

HAMBURGISCHE SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT GMBH

THE HAMBURG SHIP MODEL BASIN

Bericht K 10-14

**Modellversuche im HYKAT mit Linern
Messfahrtzustand, Schiff 1
Projekt: KONKAV II**

**HSVA-Propellermodell Nr. 2824
HSVA-Schiffsmodell Nr. 4864
HSVA-Rudermodell Nr. 874**

**Auftraggeber:
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie**

HSVA

Dokument Kontrollblatt

Auftraggeber	: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Projekt	: KONKAV II
Projekt Nr.	: 635018
Report Nr.	: K 10-14
Report Titel	: Modellversuche im HYKAT mit Linern, Messfahrtzustand, Schiff 1, Projekt: KONKAV II
Datei	: Bericht_K10_14.doc

Rev. Nr.	Datum		vorbereitet durch		Geprüft durch
	14.07.2014	Ausgangsvariante	TL		Jo

Zusammenfassung:	<p>Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurden im HYKAT Modellversuche im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens KONKAV-II durchgeführt. Dabei handelt es sich um das erste Projektschiff des Vorhabens. Bestandteil der Untersuchungen sind Druckschwankungsmessungen und Kavitationsbeobachtungen in einem Betriebszustand, der mit Ergebnissen der Großausführung verglichen werden konnte. Bei den Versuchen kamen zusätzlich die in diesem Vorhaben entwickelten Flow-Liner zum Einsatz, die den Maßstabeffekt des Modellnachstroms reduzieren und damit die Druckschwankungsprognosen verbessern sollen.</p> <p>Folgende Ergebnisse können aus den Untersuchungen abgeleitet werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Messergebnisse passen nur in der ersten Blattharmonischen relativ gut zu den Messergebnissen der Großausführung, wobei die Amplituden im Modellmaßstab etwas überzeichnet sind. In diesem Zustand dürfte die erste Blattharmonische aus Mangel an Schichtkavitation hauptsächlich aus dem Verdrängungseffekt und den Induktionen bestehen, also mit einem kavitationsfreien Zustand vergleichbar sein. Die Amplituden der höheren Blattharmonischen sind im Modellmaßstab allerdings nennenswert kleiner als in der Großausführung. Die Anregung der Druckamplituden in der Großausführung scheint von der Interaktion der saugseitigen- als auch der druckseitigen Wirbelkavitation auszugehen. • In diesem Projekt bzw. diesem Fahrzustand scheint der maßgebende nachstrombedingte Maßstabeffekt darin zu liegen, dass sich die Wirbelkavitation der Saug- als auch der Druckseite im Gegensatz zur Großausführung relativ ruhig verhalten und daher kaum Druckamplituden der höheren Blattharmonischen induzieren. Ein klassischer Fall von überzeichneten Druckimpulsen der ersten Blattharmonischen, der mit markant ausgebildeter Schichtkavitation in Zusammenhang gebracht wird, liegt hier nicht vor. • Durch die Erhöhung der Modelldrehzahl von $n=28\text{Hz}$ auf $n=36\text{Hz}$ ($R_n+29\%$) konnten keine signifikanten Unterschiede im Kavitationsverhalten beobachtet werden. Die Druckschwankungen hingegen zeigten in der ersten Blattharmonischen eine leichte Reduktion der Amplituden.
-------------------------	---

Diese Reduktion ist allerdings nicht eindeutig auf die höhere Reynolds-Zahl zurückzuführen, sondern wahrscheinlich eher auf den mit zunehmender Versuchszeit abnehmenden Keimgehalt des Wassers und die damit verbundene instabilere bzw. seltener auftretende Kavitation im Modellmaßstab von Umdrehung zu Umdrehung, sodass die Druckschwankungsamplituden aus statistischen Gründen kleiner ausfallen.

- Die Druckschwankungen sind weitestgehend vom Einsatz der Flow-Liner unverändert. Der Grund hierfür scheint zum einen in der geringen Wirksamkeit der Flow-Liner zu liegen als auch an der mangelnden Schichtkavitation, die signifikant auf geringste Nachstromänderungen reagieren müsste. Bei höherer Drehzahl reduzierten sich die Amplituden gegenüber der kleineren Drehzahl, dies ist aber eher auf den oben beschriebenen Einfluss der Versuchszeit bzw. Reihenfolge zurückzuführen.
- Die Variation des Flow-Liner Anstellwinkels kann vernachlässigt werden, da sie zu relativ kleinen Änderungen der Druckschwankungen führte.

Keywords: Kavitationsbeobachtungen, Druckschwankungen, Flow-Liner, Maßstabseffekt

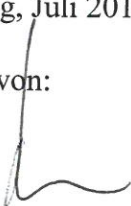
Bericht K 10-14**Modellversuche im HYKAT mit Linern
Messfahrtzustand, Schiff 1
Projekt: KONKAV II**

**HSVA-Propellermodell Nr. 2824
HSVA-Schiffsmodell Nr. 4864
HSVA-Rudermodell Nr. 874**

**Auftraggeber:
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
53107 Bonn**

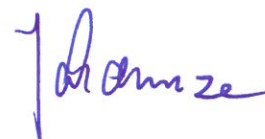
Hamburg, Juli 2014

Erstellt von:



i.A. T. Lücke

**HAMBURGISCHE SCHIFFBAU-
VERSUCHSANSTALT GmbH**



ppa. Christian Johannsen

Inhaltsverzeichnis

1	Liste der verwendeten Symbole	3
2	Einleitung	4
3	Versuchsaufbau	4
4	Versuchsbedingungen und -ausführung	5
5	Ergebnisse der Kavitationsbeobachtungen.....	6
6	Ergebnisse der Druckschwankungsmessungen	7
7	Zusammenfassung	10
8	Quellenverzeichnis	11
9	Verzeichnis der Tabellen.....	11
10	Liste der Abbildungen.....	11

Tabellen

Abbildungen

Anhang: Harmonische Analyse von Druck-Zeitfunktionen

1 Liste der verwendeten Symbole

D_P	Propellerdurchmesser	$D_P = 5.8 \text{ m}$
K_T	Schubbeiwert	$K_T = \frac{T}{\rho \cdot N^2 \cdot D_P^4}$
K_Q	Drehmomentenbeiwert	$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot N^2 \cdot D_P^5}$
T	Propellerschub	
Q	Propellerdrehmoment	
N	Propellerdrehzahl	
p	Lokaler Druck	
p_v	Dampfdruck des Wassers	
PD	Dem Propeller zugeführte Antriebsleistung	$PD = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot Q$
V_S	Schiffsgeschwindigkeit	
U_0	Tunnel- bzw. Wassergeschwindigkeit, Referenzgeschwindigkeit	
ρ	Dichte des Wasser	$\rho_{\text{See}} = 1025.9 \text{ kg/m}^3, t=15^\circ$ $\rho_{\text{Tunnel}} = 998.2 \text{ kg/m}^3, t=19.7^\circ$
ν	Kinematische Zähigkeit des Wasser	$\nu_{\text{See}} = 1.18821\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}, t=15^\circ$ $\nu_{\text{Tunnel}} = 1.0112\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}, t=19.7^\circ$
σ_n	Kavitationszahl	$\sigma_n = \frac{p - p_v}{\frac{\rho}{2} \cdot (\pi \cdot N \cdot D_P)^2}$
λ	Maßstab	$\lambda = 24.829$
Δp	Druckschwankungsamplitude	
K_P	Druckschwankungsbeiwert	$K_P = \frac{\Delta p}{\rho \cdot N^2 \cdot D_P^2}$
ϕ	Winkelposition des Propellerflügels	
E	Entwurfssteigung des Propellers	
α	Anstellwinkel der Flow-Liner	($-\alpha$ AK auswärts, $+\alpha$ AK einwärts)

2 Einleitung

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurden im HYKAT Modellversuche im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens KONKAV II durchgeführt. Dabei handelt es sich um das erste Projektschiff des Vorhabens. Die HSVA Berichte K 49-12 [1], N 11-14 [2] und WP 128/12 [3] dokumentieren die zugehörige Messfahrt, die Nachstrommessungen und die Propulsionsversuche im Schlepptank.

Dieser Bericht beschreibt die Druckschwankungsmessungen und Kavitationsbeobachtungen mit und ohne den Einsatz von Flow-Linern, die im Februar 2014 erfolgten, zusammen mit den Referenzmessungen K 43-12 im August 2013 (ohne eigenen Bericht), während derer die Universität Rostock IPI-Messungen durchführte. Die Flow-Liner wurden im Rahmen des Vorhabens entwickelt (HSVA-Bericht K 27-14 [4]) und stellen allgemeine Flow-Liner dar, die für andere Projekte gleichermaßen eingesetzt werden sollen. Mit Hilfe der Flow-Liner soll der Maßstabeffekt des Nachstroms und damit auch der Druckschwankungen reduziert werden.

Tabellen, die innerhalb des Textes zu finden sind, werden mit Buchstaben gekennzeichnet, wogegen Tabellen im Anhang durchnummeriert sind. Diese Vorgehensweise soll die Lesbarkeit dieses Berichtes steigern und die Zuordnung der Tabellen erleichtern.

