verkürztem Hinterschiff am Kavitationskanal der SVA

Tab. 5.6: Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone; Propellerebene bei $y = 0\text{ m}$, Lage der Propellerachse $x = 0\text{ m}$, $z = 0, 1\text{ m}$

Ch. Nr.	x	y	z
-	m	m	m
1	-0.4352	0.1175	0.2445
2	-0.4352	0.11021	0.27298
3	-0.4352	0.07796	0.28628
4	-0.4352	0.0431	0.26588
5	-0.4352	0.0373	0.22033
6	-0.4352	0.07367	0.18392
7	-0.4352	0.13025	0.19089
8	-0.4352	0.1625	0.2445
9	0.4352	0.2295	0.2445
10	0.4352	0.23679	0.27298
11	0.4352	0.26904	0.28628
12	0.4352	0.30391	0.26588
13	0.4352	0.3097	0.22033
14	0.4352	0.27333	0.18392
15	0.4352	0.21675	0.19089
16	0.4352	0.1845	0.2445

Tab. 5.7: Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone

Ch. Nr.	S.Nr	Charge Sensitivity	Capacity	Kommentar
-	-	pC/Pa	pF	-
1	3086050	0,0966	3712	Error an Nexus
2	3086048	0,0962	3786	
3	3086072	0,0987	3760	
4	3086070	0,0972	3731	
5	3086054	0,0988	3794	
6	3086069	0,0953	3759	
7	3086053	0,0971	3756	
8	3086052	0,0941	3640	
9	3086064	0,0942	3729	
10	3086071	0,0983	3767	
11	3086066	0,0985	3724	
12	3086049	0,097	3733	
13	3086068	0,0932	3692	
14	3086067	0,0956	3660	
15	3086065	0,0961	3705	
16	3086051	0,0958	3736	Error an Nexus

der spezifischen Schallgeschwindigkeit Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Da für die Einbauposition der Hydrofone 1 bis 8 bereits in den Ersatzmessungen der Großausführungsversuche eine Kalibrierung erfolgte (Abschnitt 6.2), wurde für die bekannten Positionen des ersten Arrays aufgrund der veränderten äußeren Bedingungen zunächst eine Korrektur der Schallgeschwindigkeit durchgeführt. Dazu wurden Signale variabler Frequenz mit $0,1 Hz \leq f \leq 100 kHz$ über ein Sendehydrofon vom Typ Brüel&Kjaer 8105 ausgesendet und sowohl direkt über einen Monitorausgang als auch über das Hydrofonarray samplesynchron aufgezeichnet. Die Sendeposition P_s des BKS 8105 wurde auf die Propellerkreisscheibe bei $\phi_s = 0^\circ$ und $R_s = 0,8R_p$ gelegt. Bezogen auf das Hydrofonarray ergibt sich eine Sendeposition von $x_s = 0 m$, $y_s = 0,0 m$, $z_s = (z_a + 0,8R_p) m$. Eine Liste der Kalibrierungsmessungen zeigt Tab. 5.8. Da die Kanäle 1 und 16 aufgrund eines Fehlers am Messverstärker kein Signal aufzeichneten, wurden beide Kanäle aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Eine typische Abweichung der Signallaufzeiten für das aufgemessene Array bei einer Schallgeschwindigkeit in Wasser von $c_0(\theta_w = 20^\circ C) = 1484 m/s$ ist in Abb. 5.22 dargestellt. Es wird deutlich, dass das Array mit den Hydrofonenkanälen 1 bis 8 Laufzeitfehler aufweist.

Tab. 5.8: Liste der Kalibrierungsmessungen mit Log-Sweep mit $1\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$

ID	Typ	Dauer	Dateiname
-	-	s	-
1	Trigger	200	SweepLog200s-1Hz-100kHz-2.wav
2	Trigger	180	Sweep180s-1Hz-100kHz-1.wav
3	Trigger	180	SweepLog180s-1Hz-100kHz-3.wav
4	Trigger	180	SweepLog180s-1Hz-100kHz-1.wav

Nach Korrektur der Schallgeschwindigkeit auf Basis der Gleichungen 6.5 und 6.6 für die Hydrofone 1 bis 8 folgt $c_{0,corr} = 1471\text{ m/s}$. Die Bewertung der Laufzeitabweichung des Arrays mit den Hydrofonkanälen 8 bis 16 zeigt, dass die Werte innerhalb des Arrays schwanken, so dass sich durch eine geometrische Verschiebung des Arrays keine einheitliche Korrektur erreichen lässt. Da der Laufzeitfehler für die meisten Hydrofone trotzdem innerhalb der Abtastweite bestimmt wurde, wurde keine räumliche Korrektur der Arrayposition durchgeführt. Abbildung 5.24 zeigt die Laufzeitabweichung für beide Hydrofonarrays. Dabei wird deutlich, dass im zweiten Array die Kanäle 9, 13 und 15 schon Abweichungen bis zu -3 Abtastweiten aufweisen. Besonders fällt der Kanal 14 auf, der eine Abweichung von 5 Abtastweiten aufweist. Da keine räumliche Korrektur der Positionen möglich ist, werden diese Kanäle in Abhängigkeit des Lokalisationsszenarios geringer gewichtet bzw. nicht berücksichtigt. Der Vergleich der Beamforming Maps beider Arrays zeigt eine gute Reproduktion der Sendehydrofonposition (Abb. 5.25). Und obwohl die Kalibrierungsmessungen größere Laufzeitabweichungen für das Steuerbordarray mit den Hydrofonen 8 bis 15 ausgewiesen hat, ist die Hauptkeulenweite für den klassischen Delay-And-Sum Beamformer besser als die des Backbordarrays mit den geringeren Laufzeitabweichungen. Dies unterstreicht noch einmal die starke Abhängigkeit des Beamforming Verfahrens von der Lage der Quellposition und der Arrayposition. Im Vergleich dazu liefert CleanSC für beide Arraykonfiguration fast identische Bilder (Abb. 5.26), da der Algorithmus nur die Lage des lokalen Maximums benötigt, um die Tiefenschärfe entsprechend iterativ nachzuschärfen. Dadurch besteht die Möglichkeit auch unter ungünstigen Messanordnungen eine vergleichsweise gute Quelllokalisierung zu erreichen.

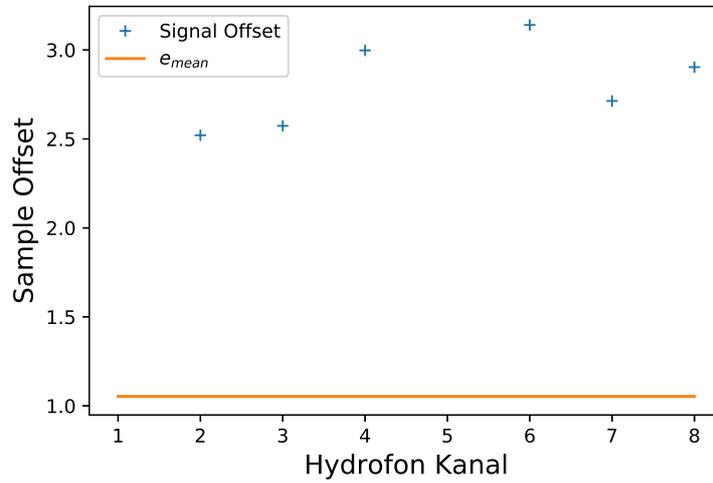


Abb. 5.22: Laufzeitfehler für eine Schallgeschwindigkeit von $c_0(\theta_w = 20^\circ C) = 1484 m/s$

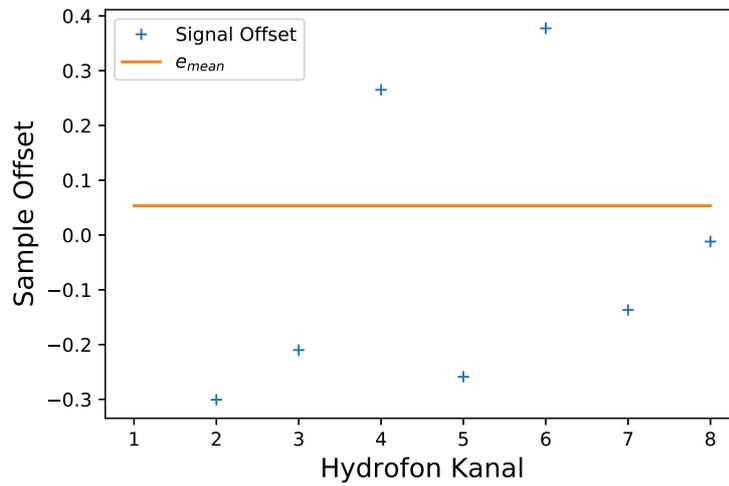


Abb. 5.23: Laufzeitfehler nach Korrektur der Schallgeschwindigkeit auf $c_{0,corr} = 1471 m/s$

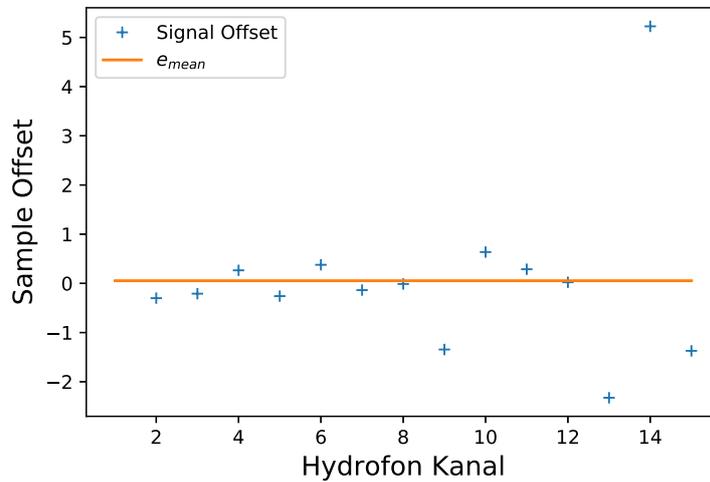


Abb. 5.24: Laufzeitfehler nach Korrektur der Schallgeschwindigkeit auf $c_{0,corr} = 1471 \text{ m/s}$

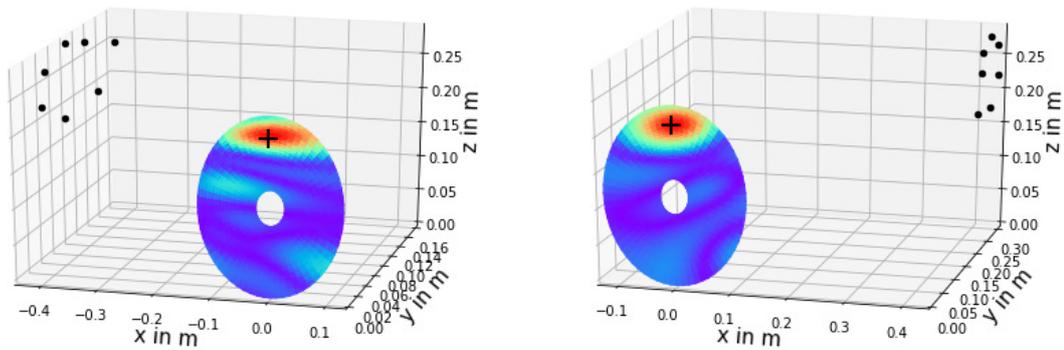


Abb. 5.25: Beamforming Map der Calibrierungsversuche mit konventionellem Beamformer auf der Propellerkreisscheibe für $100nZ \leq f \leq f_s/2$ des Backbordarrays mit den Hydrofonkanälen 2-8 (links) und des Steuerbordarrays mit den Hydrofonkanälen 9-15; Hydrofonpositionen: Schwarze Punkte, Sendehydrofonposition: Schwarzes Plus

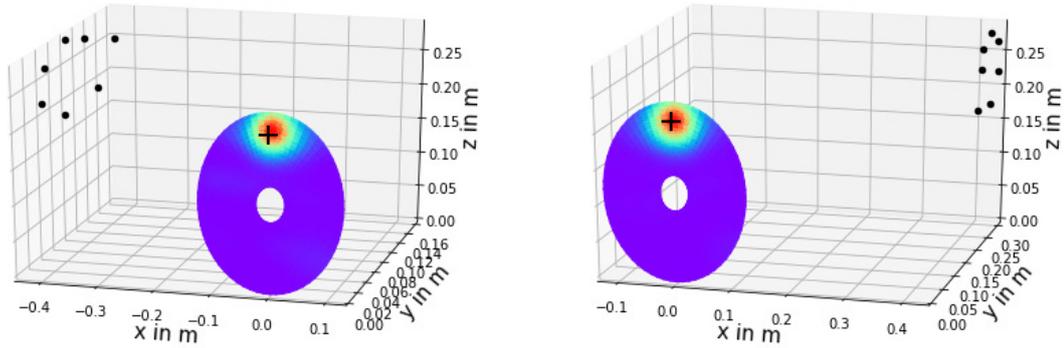


Abb. 5.26: Beamforming Map der Calibrierungsversuche mit CleanSC auf der Propellerkreisscheibe für $100nZ \leq f \leq f_s/2$ des Backbordarrays mit den Hydrofonkanälen 2-8 (links) und des Steuerbordarrays mit den Hydrofonkanälen 9-15; Hydrofonpositionen: Schwarze Punkte, Sendehydrofonposition: Schwarzes Plus

