

Entwurf geräuschoptimierter Propeller für Mehrschrauber

Design strategies for noise optimized propellers for multiple screw ships

Dr. habil. **Reinhard Schulze**
SVAtech GmbH, Potsdam

Summary:

Due to the sufficiently good accuracy and very high computing speed, potential theoretical propeller calculation methods are at the focus of the SVA propeller designs. These fast methods make it possible to use complete mathematical optimization methods for the propeller design in the sense of inverse calculation methods. The SVA programs VORTEX and VTXopt are available for this purpose. In order to minimize the noise radiation of the propeller, the optimality criteria are chosen in such a way that a minimum pressure fluctuation level and a largely delayed cavitation inception for sheet-, tip-vortex- and hub-vortex-cavitation will be realized. Finally, a final evaluation of the propeller designs is carried out using CFD methods. The unified approach to the production of pressure fluctuations and broadband noise combined with extensive experience in noise measurements for full-scale enables the SVA to provide good noise prognoses from measurements in the model basin and cavitation tunnel. In addition, new aspects of noise scaling are discussed. On the basis of a theoretically well-established system of conditions for the coherent and incoherent components of multiple signal sources, it is also possible to deduce from the component-by-component measurements to the overall acoustic signature of a multiple-screw vessel. In addition, questions of the Reynolds-number correction of the open water characteristics, the propulsion evaluation and the propulsion prognosis of multiple-screw vessels as well as fatigue of the propellers are discussed.

Zusammenfassung:

Auf Grund der hinreichend guten Genauigkeit und sehr hohen Rechengeschwindigkeit stehen potenzialtheoretische Berechnungsmethoden im Mittelpunkt der SVA-Propellerentwürfe. Durch diese schnellen Methoden wird es möglich, vollständige mathematische Optimierungsmethoden im Sinne inverser Berechnungsmethoden umfassend für den Propellerentwurf nutzbar zu machen. Hierzu stehen die SVA-Programme VORTEX und VTXopt zur Verfügung. Für die Minimierung der Geräuschabstrahlung des Propellers werden dabei die Optimalitätskriterien so gewählt, dass ein minimales Druckschwankungsniveau und ein weitestgehend verzögerter Kavitationseinsatz für Schicht- Spitzenwirbel- und Nabenwirbelkavitation realisiert wird. Eine abschließende Bewertung der Propellerentwürfe erfolgt schließlich mittels CFD Methoden. Die vereinheitlichte Betrachtungsweise der Erzeugung von Druckschwankungen und breitbandigen Geräuschen in Verbindung mit umfangreichen Erfahrungen mit Geräuschmessungen in der Großausführung ermöglicht es der SVA gute Geräuschprognosen aus Messungen in der Schlepprinne und im Kavitationstunnel abzuleiten, wobei auch auf neue Aspekte der Skalierung eingegangen wird. Auf der Basis eines theoretisch gut untermauerten Systems von Bedingungen für die kohärenten und inkohärenten Anteile von mehreren Signalquellen gelingt es, aus den komponentenweise vorgenommenen Messungen auf die akustische Gesamtsignatur eines Mehrschraubenschiffes zu schließen. Ergänzend wird noch auf Fragen der Reynoldszahlkorrektur der Freifahrtmessungen, der Propulsionsauswertung und Prognose bei Mehrschraubenschiffen sowie Festigkeit der Propeller eingegangen.

1 Einleitung

Die Idee, die notwendige Antriebsleistung ein oder mehrerer Motoren auf mehrere Propeller aufzuteilen, ist nicht neu. Bereits die Dampfer der Olympic Klasse (Titanic) hatten 3 Propeller, vgl. Bild 1.

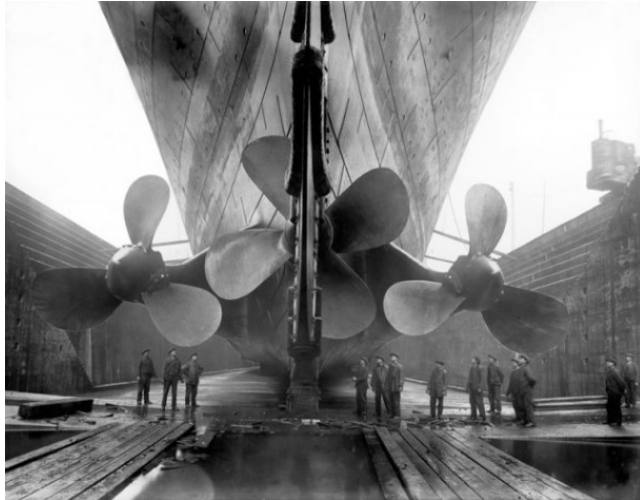
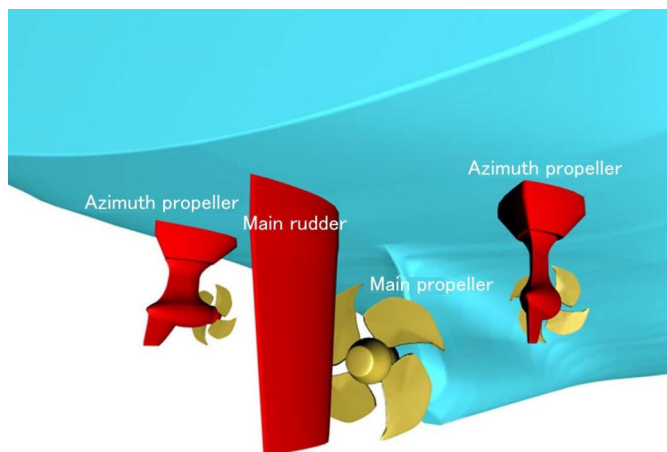


Bild 1: Propulsionssystem der „Titanic“ (<http://thescuttlefish.com/2011/11/titanics-screws/>)

In den letzten Jahren war eine starke Entwicklung der Komplexität der Propulsionssysteme von großen Container-Schiffen, ROPAX-Fähren, Marine-Schiffen, großen Yachten und Kreuzfahrtschiffen zu verzeichnen. Begleitet wurde diese Entwicklung auch durch die umfangreiche Anwendung von Pod-Antrieben. Eine Beispielanwendung ist in Bild 2 dargestellt, bei dem ein Verstellpropellerantriebssystem durch zwei azimuthal steuerbare Pod-Antriebe (Assistenz-Systeme) flankiert wird.



**Bild 2: Komplexes Antriebssystem für eine ROPAX-Fähre [1],
(Ferry Osaka II/Ferry Kitakyushu II)**

Umgekehrt wurden auch Schiffe projiziert, die zwei konventionelle Antriebsstränge auf Basis von FPP bzw. CPP Propulsionssystemen als Wing-Propeller und mitschiffs einen azimuthal steuerbaren Pod-Antrieb (Center-Pod) hatten. Der Pod-Antrieb konnte dann seinerseits wieder als Zugpropeller- oder Twinpropellersystem realisiert sein. Durch Kombination von konventionellen Antriebssystemen und Pod-Antrieben auf einer Linie entstanden auch CRP – Propulsionssysteme. Neben den Vorgaben zur Reduktion des Treibstoffverbrauches aus Umweltschutzgründen gewannen zunehmend Fragen der Reduktion der Wasserschallabstrahlung an Bedeutung. Dies

fand insbesondere Niederschlag in den IMO-Richtlinien [2] die wiederum Eingang fanden in die Planungen der Werften und Reedereien, vgl. z.B. [3]. In den IMO-Richtlinien [2] wird auf die besondere Bedeutung der Propellereigenschaften auf die Wasserschallabstrahlung eingegangen. Die Rolle der Kavitation als eine der wesentlichsten Ursachen für eine breitbandige Schallabstrahlung wird hervorgehoben (Kapitel 4 und 7). Es wird betont, dass Berechnungsverfahren aller Ebenen, wie Lifting Surface Methoden, CFD Methoden, FEM und BEM Verfahren für den Propellerentwurf und die Berechnung der Propellereigenschaften herangezogen werden sollten. Andererseits sollten alle Prognosen der propellerbedingten Wasserschallabstrahlung durch Versuche im Schlepptank und dem Kavitationstunnel validiert werden. Der auch in [2] angedeuteten Entwurfsstrategie für Propeller folgend, werden hier zunächst die Möglichkeiten der Anwendung einfachster Propellerberechnungsverfahren in Form von sogenannten Polynomkoeffizienten auf den wirkungsgradoptimalen Entwurf von Mehrschraubern angewendet. Danach wird die Entwurfsphilosophie für geräuschoptimierte Propeller auf Basis von Lifting Surface Methoden dargestellt. Vorteilhaft für den Entwurf von geräuschoptimierten Propellern innerhalb einer Versuchsanstalt ist die Möglichkeit der iterativen Verbesserung der Methoden auf der Basis von akustischen Messungen in dem Schlepptank und dem Kavitationstunnel. Auf die Fragen nach der Berücksichtigung von unvermeidlichen Störgeräuschen bei den akustischen Messungen in beiden Versuchseinrichtungen wird näher eingegangen. Die nicht unproblematische Skalierung der akustischen Messungen im Modellmaßstab auf die akustischen Erscheinungen in der Großausführung wird erläutert.