3 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden im HYKAT, dem großen Hydrodynamik- und Kavitationstunnel der HSVA (**Abb. 1**), durchgeführt. Die Messstrecke des Tunnels ist 11m lang, 2.8m breit und 1.6m hoch und erlaubt den Einbau des kompletten Schiffmodells, wie es bereits für die Widerstands- und Propulsionsversuche im Schlepptank verwendet wurde. Dabei arbeitet der Propeller bei hoher Reynoldszahl in einem realitätsnahen, dreidimensionalen Nachstromfeld.

Bei den Versuchen kamen die in diesem Vorhaben entwickelten Flow-Liner zum Einsatz, die den Maßstabeffekt des Modellnachstroms reduzieren und damit die Druckschwankungsprognosen verbessern sollen, siehe **Abb. 2**. Die Flow-Liner wurden in einer Spantebene außerhalb des Schiffmodells als auch unterhalb des Schiffmodells eingebaut, siehe **Abb. 3-4**.

Die ersten Druckschwankungsmessungen wurden parallel zu den IPI-Messungen der Universität Rostock im August 2013 durchgeführt. Diese Ergebnisse ohne den Einsatz der Flow-Liner stellen die Referenzmessungen dar. In **Abb. 5** ist der Versuchsaufbau der IPI-Messungen zu sehen. Die Bilder sind von der Universität Rostock zur Verfügung gestellt worden.

Das Schiffmodell des RoRo-Schiffes - HSVA Modell Nr. 4864-1011- wurde in der HSVA im Maßstab 1:24.829 aus Holz gefertigt. Weitere Angaben zum Schiff sind in der **Tabelle 1** aufgeführt. Das Modell war in der Messstrecke des HYKAT entsprechend dem vertrimmten Messfahrt-Tiefgang von 6.32/6.65 m am vorderen/hinteren Lot eingebaut. Die freie Wasseroberfläche wurde durch an die Wasserlinienkontur angepasste Sperrholzplatten abgedeckt, die die Wellenbildung unterdrückten. Der Einbautiefgang des Modells war um 50 mm erhöht worden, um einen Effekt der Grenzschicht an diesen Platten zu kompensieren.

Das Modell wurde mit einem Kunststoffruder HSVA-Modell Nr. 874 ausgerüstet. Dabei handelt es sich um ein getwistetes Ruder mit Birne. Das Ruder wurde auf 0° bezüglich der Schiffslängsachse eingebaut. Weitere Details zum Modelleinbau und zur Propeller-Ruderanordnung sind der **Abb. 6** zu entnehmen.

Der untersuchte Propeller (HSVA Propeller Nr. 2824) ist von der HSVA entworfen und aus Messing gefertigt. Der Modellpropeller repräsentiert einen vierflügeligen, linksgängigen Verstellpropeller (CP) von 5.8m Durchmesser. Der Formplan des Propellers ist in **Abb. 7** zu finden. Die Konfiguration entspricht dem Schiffszustand während der Messfahrt.

Drei Videokameras im Schiffsmodell ermöglichten die Beobachtung des Propellers aus unterschiedlichen Blickwinkeln. Eine weitere Kamera befand sich an einem Halter in den Wasserlinienplatten und ermöglichte die Beobachtung der Propellerdruckseite.

Der Schub, das Drehmoment, die Drehzahl und die Winkelposition des Propellers wurden mittels eines wasserdichten Dynamometers gemessen, das zusammen mit dem zugehörigen Unterwasser-Elektromotor im Modell eingebaut war. Die Signale des Dynamometers und der Sensorik für den Tunnelbetrieb (Wassergeschwindigkeit, Temperatur etc.) wurden simultan vom gleichen Messsystem erfasst.

Zur Messung der propellererregten Druckschwankungen war über dem Propeller ein Feld von 16 Druckmessdosen vom Typ Kulite XTM 190 angeordnet. Diese haben einen Durchmesser von 3.7 mm und sind geeignet für Drücke bis 350 kPa und Frequenzen bis zu 50 kHz. Die Signale wurden durch Messverstärker aufbereitet, die Frequenzen bis zu 10 kHz verarbeiten können. Die Anordnung der Druckmessdosen ist der **Abb. 8** zu entnehmen. Eine Erläuterung zur Definition der Winkelbezeichnungen befindet sich in **Abb. 9**.

4 Versuchsbedingungen und -ausführung

Für die Versuche bildeten die in **Tabelle 1** genannten Einstellwerte - die dimensionslosen KT - und σ_n -Werte sowie die Großausführungsdrehzahl N_S - die Basis zur Einstellung von Wassergeschwindigkeit und Druck im HYKAT bzw. zur Umrechnung auf die Großausführungsdruckschwankungsamplituden. Der untersuchte Betriebspunkt entspricht dem Betriebszustand der Kavitationsbeobachtungen und Druckschwankungsmessungen während einer Rundreise der AMANDINE Rotterdam - Dublin - Rotterdam am 10-14.8.2012. Die Kavitationszahl σ_n ist auf die Umfangsgeschwindigkeit der Flügelspitzen $\pi * N * D_P$ bezogen. Um eine möglichst hohe Reynoldszahl während der Versuche zu erreichen und dadurch die Zähigkeitsbedingten Maßstabeffekte zu minimieren, wurde die Modellpropellerdrehzahl mit $N_M = 28$ Hz wie in den vorhergehenden Untersuchungen gewählt. Eine weitere Drehzahl $N_M = 36$ Hz wurde in die Untersuchung mit aufgenommen, um den Einfluss der Rn -Zahl auf die Druckschwankungen zu untersuchen.

Die dadurch bedingte Abweichung vom Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz hat zur Folge, dass die Gleichheit von Modell- und Großausführungskavitationszahl nicht für den ganzen Propeller, sondern nur für eine horizontale Ebene gilt. Der Tunneldruck wurde daher entsprechend dem Radius $0.8 R$ bei der jeweiligen Winkelstellung des betrachteten Propellerflügels individuell eingeregelt.

Die Flow-Liner kamen in einer Längsposition ($x=317$ mm, $x/R=2.7$ vor der Propellerebene) unterhalb ($y=280$ mm) und außerhalb des Schiffsmodells ($y=588$ mm) zum Einsatz, siehe **Abb. 3, 4**. Die Position außerhalb des Schiffsmodells entspricht bei neutraler Winkelstellung ($\alpha=0^\circ$ des oberen ungetwisteten Profils zu Mitte Schiff) der Entwurfsposition der Flow-Liner. Die Flow-Liner beste-

hen in diesem Fall nur aus je einem Hauptflügel (ohne den in **Abb. 2** gezeigten Adapter). In dieser Konfiguration war die Hauptwirkung der Flow-Liner für dieses Projekt auf 0.8R des Propellers ausgerichtet.

Die zweite Position, in der die Flow-Liner seitlich versetzt innerhalb bzw. unterhalb des Schiffsmodells angeordnet waren, versprach eine stärkere Wirkung durch die größere Nähe der Flow-Liner zum Propeller. Im Gegensatz zur Lage neben dem Schiffmodell hat diese Position den Nachteil, dass die Zuströmung und damit die Umströmung des Flow-Liners durch die Präsenz des Schiffes bzw. seiner Grenzschicht individuell beeinflusst wird und damit nicht mehr so universell gilt wie in der äußeren Lage und dem ursprünglichen Konzept des universellen Flow-Liners eigentlich etwas entgegenspricht. In der inneren Position konnten allerdings kaum Verbesserungen des nominellen Nachstromfeldes gegenüber der äußeren Position gemessen werden, daher wurde auf die Druckschwankungsmessungen in dieser Position verzichtet.

Neben der neutralen Entwurfsposition wurden Anstellwinkel von $\pm 3^\circ$ untersucht, um eventuelle Orientierungsfehler der Liner aufzudecken.

Zu jedem untersuchten Betriebspunkt wurde das notwendige KT über die Wassergeschwindigkeit im Tunnel neu eingeregelt, sodass die Nachstromänderung durch die Flow-Liner im Mittel ausgeglichen wurde. Es wurde eine Heckwellenhöhe von 1.2m angenommen. Diese Höhe entspricht einer geschwindigkeitsbasierten Abschätzung und sorgt für ein homogenes Fluten des Tunnelhecks.

Als Referenzpropellerblatt wurde Blatt 2 gewählt.

5 Ergebnisse der Kavitationsbeobachtungen

Detaillierte Kavitationsbeobachtungen wurden nur für den Referenzzustand ohne Flow-Liner durchgeführt. Die Kavitationsskizzen sind in den **Abb. 10-15** für die Modelldrehzahl $N_M=28\text{Hz}$ zu finden.