5.2.3 Lokalisierung

Zur Lokalisierung des Kavitationslärms wurden zwei Betriebspunkte OP2 und OP3 sowohl für den Referenzpropeller P1724 als auch für den hydroakustisch optimierten Entwurf P1889 abgefahren. Die Propellerdrehzahl betrug über alle Versuche $n = 26 \text{ s}^{-1}$, variiert wurde die Kavitationszahl $\sigma = 2(p_0 - p_v)/(\rho v^2)$ durch Änderung der Anströmgeschwindigkeit v . Im Gegensatz zu den Ersatzversuchen der Großausführungsmessungen wurden in den Versuchen lediglich je ein kavitationsfreier und ein kavitierender Betriebspunkt untersucht. Typische Kavitationsausprägungen zeigt Abb. 5.27. Es ist zu beachten, dass die Bilder nur eine Momentaufnahme darstellen. Gerade für mittlere Kavitationszahlen konnte ein sehr dynamisches Kavitationsgeschehen beobachtet werden mit instabilen und interagierenden Kavitationsformen. Dies stellt sich auch in den Ergebnissen der Lokalisationsrechnungen dar. In Abhängigkeit der ausgewerteten Signallänge werden unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Je kürzer die ausgewertete Signallänge und damit die Anzahl auszuwertender Fenster ist, umso geringer ist auch der Einfluss der Mittelung über die Fensteranzahl. Das Ergebnis des Beamforming Algorithmus entspricht dann der instantanen Schallabstrahlung des Propellers. Dies eignet sich insbesondere für die Lokalisation und Betrachtung einzelner und instationärer Kavitationsereignisse. Für eine beispielhafte Signallänge von einem einzelnen Fenster mit einer Länge von $k = 32$ Samples folgt bei der verwendeten Samplefrequenz

Tab. 5.9: Versuchsreihe der Lokalisierungsmessungen

ID	Propeller	OP	n	σ	Dateiname
-	-	-	s^{-1}	-	-
1	P1724	2	26	3,18	OP2-P1724-0452-n26-sigma318-1.wav
2	P1724	2	26	7,00	OP2-P1724-0452-n26-sigma7000-1.wav
3	P1724	2	26	3,18	OP2-P1724-0457-n26-sigma318-6.wav
4	P1724	2	26	6,90	OP2-P1724-0457-n26-sigma6900-5.wav
5	P1724	3	26	1,71	OP3-P1724-0453-n26-sigma171-2.wav
6	P1724	3	26	7,00	OP3-P1724-0453-n26-sigma7000-2.wav
7	P1724	3	26	1,71	OP3-P1724-0458-n26-sigma171-7.wav
8	P1724	3	26	6,90	OP3-P1724-0458-n26-sigma6900-6.wav
9	P1889	2	26	1,79	OP2-P1889-0455-n26-sigma179-3.wav
10	P1889	2	26	3,08	OP2-P1889-0455-n26-sigma308-5.wav
11	P1889	2	26	7,00	OP2-P1889-0455-n26-sigma7000-3.wav
12	P1889	2	26	3,08	OP2-P1889-0460-n26-sigma308-6.wav
13	P1889	2	26	7,00	OP2-P1889-0461-n26-sigma7000-5.wav
14	P1889+NK	2	26	3,08	OP2-P1889-0464wNK-n26-sigma308-357.wav
15	P1889+NK	2	26	6,97	OP2-P1889-0464wNK-n26-sigma6965-57.wav
16	P1889	3	26	1,79	OP3-P1889-0456-n26-sigma179-4.wav
17	P1889	3	26	7,00	OP3-P1889-0456-n26-sigma7000-4.wav
18	P1889	3	26	1,79	OP3-P1889-0462-n26-sigma179-7.wav
19	P1889	3	26	7,00	OP3-P1889-0462-n26-sigma7000-6.wav
20	P1889+NK	3	26	1,79	OP3-P1889-0465wNK-n26-sigma179-359.wav
21	P1889+NK	3	26	6,92	OP3-P1889-0465wNK-n26-sigma692-358.wav

von $f_s = 262144 \text{ Hz}$ für eine Propellerdrehzahl von $n = 26 \text{ s}^{-1}$ eine Betrachtung eines Rotationswinkels von $\phi = kn360^\circ/f_s = 1,1^\circ$. Mit zunehmender Signallänge und Zunahme der Fensteranzahl erfolgt eine Mittelung über die Anzahl der Fenster. Das Ergebnis entspricht eher der beobachtbaren mittleren Kavitationsausdehnung und der mittleren Schallabstrahlung des Propellers. Dies ist insbesondere für den Vergleich unterschiedlicher Propeller oder die Bewertung des akustischen Verhaltens des Propellers vorzuziehen.

Da die hydroakustische Auswertung der Versuchsreihen bereits in den Ersatzversuchen der Großausführungsmessungen durchgeführt wurde (siehe Abschnitt 6), soll sich hier auf die akustische Bewertung des akustisch optimierten Propellers mit und ohne Nabenkappe beschränkt werden. Die Nabenkappe als propulsionsverbessernde Maßnahme übt durch die Beeinflussung der Nabenumströmung einen Einfluss auf

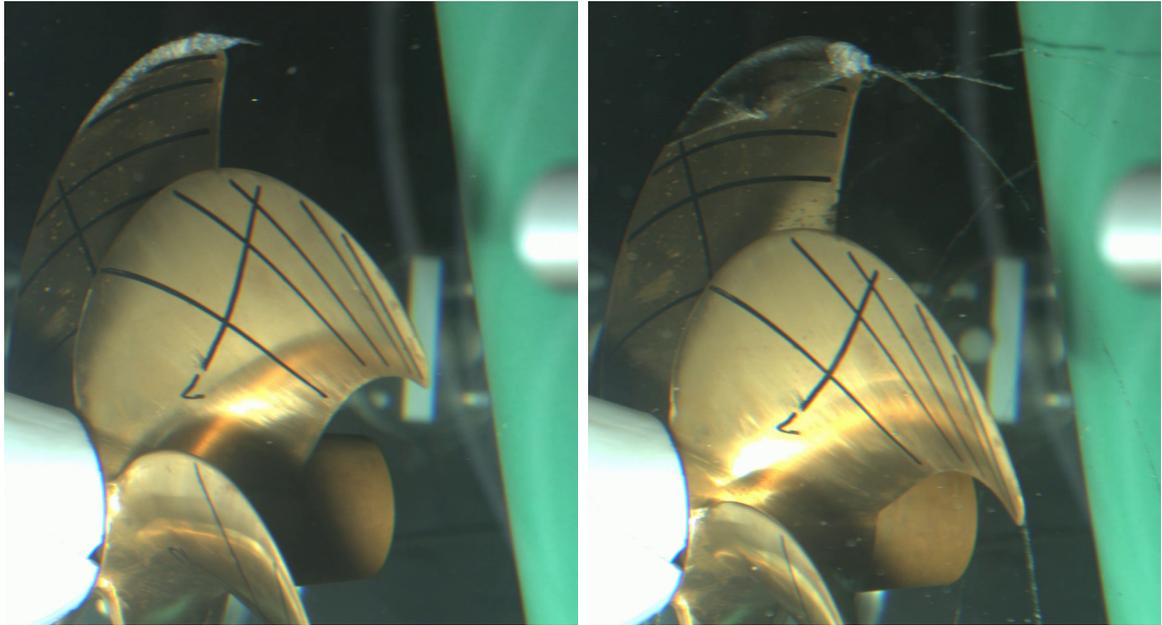


Abb. 5.27: Messung ID=1 (links): Saugseitenschichtkavitation (selten) + Spitzenwirbelkavitation (selten); Messung ID=5 (rechts): Saugseitenschichtkavitation (stabil) + Spitzenwirbelkavitation (stabil)

das Betriebsverhalten des Propellers aus. Die Beeinflussung des Nabenwirbelsystems wirkt sich auf den radialen Schubverlauf des Propellers aus und kann somit auch die akustischen Eigenschaften beeinflussen. Die Ergebnisse des Beamformer Outputs zeigen, dass der akustisch optimierte Propeller mit und ohne Nabenkappe signifikant unterschiedliche Ergebnisse aufweisen. Sowohl für den kavitationsfreien Betrieb, als auch für die Messung mit ausgeprägter Saugseiten- und Spitzenwirbelkavitation zeigt der Propeller mit Nabenkappe ein nochmal leiseres Betriebsverhalten. Dabei ist der Unterschied zwischen den Varianten mit und ohne Nabenkappe vergleichsweise groß. Eine Vermutung ist, dass die Verbesserung des Ablaufverhaltens an der Nabe den Schub des gesamten Propulsionssystems (Propeller + Nabe + Ruder) derart steigert, dass der Schubbelastungsgrad am Propeller im gleichen Betriebspunkt signifikant sinkt. Da die Messungen nur begleitend zu den Messungen durchgeführt wurden, kann diese Frage nicht abschließend beantwortet werden. Aufgrund der deutlichen Wirkung sollte dieser Effekt jedoch weiteren Untersuchungen unterzogen werden.

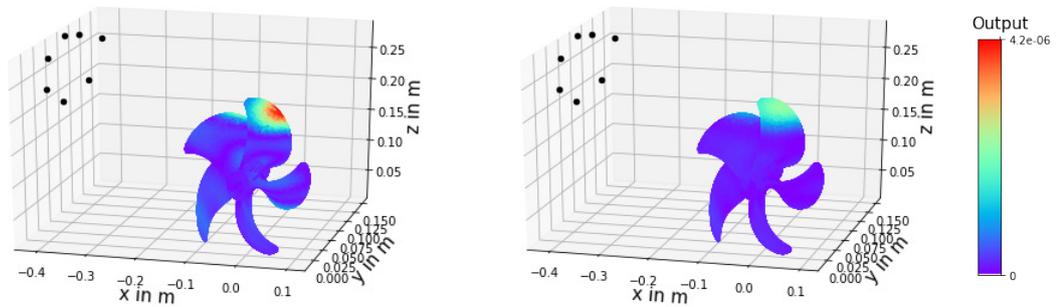


Abb. 5.28: Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 mit Kavitation ($\sigma = 1,79$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1889 ohne Nabenkappe (links) und mit Nabenkappe (rechts)

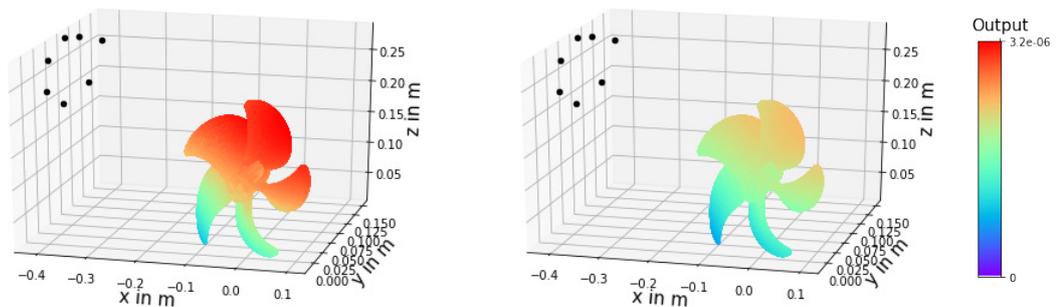


Abb. 5.29: Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 kavitationsfrei ($\sigma = 7,00$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1889 ohne Nabenkappe (links) und mit Nabenkappe (rechts)

Tab. 5.10: Versuchsreihe der Lokalisierungsmessungen

ID	Propeller	OP	n	σ	Dateiname
-	-	-	s^{-1}	-	-
0	P1889	2	26	3,08	OP2-P1889-0460-n26-sigma308-6.wav
1	P1889+NK	2	26	3,08	OP2-P1889-0464wNK-n26-sigma308-357.wav
2	P1889	2	26	7,00	OP2-P1889-0461-n26-sigma7000-5.wav
3	P1889+NK	2	26	6,97	OP2-P1889-0464wNK-n26-sigma6965-57.wav
4	P1889	3	26	1,79	OP3-P1889-0462-n26-sigma179-7.wav
5	P1889+NK	3	26	1,79	OP3-P1889-0465wNK-n26-sigma179-359.wav
6	P1889	3	26	7,00	OP3-P1889-0462-n26-sigma7000-6.wav
7	P1889+NK	3	26	6,92	OP3-P1889-0465wNK-n26-sigma692-358.wav

5.2.4 Kavitationsklassifikation

Wie bei den vorherigen Messkampagnen erfolgte die Klassifikation unter Anwendung eines Random Forest Klassifikators auf dem Audiosignal des Hydrofons Ch 1. Die Audiodaten wurden mit Hilfe des TKE-Operators gefiltert und von Störgeräuschen bereinigt. Das gefilterte Audiosignal wurde mit einer Waveletpacket Transformation mit Daubechies Wavelets in 64 Frequenzbänder zerlegt und danach in mit einem Rechteckfenster der Länge $t_F = 0.1 s$ und einem Overlap von 0,5 in einzelne Blöcke unterteilt. Auf jedem Frequenzband eines Blockes wurden 20 beliebige statistische Größen (Tab. 3.1) berechnet und anschließend normiert, so dass jeder der $t_F = 0,1 s$ langen Audioblöcke durch insgesamt 1280 Werte charakterisiert wurde. Tabelle 5.10 zeigt die Liste der klassifizierten Messreihen des hydroakustisch optimierten Propellers mit und ohne Nabenkappe.