2 Realisierung von Propellerentwürfen mit hohen Akustikforderungen

In der SVA Potsdam GmbH werden seit langem eigene Vorentwurfsverfahren auf Basis der Wageninger Polynomkoeffizienten für die Propellerauslegung herangezogen. In der Vergangenheit wurden diese Verfahren auch auf selbst entwickelte Polynomkoeffizienten für andere Klassen von Propulsionssystemen erweitert [4]. Mit den vereinfachenden Annahmen, dass z.B. für einen 3-Schrauber Symmetriebedingungen erfüllt sind, d.h. insbesondere die Wirkung der beiden äußeren Wing-Antriebssysteme wirken gleich auf das Schiff und dass die Propulsionskoeffizienten für alle drei Antriebssysteme unabhängig vom jeweils anderen Propulsionssystem sind, dann lassen sich auf der Basis von (Wageninger) Polynomkoeffizienten auch Vorentwurfsverfahren für 3-Schrauber realisieren. Das Programm TripleScrewOprRS-2020 realisiert auf diesem Wege einen Vorentwurf für alle 3 (Wageninger) Propeller für ein Dreischraubenschiff derart, dass für jede Flügelzahlkombination nach dem höchsten Wirkungsgrad optimiert wird. Als Optimierungsverfahren wird dabei eine Kombination aus determiniertem Suchverfahren und einem Newtonähnlichen Verfahren eingesetzt. Für einen (quasi-) symmetrischen 3-Schrauber treten dann bei fest vorgegebenen Flächenverhältnissen 7 Unbekannte auf die jeweils durch gewisse Grenzen aus Erfahrungswerten eingeschränkt werden. Dann wird bei jeder Flügelzahlkombination ($Z = 3$ bis $Z = 7$) eine optimale Drehzahl und Durchmesserkombination und eine erreichbare Geschwindigkeit berechnet. In Tabelle 1 steht der Index 2 für die beiden identischen Wing-Propeller, die Drehzahlen sind in [rpm] angegeben und die berechneten Durchmesser in [m]

Z1	Z2	VS	D1	n1	P/D1	D2	n2	P/D2	diffFT[N]	diffFP1[W]	diffFP2[W]	etaD
3	3	23.214	5.6822	120.99	1.3167	5.8611	124.26	1.3167	0.10205E-05	0.10534E-06	0.54805E-07	0.60829
3	4	23.373	5.6944	120.81	1.3167	5.9887	118.55	1.3167	0.47874E-06	0.34886E-07	0.27494E-09	0.62354
3	5	23.406	5.7692	118.52	1.3167	5.8675	120.20	1.3167	0.29102E-05	0.14363E-07	0.52658E-07	0.62672
3	6	23.408	5.6947	120.85	1.3167	5.9784	115.40	1.3167	0.83836E-07	0.18292E-07	0.17080E-08	0.62687
3	7	23.318	5.7506	118.97	1.3167	5.8056	118.90	1.3167	0.12921E-03	0.90929E-07	0.55202E-06	0.61822
4	3	23.296	5.8084	115.55	1.3167	5.8642	124.32	1.3167	0.80644E-05	0.54468E-06	0.17508E-07	0.61612
4	4	23.383	5.5998	122.21	1.3167	5.8611	122.31	1.3167	0.84321E-06	0.15036E-07	0.27170E-07	0.62449
4	5	23.532	5.9145	123.82	1.1500	5.9168	118.97	1.3167	0.31622E-09	0.68937E-09	0.10857E-08	0.63911
4	6	23.486	5.9171	123.67	1.1500	5.7507	122.20	1.3167	0.41952E-07	0.10101E-06	0.28652E-06	0.63456
4	7	23.453	5.9166	123.65	1.1500	5.9229	115.75	1.3167	0.56596E-07	0.18721E-07	0.13979E-07	0.63134
5	3	23.389	5.8678	123.30	1.1500	5.8981	123.47	1.3167	0.49658E-07	0.10749E-07	0.70135E-09	0.62503
5	4	23.496	5.8549	123.85	1.1500	5.8609	122.51	1.3167	0.18968E-05	0.29036E-05	0.30560E-05	0.63552
5	5	23.561	5.8671	123.55	1.1500	5.9174	119.00	1.3167	0.32194E-07	0.25339E-09	0.90334E-09	0.64197
5	6	23.514	5.8632	123.61	1.1500	5.7500	122.27	1.3167	0.10720E-06	0.14832E-08	0.10563E-07	0.63729
5	7	23.482	5.8549	123.83	1.1500	5.9359	115.43	1.3167	0.46733E-09	0.52056E-05	0.14341E-06	0.63413
6	3	23.413	5.9420	119.46	1.1500	5.8981	123.51	1.3167	0.75253E-06	0.22976E-08	0.12536E-07	0.62735
6	4	23.440	5.5833	119.64	1.3167	5.8613	122.40	1.3167	0.16371E-06	0.84022E-09	0.49259E-10	0.63004
6	5	23.581	5.9249	120.20	1.1500	5.9167	119.05	1.3167	0.25429E-07	0.96776E-07	0.63828E-08	0.64397
6	6	23.535	5.9231	120.19	1.1500	5.7500	122.31	1.3167	0.11662E-07	0.17082E-06	0.37665E-06	0.63934
6	7	23.502	5.9098	120.55	1.1500	5.9353	115.48	1.3167	0.24459E-05	0.98970E-08	0.38329E-07	0.63608
7	3	23.401	5.9166	118.85	1.1500	5.8984	123.48	1.3167	0.27872E-06	0.53471E-08	0.10833E-08	0.62626
7	4	23.537	5.9208	118.90	1.1500	5.9706	119.36	1.3167	0.27953E-05	0.18816E-08	0.49688E-08	0.63961
7	5	23.559	5.8056	122.48	1.1500	5.9167	119.01	1.3167	0.16149E-07	0.49243E-08	0.27111E-08	0.64174
7	6	23.572	5.9352	118.52	1.1500	5.9743	115.79	1.3167	0.68996E-08	0.64265E-09	0.66681E-10	0.64308
7	7	23.491	5.8881	119.83	1.1500	5.9360	115.44	1.3167	0.69865E-07	0.16012E-06	0.10777E-07	0.63508

Tabelle 1: Ergebnisprotokoll einer Berechnung der optimalen Drehzahl-Durchmesser-Kombination für einen 3-Schrauber mittels des Programmes TripleScrewOprRS-2020