Durch die reduzierte Propellersteigung (Entwurfssteigung -5°) konnte nur Wirbelkavitation auf der Saugseite als auch auf der Druckseite beobachtet werden. Die Spitzenwirbelkavitation der Saugseite trat zwischen den Blattpositionen 180° und 260° auf. Die Druckseitenkavitation konnte als Wirbelkavitation zwischen 100° und 120° beobachtet werden. Erst bei einer Erhöhung des KT-Wertes um 7% bei konstanter Kavitationszahl konnte keine Druckseitenkavitation mehr beobachtet werden.

Ein signifikanter Einfluss der Flow-Liner auf die Kavitationserscheinungen konnte nicht erkannt werden. Dadurch entsprechen diese Erfahrungen den eigenen Berechnungen und den zugehörigen Aussagen der TUHH, die mit den speziellen Linern keine signifikante Verbesserung des Nachstroms für dieses Schiff erreichbar sahen. Die eigenen Berechnungsergebnisse deuten zwar auf eine leichte Beschleunigung der Grenzschicht im Bereich des Propellers durch die Flow-Liner hin, dies reicht aber nicht aus, um die Kavitationseigenschaften und die Druckschwankungsergebnisse zu verändern. Dies mag zum einen an dem bereits sehr günstigen Nachstromfeld dieses schlanken Schiffes liegen, und zum anderen, an dem zu untersuchenden Zustand, der nicht von Schichtkavitation beeinflusst ist.

6 Ergebnisse der Druckschwankungsmessungen

Der untersuchte Betriebspunkt entspricht dem der **Tabelle 1**. Der Tunneldruck wurde dabei auf der Basis der σ_n -Identität zwischen Modell und Großausführung für die Flügelwinkelstellung 180° und einen Radius $r/R = 0.8$ eingestellt. Die Ergebnisse sind für den Referenzzustand (ohne Flow-Liner) in den **Abb. 19-25** und **Tab. 2-3** zu finden. Die Ergebnisse der harmonischen Analyse sind in Form von Balkendiagrammen aller Druckmessdosen, als räumliche Verteilung der Druckamplituden der 1 harmonischen Ordnung und als Kurven der Verläufe der Druckamplituden entlang der Schiffsmittellinie sowie in der Propellerebene dargestellt. Neben den Ergebnissen der harmonischen Analyse sind die zeitlichen Verläufe des Druckmesssignals eines repräsentativen Druckaufnehmers über 4 Umdrehungen und das korrespondierende Ergebnis der FFT-Analyse als Frequenzspektrum dargestellt. Alle weiteren Ergebnisse, die den Einfluss der Flow-Liner auf die Druckschwankungen oder den Vergleich mit der Großausführung zeigen, sind in den Balkendiagrammen **Abb. 28-29** zu finden.

Die Umrechnung der gemessenen Werte auf die Großausführung erfolgte unter der Annahme $K_{P,Mod.} = K_{P,Schiff}$, wobei die Definition von K_P in Kapitel 1 gegeben ist. Die Phasenlage der harmonischen Komponenten wurde für Modell und Großausführung als gleich angenommen. Eine ausführliche Beschreibung der Auswerteprozedur findet sich im Anhang. Die K_P -Werte sowie die daraus resultierenden Großausführungsamplituden sind zusammen mit den Phasenlagen für die erste bis fünfte Flügelharmonische angegeben.

Ergebnisse ohne Flow-Liner

Es wurden 6 Betriebszustände nach der folgenden **Tabelle A** eingestellt und die korrespondierenden Druckschwankungen gemessen. Zeitgleich wurden IPI-Messungen zur Bestimmung des O_2 - bzw. Keimgehaltes des Wassers von der Universität Rostock durchgeführt. Die Ergebnisse der IPI-Messungen sind in den **Abb. 16-17** zu sehen sowie in der **Abb. 18** die zugehörigen Druckimpulse für zwei repräsentative Druckaufnehmer 11 und 12 (in der Propellerebene, BB, STB). Interessant ist der Vergleich der Punkte 2 bzw. 3 und 5, die den gleichen Betriebszustand aber eine andere Vorgeschichte kennzeichnen. In Punkt 2 ist der Betriebsdruck entsprechend der HSVA Standard-Vorgehensweise zu Beginn der Versuche von einem kavitationsfreien Zustand aus angefahren worden. Der O_2 -Gehalt betrug 74% bei Umgebungsdruck ($p=1060$ mbar), was etwas niedriger ist als der für den HYKAT übliche O_2 -Gehalt von ca. 80% und mehr.

Punkt 3 beschreibt den gleichen Betriebszustand, allerdings sind die Messungen 23 Minuten später als in Punkt 2 erfolgt, wobei der Unterdruck 23 Minuten bestand. Punkt 5 wurde ebenfalls aus dem kavitationsfreien Zustand aus angefahren, vorher jedoch wurde Punkt 4 mit stärkerem Unterdruck in der Teststrecke untersucht. Die Auswirkungen dieser unterschiedlichen Vorgeschichten bzw. Randbedingungen sind in Bezug auf die Keimspektren relativ groß. Die Auswirkungen auf die Druckschwankungen sind im aktuellen Beispiel jedoch gering, da der Propeller kaum Schichtkavitation zeigt und sich deshalb unempfindlich in Bezug auf Druckschwankungen verhält. **Abb. 26-27** zeigen das Zeitsignal und das FFT-Spektrum des Druckaufnehmers P2 in Punkt 2 und in Punkt 5. In dieser Darstellung ist schon eher ein Einfluss der Wasserqualität zu erkennen als in den Amplituden der Blattharmonischen. Die Signale unterscheiden sich zusätzlich in der Darstellung der Oberschwingungen, da die Messungen zu Punkt 2 mit einem anderen Hochpassfilter (1kHz) gemacht bzw. ausgewertet wurden als die Messungen in Punkt 5 (10kHz). Diese Feinheit macht den Vergleich schwierig und sollte beim Vergleich der Abbildungen beachtet werden.

Messung Nr.	Druck m.W. mbar	O ₂ % Gemessen im jeweiligen Betriebsdruck (Spalte 2)	Zeitspanne zw. vorherigem Versuch Min.	Anzahlkonzentration 1/cm ³
1	1300	61	0	0.187
2	628	127	10	0.193
3	628	126	23	0.135
4	400	204	10	0.436
5	628	126	14	0.250
6	1300	60	8	0.150

Tabelle A: Betriebszustände während der IPI- und Druckschwankungsmessungen

Mit zunehmender Versuchszeit eines Tages gast das Wasser bei Unterdruck aus und ändert die Verteilung und die Größe der für die Kavitation notwendigen Keime im Wasser. Das beeinflusst die Kavitation durch weniger Stabilität bzw. Periodizität von Propellerumdrehung zu Propellerumdrehung. Dies setzt sich im Zeitsignal der Druckschwankungen fort und lässt die Häufigkeit der Impulse zu- oder abnehmen. Daraus ergibt sich durch den Mittelungsprozess der harmonischen Analyse über 1000 Umdrehungen ebenfalls eine Veränderung der Amplituden.

Verglichen mit den Ergebnissen der Großausführung sind die im Modellversuch gemessenen Druckschwankungsamplituden in der ersten Blattharmonischen größer und in den höheren Blattharmonischen kleiner. Dies gilt ganz besonders für die 5. Blattharmonische. Der Grund für diese Diskrepanz wird in dem Verhalten der saugseitigen Spitzenwirbelkavitation in Zusammenhang mit der druckseitigen Wirbelkavitation oder zumindest mit der für sie verantwortlichen Strömung vermutet. Da Wirbelkavitation im Modellmaßstab im Allgemeinen geringer ausfällt als in der Großausführung, könnte dies den Grund für die Diskrepanz zwischen Modellversuch und Großausführung darstellen. Die druckseitige Wirbelkavitation kann einerseits aus Gründen der Viskosität bzw. der kleineren Reynolds-Zahl im Modellversuch geringer ausfallen, da die Viskosität die Geschwindigkeit und den Druck im Wirbelkern stark beeinflusst. Darüber hinaus kann der Großausführungsnachstrom durch die höhere Axialkomponente der Geschwindigkeiten dafür sorgen, dass die Profilschnitte auf der Saugseite schwächer belastet werden als im Modellnachstrom und die Druckseitenkavitation daher früher eintritt und stärker ausgeprägt ist als im Modellmaßstab (unabhängig davon ob sie als Schicht- oder Wirbelkavitation auftritt). Dies ist ein markanter Maßstabseinfluss des Nachstroms auf die Kavitationserscheinungen und die Druckschwankungsergebnisse, jedoch ist dieser Einfluss mangels Schichtkavitation eher speziell auf die hohen Frequenzen begrenzt, die im normalen Industrialltag der Kavitationsversuche eher eine untergeordnete Rolle spielen.