Abb. 5.30 zeigt das Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation als Confusion Matrix. Die Confusion Matrix zeigt das Ergebnis des Blindtests des trainierten Random Forest Klassifikators, indem untersucht wird, ob ein vorliegendes Audiosignal korrekt erkannt wird (true positive tp), eine falsches Audiosignal in einer Klasse erkannt wird (false positive fp) oder das Audiosignal fälschlicherweise einer anderen Klasse zugeordnet wird (false negative fn). Die stark besetzte Hauptdiagonale zeigt, dass ein Großteil der Audiosignale korrekt den tatsächlichen Messreihen zugeordnet werden können. Elemente abseits der Hauptdiagonale deuten auf Fehlinterpretationen des Klassifikators hin, deren Ursache gleiche akustische Eigenschaften zwischen den Versuchen sein können. Ähnlichkeiten in den akustischen Eigenschaften können zwischen den Versuchsreihen

5. Messungen am Propeller

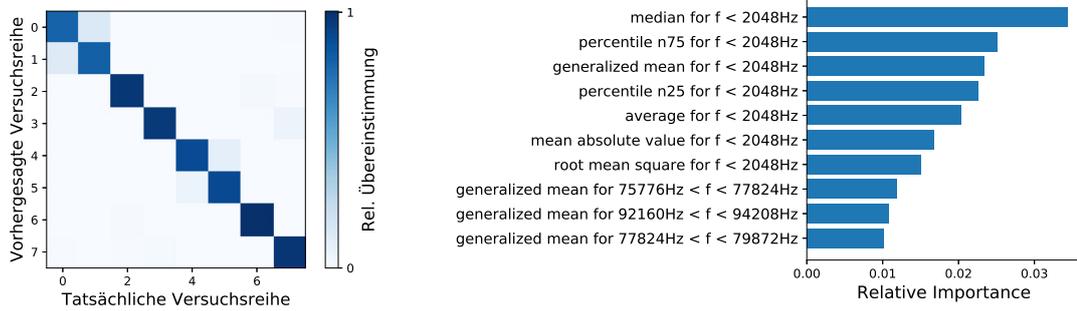


Abb. 5.30: Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation: Confusion Matrix für den akustisch optimierten Propeller P1889 mit und ohne Nabenkappe mit $F_1 = 0.93$ (links) und die zehn wichtigsten Statistikgrößen, die eine Unterscheidung der Audiosignale erlauben (rechts)

mit der ID 0 und 1 sowie 4 und 5 erkannt werden. Die Genauigkeit des trainierten Random Forest Klassifikators mit allen 1280 Features beträgt

$$F_1 = \frac{tp}{tp + 0,5(fp + fn)} = 0,93 \quad (5.1)$$

Mit Berechnung der Feature Importance können die Frequenzbereiche und Größen identifiziert werden, an denen sich die Messreihen bestmöglich unterscheiden lassen (Abb. 5.30). Die Reduktion der Featuredimension von 1280 auf die 10 stärksten Features fällt auf, der F_1 -Score nahe zu unverändert bei $F_1 = 0,92$ verbleibt. Dabei befinden sich die Features schwerpunktmäßig im untersten Frequenzbereich bei $f < 2048 \text{ Hz}$. Um auszuschließen dass die tieffrequenten Komponenten des Antriebs die Klassifikation dominieren, wurden alle tieffrequenten Features mit $f < 2048 \text{ Hz}$ entfernt. Im Ergebnis zeigte sich zwar eine Verschlechterung der Prognosefähigkeit des Random Forest, diese jedoch nur um ca. 9% auf $F_1 = 0,84$ (Abb. 5.32). Selbst eine erneute Beschränkung des Featureerraums auf die hochfrequenten Elemente mit $f > 65535 \text{ Hz}$ ermöglichte immer noch eine zuverlässige Klassifikation mit einer Genauigkeit von $F_1 = 0,72$ (Abb. 5.33), so dass die Vermutung nahe liegt, dass die Nabenkappe das akustische Verhalten des Propellers bis in die höheren Frequenzbereiche beeinflussen kann.

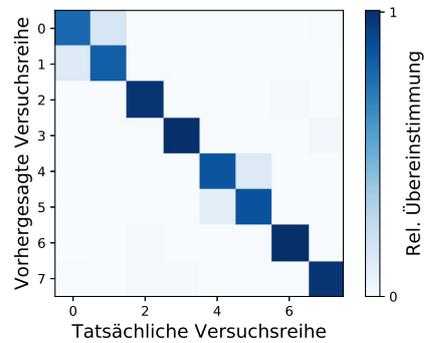


Abb. 5.31: Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation mit den zehn wichtigsten Features: Confusion Matrix für den akustisch optimierten Propeller P1889 mit und ohne Nabenkappe mit $F_1 = 0,92$

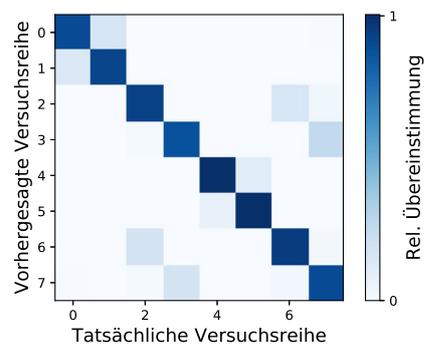


Abb. 5.32: Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation mit allen Features für $f > 2048 Hz$: Confusion Matrix für den akustisch optimierten Propeller P1889 mit und ohne Nabenkappe mit $F_1 = 0,84$

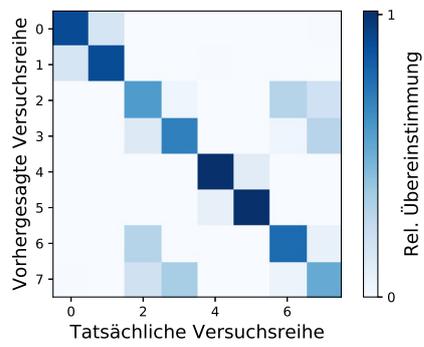


Abb. 5.33: Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation mit allen Features für $f > 65536 \text{ Hz}$: Confusion Matrix für den akustisch optimierten Propeller P1889 mit und ohne Nabenkappe mit $F_1 = 0,72$

6 Großausführungsmessungen

Als Folge der durch Covid-19 untersagten Reisetätigkeit war die Durchführung von Großausführungsmessungen nicht möglich. Alternativ wurde zusammen mit den Forschungspartnern der SVA Potsdam eine zusätzliche Messreihe geplant und durchgeführt, die die Erprobung der entwickelten Verfahren unter realitätsnahen Bedingungen ermöglichte. Zu diesem Zweck wurden der Referenzpropeller P1724 und die akustisch optimierte Variante im Kavitationskanal mit verkürztem Hinterschiff DM110FS hydroakustisch untersucht.

6.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen wurden an der großen Messstrecke der SAV Potsdam durchgeführt. Die Messstrecke hat einen Querschnitt von $825\text{ mm} \times 825\text{ mm}$. Da das verwendete Dummymodell die ungestörten Abstrahlrichtungen der kavitierenden Propellerregionen stark einschränkt, wurden neue Hydrofonarrays auf Basis der Archimedischen Spirale entwickelt. Für eine Anzahl von $N = 16$ Empfangshydrofonen wurden zwei Arrays mit je acht Hydrofonen auf zwei unterschiedliche Scheiben verteilt (Abb. 6.1). Durch unterschiedliche Einbaulagen der Scheiben konnten verschiedene Arraykonfigurationen und lokalisierbare Frequenzbereiche getestet werden. Der horizontale Abstand zwischen den Scheiben beträgt $y = 0,16\text{ m}$. Die Aufnahme der Hydrofone in den Scheiben erfolgt durch passend konstruierte Buchsen, die die Hydrofone versenkt in den Scheiben geschützt von der freien Strömung festhalten (Abb. 6.3). Gleichzeitig waren die Hydrofone vollständig getaucht um die hydroakustische Kopplung sicherzustellen. Die Propellerkreisscheibe mit dem Radius $R_P = 0,125\text{ m}$ befindet sich bei $y = 0\text{ m}$, die Lage der Propellerachse befindet sich oberhalb der Kanalmitte bei $x = 0\text{ m}$, $z = 0,125\text{ m}$, die Strömungsrichtung des Kanals ist in negative y-Richtung. Das Hydrofonarray wurde mit $N = 16$ Hydrofonen vom Typ Brüel&Kjaer 8103 bestückt. Die Positionen Empfangshydrofone P_r finden sich in den Tab. 6.1, 6.2. Gemessen wurde mit einer Samplefrequenz von $f_s = 262144\text{ Hz}$. Um Einflüsse durch Trittschall und andere Ein-

Tab. 6.1: Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone in der Standardvariante; Propellerebene bei $y = 0\text{ m}$, Lage der Propellerachse $x = 0\text{ m}$, $z = 0,1\text{ m}$

Ch. Nr.	x	y	z
-	m	m	m
1	-0.4352	0.11750	0.24450
2	-0.4352	0.11021	0.27298
3	-0.4352	0.07796	0.28628
4	-0.4352	0.04310	0.26588
5	-0.4352	0.03730	0.22033
6	-0.4352	0.07367	0.18392
7	-0.4352	0.13025	0.19089
8	-0.4352	0.16250	0.24450
9	-0.4352	-0.21150	0.24450
10	-0.4352	-0.21879	0.27298
11	-0.4352	-0.25104	0.28628
12	-0.4352	-0.28590	0.26588
13	-0.4352	-0.29170	0.22033
14	-0.4352	-0.25533	0.18392
15	-0.4352	-0.19875	0.19089
16	-0.4352	-0.16650	0.24450

flüsse durch parallele Arbeiten in der Versuchseinrichtung zu minimieren wurde ein Hochpassfilter bei $f_{HP} = 22\text{ Hz}$ verwendet. Es wurden 4-Kanal Messverstärker vom Typ Nexus der Marke Brüel&Kjaer verwendet. Die Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone zeigt Tab. 6.3.

6. Großausführungsmessungen

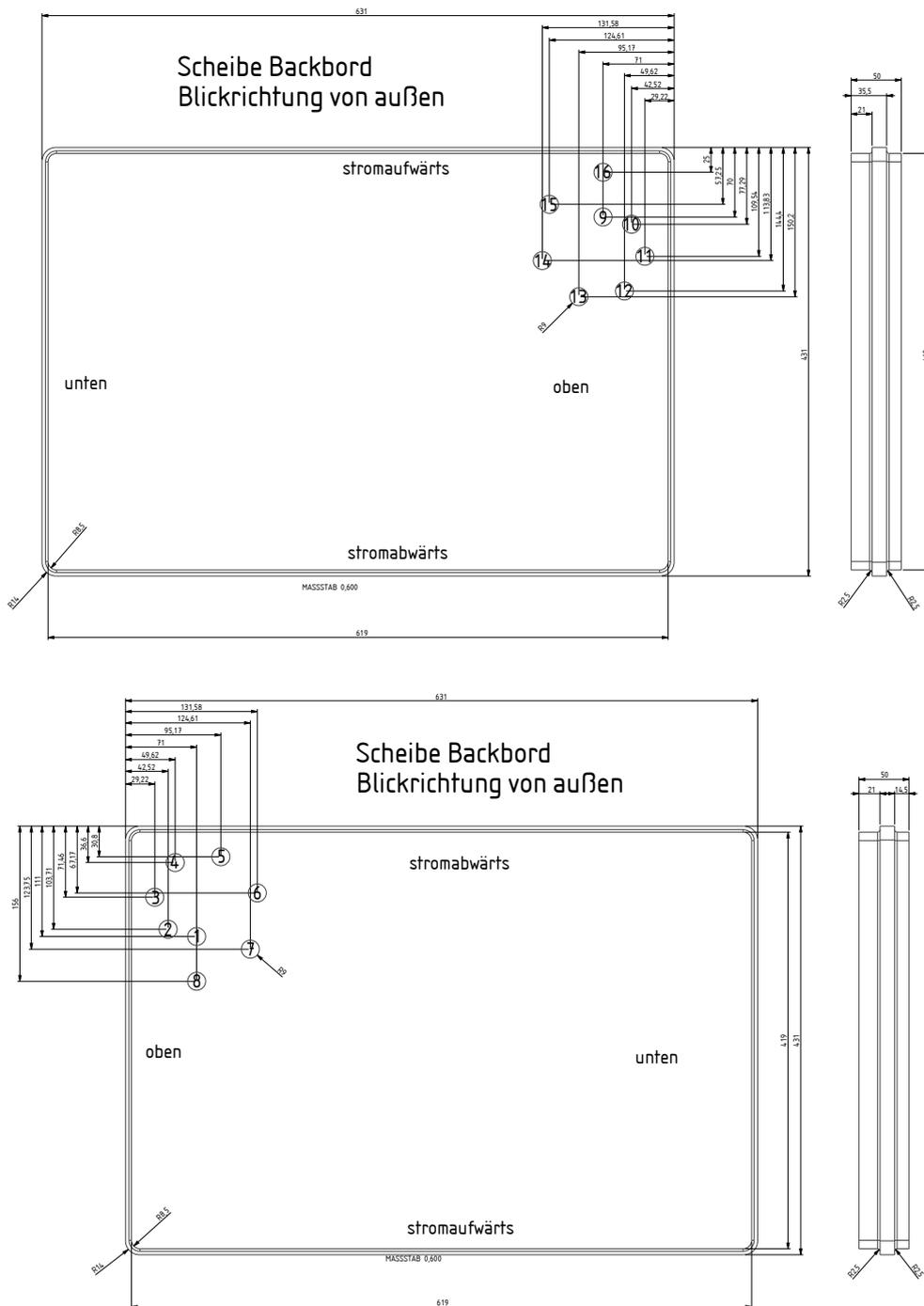


Abb. 6.1: Seitenscheiben mit Bohrungen für Hydrofonpositionen; Nummerierung an der Position beschreibt den Messkanal 1-16