Die Spalten die mit „diff“ kenntlich gemacht wurden, geben den erreichten absoluten Rechenfehler an. Es ist nicht davon auszugehen, dass es immer eine einzige eindeutige Lösung gibt, sondern es kann durchaus vorkommen, dass es mehrere Lösungen mit gleich guten Propulsionseigenschaften geben kann. Vom Prinzip her kann diese Vorgehensweise auch für andere (mehr als 3) Mehrschrauber übertragen werden, wobei natürlich die Anzahl der Unbekannten steigt. Die Anzahl der Unbekannten kann andererseits durch Fixierung weiterer Größen (Durchmesser oder Drehzahlen) reduziert werden. Die weitere Entwurfsmethodik wird im Wesentlichen von einem Potenzialtheoretischen Propellernachrechen- und Optimierungsverfahren (VORTEX2010 und vtxOPT2010) bestimmt. Im zuvor skizzierten Vorentwurfsprozess konnten bereits wichtige Informationen zur optimalen Flügelzahl und zu den optimalen Durchmesser- und Drehzahlverhältnissen an einem Mehrschrauber gewonnen werden. Das Programm VORTEX2010 [5 und 6] berechnet die quasistationären Eigenschaften von Propellern mittels der Tragflächenmethode. In Zusammenarbeit mit Postprozessoren zur grafischen Darstellung berechnet VORTEX2010 die Freiwasserkennlinie, die Druckverteilung, das Kavitationsverhalten, die Kräfte und Momente sowie das Geschwindigkeitsfeld um den Propeller. Wird ein instationärer Zuströmung definiert, berechnet VORTEX2010 in Zusammenarbeit mit dem Postprozessor CAVILOT das quasistationäre Kavitationsverhalten im Nachstromfeld und in Zusammenarbeit mit dem Postprozessor VTXFORCE die auf die Flügel und den Propeller einwirkenden Kräfte und Momente (body forces). Die Algorithmen, die auf den Vortex-Lattice-Verfahren basieren, führen im Allgemeinen zu Programmen mit kurzen Rechenzeiten und einer ausreichenden Genauigkeit. Im Gegensatz zu [7] und [8] verwendet VORTEX2010 vier Parameter für eine Reibungskorrektur. Alle Parameter für die Reibungskorrektur werden durch ein Ensemble von Messungen mit Modellpropellern optimal geschätzt und in funktioneller Abhängigkeit zu den Hauptdaten der Propeller gestellt. Dies gewährleistet eine sehr hohe Genauigkeit, auch für Propeller mit einer unkonventionellen Geometrie. Für diese Parameterschätzung steht ein eigenes Programm vtxVPA2010 zur Verfügung. Für die meisten Anwendungen ist die quasi-stationäre Analyse ein guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit der Ergebnisse. Das Programmpaket VORTEX2010 ist in ein Bündel von Programmen unterteilt. Alle Programme können eigenständig verwendet werden. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Programmen haben reine ASCII-Dateistruktur und somit können alle Programme für verschiedene Computerplattformen implementiert werden bzw. es ist ein plattformunabhängiger Austausch von Daten möglich. Die Programme für das Postprocessing stellen die Ergebnisse graphisch dar und speichern die Grafikdaten als BMP- GIF- oder PCX-Datei für Bitmap-Darstellungen (DENPLOT, PREPLOT, CAVILOT, VELPLOT, WAKPLOT) oder als HPGL-Datei für Vektorplots (PFFEDIT, PFFFEST, VORTEX, VTXPLOT, SELFPROP, PROGNOSES).

Für die Beschreibung der Propellergeometrie wurde die sogenannte PFF-Dateistruktur verwendet, d.h. eine offene ASCII-Dateiarchitektur. Zusätzliche geometrische Informationen wie Daten für die Nabengeometrie können in der PFF-Datei enthalten sein. Die Steuerdaten für alle Programme werden durch interaktive Dialoge generiert und in der VXI-Datei getrennt gespeichert. Im quasi-instationären Fall muss die zwei- oder dreidimensionale Zuströmung durch eine ASCII Datei im WAK-Format beschrieben werden. Das Propeller-Design-Tool vtxOPT2010 baut als Optimierungsverfahren (inverse Methode) auf dem numerischen Kern von VORTEX2010 auf. Die Anforderungen an das Propellerdesign, wie der Freifahrtwirkungsgrad und die erreichbaren Kavitationseigenschaften im Betriebspunkt definieren eine Gewichtsfunktion, die durch numerische Optimierungstechniken minimiert werden kann. Das Vorgehen des Propeller-Optimierungstools vtxOPT2010 sei beispielhaft wie folgt erläutert: Werde die Propellergeometrie G durch die folgenden diskreten Funktionen in Abhängigkeit vom Radius r vereinfachend durch folgende 66 Zahlen beschrieben (Für eine vollständige Beschreibung sind natürlich dann noch Profilinformatoren auf den Radienschnitten notwendig):

Radius	Chord	Pitch	Skew	Rake	Camber	Thickn.
47.813	68.825	.51062	-1.0039	6.3506	-2.8453	18.665
63.750	74.558	.75384	-5.3262	6.4011	-.21157	15.945
85.000	77.883	.90690	-7.4634	7.1209	1.5324	13.379
106.25	78.066	.98653	-7.3292	8.4464	1.7901	11.060
127.50	76.913	1.0241	-6.3563	10.310	1.7536	9.0279
148.75	75.882	1.0007	-4.4947	12.644	1.7323	7.2598
170.00	74.561	.92955	-1.1436	15.385	1.6623	5.6895
191.25	71.663	.81071	3.8820	18.464	1.3484	4.2351
201.88	69.698	.73347	7.4199	20.110	.47569	3.5669
207.19	68.156	.68036	9.5836	20.957	-.28499	3.5825
212.50	66.009	.61324	12.189	21.816	-1.4100	3.9586

Tabelle 2: Beschreibung einer Propellergeometrie durch eine Matrix G

Dann kann das Propellerdesignproblem durch folgende Optimierungsaufgabe beschrieben werden. Werde das Funktional f so definiert, dass

$$f(G)=f(G, J^*, \eta_0(J^*), \sigma_n(J^*), K_Q(J^*)) \rightarrow \text{Min (über alle bzw. gewisse Geometrien } G) \quad (1)$$

die Werte von f möglichst klein werden, wenn für vorgegebenen Entwurfsfortschrittsgrad J^* und Leistungsbeiwert $K_Q(J^*)$ (entsprechend der Leistungsaufnahme im Betriebspunkt J^*) der Wirkungsgrad $\eta_0(J^*)$ maximal und die Kavitationszahl $\sigma_n(J^*)$ minimal (bzw. unterhalb eines vorgegebenen Wertes liegt) sind, dann liegt eine im Sinne des definierten Funktional „optimale“ Propellergeometrie vor. Um den Aufwand möglichst klein zu halten, d.h. auch die notwendigen Rechenzeiten klein zu halten, ist es sinnvoll sich bei der Optimierung nur auf die „hydrodynamisch wichtigsten“ Propellergrößen zu beschränken. In vielen Fällen reicht es dann dazu aus, sich auf die Optimierung der Steigungs- und Wölbungsverteilung zu beschränken. Überdies ist es sinnvoll, die radialen Verteilungen obiger Propellergrößen durch analytische Ausdrücke (z.B. Polynome 3 bis 5. Grades) zu approximieren. Auf diesem Wege werden dann auch möglichst glatte Propelleroberflächen erhalten. Für die Lösung des eigentlichen Optimierungsproblems wurden im Programm vtxOPT2010 zwei Algorithmen implementiert: Ein weitestgehend global konvergentes mehrdimensionales determiniertes Suchverfahren nach Gablonski und ein schnell aber ggf. nur lokal konvergentes Newton-ähnliches Verfahren (Davidon-Fletcher Powell). Das Newton-ähnliche Verfahren ist überlinear konvergent und damit relativ schnell (aber nur wenn eine

hinreichend gute Startnäherung bekannt ist). Das determinierte Suchverfahren ist nur linear konvergent und damit relativ langsam aber dafür wird i.A. nur eine grobe Näherungslösung benötigt. In vtxOPT2010 können beide Verfahren geeignet kombiniert werden, so dass mit dem Suchverfahren begonnen wird und danach auf das Newtonähnliche Verfahren umgeschaltet werden kann. Praktisch läuft die Optimierung so ab, dass mit einer Startgeometrie G_0 mittels VORTEX2010 (genauer mit dem Kern von VORTEX2010) die globalen Propellergrößen $\eta_0(J^*), \sigma_n(J^*), K_Q(J^*)$ berechnet werden und dann iterativ mittels vtxOPT2010 eine neue („bessere“) Propellergeometrie G_1 ermittelt wird. In vielen Fällen reichen dann ca. 50 solche Iterationsschritte aus um eine hinreichend gute (nach obigem Kriterium) Propellergeometrie zu erhalten. Für einen im homogenen Nachstromfeld arbeitenden Propeller würde diese Vorgehensweise auch zu Vermeidung von Kavitation führen, vorausgesetzt die Randbedingungen für die Kavitationszahl wurden geeignet gewählt. Für einen im Nachstrom des Schiffes arbeitenden Propeller – insbesondere beim Einschrauber bzw. beim Centerantrieb eines 3-Schraubers – genügt diese Betrachtung nicht. Lokal arbeiten die verschiedenen Bereiche des Propellerflügels in sehr unterschiedlichen Zustrombedingungen. Deswegen wurde die Formulierung des Minimumproblems (1) dahingehend erweitert, dass an drei verschiedenen Betriebszuständen (Fortschrittsgraden) Beschränkungen für die Kavitationszahlen vorgegeben werden können. Dies soll an Hand des Bildes 3 erläutert werden.