Flügel 3 zeigte starke Spitzenwirbel-Kavitation im Vergleich zu den anderen Flügeln. Erst bei Überdruck (P=1600 mbar) im Tunnel verschwand diese Kavitation restlos. Als Grund kann nur eine leichte Beschädigung der Flügelgeometrie erachtet werden, da die Steigung der Flügel genau eingestellt und kontrolliert wurde. Vom wissenschaftlichen Standpunkt ist dies aber ein Glücksfall, da das Verhalten eines einzelnen Flügels im Drucksignal verfolgt werden kann. Vergleicht man den Pfad von Flügel 3 bzw. seines Drucksignals in **Abb. 26** so ergibt sich folgendes Bild. Der Ausschnitt des Zeitsignals aus 4 Umdrehungen zeigt beginnend mit Flügel 1 in der 12:00 Uhr Stellung drei relativ ruhig verlaufende Drucksignale ohne nennenswerten Einfluss durch Kavitation (erste, zweite und vierte Flügelperiode aus Blatt 1, Blatt 2, Blatt 4) und eins mit ausgeprägten Oberschwingungen (dritte Flügelperiode von Blatt 3). Die Oberschwingungen gehören zu Blatt 3 und wirken sich in der letzten Umdrehung der Abbildung auch noch auf das Drucksignal von Blatt 4

aus. Dabei ist Flügel 3 bereits um 90° weiter vorausgeleitet als Flügel 4. Es ist erstaunlich, dass die Spitzenwirbelkavitation stromabwärts noch relativ markante Drucksignale induziert.

Flow-Liner

Ein systematischer Vergleich der Druckimpulse ohne bzw. mit Flow-Linern ist in den **Abb. 28** für die Drehzahl $n=28\text{Hz}$ (Wassergeschwindigkeit im HYKAT $V=5.4\text{m/s}$) zu sehen. In **Abb. 29** sind die Amplituden der ersten Blattharmonischen für $n=28\text{Hz}$ und $n=36\text{Hz}$ ($V=6.8\text{m/s}$) gemeinsam mit den Ergebnissen der Großausführung dargestellt. Ungeachtet der Anstellwinkel und der Lage der Flow-Liner ist nur ein sehr geringer Einfluss der Flow-Liner auf die Druckimpulse zu sehen. Die Amplituden mit Flow-Liner sind in der Regel sogar etwas höher als die Amplituden der Referenzmessungen. Die Amplituden bei höherer Drehzahl ($n=36\text{Hz}$) liegen unterhalb derer bei $n=28\text{Hz}$. Dies ist allerdings nicht streng der damit verbundenen höheren Reynolds-Zahl zu verdanken, sondern wahrscheinlich eher dem Einfluss des entgasenden Wassers, da die Messungen mit $n=36\text{Hz}$ später stattfanden als die ersten Messungen mit $n=28\text{Hz}$.

Der Einfluss der Anstellwinkel war in beiden Zuständen ähnlich gering und kann zur Beurteilung der Wirksamkeit aus praktischer Sicht vernachlässigt werden.

Die praktische Erfahrung zeigte bisher, dass der den Maßstabeffekten zugeschriebene Unterschied zwischen den Druckimpulsen des Modells und der Großausführung mit einer im Modellversuch auftretenden dicken Kavitationsschicht zusammenhing. Das gilt hauptsächlich für die erste Blattharmonische. Die hier gemachten Beobachtungen decken sich insofern mit dieser Erfahrung, als dass Korrekturen bei der geringen Kavitation dieses Projektschiffes nicht nötig erscheinen und darüber hinaus der Einfluss der Flow-Liner auch nur gering ausfällt.

Untersuchungen während einer Kooperation zwischen MARIN und der HSVA mit einem Smart-Dummy Modell haben gezeigt, dass der Maßstabeffekt des Nachstroms hauptsächlich die Amplitude der ersten Blattharmonischen beeinflusste [5]. Aus diesen Ergebnissen und den Erfahrungen, dass nur eine ausgeprägte dicke Kavitationsschicht am Propeller zur Überzeichnung der Amplituden in der ersten Blattharmonischen führte, wird der Maßstabeffekt hauptsächlich in der Ausprägung der Schichtkavitation und der korrespondierenden Druckimpulse der ersten Blattharmonischen vermutet. Gerade diese Amplituden sind in den vorliegenden Modellversuchen ohne erkennbare Schichtkavitation bereits ohne Nachstromänderung relativ gut getroffen. Aus dieser Sicht besteht im vorliegenden Fall kein Bedarf, den Nachstrom hinsichtlich des Maßstabeffektes weiter zu verändern. Erst bei der Betrachtung der Wirbelkavitation, vor allem der Druckseitenkavitation, kann sich der Maßstabeffekt des Nachstroms markant auf die Kavitation auswirken. Dabei kann der Maßstabeffekt der im Modellversuch auftretenden zusätzlichen Überzeichnung der viskosen Effekte im Wirbelkern bei Druckschwankungsmessungen nicht ausgeglichen werden.

In diesem Beispielprojekt scheint der maßgebende nachstrombedingte Maßstabeffekt darin zu liegen, dass sich die Wirbelkavitation der Saug- als auch der Druckseite im Gegensatz zur Großausführung anders verhalten und daher kaum Druckamplituden der höheren Blattharmonischen (4-5) induzieren. Ein klassischer Fall von überzeichneten Druckimpulsen, der für den Industrialltag üblichen oder relevanten Frequenzbereich (1-3 Harm), der mit markant ausgebildeter Schichtkavitation in Zusammenhang gebracht wird, liegt hier nicht vor.

7 Zusammenfassung

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurden im HYKAT Modellversuche im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens KONKAV-II durchgeführt. Dabei handelt es sich um das erste Projektschiff des Vorhabens. Bestandteil der Untersuchungen sind Druckschwankungsmessungen und Kavitationsbeobachtungen in einem Betriebszustand, der mit Ergebnissen der Großausführung verglichen werden konnte. Bei den Versuchen kamen zusätzlich die in diesem Vorhaben entwickelten Flow-Liner zum Einsatz, die den Maßstabeffekt des Modellnachstroms reduzieren und damit die Druckschwankungsprognosen verbessern sollen.

Folgende Ergebnisse können aus den Untersuchungen abgeleitet werden:

- Die Messergebnisse passen nur in der ersten Blattharmonischen relativ gut zu den Messergebnissen der Großausführung, wobei die Amplituden im Modellmaßstab etwas überzeichnet sind. In diesem Zustand dürfte die erste Blattharmonische aus Mangel an Schichtkavitation hauptsächlich aus dem Verdrängungseffekt und den Induktionen bestehen, also mit einem kavitationsfreien Zustand vergleichbar sein. Die Amplituden der höheren Blattharmonischen sind im Modellmaßstab allerdings nennenswert kleiner als in der Großausführung. Die Anregung der Druckamplituden in der Großausführung scheint von der Interaktion der saugseitigen- als auch der druckseitigen Wirbelkavitation auszugehen.
- In diesem Projekt bzw. diesem Fahrzustand scheint der maßgebende nachstrombedingte Maßstabeffekt darin zu liegen, dass sich die Wirbelkavitation der Saug- als auch der Druckseite im Gegensatz zur Großausführung relativ ruhig verhalten und daher kaum Druckamplituden der höheren Blattharmonischen induzieren. Ein klassischer Fall von überzeichneten Druckimpulsen der ersten Blattharmonischen, der mit markant ausgebildeter Schichtkavitation in Zusammenhang gebracht wird, liegt hier nicht vor.
- Durch die Erhöhung der Modelldrehzahl von $n=28\text{Hz}$ auf $n=36\text{Hz}$ ($R_n+29\%$) konnten keine signifikanten Unterschiede im Kavitationsverhalten beobachtet werden. Die Druckschwankungen hingegen zeigten in der ersten Blattharmonischen eine leichte Reduktion der Amplituden.

Diese Reduktion ist allerdings nicht eindeutig auf die höhere Reynolds-Zahl zurückzuführen, sondern wahrscheinlich eher auf den mit zunehmender Versuchszeit abnehmenden Keimgehalt des Wassers und die damit verbundene instabilere bzw. seltener auftretende Kavitation im Modellmaßstab von Umdrehung zu Umdrehung, sodass die Druckschwankungsamplituden aus statistischen Gründen kleiner ausfallen.

- Die Druckschwankungen sind weitestgehend vom Einsatz der Flow-Liner unverändert. Der Grund hierfür scheint zum einen in der geringen Wirksamkeit der Flow-Liner zu liegen als auch an der mangelnden Schichtkavitation, die signifikant auf geringste Nachstromänderungen reagieren müsste. Bei höherer Drehzahl reduzierten sich die Amplituden gegenüber der kleineren Drehzahl, dies ist aber eher auf den oben beschriebenen Einfluss der Versuchszeit bzw. Reihenfolge zurückzuführen.
- Die Variation des Flow-Liner Anstellwinkels kann vernachlässigt werden, da sie zu relativ kleinen Änderungen der Druckschwankungen führte.