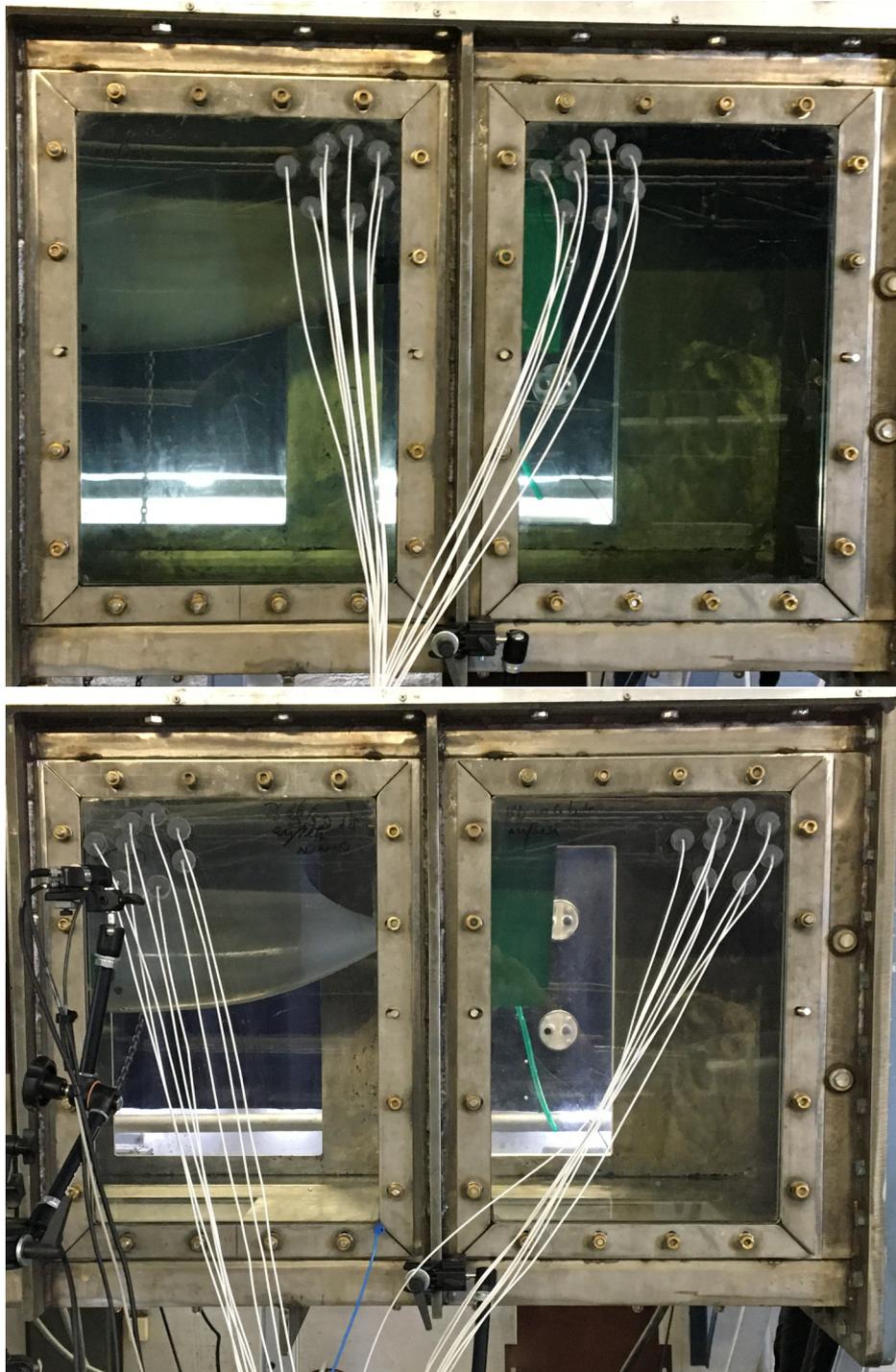


Abb. 6.2: Einbaupositionen der Seitenscheiben; normaler Einbau (oben), Scheibenwechsel (unten)



Abb. 6.3: Hydrofonhalterungen in der Scheibe (oben); Sitz der Hydrofone in der Scheibe (unten)

Tab. 6.2: Positionen P_s der akustischen Zentren der Hydrofone für die Konfiguration Scheibenwechsel; Propellerebene bei $y = 0\text{ m}$, Lage der Propellerachse $x_a = 0\text{ m}$, $z_a = 0,125\text{ m}$

Ch. Nr.	x	y	z
-	m	m	m
1	-0.4352	-0.4615	0.2445
2	-0.4352	-0.46879	0.27298
3	-0.4352	-0.50104	0.28628
4	-0.4352	-0.5359	0.26588
5	-0.4352	-0.5417	0.22033
6	-0.4352	-0.50533	0.18392
7	-0.4352	-0.44875	0.19089
8	-0.4352	-0.4165	0.2445
9	-0.4352	0.3675	0.2445
10	-0.4352	0.36021	0.27298
11	-0.4352	0.32796	0.28628
12	-0.4352	0.2931	0.26588
13	-0.4352	0.2873	0.22033
14	-0.4352	0.32367	0.18392
15	-0.4352	0.38025	0.19089
16	-0.4352	0.4125	0.2445

Tab. 6.3: Kanalbelegung der verwendeten Hydrofone

Ch. Nr.	S.Nr	Charge Sensitivity pC/Pa	Capacity pF	Kommentar
-	-			-
1	3086050	0,0966	3712	
2	3086048	0,0962	3786	
3	3086072	0,0987	3760	Schlechtes SNR an Nexus
4	3086070	0,0972	3731	
5	3086054	0,0988	3794	
6	3086069	0,0953	3759	
7	3086053	0,0971	3756	
8	3086052	0,0941	3640	
9	3086064	0,0942	3729	
10	3086071	0,0983	3767	
11	3086066	0,0985	3724	
12	3086049	0,097	3733	
13	3086068	0,0932	3692	
14	3086067	0,0956	3660	
15	3086065	0,0961	3705	
16	3086051	0,0958	3736	Error an Nexus

6.2 Kalibrierungsmessungen

Zur Kalibrierung des Versuchsaufbaus, Überprüfung der Abmessungen der Anordnung und Feststellung der spezifischen Schallgeschwindigkeit wurden Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Dazu wurden Signale variabler Frequenz mit $0,1 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$ über ein Sendehydrofon vom Typ Brüel&Kjaer 8105 ausgesendet und sowohl direkt über einen Monitorausgang als auch über das Hydrofonarray samplesynchron aufgezeichnet. Die Sendeposition P_s des BKS 8105 wurde auf die Propellerkreisscheibe bei $\phi_s = 0^\circ$ und $R_s = 0,8R_p$ gelegt. Bezogen auf das Hydrofonarray ergibt sich eine Sendeposition von $x_s = 0 \text{ m}$, $y_s = 0,0 \text{ m}$, $z_s = (z_a + 0,8R_p) \text{ m}$. Für das gesendete Signal $x_s[k]$ mit dessen Übertragungsfunktion $X_s(e^{j\Omega}) = \mathcal{F}_*\{x_s[k]\}$ und das empfangene Signal $x_r[k]$ mit dessen Übertragungsfunktion $X_r(e^{j\Omega}) = \mathcal{F}_*\{x_r[k]\}$ folgt die Raumimpulsantwort zu

$$H(e^{j\Omega}) = \frac{X_r(e^{j\Omega})}{X_s(e^{j\Omega})}. \quad (6.1)$$

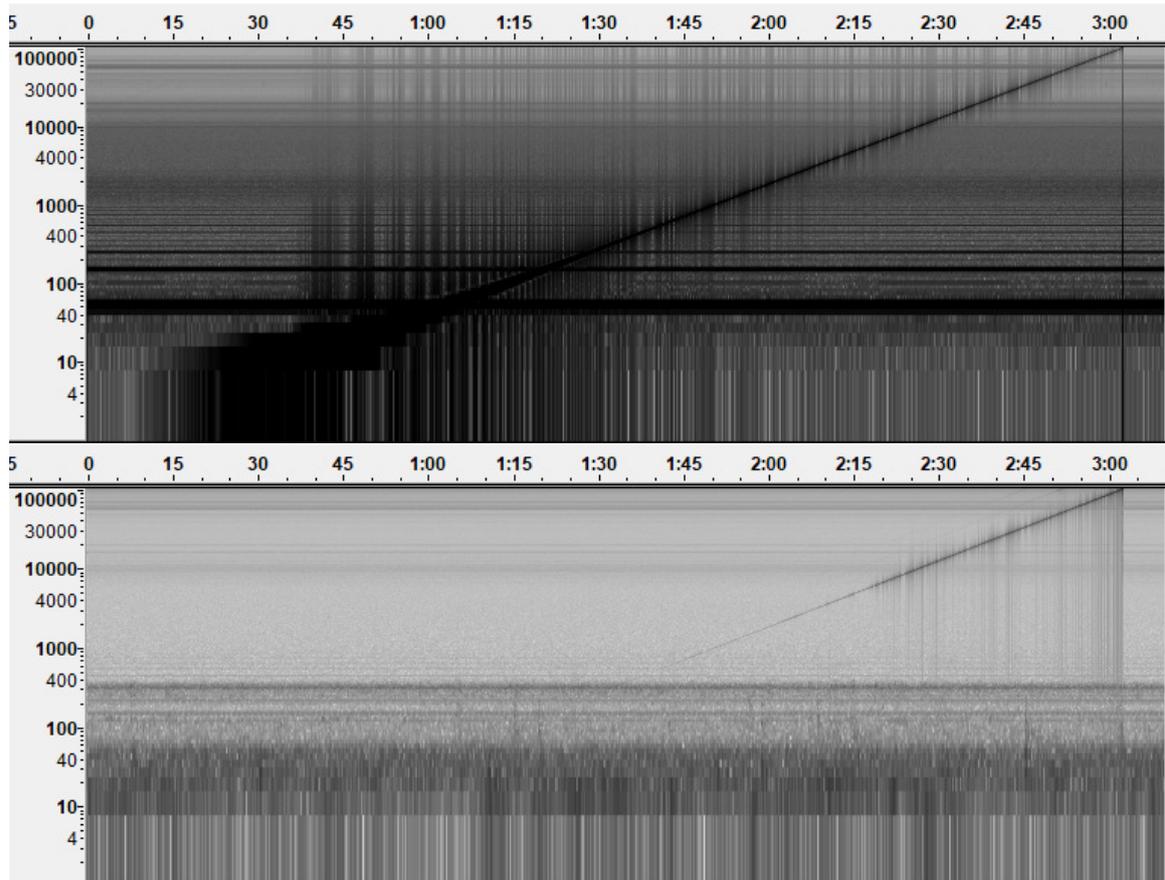


Abb. 6.4: Kalibrierungsmessung: Spektrogramm des Log-Sweeps über $t = 180\text{ s}$ aus Messung 7 (Tab. 6.4); Monitorausgang des Sendesignals (oben), empfangenes Signal auf Kanal 1 (unten)

Aus der inversen DFT folgt die Impulsantwort im Zeitbereich zu

$$h(k) = \mathcal{F}_*^{-1}\{H(e^{j\Omega})\}. \quad (6.2)$$

Das Delay des nacheilenden Empfangssignals beträgt

$$k_{max} = \operatorname{argmax}(h(k)). \quad (6.3)$$

Der Abstand des Senders zum Empfänger folgt aus

$$\Delta = k_{max} f_s c_0. \quad (6.4)$$

Unbekannt sind die Qualität der Aufnahmen, die Schallgeschwindigkeit und die tatsächlichen Abstände von Sende- und Empfangshydrofonen. Deshalb wurden die Messdaten ausgewertet und auf Fehlermuster hin überprüft. Da die Position des Sendehydrofons bekannt ist, bilden sich Abweichungen in der Schallgeschwindigkeit Fehler in allen Δ der Empfangshydrofone ab, Fehler in der Positionierung der Empfangshydrofone zeigen sich als individuelle Ausreißer. Ziel ist die Korrektur von Schallgeschwindigkeit und Hydrofonposition, so dass für den Mittelwert des Fehlers e_{mean} gilt

$$e_{mean} = \frac{f_s}{N c_0} \sum_{i=1}^N (\Delta_N - P_{s,N}) \rightarrow 0 \quad (6.5)$$

und den quadratischen Mittelwert des Fehlers e_{RMS}

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{f_s}{N c_0} \sum_{i=1}^N (\Delta_N - P_{s,N})^2} \rightarrow \min. \quad (6.6)$$

Zum Ausgleich der Sende- und Empfangscharakteristiken der Hydrofone wurden die Impulsantworten $H(e^{j\Omega})$ zunächst mit einem Butterworth Lowpass Filter 1. Ordnung und einer Grenzfrequenz von $f_{LP} = 100/(0,5 f_s) Hz$ und anschließend mit einem Highpass Filter der Ordnung 2^{12} mit einer Grenzfrequenz von $f_{HP} = 5 kHz$ gefiltert (Abb. 6.5).