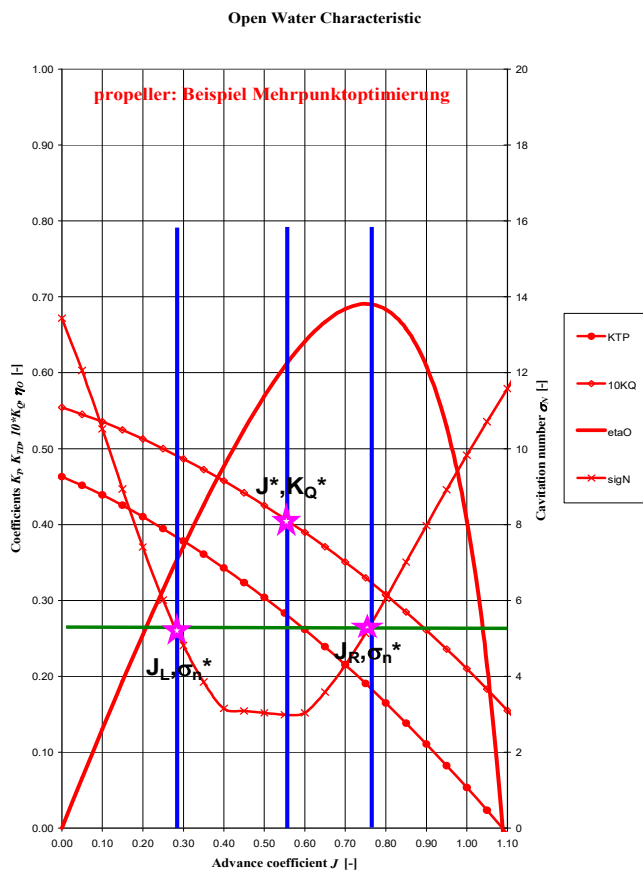


Bild 3: Formulierung der Randbedingungen für einen kavitationsfreien Betrieb im inhomogenen Nachstromfeld.

Das Funktional (1) wird durch die Aufnahme von zusätzlichen Beschränkungen für die Kavitationszahlen an den Betriebspunkten J_L und J_R erweitert. Dadurch vergrößert sich natürlich der Rechenaufwand, weil die hydrodynamischen Eigenschaften nicht nur an einem Punkt, sondern nun an drei Punkten berechnet werden müssen.

Auf diesem Wege gelingt es – wenn es überhaupt physikalisch möglich ist – einen kavitationsfreien Propeller im Nachstrom eines Schiffes zu entwerfen und eine der Grundvoraussetzungen entsprechend [2] für einen geräuscharmen Antrieb eines Schiffes zu realisieren. Für einen Mehrschrauber sind dann für jeden Antrieb einzeln die Propeller entsprechend ihren vorausgewählten Betriebssituationen zu optimieren. Bei Verwendung von Pods sind dann noch die Interaktionen des Propellers mit dem Gehäuse zu berücksichtigen (vor und nach der eigentlichen Optimierung). Im Anschluss an diesen Optimierungsprozess muss dann entschieden werden, ob weitere Rechnungen zur Abschätzung der Propellereigenschaften, wie Abschätzung der Druckschwankungen, CFD - Rechnungen zur Feinanalyse der Propeller- und Schiffsumströmung sowie FE - Rechnungen zur Eigenwertanalyse zur Einschätzung niederfrequenter Propellervibrationen (Singen) und zur Festigkeit realisiert werden und wann in die Testung der Antriebssysteme im Schlepptank bzw. im Kavitationstunnel übergegangen wird. In Bild 4 wird ein Beispiel eines Propellers gegeben, der mittels obiger Optimierungstechnik als geräuscharmer Propeller entworfen wurde.



Bild 4: Propeller des FRV „Solea“ der Fassmer Werft

3 Wasserschallmessungen in der Schlepprinne und dem Kavitationstunnel der SVA Potsdam GmbH

Seit 2007 betreibt die SVA Potsdam GmbH ein Hydrofonarray mit 16 Hydrofonen zur akustischen Vermessung von Schiffmodellen in der Schlepprinne [9] und [10]. Bild 5 zeigt eine Prinzipdarstellung.

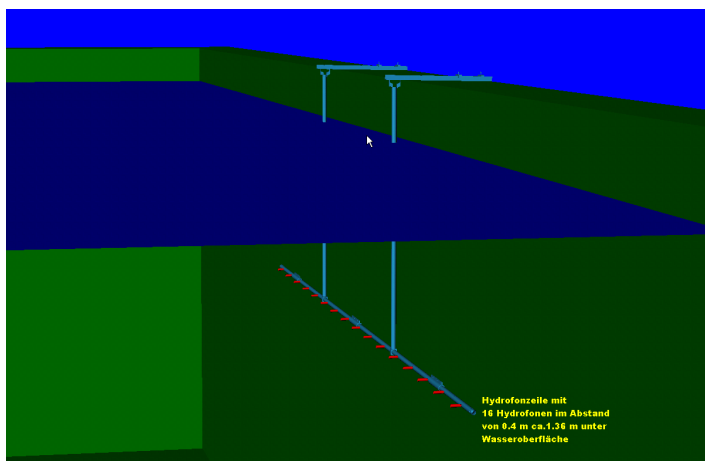


Bild 5: Prinzipdarstellung des Hydrofonarrays in der Schlepprinne der SVA Potsdam

Da in der Schlepprinne keine Kavitationsähnlichkeit hergestellt werden kann, beschränken sich diese akustischen Messungen auf Schiffs- und Propellergeräusche im kavitationsfreien Betrieb. Zur Ermittlung des Quellortes des Schalles (Bug, Heck bzw. Propeller) wird auf die Lokalisierungsprinzipien des Beamformings [12] zurückgegriffen. Die theoretische Wirkungsweise in Verbindung mit der Auswertesoftware und praktische Erfahrungen sind in [11] beschrieben. Grundlage der 64-Bit Auswertesoftware CameraHP_RS2020_64 ist ein Beamforming der Signale im Zeitbereich. Beispielhaft sei in Bild 6 die Wirkung dieses Hydrofonarrays in Verbindung mit der Auswertesoftware beschrieben.

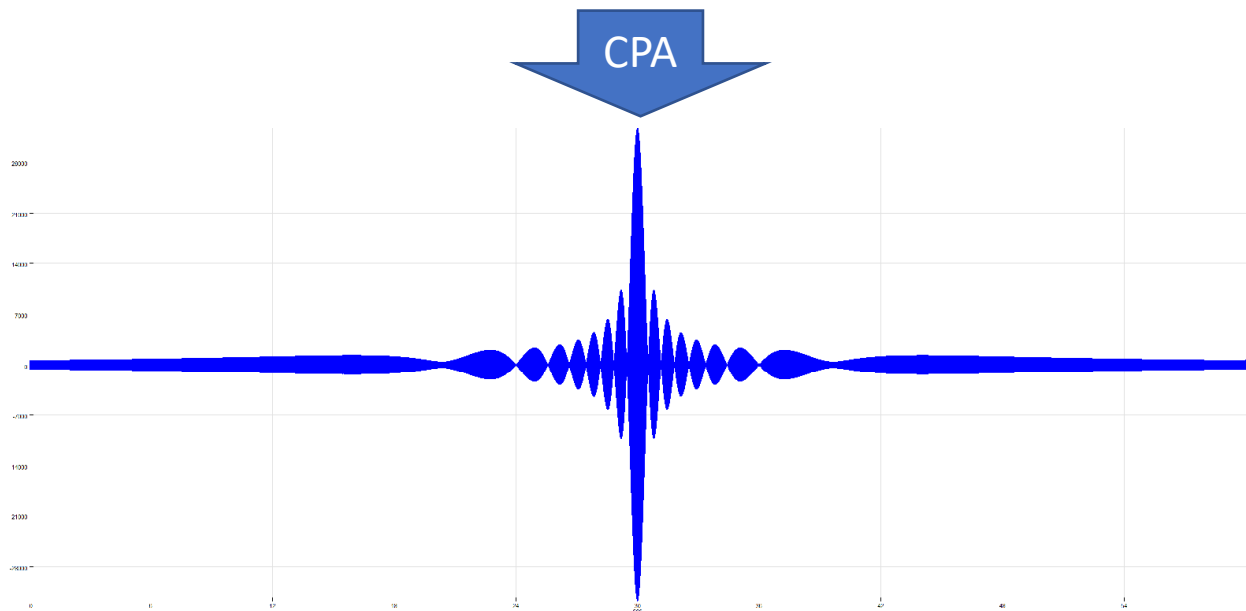


Bild 6: Wirkungsweise eines Beamformings des SVA – Hydrofonarrays für einen 2 kHz Monopolstrahler während einer simulierten Vorbeifahrt (CPA: closest point of approach)