8 Quellenverzeichnis

- [1] HSVA Bericht K 49-12 : „Messfahrt FSG Nr. 743 „AMANDINE“ Kavitationsbeobachtungen und Druckschwankungsmessungen Projekt: KONKAV II“
- [2] HSVA Bericht N 11-14 : „3-D-Nachstrommessungen, Projekt : KONKAV II“
- [3] HSVA-Bericht WP 128/12 : „Modellversuche im Schlepptank, Projekt : KONKAV II“
- [4] HSVA-Bericht K 27-14 : „Entwicklung von Flow-Linern zur Reduzierung des nachstrombedingten Maßstabeffekts: Projekt : KONKAV II“
- [5] Proceedings of the 8th International Symposium on Cavitation CAV 2012, Singapore, “Investigation of Hull Pressure Pulses, Making Use of Two Different Large Scale Cavitation Testing Facilities”

9 Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 1 Hauptdaten des Projektes
- Tab. 2-3a-c Ergebnisse der Druckschwankungsmessungen: mit/ohne Kavitation, ohne Liner

10 Liste der Abbildungen

- Abb. 1 Hydrodynamik- und Kavitationstunnel (HYKAT)
- Abb. 2 Flow-Liner
- Abb. 3 Versuchseinbauten in der HYKAT Messstrecke, innen liegende Liner
- Abb. 4 Versuchseinbauten in der HYKAT Messstrecke, außen liegende Liner
- Abb. 5 Versuchsaufbau für die IPI-Messungen der UniRo
- Abb. 6 Ruder- und Propelleranordnung
- Abb. 7 Formplan des Propellers
- Abb. 8 Lage der Druckmessdosen
- Abb. 9 Winkelkonvention
- Abb. 10-15 Skizzen der Kavitationserscheinungen

Einfluss des Gasgehalts

Abb. 16-17 Anzahlkonzentration und Keimspektren, Punkt1-Punkt5

Abb. 18 Ergebnisse Druckschwankungsmessungen, Punkt1-Punkt5

Abb. 19-25 Ergebnisse Druckschwankungsmessungen, Referenzergebnisse, Punkt 2

Abb. 26-27 Zeitsignal, FFT vergleich Punkt 2 und Punkt 5

Einfluss der Flow-Liner

Abb. 28 Druckimpulse ohne und mit Flow-Liner, 1-3 Harmonische, $n=28\text{Hz}$

Abb. 29 Druckimpulse ohne und mit Flow-Liner, 1 Harmonische, $n=28\text{Hz}$ und 36Hz

Versuchsnummer	K 10-14
HSVA Schiffsmodell Nr.	4864
HSVA Ruder Nr.	874
Länge zwischen den Loten (L_{pp})	186.22 m
Breite	30.0 m
Tiefgang, vorne / hinten	6.32 m / 6.65 m
Maßstab	24.829
Propeller Nummer (HSVA)	2824
Propeller Durchmesser D	5.80 m
Propellertyp	Verstellpropeller (CP)
Drehsinn	Links
Zahl der Propellerflügel	4
Propellersteigung $P_{0.7R}/D$	0.902 (Entwurf -5°)
Freischlag	27.5 %
Abstand MW Welle - Basis	2.90 m
Heckwellenhöhe	1.2 m
Leistung PD [MCR]	6522 kW
Nenn Drehzahl N	103.2 Umin
Geschwindigkeit ca. V_s	16.4 kn
K_T	0.1788
σ_n	0.2966

Tabelle 1: Hauptdaten des Projektes

		Mittelwerte		Standardabweichung
	KP [-]	ΔP [kPa]	Phi [°]	ΔP [kPa]
P2				
1. Harm.	0.00855	0.87	243.5	0.07
2. Harm.	0.00101	0.10	34.7	0.05
3. Harm.	0.00057	0.06	76.7	0.04
4. Harm.	0.00047	0.05	257.0	0.04
5. Harm.	0.00065	0.07	81.0	0.08
P3				
1. Harm.	0.00766	0.78	257.2	0.08
2. Harm.	0.00099	0.10	55.3	0.05
3. Harm.	0.00058	0.06	68.6	0.05
4. Harm.	0.00049	0.05	252.5	0.05
5. Harm.	0.00070	0.07	84.1	0.09
P4				
1. Harm.	0.00324	0.33	265.9	0.08
2. Harm.	0.00065	0.07	53.6	0.04
3. Harm.	0.00061	0.06	45.2	0.05
4. Harm.	0.00058	0.06	284.2	0.06
5. Harm.	0.00064	0.07	89.7	0.08
P5				
1. Harm.	0.00366	0.37	334.2	0.09
2. Harm.	0.00065	0.07	318.0	0.03
3. Harm.	0.00041	0.04	200.1	0.03
4. Harm.	0.00034	0.04	239.0	0.03
5. Harm.	0.00044	0.05	129.2	0.05
P6				
1. Harm.	0.00540	0.55	311.1	0.11
2. Harm.	0.00071	0.07	238.5	0.05
3. Harm.	0.00055	0.06	127.4	0.04
4. Harm.	0.00048	0.05	247.3	0.04
5. Harm.	0.00058	0.06	78.0	0.07
P8				
1. Harm.	0.00727	0.74	228.5	0.10
2. Harm.	0.00095	0.10	11.8	0.04
3. Harm.	0.00057	0.06	74.3	0.04
4. Harm.	0.00050	0.05	259.4	0.05
5. Harm.	0.00075	0.08	74.6	0.10

Tab. 2a: Druckamplituden (Großausführung)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5°

		Mittelwerte		Standardabweichung
	KP [-]	ΔP [kPa]	Phi [°]	ΔP [kPa]
P9				
1. Harm.	0.00555	0.57	198.8	0.08
2. Harm.	0.00071	0.07	340.0	0.04
3. Harm.	0.00062	0.06	61.1	0.04
4. Harm.	0.00045	0.05	205.6	0.04
5. Harm.	0.00055	0.06	87.5	0.07
P10				
1. Harm.	0.00623	0.64	299.8	0.10
2. Harm.	0.00070	0.07	321.1	0.04
3. Harm.	0.00054	0.06	28.9	0.03
4. Harm.	0.00051	0.05	241.6	0.04
5. Harm.	0.00063	0.06	83.5	0.07
P11				
1. Harm.	0.00821	0.84	270.8	0.10
2. Harm.	0.00078	0.08	76.3	0.05
3. Harm.	0.00053	0.05	5.2	0.04
4. Harm.	0.00055	0.06	244.4	0.05
5. Harm.	0.00062	0.06	87.4	0.08
P12				
1. Harm.	0.00833	0.85	213.2	0.09
2. Harm.	0.00090	0.09	0.4	0.04
3. Harm.	0.00054	0.06	70.6	0.04
4. Harm.	0.00043	0.04	241.1	0.04
5. Harm.	0.00060	0.06	67.2	0.08
P13				
1. Harm.	0.00300	0.31	315.1	0.09
2. Harm.	0.00067	0.07	310.3	0.04
3. Harm.	0.00051	0.05	150.0	0.03
4. Harm.	0.00040	0.04	297.1	0.03
5. Harm.	0.00053	0.05	117.7	0.07
P14				
1. Harm.	0.00329	0.34	291.4	0.10
2. Harm.	0.00065	0.07	176.1	0.04
3. Harm.	0.00059	0.06	37.6	0.04
4. Harm.	0.00055	0.06	265.7	0.05
5. Harm.	0.00076	0.08	75.1	0.10

Tab. 2b: Druckamplituden (Großausführung)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5°

		Mittelwerte		Standardabweichung
	KP [-]	ΔP [kPa]	Phi [°]	ΔP [kPa]
p16				
1. Harm.	0.00408	0.42	323.2	0.07
2. Harm.	0.00066	0.07	319.7	0.04
3. Harm.	0.00042	0.04	220.8	0.03
4. Harm.	0.00038	0.04	252.7	0.03
5. Harm.	0.00041	0.04	104.3	0.05
p17				
1. Harm.	0.00626	0.64	187.6	0.08
2. Harm.	0.00069	0.07	344.3	0.04
3. Harm.	0.00055	0.06	52.8	0.03
4. Harm.	0.00044	0.05	267.7	0.04
5. Harm.	0.00056	0.06	65.3	0.07
p18				
1. Harm.	0.00237	0.24	331.8	0.07
2. Harm.	0.00071	0.07	319.7	0.04
3. Harm.	0.00047	0.05	174.0	0.03
4. Harm.	0.00039	0.04	271.3	0.03
5. Harm.	0.00050	0.05	130.4	0.06
p19				
1. Harm.	0.00253	0.26	206.9	0.08
2. Harm.	0.00067	0.07	353.3	0.04
3. Harm.	0.00063	0.06	67.6	0.04
4. Harm.	0.00036	0.04	265.7	0.03
5. Harm.	0.00051	0.05	98.6	0.06

Tab. 2c: Druckamplituden (Großausführung)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5°