Eine Liste der Kalibrierungsmessungen zeigt Tab. 6.4. Da Kanal 16 aufgrund eines Fehlers am Messverstärker kein Signal aufzeichnet, wird der Kanal 16 aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Die Analyse der Kalibrierungsdaten zeigt, dass außer

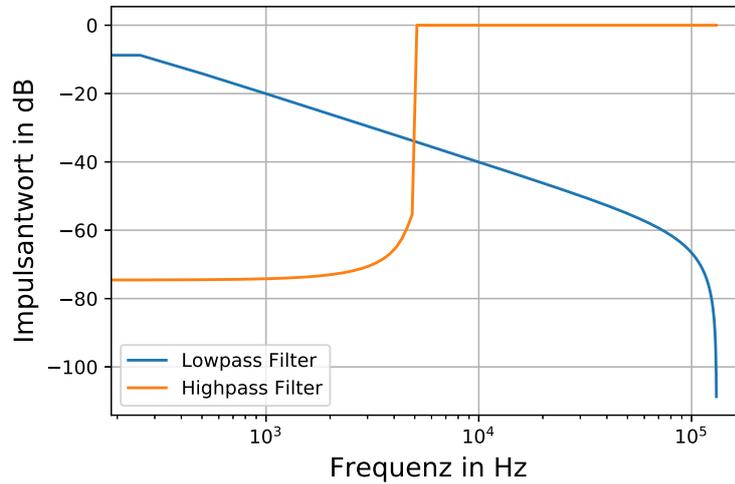


Abb. 6.5: Raumimpulsantwort: Filterverläufe zum Ausgleich von Sende- und Empfangscharakteristik

Tab. 6.4: Liste der Kalibrierungsmessungen mit Log-Sweep mit $1 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ kHz}$

ID	Typ	Dauer	Dateiname
-	-	<i>s</i>	-
1	Trigger	180	CalibrationTestSweep180-2.wav
2	Trigger	900	CalibrationTestSweep15minFree60dB-1.wav
3	Trigger	180	CalibrationTestSweep180-1.wav
4	Trigger	180	CalibrationTestSweep180Trigger-2.wav
5	Trigger	180	CalibrationTestSweep180Trigger50dB-1.wav
6	Trigger	180	CalibrationTestSweep180Trigger-1.wav
7	Trigger	180	CalibrationTestSweep180Trigger60dB-1.wav

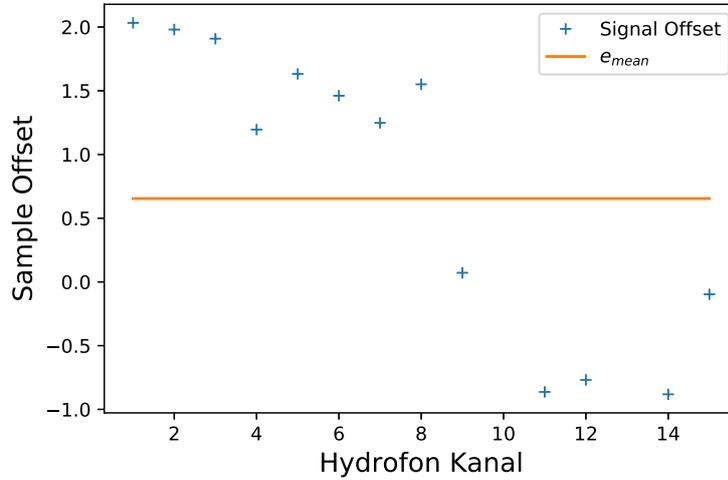


Abb. 6.6: Laufzeitfehler für eine Schallgeschwindigkeit von $c_0(\theta_w = 20^\circ C) = 1484 m/s$ und unkorrigierte Arrayabstände

für die Kalibrierungsmessung mit der ID 2 für alle Messreihen plausible Werte für $\Delta_N - P_{s,N}$ erreicht werden können. Allerdings zeigen sich für die Messkanäle 10 und 13 in den Messreihen stärkere Abweichungen und unplausible Werte. Aus diesem Grund werden die Kanäle 10 und 13 für die weitere Kalibrierung ausgeschlossen. Eine typische Abweichung der Signallaufzeiten für das aufgemessene Array bei einer Schallgeschwindigkeit in Wasser von $c_0(\theta_w = 20^\circ C) = 1484 m/s$ ist in Abb. 6.6 dargestellt. Es wird deutlich, dass die beiden Arrays grundsätzlich unterschiedliche Laufzeitenfehler aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass sowohl die Schallgeschwindigkeit als auch der relative Abstand der beiden Arrays zueinander eine Korrektur erfordert. Nach Korrektur der Schallgeschwindigkeit auf Basis der Gleichungen 6.5 und 6.6 für die Hydrofone 1 bis 8 folgt $c_{0,corr} = 1453 m/s$. Nach Korrektur der Position des zweiten Arrays mit den Hydrofonen 9 bis 16 um $y_{corr} = 2,85 \cdot 10^{-2} m$ folgt der Laufzeitenfehler zu $e_{RMS} = 1,415 \cdot 10^{-3}$ und $e_{mean} = -1,577 \cdot 10^{-5}$. Alle Laufzeitenfehler liegen nach der Korrektur mit $-0,433 \leq e \leq 0,443$ innerhalb einer Abtastweite des Messsystems (Abb. 6.7). Die Anwendung der Korrekturen auf die Beamforming Maps der Kalibrierungsmessungen ist in Abb.6.8 dargestellt.

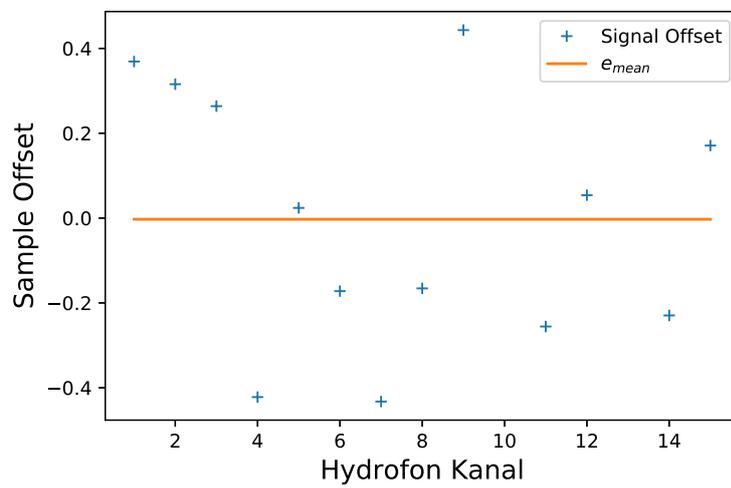


Abb. 6.7: Laufzeitfehler nach Korrektur der Schallgeschwindigkeit auf $c_{0,corr} = 1453 \text{ m/s}$ und Korrektur der Arrayabstände um $y_{\Delta} = 2,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

6. Großausführungsmessungen

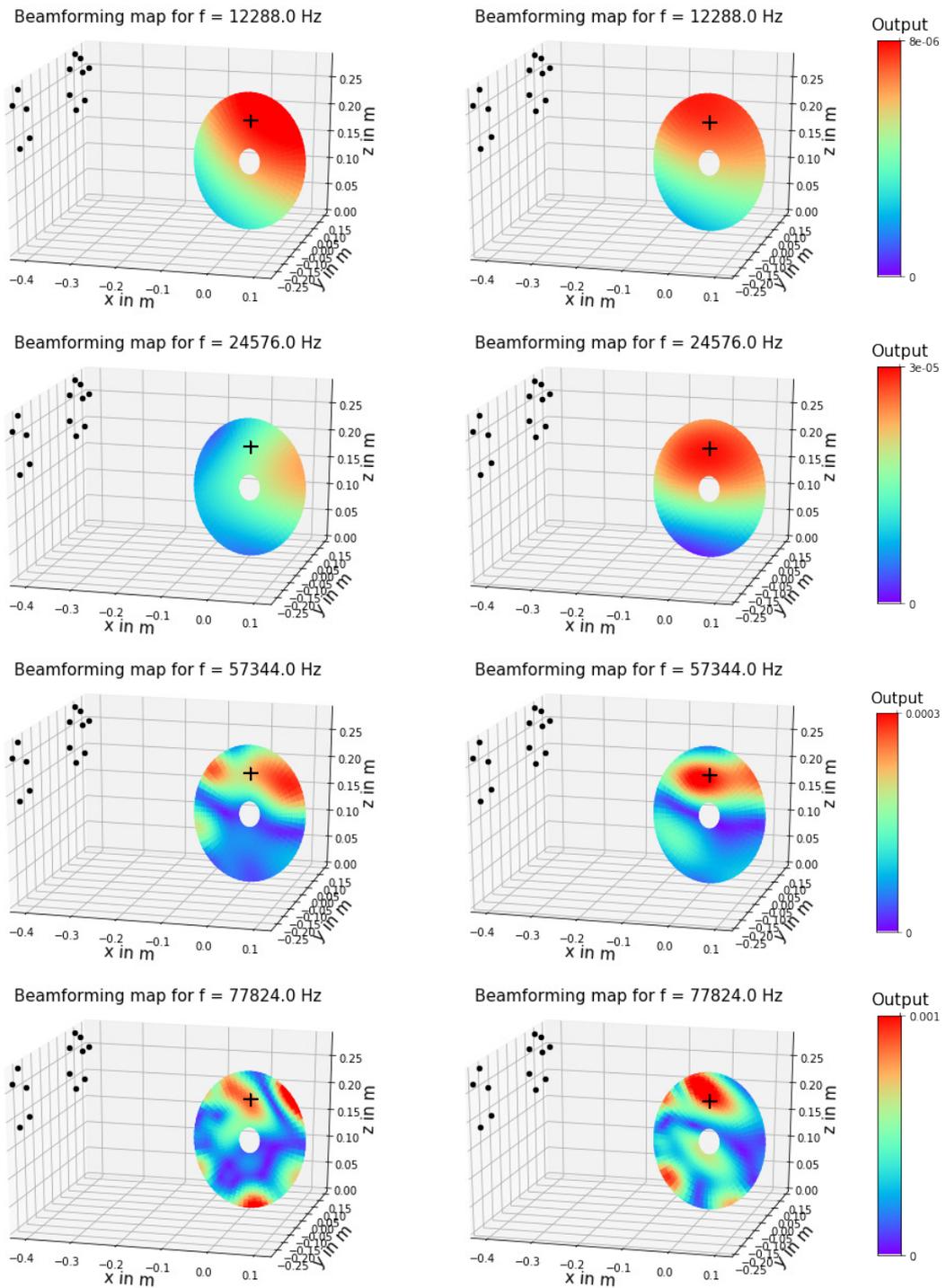


Abb. 6.8: Beamforming Map der Propellerkreisscheibe für vier beliebige Frequenzen im unkorrigierten (links) und korrigierten Zustand (rechts); Hydrofonpositionen: Schwarze Punkte, Sendehydrofonposition: Schwarzes Plus

6.3 Lokalisierung

Zur Lokalisierung des Kavitationslärms wurden zwei Betriebspunkte OP2 und OP3 sowohl für den Referenzpropeller P1724 als auch für den hydroakustisch optimierten Entwurf P1889 abgefahren. Die Propellerdrehzahl betrug über alle Versuche $n = 26 \text{ s}^{-1}$, variiert wurde die Kavitationszahl $\sigma = 2(p_0 - p_v)/(\rho v^2)$ durch Änderung der Anströmgeschwindigkeit v (Tab. 6.5). Parallel zu den Lokalisierungsversuchen wurden Videoaufzeichnungen durchgeführt. Zwar wurden Ein- und Ausschaltimpuls der Videokamera samplesynchron aufgezeichnet, jedoch nicht die Bildrate. Die Videodaten dienen primär der Bestimmung der vorherrschenden Kavitationszustände und zur Unterstützung der Annotation der Audiodaten. Die untersuchten Punkte deckten kavitationsfreie und kavitierende Betriebspunkte ab. Einen exemplarischen Überblick über die Kavitationszustände zeigen die Abb. 6.9 bis 6.11. Es ist zu beachten, dass die Bilder nur eine Momentaufnahme darstellen. Gerade für mittlere Kavitationszahlen konnte ein sehr dynamisches Kavitationsgeschehen beobachtet werden mit instabilen und interagierenden Kavitationsformen. Dies stellt sich auch in den Ergebnissen der Lokalisationsrechnungen dar. In Abhängigkeit der ausgewerteten Signallänge werden unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Je kürzer die ausgewertete Signallänge und damit die Anzahl auszuwertender Fenster ist, umso geringer ist auch der Einfluss der Mittelung über die Fensteranzahl. Das Ergebnis des Beamforming Algorithmus entspricht dann der instantanen Schallabstrahlung des Propellers. Dies eignet sich insbesondere für die Lokalisation und Betrachtung einzelner und instationärer Kavitationsereignisse. Für eine beispielhafte Signallänge von einem einzelnen Fenster mit einer Länge von $k = 32$ Samples folgt bei der verwendeten Samplefrequenz von $f_s = 262144 \text{ Hz}$ für eine Propellerdrehzahl von $n = 26 \text{ s}^{-1}$ eine Betrachtung eines Rotationswinkels von $\phi = kn360^\circ/f_s = 1,1^\circ$. Mit zunehmender Signallänge und Zunahme der Fensteranzahl erfolgt eine Mittelung über die Anzahl der Fenster. Das Ergebnis entspricht eher der beobachtbaren mittleren Kavitationsausdehnung und der mittleren Schallabstrahlung des Propellers. Dies ist insbesondere für den Vergleich unterschiedlicher Propeller oder die Bewertung des akustischen Verhaltens des Propellers vorzuziehen. Eine Gegenüberstellung beider Ergebnisse zeigt Abb. 6.12. Dabei wird deutlich, dass mit ausreichender Mittlung die ermittelte Region der Schallabstrahlung in den Bereich des visuell feststellbaren Kavitationsgebiets wandert.