Das Bild 6 stellt die idealen Verhältnisse dar. Real werden diese guten lokalisierenden Eigenschaften aber durch das Hallverhalten für Wasserschall der Schlepprinne und durch die im Allgemeinen nicht unwesentlichen Nebengeräusche durch den Schleppwagen oder/und durch die Antriebssysteme des Schiffsmodells selbst wieder reduziert. Das Hallverhalten der Schlepprinne wurde ansatzweise in [10] versucht zu verbessern. Hierzu sind aber weitere Arbeiten und Investitionen notwendig um eine signifikante Verbesserung zu erreichen. In [13] wird die Möglichkeit für den Anwender aufgezeigt, den kohärenten Signalanteil bei Akustikmessungen an Propulsionssystemen gesondert zu behandeln. Es werden dabei aber keine Hinweise bzw. „Guidelines“ für die eigentliche Durchführung der Messungen und deren entsprechende Auswertung gegeben. Andererseits ist die Berücksichtigung der Hintergrundgeräusche essentiell für die Auswertung der Akustiksignale. Eine ergänzende Auswertung der kohärenten Störeinflüsse ist nur möglich, wenn durch eine zusätzliche physikalische motivierte Signalquelle und ein entsprechender Signalweg vorhanden ist. Für die akustischen Messungen an Propulsionssystemen kommen dafür eine Vielzahl von Körperschallquellen in Betracht, die einen starken Einfluss auf die eigentlichen Messgrößen wie Druckschwankungen und Wasserschall haben. Insofern ist es naheliegend ein oder mehrere Körperschallsensoren (Beschleunigungssensoren) geeignet anzubringen und deren Signale parallel zu den gewünschten Wasserschallsignalen phasensynchron mit aufzuzeichnen. Die folgenden Ausführungen beziehen sich lediglich auf nur ein Nutzsignal und ein Hilfssignal zur Erfassung des kohärenten Anteils der Hintergrundgeräusche. Für mehrere Nutzsignale und mehrere Hilfssignale sind die folgenden Ausführungen leicht verallgemeinerbar.

Es wird ein vollständiger Algorithmus zur separaten Auswertung von kohärenten und inkohärenten Signalanteilen für Wasserschallmessungen gegeben. Für eine einfache mathematische Betrachtung reicht die Interpretation eines akustischen Signals $p(t)$ als eine quadratisch integrierbare reellwertige Funktion über einem endlichen oder (einseitig) unendlichen Zeitintervall, d.h. ohne Beschränkung der Allgemeinheit ($T < \infty$) gilt für die Norm $\|\cdot\|$ von p :

$$\|p\|^2 = \langle p, p \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t)^2 \cdot dt < \infty \quad (2)$$

Wobei für zwei akustische Signale p_1, p_2 das Skalarprodukt $\langle \cdot, \cdot \rangle$ definiert sei durch:

$$\langle p_1, p_2 \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot dt \quad (3)$$

Alle „akustischen Funktionen“ mit diesen Eigenschaften bilden im mathematischen Sinne einen Hilbertraum [16] und im Folgenden nutzen wir dessen mathematischen Eigenschaften konsequent aus. Insbesondere existieren orthonormale Erzeugendensysteme $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$, siehe [16], mit deren Hilfe sich alle Signale p in Form einer abstrakten Fourierreihe darstellen lassen.

$$p(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \langle \varphi_i, p \rangle \cdot \varphi_i(t) \quad (4)$$

Die Skalarprodukte $\langle \varphi_i, p \rangle$ sind dann die „abstrakten Fourierkoeffizienten“.

Der Erwartungswert (Mittelwert) eines Signals p sei wie üblich definiert durch

$$E(p) = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt \quad (5)$$

Die Definition für kohärente bzw. inkohärente Signale werde wie folgt gegeben. Zwei Signale p_1, p_2 sollen zueinander inkohärent heißen, wenn

$$K(p_1, p_2) := \frac{\langle p_1 - E(p_1), p_2 - E(p_2) \rangle}{\|p_1 - E(p_1)\| \cdot \|p_2 - E(p_2)\|} = 0 \quad (6)$$

andernfalls kohärent.

Die Definitionsbeziehung (5) ist formal der Definition des Korrelationskoeffizienten K gleich. Mit anderen Worten sind zwei Signale inkohärent, wenn sie unkorreliert sind. Funktionalanalytisch ist diese Eigenschaft wiederum äquivalent mit dem Orthogonalitätsbegriff.

In vielen Fällen kann auf Grund der verwendeten Messkette zur Signalerfassung bereits davon ausgegangen werden, dass $E(p_1) = 0$ und $E(p_2) = 0$. Grund dafür ist die oft verwendete AC-Kopplung bereits vor dem AD-Wandler.

$$\text{Gilt also } E(p_1) = 0 \text{ und } E(p_2) = 0, \quad (7)$$

dann berechnet sich der Korrelationskoeffizient zu

$$K(p_1, p_2) := \frac{\langle p_1, p_2 \rangle}{\|p_1\| \cdot \|p_2\|}. \quad (8)$$

Der Korrelationskoeffizient wird zur Korrelationsfunktion in Abhängigkeit von τ , wenn für das zweite Argument (Funktion p_2) eine Zeitverschiebung τ eingeführt wird. Der Korrelationskoeffizient kann vom Betrage her nicht größer als 1 werden ([16] und [17] (Schwarzsche Ungleichung)). Ist der Korrelationskoeffizient ± 1 sind die Signale linear abhängig. Gemessen wird im Allgemeinen ein Signal, das mit Störungen überlagert ist. Für das Weitere wird angenommen, dass sich die Störungen (Hintergrundgeräusche) sowohl aus einem inkohärenten als auch einem kohärenten Anteil zusammensetzen. Für den kohärenten Anteil der Störungen wird stillschweigend vorausgesetzt, dass es aus einem irgendwie gestalteten funktionalen Zusammenhang mit einer „beobachtbaren“ Größe abgeleitet werden kann. Insbesondere sollen darunter hier die rotationsbedingten mechanischen Geräusche des Antriebsstranges und die Geräusche der Versuchsanlage verstanden werden. Diese mechanischen Geräusche (Körperschall) haben dann mitunter sehr großen Einfluss auf die Größe der Druckschwankungen und die Pegel der Wasserschallabstrahlung. Unter der Voraussetzung, dass die kohärenten Störgeräusche sich in einem irgendwie gestalteten linearen funktionalen Zusammenhang mit dem Körperschall im Hinterschiffsbereich stehen, ist der folgende Ansatz plausibel: Die gemessene Größe (Druckschwankungen, Wasserschall) p sei zusammengesetzt aus dem eigentlich „erwünschten“ Signal p_P (der Index p steht für Propeller auch wenn ein anderes Propulsionsorgan betrachtet wird), dem kohärenten Störsignal p_{CO} und dem inkohärenten Störsignal p_{IC} . Es wird weiter angenommen, dass für den kohärenten Signalanteil p_{CO} ein gesonderter Sensor zur Verfügung steht und ein Vielfaches mit dem zunächst unbekanntem Faktor α in die eigentliche Messung p eingeht.

$$p = p_P + \alpha \cdot p_{CO} + p_{IC} \quad (9)$$

Mit anderen Worten das Hintergrundgeräusch p_{BN} setzt sich aus den beiden Anteilen

$$p_{BN} = \alpha \cdot p_{CO} + p_{IC} \quad (10)$$

zusammen.

Es folgt nun durch Bildung der Skalarprodukte mit p_{CO} auf beiden Seiten der Definitionsbeziehung (8)

$$\langle p, p_{CO} \rangle = \langle p_P, p_{CO} \rangle + \alpha \cdot \langle p_{CO}, p_{CO} \rangle + \langle p_{IC}, p_{CO} \rangle . \quad (11)$$

Stillschweigend sei vorausgesetzt, dass alle Signalanteile den Mittelwert 0 haben, andernfalls müsste der Mittelwert vorher subtrahiert werden.

Für den inkohärenten Anteil gilt aber per Definition:

$$\langle p_{IC}, p_{CO} \rangle = 0 \quad (12)$$

Außerdem soll stillschweigend angenommen werden, dass das „Nutzsignal“ p_P inkohärent zu dem kohärenten Störsignal sei, d.h.

$$\langle p_P, p_{CO} \rangle = 0 \quad (13)$$

Es folgen nun nach einigen Rechenschritten:

$$p_P = p - \frac{\langle p, p_{CO} \rangle}{\langle p_{CO}, p_{CO} \rangle} \cdot p_{CO} - p_{IC} \quad (14)$$

Da der inkohärente Signalanteil nicht gleichzeitig mit bestimmt werden kann, ist für diesen eine gesonderte „Kalibriermessung“ erforderlich. Bei der Durchführung der Kalibriermessung wird natürlich auch ein kohärenter Störeinfluss auftreten – ggf. mit einer anderen Größenordnung als bei der eigentlichen Messung. Dieser kohärente Signalanteil bei der Kalibriermessung lässt sich wieder auf oben beschriebene Weise korrigieren. Zusammenfassend ergeben sich folgende Korrekturschritte zur Berücksichtigung von Hintergrundgeräuschen:

A) Messung der Hintergrundgeräusche entsprechend ITTC ohne Propeller (mit Blindnabe) bei den definierten Einstellungen.