		Mittelwerte		Standardabweichung
	KP [-]	ΔP [kPa]	Phi [°]	ΔP [kPa]
P2				
1. Harm.	0.00921	0.94	245.8	0.07
2. Harm.	0.00117	0.12	52.5	0.05
3. Harm.	0.00033	0.03	276.4	0.02
4. Harm.	0.00024	0.03	347.9	0.01
5. Harm.	0.00018	0.02	10.5	0.01
P3				
1. Harm.	0.00843	0.86	258.1	0.08
2. Harm.	0.00130	0.13	62.2	0.04
3. Harm.	0.00027	0.03	271.5	0.02
4. Harm.	0.00019	0.02	319.9	0.01
5. Harm.	0.00015	0.02	15.6	0.01
P4				
1. Harm.	0.00385	0.39	265.3	0.07
2. Harm.	0.00085	0.09	67.7	0.03
3. Harm.	0.00021	0.02	332.0	0.01
4. Harm.	0.00016	0.02	319.1	0.01
5. Harm.	0.00015	0.02	27.8	0.01
P5				
1. Harm.	0.00397	0.41	326.7	0.10
2. Harm.	0.00061	0.06	357.0	0.03
3. Harm.	0.00032	0.03	224.5	0.02
4. Harm.	0.00017	0.02	231.0	0.01
5. Harm.	0.00014	0.01	224.2	0.01
P6				
1. Harm.	0.00579	0.59	307.9	0.10
2. Harm.	0.00068	0.07	72.2	0.04
3. Harm.	0.00038	0.04	247.2	0.02
4. Harm.	0.00024	0.03	277.4	0.02
5. Harm.	0.00019	0.02	238.5	0.01
P8				
1. Harm.	0.00784	0.80	231.2	0.09
2. Harm.	0.00121	0.12	34.5	0.04
3. Harm.	0.00024	0.03	117.1	0.01
4. Harm.	0.00018	0.02	328.6	0.01
5. Harm.	0.00012	0.01	23.2	0.01

Tab. 3a: Druckamplituden - kavitationsfrei (auf Großausführung umgerechnet)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5°

		Mittelwerte		Standardabweichung
	KP [-]	ΔP [kPa]	Phi [°]	ΔP [kPa]
P9				
1. Harm.	0.00582	0.59	204.2	0.09
2. Harm.	0.00077	0.08	27.9	0.04
3. Harm.	0.00036	0.04	35.5	0.02
4. Harm.	0.00023	0.02	30.1	0.01
5. Harm.	0.00016	0.02	9.3	0.01
P10				
1. Harm.	0.00677	0.69	297.7	0.10
2. Harm.	0.00070	0.07	60.2	0.04
3. Harm.	0.00045	0.05	230.9	0.03
4. Harm.	0.00030	0.03	214.8	0.02
5. Harm.	0.00023	0.02	231.4	0.01
P11				
1. Harm.	0.00891	0.91	271.2	0.10
2. Harm.	0.00103	0.11	73.0	0.05
3. Harm.	0.00034	0.04	268.7	0.02
4. Harm.	0.00022	0.02	331.9	0.01
5. Harm.	0.00014	0.01	339.3	0.01
P12				
1. Harm.	0.00866	0.88	216.9	0.08
2. Harm.	0.00107	0.11	28.3	0.04
3. Harm.	0.00026	0.03	54.8	0.02
4. Harm.	0.00020	0.02	306.1	0.01
5. Harm.	0.00013	0.01	7.3	0.01
P13				
1. Harm.	0.00333	0.34	307.5	0.09
2. Harm.	0.00055	0.06	17.0	0.03
3. Harm.	0.00030	0.03	234.2	0.02
4. Harm.	0.00021	0.02	276.1	0.01
5. Harm.	0.00015	0.02	184.7	0.01
P14				
1. Harm.	0.00384	0.39	286.5	0.10
2. Harm.	0.00068	0.07	87.1	0.04
3. Harm.	0.00027	0.03	329.9	0.02
4. Harm.	0.00021	0.02	295.0	0.01
5. Harm.	0.00016	0.02	1.0	0.01

Tab. 3b: Druckamplituden - kavitationsfrei (auf Großausführung umgerechnet)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5°

		Mittelwerte		Standardabweichung
	KP [-]	ΔP [kPa]	Phi [°]	ΔP [kPa]
p16				
1. Harm.	0.00452	0.46	316.7	0.08
2. Harm.	0.00064	0.07	3.2	0.04
3. Harm.	0.00036	0.04	235.7	0.02
4. Harm.	0.00019	0.02	296.6	0.01
5. Harm.	0.00015	0.02	206.3	0.01
p17				
1. Harm.	0.00643	0.66	193.2	0.09
2. Harm.	0.00074	0.08	29.8	0.04
3. Harm.	0.00036	0.04	27.7	0.02
4. Harm.	0.00025	0.03	200.5	0.02
5. Harm.	0.00018	0.02	355.5	0.01
p18				
1. Harm.	0.00263	0.27	321.1	0.08
2. Harm.	0.00067	0.07	2.3	0.04
3. Harm.	0.00039	0.04	212.8	0.02
4. Harm.	0.00024	0.03	246.4	0.02
5. Harm.	0.00018	0.02	187.0	0.01
p19				
1. Harm.	0.00292	0.30	215.6	0.08
2. Harm.	0.00075	0.08	42.6	0.04
3. Harm.	0.00036	0.04	32.5	0.02
4. Harm.	0.00018	0.02	352.9	0.01
5. Harm.	0.00013	0.01	18.8	0.01

Tab. 3c: Druckamplituden - kavitationsfrei (auf Großausführung umgerechnet)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5°

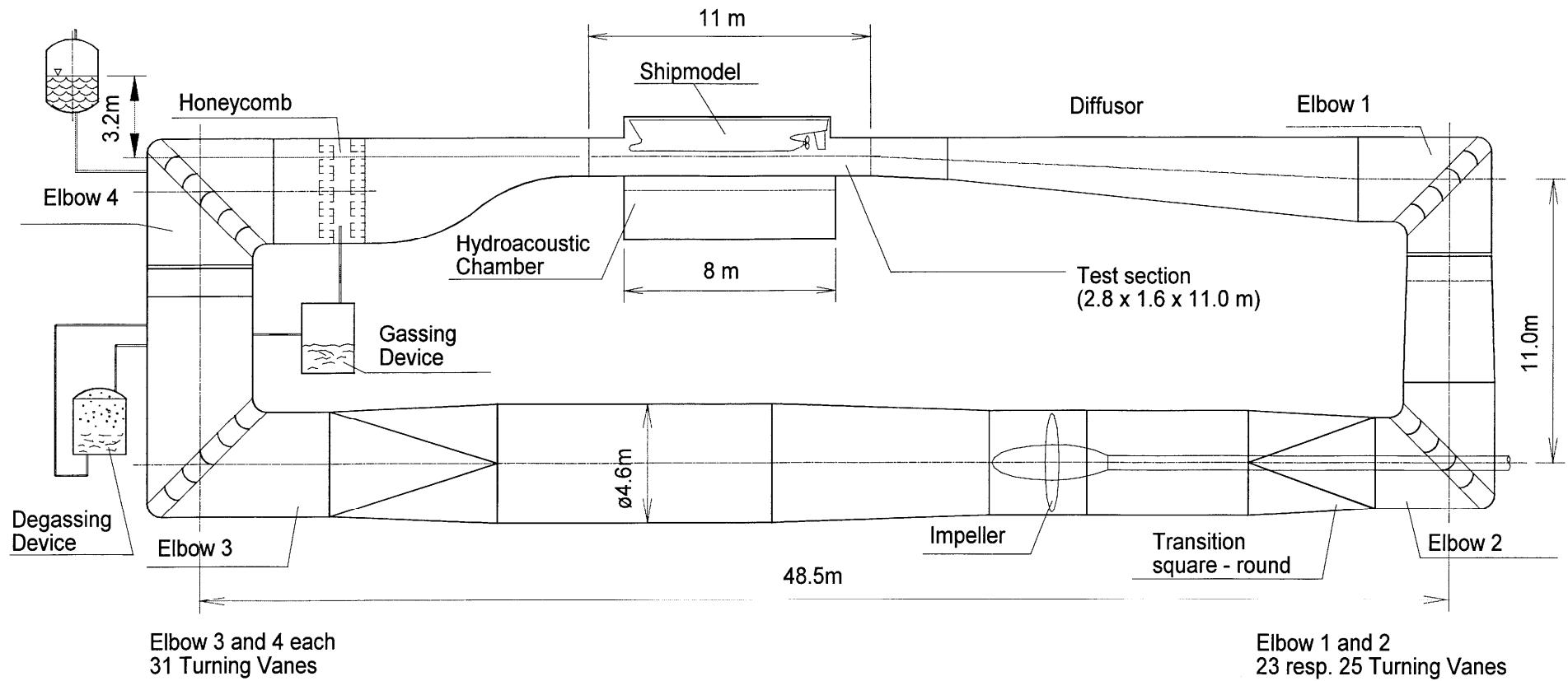
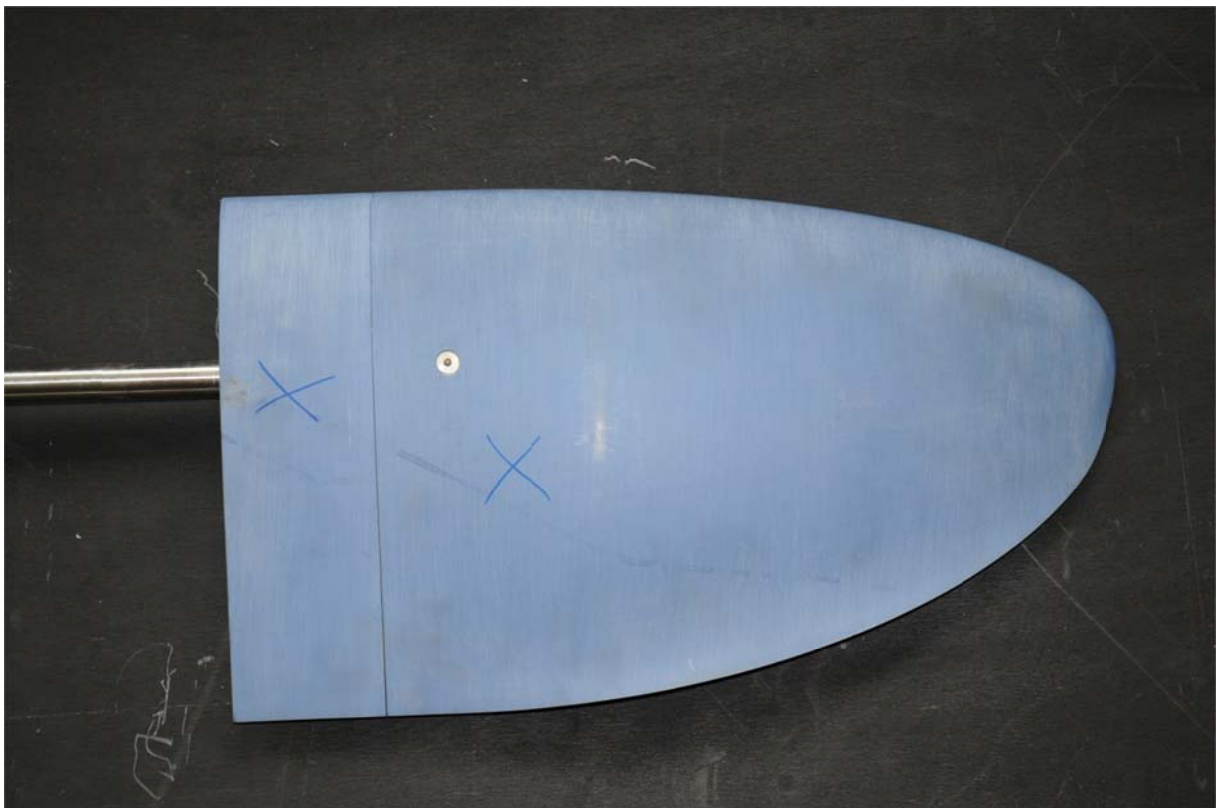