Tab. 6.5: Versuchsreihe der Lokalisierungsmessungen

ID	Propeller	OP	n	σ	Dateiname
-	-	-	s^{-1}	-	-
1	P1724	2	26	7,000	DM110-P1724-OP2-sigma700-1.wav
2	P1724	2	26	3,859	DM110-P1724-OP2-sigma3859-1.wav
3	P1724	2	26	3,468	DM110-P1724-OP2-sigma3468-2.wav
4	P1724	2	26	3,180	DM110-P1724-OP2-sigma3180-3.wav
5	P1724	2	26	2,824	DM110-P1724-OP2-sigma2824-4.wav
6	P1724	3	26	7,000	DM110-P1724-OP3-sigma700-2.wav
7	P1724	3	26	5,014	DM110-P1724-OP3-sigma5014-5.wav
8	P1724	3	26	2,455	DM110-P1724-OP3-sigma2455-6.wav
9	P1724	3	26	2,040	DM110-P1724-OP3-sigma2040-7.wav
10	P1724	3	26	1,710	DM110-P1724-OP3-sigma1710-8.wav
11	P1724	3	26	1,361	DM110-P1724-OP3-sigma1361-9.wav
12	P1889	2	26	7,000	DM110-P1889-OP2-sigma7000-10.wav
13	P1889	2	26	3,710	DM110-P1889-OP2-sigma3710-11.wav
14	P1889	2	26	3,395	DM110-P1889-OP2-sigma3395-12.wav
15	P1889	2	26	3,080	DM110-P1889-OP2-sigma3080-13.wav
16	P1889	2	26	2,765	DM110-P1889-OP2-sigma2765-14.wav
17	P1889	3	26	7,000	DM110-P1889-OP3-sigma7000-15.wav
18	P1889	3	26	5,114	DM110-P1889-OP3-sigma5114-16.wav
19	P1889	3	26	2,555	DM110-P1889-OP3-sigma2555-17.wav
20	P1889	3	26	2,140	DM110-P1889-OP3-sigma2140-18.wav
21	P1889	3	26	1,790	DM110-P1889-OP3-sigma1790-19.wav
22	P1889	3	26	1,440	DM110-P1889-OP3-sigma1440-21.wav

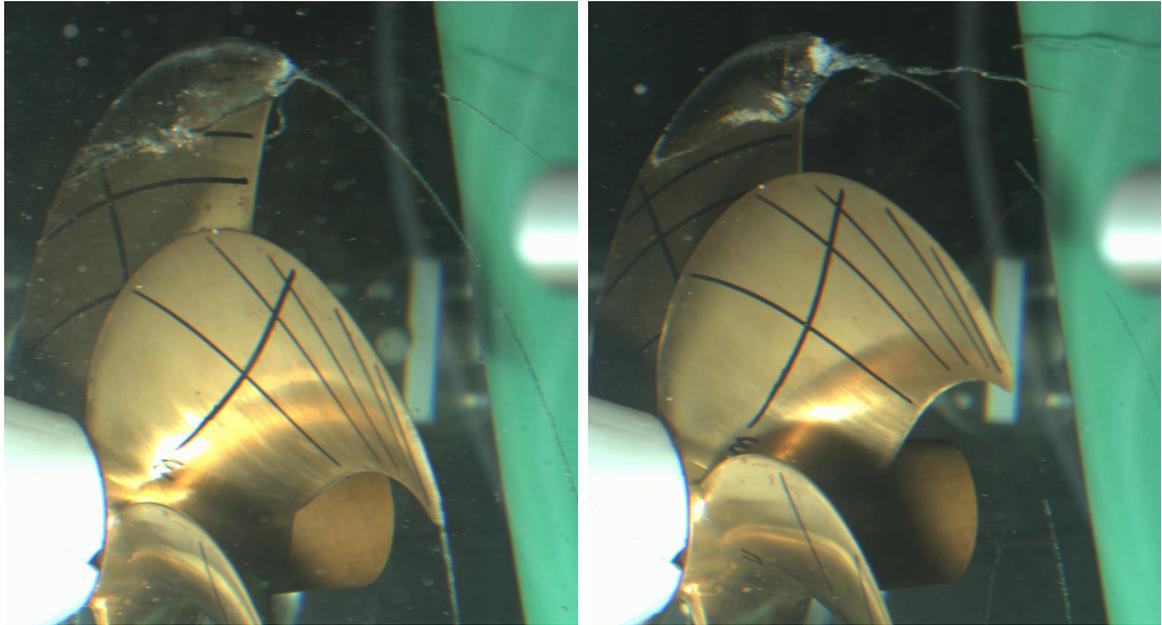


Abb. 6.9: Messung ID=11 (links): Saugseitenschichtkavitation (stabil) + Spitzenwirbelkavitation (stabil); Messung ID=10 (rechts): Saugseitenschichtkavitation (stabil) + Spitzenwirbelkavitation (stabil)

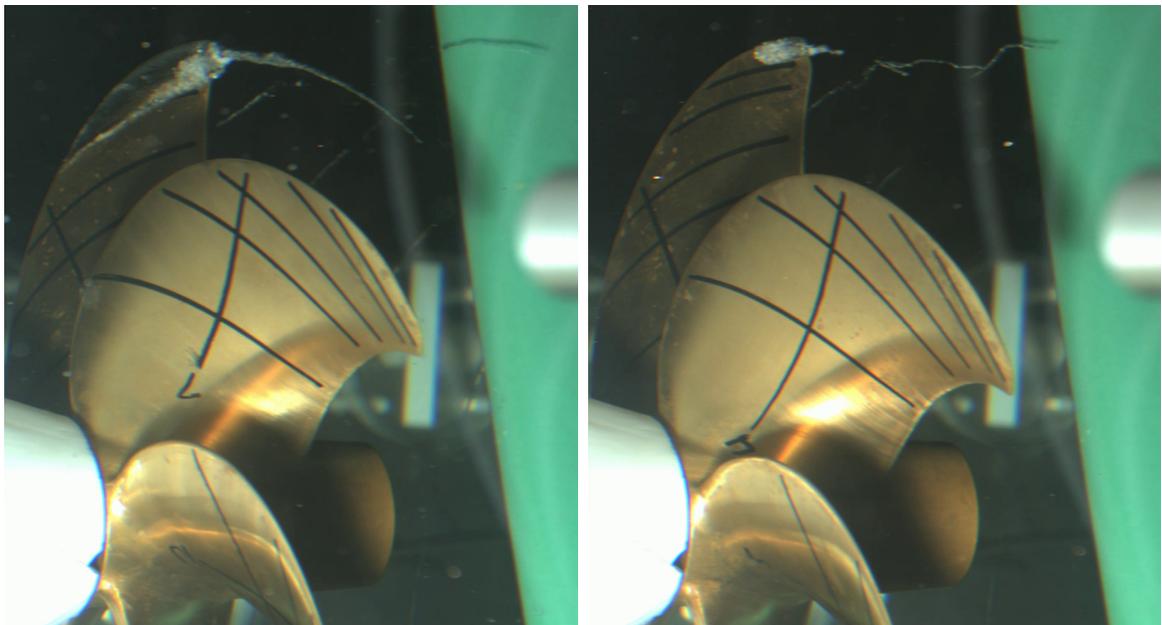


Abb. 6.10: Messung ID=9 (links): Saugseitenschichtkavitation (instabil) + Spitzenwirbelkavitation (stabil); Messung ID=8 (rechts): Saugseitenschichtkavitation (instabil) + Spitzenwirbelkavitation (instabil)

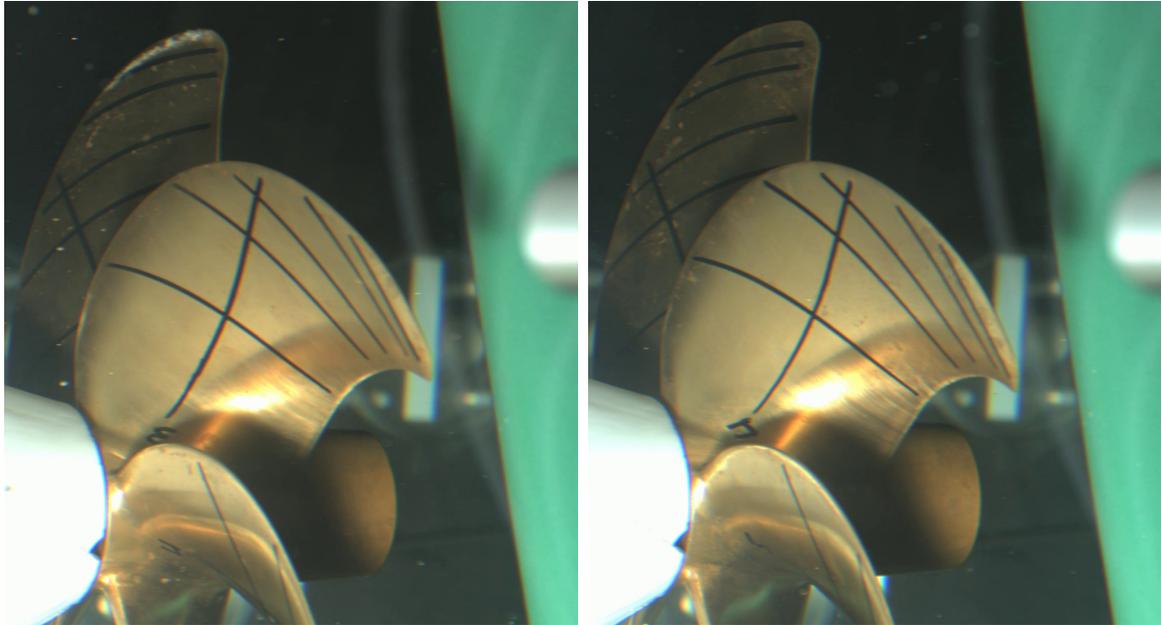


Abb. 6.11: Messung ID=7 (links): Saugseitenschichtkavitation (selten); Messung ID=6 (rechts): Kavitationsfrei

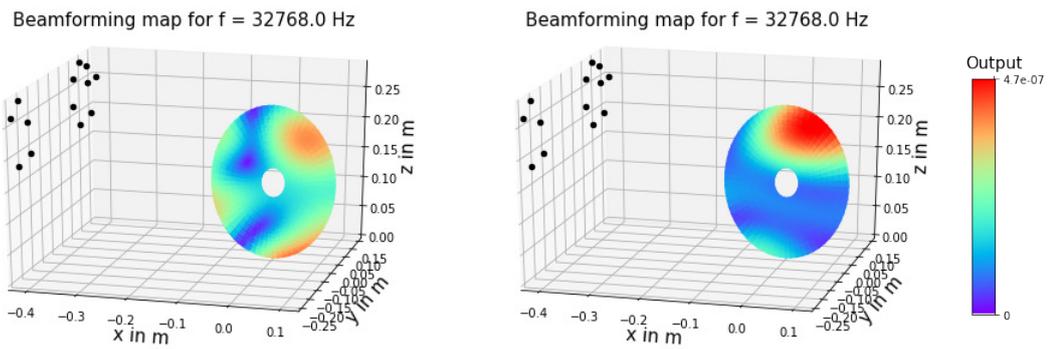


Abb. 6.12: Ergebnis der Lokalisierung für Messung ID=10 mit instantaner ($k = 32$) (links) und mittlerer Schallabstrahlung ($k = fs$) (rechts)

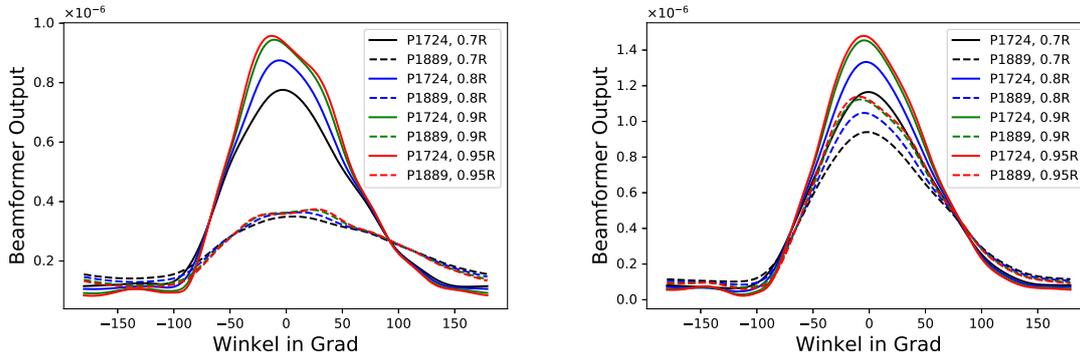


Abb. 6.13: Akustischer Beamformer Output für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ auf verschiedenen Propellerradien für die Propeller P1724 und P1889 in OP3 ($\sigma = 7,0$ (links) und $\sigma = 5,0$ (rechts))

6.3.1 Vergleich P1724 und P1889

Die Gegenüberstellung des Beamformer Outputs für den Referenzpropeller P1724 und die akustisch optimierte Variante P1889 auf den Radien 0,7R, 0,8R, 0,9R und 0,95R der Propellerkreisscheibe im lokalisierbaren Frequenzbereich von $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ zeigt, dass beide Propeller im Bereich der Nachstromdelle bei $\phi = 0^\circ$ die stärksten Schallemissionen aufweisen. Dabei zeigt der akustisch optimierte Propeller P1889 im kavitationsfreien Betrieb (Abb. 6.13 links) ein signifikant leiseres Betriebsverhalten als der Referenzpropeller P1724. Mit Absenken der Kavitationszahl σ wird deutlich, dass die Schallemissionen beider Propeller zunehmen und sich der Ort der stärksten Schallemissionen in den Bereich positiver Winkel $\phi > 0$, genauer den Bereich des herabschlagenden Flügels verschiebt (Abb. 6.13-6.15). Gleichzeitig nähern sich die Schallemissionen beider Propeller mit zunehmender Kavitation einander an mit minimal leiserer Schallabstrahlung des akustisch optimierten Propellers P1889. Dies entspricht der Erwartung, dass der akustische Beitrag der Kavitation alle anderen Beiträge in Größenordnung übersteigt. Dies bestätigt, dass für einen konventionell betriebenen Propeller, bei dem Kavitation in Kauf genommen wird, eine akustische Optimierung mit einer Optimierung des Kavitationsverhaltens gleichzusetzen ist. Dies wird noch einmal untermauert durch die Ergebnisse des Beamforming Algorithmus über die Propelleroberfläche, der den Ort der wesentlichen Schallentstehung im kavitierenden Bereich des herabschlagenden Flügels lokalisiert (Abb. 6.16-6.20).