Hier kommt es im Wesentlichen auf die Ermittlung des inkohärenten Anteils der Hintergrundgeräusche p_{BN} an. Die Messung des kohärenten Anteils der Hintergrundgeräusche erfolgt z.B. mittels ACC-Sensor im Hinterschiffsbereich phasengenau. p_{BN} wird mittels des betrachteten Sensors (Drucksensoren, Hydrophon,...) wie üblich aufgezeichnet.

Wegen Gleichung (9) gilt nun analog zu (14), da $p_p = 0$ (kein Propeller eingebaut).

$$0 = p - \frac{\langle p, p_{CO} \rangle}{\langle p_{CO}, p_{CO} \rangle} \cdot p_{CO} - p_{IC} \quad (15)$$

und wegen $p = p_{BN}$ (derselbe Messpunkt, Hydrophon,...) folgt:

$$p_{IC} = p_{BN} - \frac{\langle p_{BN}, p_{CO} \rangle}{\langle p_{CO}, p_{CO} \rangle} \cdot p_{CO} \quad (16)$$

Von diesem um den kohärenten Anteil korrigierten Zeitsignal p_{IC} erfolgt nun auf üblichem Wege eine Frequenzanalyse und die Ableitung eines Terzspektrums $L_{IC}(f)$.

B) Messung der Geräusche entsprechend ITTC mit arbeitendem Propeller bei den definierten Einstellungen und Korrektur der kohärenten Störgeräusche.

Messung von p und p_{CO} phasensynchron.

Bildung von

$$p_{PP} = p - \frac{\langle p, p_{CO} \rangle}{\langle p_{CO}, p_{CO} \rangle} \cdot p_{CO} \quad (17)$$

Von diesem um den kohärenten Anteil korrigierten Zeitsignal p_{PP} erfolgt nun auf üblichem Wege eine Frequenzanalyse und die Ableitung eines Terzspektrums $L_{PP}(f)$.

C) Korrektur durch den inkohärenten Signalanteil des Hintergrundgeräusches

$$L_p(f) = L_{PP}(f) \ominus L_{IC}(f) \quad (18)$$

für alle Terzmittenfrequenzen f im interessierenden Bereich.

Wobei \ominus definiert ist durch die Beziehungen (19) und (19‘):

$$L_p(f) = 10 \cdot \log \left[10^{(L_{PP}(f)/10)} - 10^{(L_{IC}(f)/10)} \right] \quad (19)$$

$$\text{für } L_{PP}(f) - L_{IC}(f) \geq 3 \text{ dB und undefiniert sonst.} \quad (19')$$

In [13] wird die Möglichkeit für den Anwender aufgezeigt, den kohärenten Signalanteil bei Akustikmessungen an Propellern gesondert zu behandeln. Es werden dabei aber keine Hinweise bzw. „Guidelines“ für die eigentliche Durchführung der Messungen und die entsprechende Auswertung gegeben. Andererseits ist die Berücksichtigung der Hintergrundgeräusche essentiell für die Auswertung der Signale und oftmals lässt sich Bedingung (19‘) nicht erfüllen, so dass die Terzauswertungen oft große Lücken aufweisen. Mit anderen Worten ist dann der Signal-Hintergrundgeräuschabstand viel zu klein damit überhaupt eine Auswertung ohne Kohärenzkorrektur Sinn macht. Die Erfahrung zeigt, dass die Hintergrundgeräusche durch den

Antriebsstrang und die Versuchsanlage da bei im Verhältnis zu den hydrodynamischen Geräuschen oft dominant sind. Teilweise sind diese kohärent einzustufenden Signalanteile bei der Leerlaufmessung (ohne Propeller) sogar größer als mit arbeitendem Propeller was streng genommen eine Auswertung unmöglich macht. D.h. die Leerlaufmessung allein ist nicht ausreichend für eine Korrektur der Daten. Es wird vorgeschlagen, die auf „mechanischem Wege“ entstandenen (möglicherweise) kohärenten Signalanteile durch Erfassung des Körperschalls am Schiff (Dummymodell) für eine Korrektur zu nutzen. Die Kohärenz (ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizient) kann ermittelt und der dadurch verursachte Signalanteil direkt im Zeitbereich korrigiert werden. Diese Korrekturen der kohärenten Signalanteile erfolgen sowohl bei der Leerlaufmessung als auch bei der Messung mit rotierendem Propeller. Mit diesen jeweils korrigierten Zeitsignalen erfolgt die weitere Auswertung entsprechend den ITTC Guidelines [13].

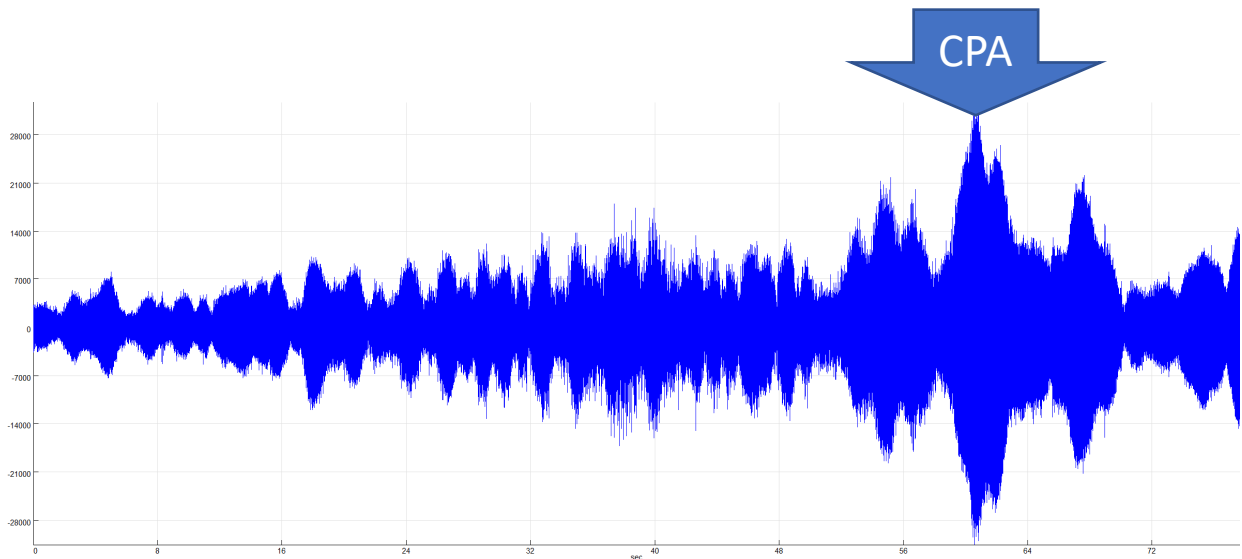


Bild 7: 2 kHz, Monopolstrahler, praktisch: UW-Lautsprecher in SR am Schleppwagen, Hydrofonarray *ohne* Kohärenzkorrektur

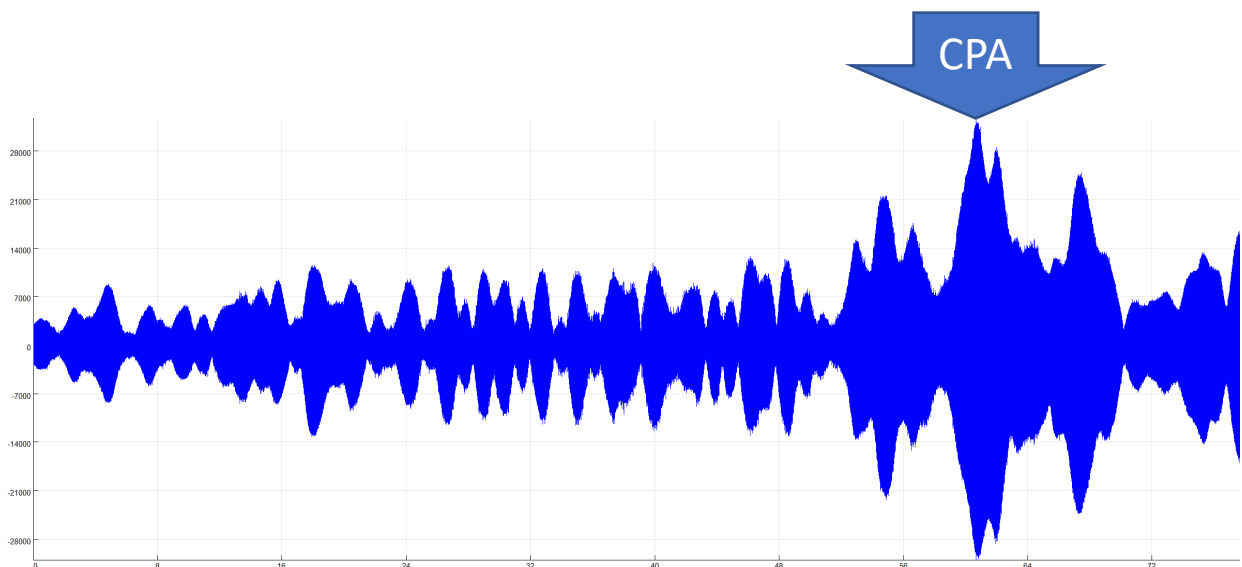


Bild 8: 2 kHz, Monopolstrahler, praktisch: UW-Lautsprecher in SR am Schleppwagen, Hydrofonarray *mit* Kohärenzkorrektur