Abb. 1: Hydrodynamik und Kavitationstunnel (HYKAT)



Hauptflügel + Adapter



Hauptflügel + Adapter zusammengesetzt

Abb. 2: Flow-Liner

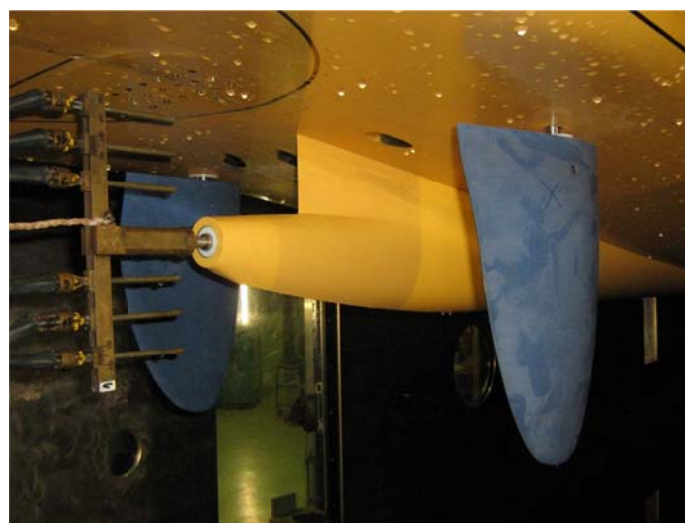
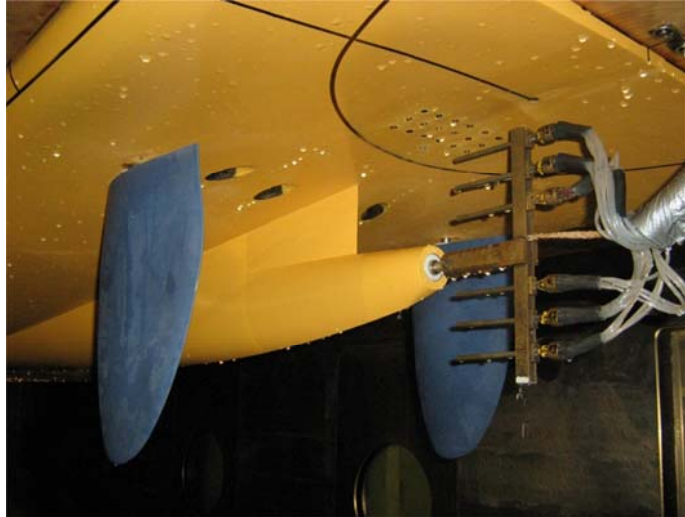