Da Hauptkeulenweite und Tiefenschärfe des Beamforming Algorithmus Limitierungen

6. Großausführungsmessungen

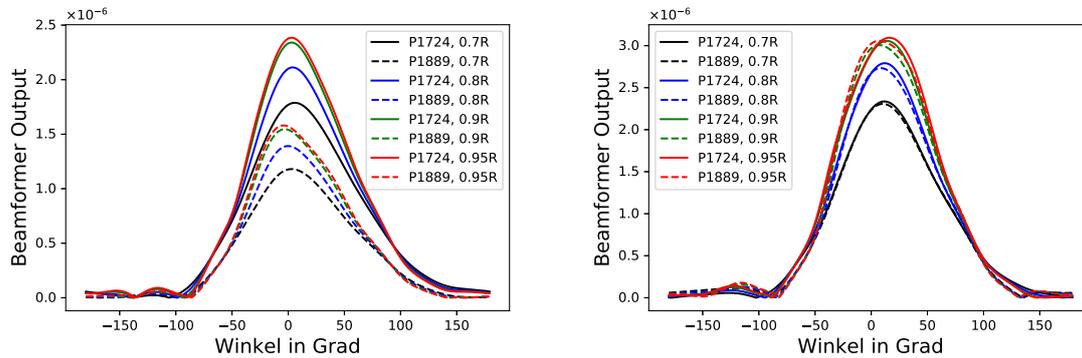


Abb. 6.14: Akustischer Beamformer Output für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ auf verschiedenen Propellerradien für die Propeller P1724 und P1889 in OP3 ($\sigma = 2,5$ (links) und $\sigma = 2,1$ (rechts))

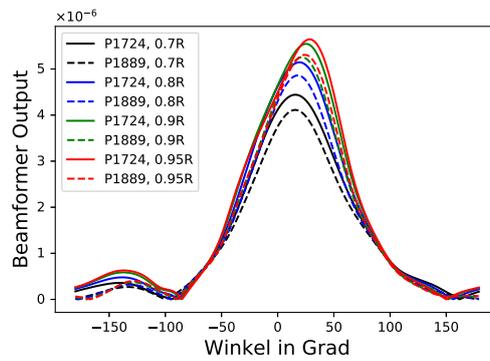


Abb. 6.15: Akustischer Beamformer Output für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ auf verschiedenen Propellerradien für die Propeller P1724 und P1889 in OP3 ($\sigma = 1,7$)

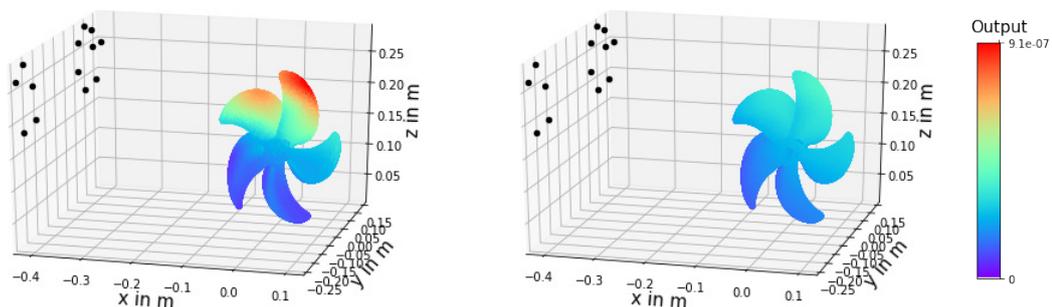


Abb. 6.16: Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 7,0$, kavitationsfrei) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

6. Großausführungsmessungen

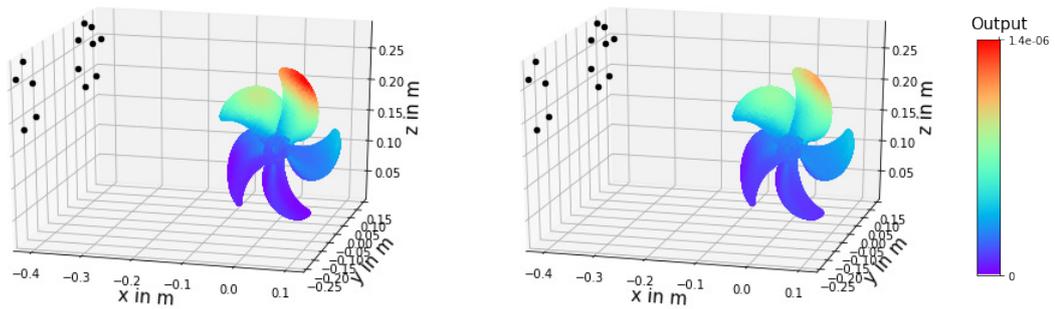


Abb. 6.17: Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 5,0$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

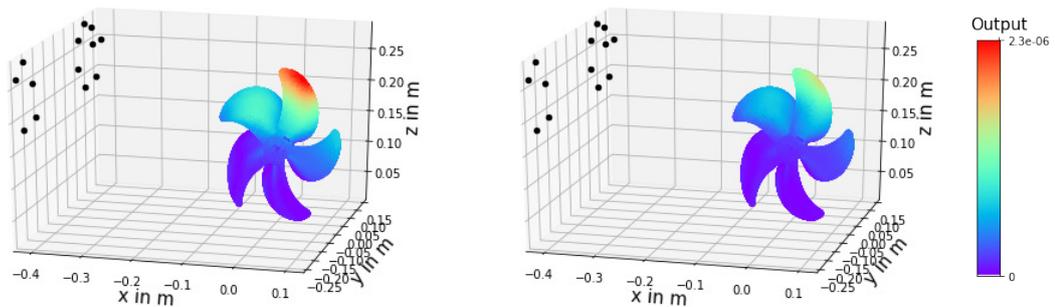


Abb. 6.18: Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 2,5$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

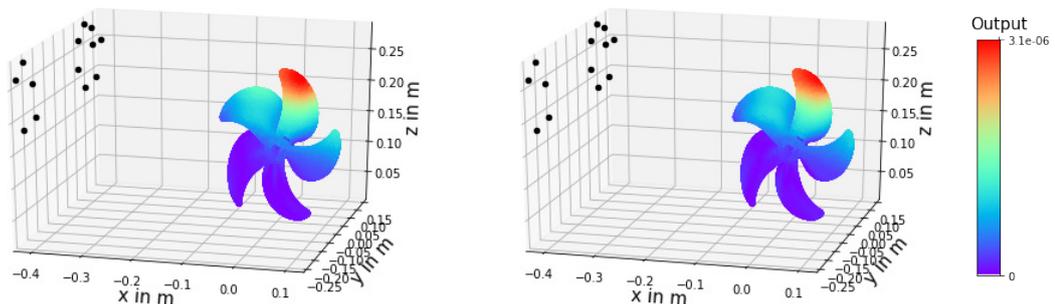


Abb. 6.19: Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 2,1$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

6. Großausführungsmessungen

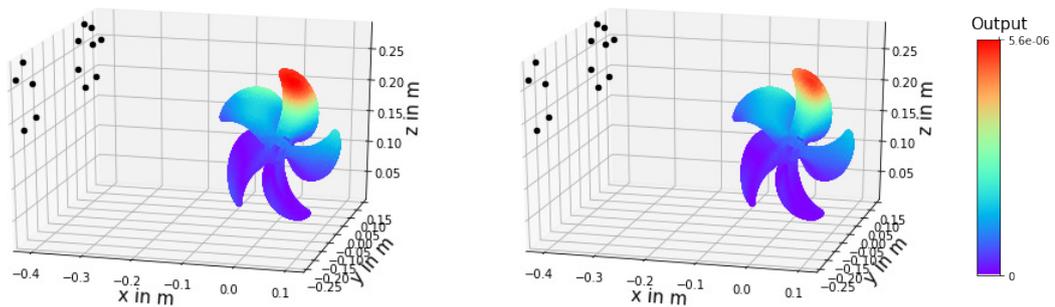


Abb. 6.20: Akustischer Beamformer Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 1,7$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

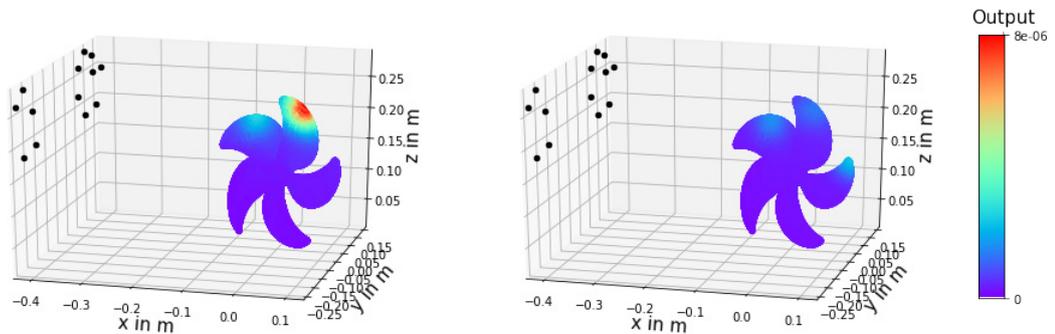


Abb. 6.21: CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 7,0$, kavitationsfrei) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

unterworfen sind, können Dekonvolutionsansätze die räumliche Auflösung signifikant erhöhen. Durch Anwendung des CleanSC Algorithmus werden die Orte der maximalen Schallemissionen gesucht und iterativ geschärft. Dies erlaubt eine detailliertere Eingrenzung der schallemittierenden Propellerbereiche. Eine Darstellung des CleanSC Ergebnisses zeigen die Abb. 6.21 - 6.25.

6. Großausführungsmessungen

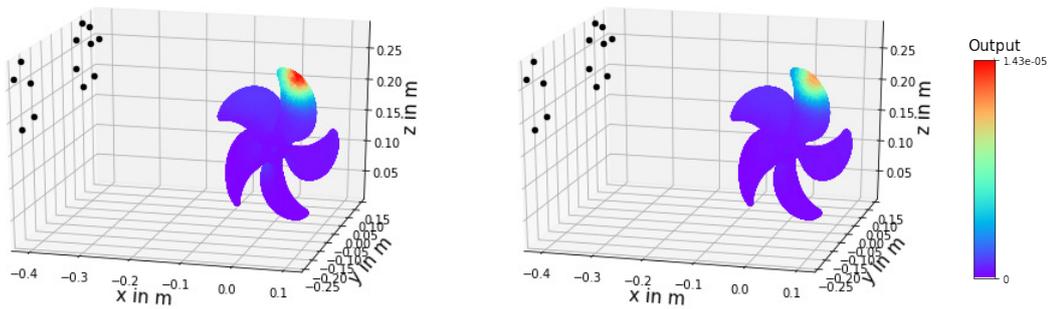


Abb. 6.22: CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 5, 0$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

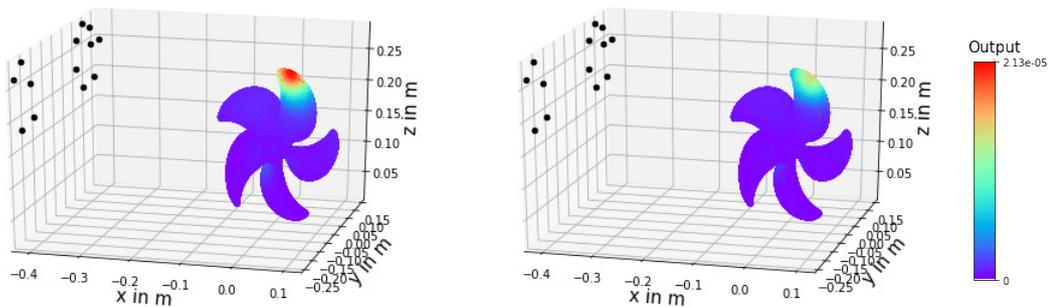


Abb. 6.23: CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 2, 5$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

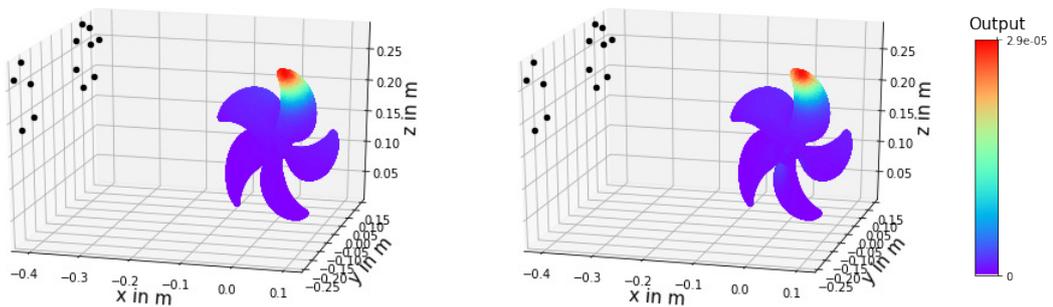


Abb. 6.24: CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 2, 1$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