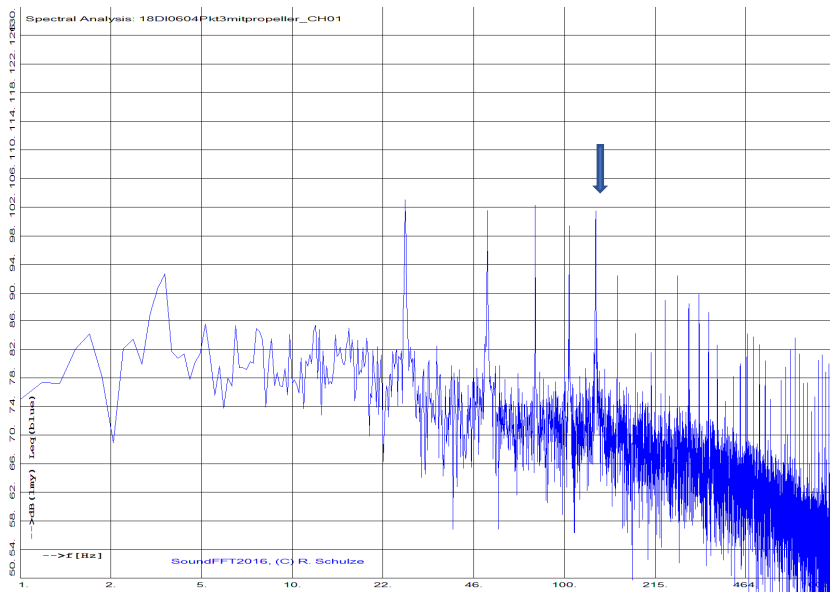


Bild 9: Beispiel eines Spektrums einer Wasserschallmessung mit Hintergrundgeräusch

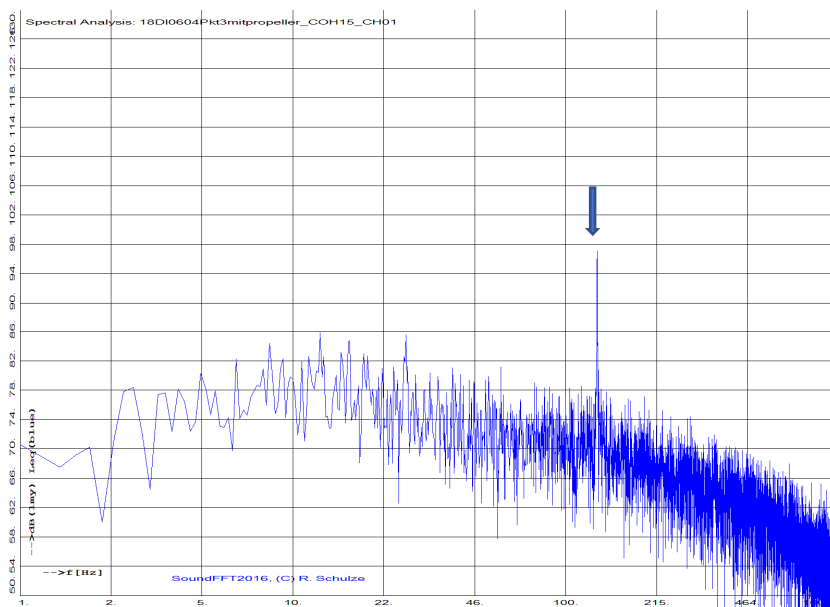


Bild 10: Beispiel eines Spektrums einer Wasserschallmessung mit Kohärenzkorrektur

Im Kavitationstunnel der SVA Potsdam werden Wasserschallmessungen durch Druckschwankungsmessungen mittels Drucksensoren im Hinterschiff, den Einbau von Hydrofonen in das Hinterschiff sowie mit frontbündigen Hydrofonen in den Beobachtungsfenstern sowie Hydrofonen in akustisch angekoppelten Wasserkästen realisiert. Die Versuchsmethodik der SVA Potsdam GmbH zielt darauf ab, die Zuströmverhältnisse zu den Propellern möglichst den Verhältnissen der Großausführung anzupassen. Dazu wird mit Dummymodellen des Hinterschiffes gearbeitet, wobei die finale Zuströmung durch Gitter einreguliert wird. Für Mehrschrauber wird dazu das Hinterschiff in mehrere Sektionen aufgeteilt. Dies wird in Bild 9 an einem 3-Schrauber veranschaulicht. Auf Grund der Symmetrie werden zwei Dummymodelle (In diesem Fall für den Center Pod und ein Dummymodell für den Wing Pod) benötigt.

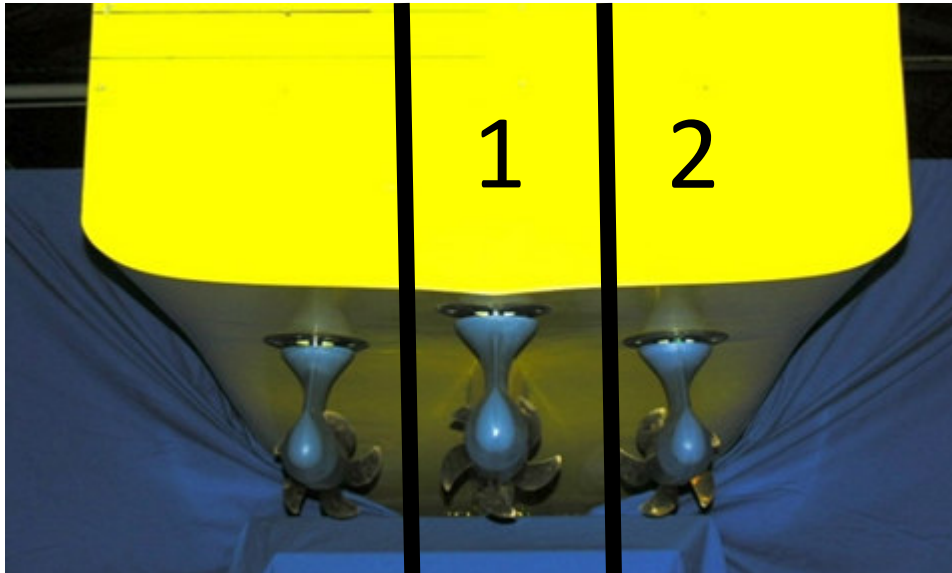


Bild 11: Beispiel der Aufteilung der Hinterschiffssektion eines 3-Schraubers für die Fertigung von zwei Dummymodellen für Versuche im Kavitationstunnel

Die Auswertung der akustischen Signale für das Gesamtschiff gelingt dann durch Summation der einzelnen akustischen Signale für jede Sektion (in diesem Fall müssen für die Wing Pods die Signale gedoppelt werden). Diese Methodik ist dann zulässig, wenn die Signalanteile der jeweiligen Sektionen als stochastische Prozesse betrachtet stochastisch unabhängig sind. Diese mathematische Voraussetzung konnte experimentell durch Vergleich von akustischen Messungen in der Schlepprinne mit separat aktivierten Antrieben und gemeinsam arbeitenden Antrieben nachgewiesen werden. Auf diesem Wege gelingt durch pegelgerechte Summation der einzelnen Komponenten der Wasserschalls eine worst case Abschätzung der Gesamtschallabstrahlung auch unter den Bedingungen der realen Betriebsverhältnisse ggf. mit Kavitation. Die Richtlinien der ITTC [13] erfassen bei der Korrektur von Störgeräuschen nur die inkohärenten Signalanteile. Durch Formel (17) wird hier auch der kohärente Störanteil der Signale korrigiert. Eine abschließende Umrechnung der Signale hat noch den Richtlinien entsprechend auf die Großausführung nach folgendem Schema zu erfolgen:

D) Korrektur der Übertragungsfunktion des Kavitationstunnels

Aufgrund der Reflexionen an den Wänden der Testanlage wird ein anderes Schallfeld als in einer Freifeldumgebung erhalten. Dieser Einfluss wird sowohl im Kavitationstunnel als auch im Schlepptank (Freifeldumgebung) getestet, indem ein Sender an der Stelle platziert wird, an der die Kavitation am Propeller aufgetreten ist, und ein genau definiertes „rosa Geräusch“ übertragen wird. Die Übertragungsfunktion $L_{p,trans}$ zwischen diesen beiden Messungen wird dann wie folgt definiert (Index FF: Freifeld-Messung, CT: Kavitationstunne-Messung):

$$L_{p,trans}(f) = L_{p,FF}(f) - L_{p,CT}(f) \quad (20)$$

Der Schallpegel ergibt sich dann im Modellmaßstab zu:

$$L_{pM}(f) = L_{p,adj}(f) + L_{p,trans}(f) \quad (21)$$

Beide Geräuschemessungen müssen zuvor korrigiert werden mit den Hintergrundgeräuschen.

E) Abstandsnormalisierung

Da der Abstand d zwischen der Geräuschquelle und den Hydrophonen einen großen Einfluss auf den Geräuschpegel hat, muss er durch die Abstandsnormalisierung $L_{p,\text{norm}}$, korrigiert werden. Für die sphärische Ausbreitung (keine Grenzen) gilt:

$$L_{pM,\text{norm}}(f) = L_{pM}(f) + 20 \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] \quad (22)$$

Für die Ausbreitung im Kavitationstunnel wird eine zylindrische Ausbreitung angenommen. Für deren Korrektur gilt:

$$L_{pM,\text{norm}}(f) = L_{pM}(f) + 10 \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] \quad (23)$$

Die Referenzdistanz wird immer zu $d_0=1$ m festgelegt.

F) Skalierung auf die Großausführung

Der Großausführungsgeräuschpegel L_{pS} wird dann noch entsprechend den ITTC Cavitation Committee Richtlinien [13] wie folgt vorgenommen:

$$L_{pS}(f) = L_{pM}(f) + 20 \log_{10} \left[\left(\frac{D_S}{D_M} \right)^z \left(\frac{d_M}{d_S} \right)^x \left(\frac{\sigma_S}{\sigma_M} \right)^{y/2} \left(\frac{n_S D_S}{n_M D_M} \right)^y \left(\frac{\rho_S}{\rho_M} \right)^{y/2} \right] \quad (24)$$

Die Exponenten hängen vom Versuchsaufbau und werden für die SVA Potsdam GmbH mit $x = 1, y = 2, z = 1$ festgelegt und es erfolgt damit die Umrechnung

$$L_{pS}(f) = L_{pM}(f) + 20 \log_{10} \left[\left(\frac{D_S}{D_M} \right) \cdot \left(\frac{d_M}{d_S} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_S}{\sigma_M} \right) \cdot \left(\frac{n_S D_S}{n_M D_M} \right)^2 \left(\frac{\rho_S}{\rho_M} \right) \right] \quad (25)$$

Dabei sollen entsprechend [13] die Frequenzen mit

$$\frac{f_S}{f_M} = \frac{n_S}{n_M} \quad (26)$$

umgerechnet werden.

Sowohl die Umrechnungen (25) als auch (26) gelten, wenn den Kommentaren in [15] gefolgt wird, nur für die ersten 5 Flügelzahlharmonische und sollten in Zukunft weiter hinterfragt und für höhere Frequenzen modifiziert werden.

G) Falls gewünscht erfolgt noch eine Transformation zu einem äquivalenten 1 Hz Spektrum

Da die Frequenzspektren für die Anwendung der Korrekturen in 1/3 Oktavbandspektren transformiert wurden, müssen die Schallpegel anschließend im Vergleich zu 1 Hz-Spektren auf äquivalente 1-Hz-Bandbreitenpegel umgerechnet werden:

$$L_{pS,1\text{Hz}}(f) = L_{pS,\text{Terz}}(f_{\text{centre}}) - 10 \log_{10} (0.23 f_{\text{centre}}) \text{ [dB]} \quad (27)$$

4 Zusammenfassung

- Es wurde eine Methodik zu Vorauswahl von Propellern auf der Basis von Polynomkoeffizienten vorgestellt
- Auf der Basis von potenzialtheoretischen Nachrechenverfahren gelingt ein geräuschoptimierter Entwurf von Propellern durch weitestgehende Vermeidung von Kavitation im Nachstromfeld eines Schiffes
- Techniken und Methoden zur akustischen Vermessung von Schiffen in der Schlepprinne und Kavitationstunnel der SVA Potsdam GmbH wurden vorgestellt.
- Es wurden erweiterte Korrekturverfahren zur Auswertung von Wasserschallmessungen definiert und erläutert
- Vor der üblichen akustischen Auswertung (Terzanalyse) empfiehlt sich eine „Subtraktion“ der kohärenten Anteile
- Diese Kohärenzkorrektur kann auch auf Druckschwankungsmessungen angewendet werden
- Für die Kohärenzkorrektur sollte ein zusätzlicher Sensor zur Detektion der Störungen appliziert werden (meist ein Beschleunigungssensor)
- Akustische Untersuchungen an Mehrschraubern können durch „Zerlegung“ in mehrere „Einschrauber“ im Kavitationstunnel bewertet werden

5 Referenzen

- [1] Onzuka, M.; Uemura, Y.; Yamato, K.; Doi, A.;
Efforts toward Development of Energy-Saving Large-Size ROPAX Ferry,
Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 53 No. 2 (June 2016), pp 24 - 29
- [2] IMO MEPC.1/Circ.833
Guidelines for the Reduction of Underwater Noise from Commercial Shipping to
Address Adverse Impacts on Marine Life, 21st ASCOBANS Advisory Committee
Meeting, Gothenburg, Sweden, 29 September - 1 October 2014
- [3] Collins, M.
Long Term Underwater Noise Management Plan, BCFerries, Summer 2019
(<https://www.bcferrries.com/files/AboutBCF/2019-bc-ferrries-underwater-noise-mitigation-plan.pdf>)
- [4] Schulze, R.; Manke, H.
Propellersysteme mit Ostdüsen, HANSA, 137 (2000) 2
- [5] Schulze, R.
Nachrechen- und Entwurfsverfahren für den Propellerentwurf
SVA-Forum „Numerischer Tank“, Potsdam 2.3.1995
- [6] Schulze, R.
Globale Optimierung von Propellern,
Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Band 91, 1997, S. 97-104,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ..., 1997
- [7] Greely, D. S. and Kerwin, J. E.
Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow Trans
SNAME, Vol. 90, 1982, pp. 415-453

- [8] Szantyr, J.
The Lifting Surface Program UNCA93 for hydrodynamic Analysis of Marine Propellers
Report No. RH-93/R-064, CTO Gdansk, Mach 1993
- [9] Schulze, R.
UW-Sonar-Camera für Schiffsmodellversuche, Sachbericht zum FuE Vorhaben 194/04,
Potsdam den 30.06.2007
- [10] Schulze, R.
Akustische Isolierung für UW – Hydrophon – Array (SONARII),
Sachbericht zum Verwendungsnachweis zu FuE Vorhaben IW 0080115,
Potsdam, den 30.05.2011
- [11] Schulze, R.
Acoustic Camera for the SVA Model Basin and Manual for the 64 Bit Software
CameraHP_RS2020_64, SVAtch Bericht 470/4883, Potsdam Dezember 2019
(unveröffentlicht)
- [12] Sherman, Ch. H., Butler, J. L.
Transducers and Arrays for Underwater Sound, SpringerScience+Business Media,
NY 2007, 2013
- [13] ITTC 2017
ITTC – recommended Procedures and Guidelines,
Model-Scale Propeller Cavitation Noise Measurements 7.5-02-01-05, pp 1 to 22,
Revision 01
- [14] ITTC 2017
The specialist Committee on Hydrodynamic Noise, Final Report and
Recommendations to the 28th ITTC,
Proceedings of the 28th ITTC, Volume II, WUXI 2017
- [15] Carlton, J.
Marine Propellers and Propulsion, 2nd edition, 2007, Elsevier, Amsterdam,...,
ISBN: 978-07506-8150-6
- [16] Dirk Werner: *Funktionalanalysis*. 7. Auflage. Springer, 2011, ISBN 978-3-642-21016-7
- [17] Clay, C.S.; Medwin, H.
Acoustical Oceanography, John Wiley & Sons, New York, Toronto, Singapore 1977,
ISBN 0-471-16041-5