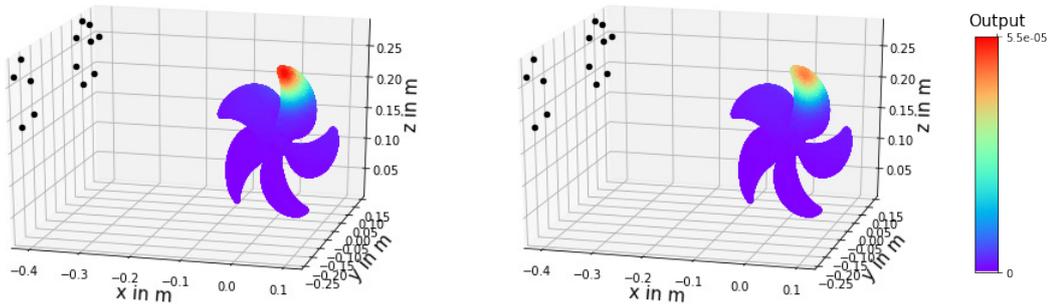


Abb. 6.25: CleanSC Output in Betriebspunkt OP3 ($\sigma = 1, 7$) für $100nZ \leq f \leq 0,5f_s$ für den Referenzpropeller P1724 (links) und den akustisch optimierten Propeller P1889 (rechts)

6.4 Kavitationsklassifikation

Die Klassifikation der Kavitationszustände wurde unter der Prämisse durchgeführt, dass zwischen den einzelnen Propellern und in den einzelnen Versuchsreihen unterschiedliche Kavitationszustände und -ausprägungen herrschen. Die Klassifikation erfolgte unter Anwendung eines Random Forest Classifiers auf dem Audiosignal des Hydrofons Ch. 1. Die Audiodaten wurden mit Hilfe des TKE-Operators gefiltert und von Störgeräuschen bereinigt. Das gefilterte Audiosignal wurde mit einer Waveletpacket Transformation mit Daubechies Wavelets in 64 Frequenzbänder zerlegt und danach in mit einem Rechteckfenster der Länge $t_F = 0.1 s$ und einem Overlap von 0,5 in einzelne Blöcke unterteilt. Ein typisches Bild eines Audioblockes zeigt Abb. 6.26. Auf jedem Frequenzband eines Blockes wurden 20 beliebige statistische Größen berechnet und anschließend normiert, so dass jeder der $t_F = 0,1 s$ langen Audioblocke durch insgesamt 1280 Werte charakterisiert wurde.

Abb. 6.27 zeigt das Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation als Confusion Matrix. Die Confusion Matrix zeigt das Ergebnis des Blindtests des trainierten Random Forest Klassifikators, indem untersucht wird, ob ein vorliegendes Audiosignal korrekt erkannt wird (true positive tp), eine falsches Audiosignal in einer Klasse erkannt wird (false positive fp) oder das Audiosignal fälschlicherweise einer anderen Klasse zugeordnet wird (false negative fn). Die stark besetzte Hauptdiagonale zeigt, dass ein Großteil der Audiosignale korrekt den tatsächlichen Messreihen zugeordnet werden können. Elemente abseits der Hauptdiagonale deuten auf Fehlinterpretationen

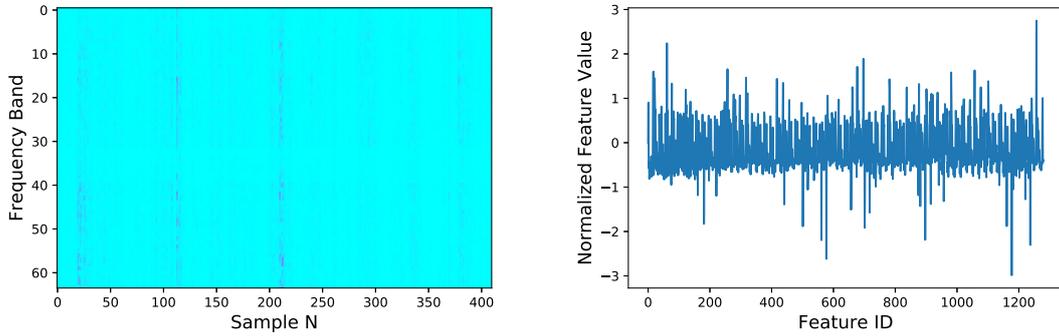


Abb. 6.26: Beispielhaftes Spektrogramm der Wavelet Packet Transformation für ein $t_F = 0,1 s$ langes Audiosegment (links) und darauf berechneter Feature Vektor (rechts)

des Klassifikators hin, deren Ursache gleiche akustische Eigenschaften zwischen den Versuchen sein können. Besonders deutlich können diese Ähnlichkeiten der akustischen Eigenschaften in den Versuchsreihen mit den ID 3-4 bzw. den ID 13-16 beobachtet werden. In diesen Versuchen wurde die Kavitationszahl σ nur leicht variiert, was auch nur leichte Abweichungen des Kavitationszustandes und somit auch nur leichte akustische Unterschiede zur Folge hatte. Weitere Ähnlichkeiten können zwischen den beiden Propellern für OP3 gefunden werden. Die Versuche mit ID 7+8 werden z.B. mit den Versuchen ID 18+19 fehlinterpretiert. Hier wurden für beide Propeller ähnliche Kavitationszahlen untersucht, was auch wieder zu ähnlichen Kavitationszuständen führt. Interessanterweise bestätigt die Klassifikation auch, dass sich die Propeller P1724 und P1889 im kavitationsfreien Betrieb akustisch deutlich voneinander unterscheiden. Alle kavitationsfreien Betriebszustände werden eindeutig ihren Versuchsreihen zugeordnet. Weitere Ähnlichkeiten können in Abb. 6.27 erkannt werden. Die Genauigkeit des trainierten Random Forest Klassifikators mit allen 1280 Features beträgt

$$F_1 = \frac{tp}{tp + 0,5(fp + fn)} = 0,784 \quad (6.7)$$

Zur Identifikation der Prozesse und Frequenzbänder, in denen sich die Versuche unterscheiden bzw. ähneln, erlaubt der Random Forest Klassifikator die Extraktion der Feature Importance, denn nicht alle der 1280 berechneten Features sind für eine eindeutige Klassifikation erforderlich. In Abb. 6.27 sind beispielhaft die zehn wichtigsten Features zur Unterscheidung der Audiosignale aufgelistet. So ist es möglich die zunächst

6. Großausführungsmessungen

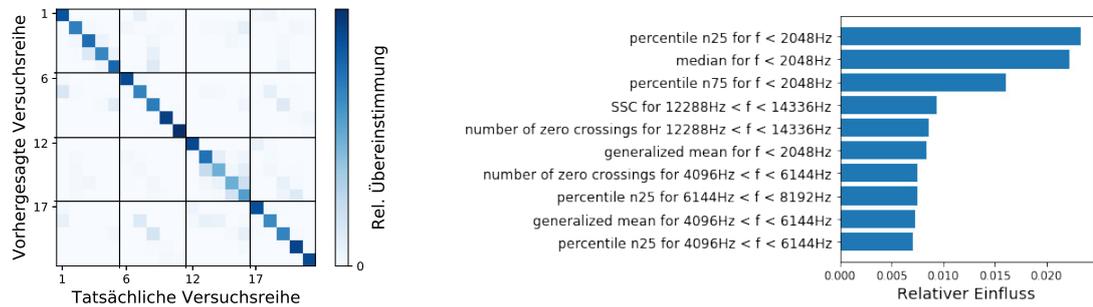


Abb. 6.27: Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation: Confusion Matrix aller durchgeführten Versuche mit $F_1 = 0.784$ (links) und die zehn wichtigsten Statistikgrößen, die eine Unterscheidung der Audiosignale erlauben (rechts)

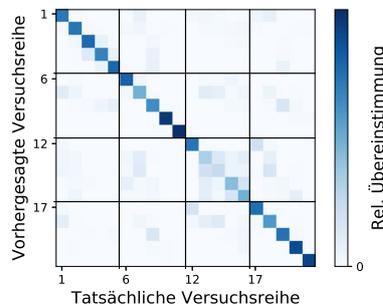


Abb. 6.28: Ergebnis der akustischen Kavitationsklassifikation mit den zehn wichtigsten Features: Confusion Matrix aller durchgeführten Versuche mit $F_1 = 0.706$

beliebig ausgewählten Features auf die relevanten Größen zu reduzieren. Dies ist von besonderem Interesse, wenn a priori keine Informationen zu den zu klassifizierenden Audiosignalen vorliegen. Abbildung 6.28 zeigt das Ergebnis der Klassifikation bei Reduktion der Features von 1280 auf die 10 wichtigsten Parameter. Die Gesamtgenauigkeit beträgt immer noch $F_1 = 0.706$, allerdings sind schon deutliche Fehlklassifikationen für die Messungen an P1889, OP2 (ID 13-16) festzustellen. So können über geeignete Featureselektion Ähnlichkeiten und Abweichungen zwischen den Kavitationssignalen identifiziert werden.

7 Verwertung der Ergebnisse

Die Verwertung der Ergebnisse fand durch den Ausbau der Lehrinhalte statt sowie durch die Erweiterung des Forschungsspektrums an den Schnittstellen von Schiffbauforschung und digitaler Signalverarbeitung statt. Durch die Forschungsergebnisse konnten den Studierenden neue Themeninhalte in den Bereichen der schiffbaulichen Hydroakustik und Kavitationsklassifikation angeboten werden. Die Ergebnisse des beantragten Vorhabens wurden im Rahmen von Abschlussarbeiten den Studierenden zugänglich gemacht und damit deren methodische Fähigkeiten auf dem Gebiet der hydroakustischen Kavitationsklassifikation gefördert. Studierende wurden in Form von studentischen Arbeiten an die Problemstellung herangeführt. Der für die Bearbeitung des Vorhabens eingestellte Wissenschaftliche Mitarbeiter konnte sich durch die Qualifizierung in dem Themengebiet wissenschaftlich etablieren. Durch seine Anschlussbeschäftigung im Bereich Lärmschutz strahlen die Ergebnisse in andere Themenbereiche aus und finden in der Praxis umfangreiche Anwendung. Die Ergebnisse wurden auf internationalen Konferenzen präsentiert und eröffneten Möglichkeiten zur Zusammenarbeit mit anderen Partnern der maritimen Industrie.

8 Gegenüberstellung des Projektergebnisses zu den vorgegebenen Zielen

Das Globalziel des Vorhabens, die Entwicklung von Verfahren zur akustischen Lokalisation und Klassifikation von kavitationsinduziertem Lärm an Schiffspropellern wurde vollumfänglich erfüllt. Es wurden die theoretischen Verfahren hergeleitet um die räumlich verteilten akustischen Quellen der Kavitation am Schiffspropeller messtechnisch zu erfassen und zu klassifizieren. Dazu wurden verschiedene Beamforming Verfahren implementiert um unterschiedlichen Gegebenheiten der Messanordnung Rechnung zu tragen. Es wurden Verfahren zur Störgeräuschunterdrückung entwickelt, die harmonische Komponenten des Antriebs nahezu vollständig aus dem Audiosignal entfernen und das Kavitationssignal extrahieren. Mit verschiedenen Ansätzen des maschinellen Lernens konnte das Kavitationssignal mit einer Genauigkeit von über 90% klassifiziert werden. Dabei leisteten die entwickelten Verfahren zusätzliche Ansätze zur Identifikation der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der frequenzabhängigen Signaleigenschaften des Kavitationslärms und bieten somit wertvolle Werkzeuge zum tieferen Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen der Propellerkavitation. Die entwickelten Verfahren wurden in umfangreichen Messkampagnien am Tragflügel und am drehenden Propeller validiert und ihre Funktionsfähigkeit bestätigt. Trotz erschwelter Bedingungen durch die COVID-19 Pandemie, die einen kompletten Stopp der Reisetätigkeit nach sich zog und somit die Großausführungsversuche an Bord unmöglich machte, konnte dank der flexiblen und zielgerichteten Arbeit der Projektpartner ein äquivalentes und realitätsnahes Versuchsprogramm im Modellmaßstab umgesetzt werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind eine Reihe neuartiger Methoden entwickelt worden, die die Methoden der Schiffbauforschung erheblich erweitert haben. Bereits in den Erprobungsmessungen konnten eine Vielzahl unbekannter Mechanismen der Kavitation aufgedeckt werden, die für zukünftige Forschungsfelder von besonderer Bedeutung sein werden.

9 Veröffentlichungen

Krüger C., Krüger F. and Wolter A.: Pattern recognition in hydroacoustic cavitation measurements. Sixth International Symposium on Marine Propulsors, 2019

Krüger C., Krüger F. and Spors S.: Automatic classification of cavitation states using hydroacoustic measurements. Ship Technology Research, Under Review

Literaturverzeichnis

- [1] Thomas F Brooks and William M Humphreys. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (damas) determined from phased microphone arrays. *Journal of Sound and Vibration*, 294(4-5):856–879, 2006.
- [2] James F Kaiser. On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal. In *International conference on acoustics, speech, and signal processing*, pages 381–384. IEEE, 1990.
- [3] Daniel Król, Anita Lorenc, and Radosław Świcęński. Detecting laterality and nasality in speech with the use of a multi-channel recorder. In *2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 5147–5151. IEEE, 2015.
- [4] Zebb Prime and Con Doolan. A comparison of popular beamforming arrays. *Proceedings of the Australian Acoustical Society AAS2013 Victor Harbor*, 1:5, 2013.
- [5] Hiroshi Sakamoto and Mikio Arie. Vortex shedding from a rectangular prism and a circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 126:147–165, 1983.
- [6] Ennes Sarradj. Three-dimensional acoustic source mapping with different beamforming steering vector formulations. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012, 2012.
- [7] Pieter Sijtsma. Clean based on spatial source coherence. *International journal of aeroacoustics*, 6(4):357–374, 2007.
- [8] A Vogel, W Lauterborn, and R Timm. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 206:299–338, 1989.