Abb. 3: Einbausituation mit innen liegenden Flügeln, Nachstromharke



Abb. 4: Einbausituation mit außenliegenden Flügeln

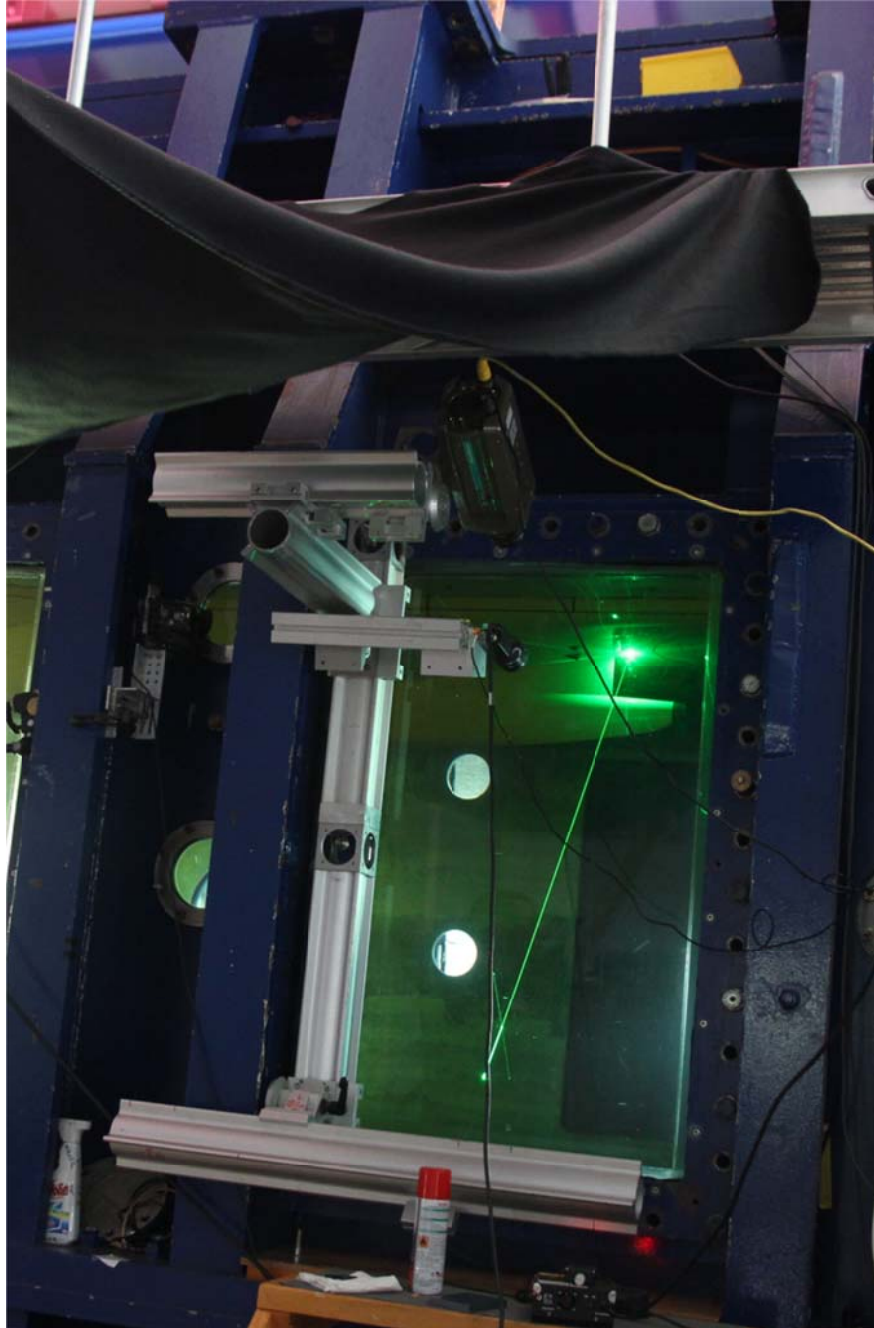


Abb. 5: Versuchsaufbau für die IPI-Messungen der UniRo

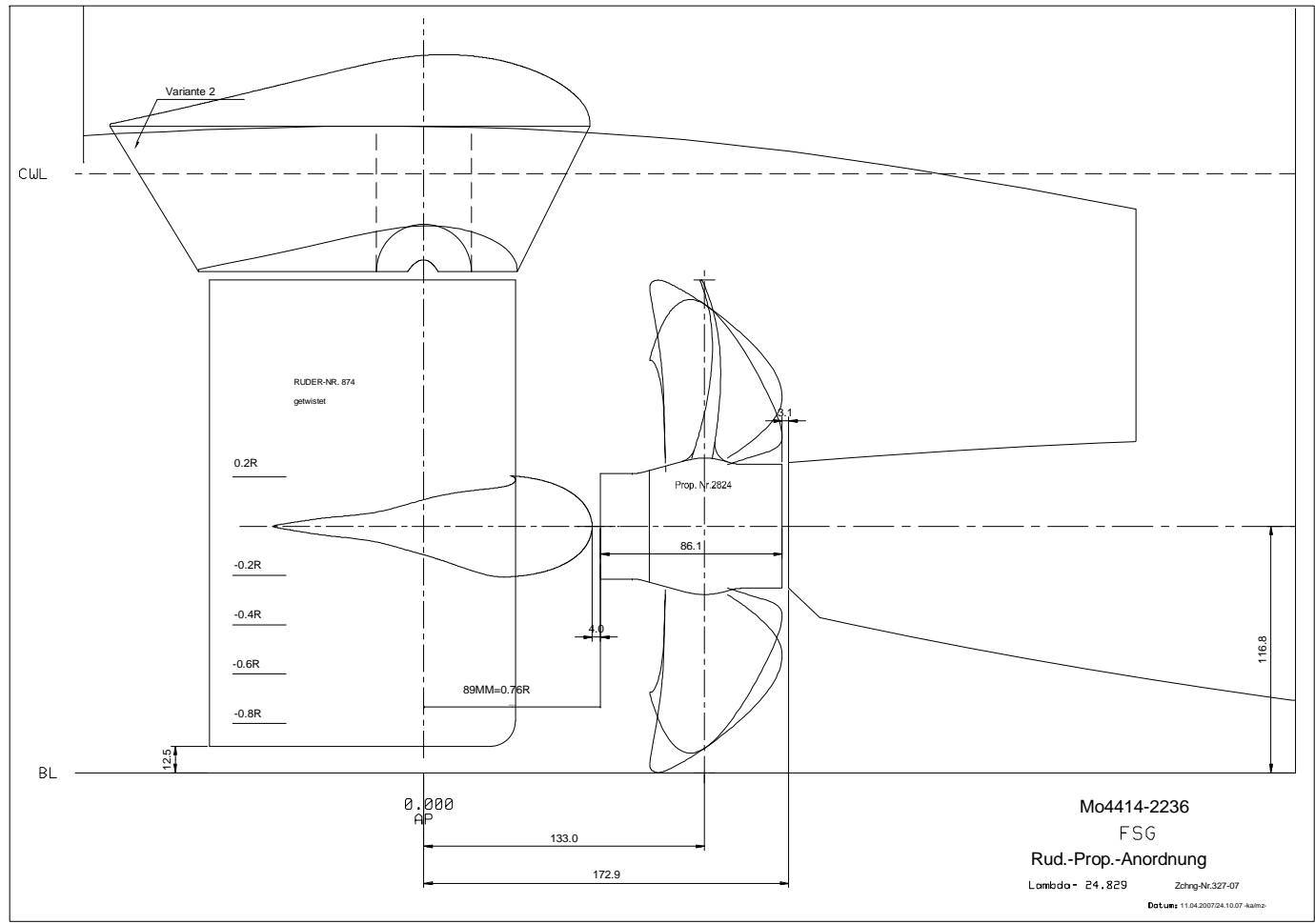
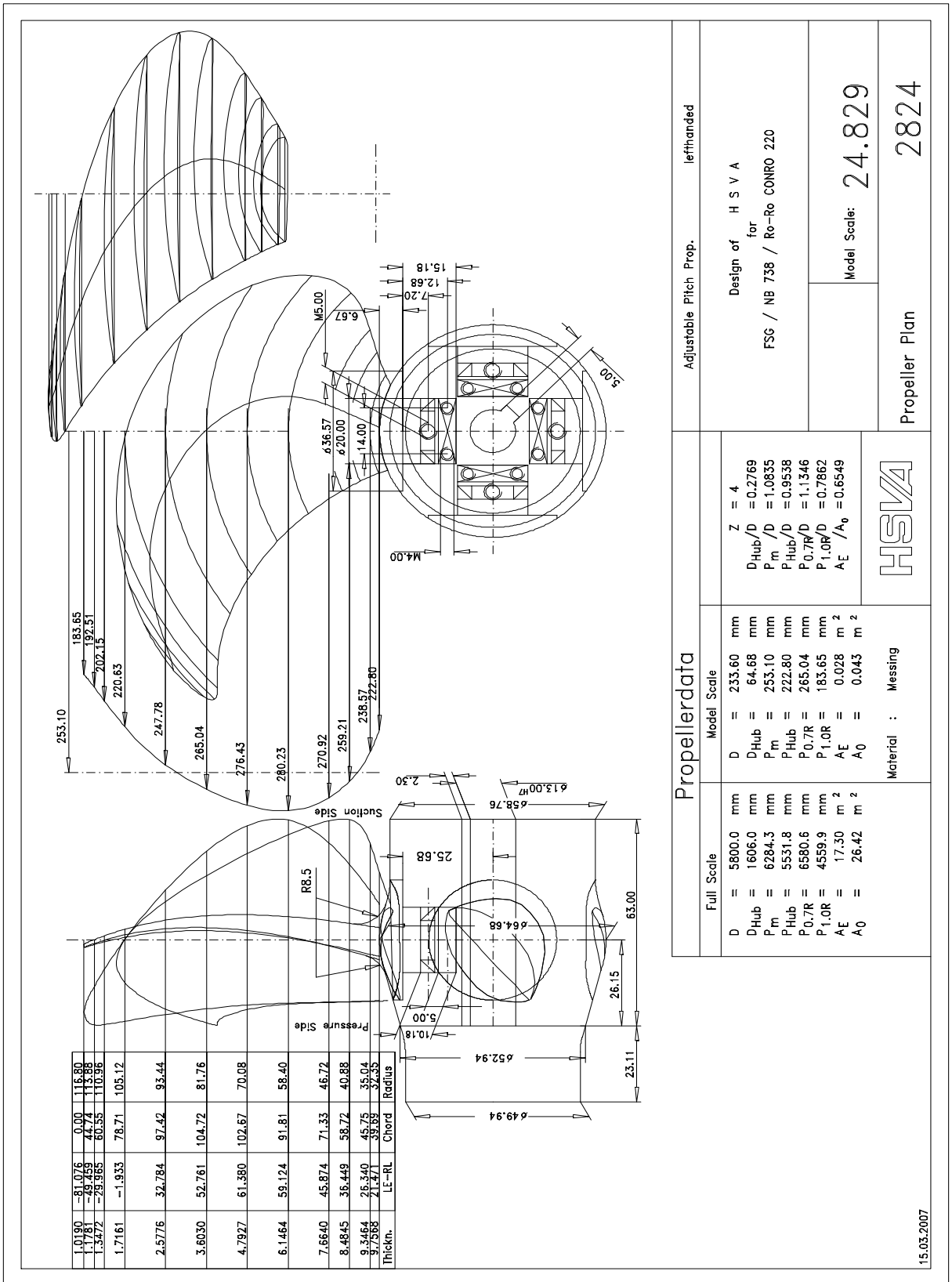


Abb. 6: Ruder- und Propelleranordnung



Propellerdata		Adjustable Pitch Prop.		lefthanded	
Full Scale		Model Scale		Design of H S V A	
D = 5800.0 mm	D = 233.60 mm	for FSG / NB 738 / Ro-Ro CONRO 220			
D _{Hub} = 1606.0 mm	D _{Hub} = 64.68 mm	Model Scale: 24.829			
P _m = 6284.3 mm	P _m = 253.10 mm	Propeller Plan 2824			
P _{Hub} = 5531.8 mm	P _{Hub} = 222.80 mm	HSLVA			
P _{0.7R} = 6580.6 mm	P _{0.7R} = 265.04 mm	Material : Messing			
P _{1.0R} = 4559.9 mm	P _{1.0R} = 183.65 mm	Z = 4			
A _E = 17.30 m ²	A _E = 0.028 m ²	D _{Hub} /D = 0.2769			
A ₀ = 26.42 m ²	A ₀ = 0.043 m ²	P _m /D = 1.0835			
		P _{Hub} /D = 0.9538			
		P _{0.7R} /D = 1.1346			
		P _{1.0R} /D = 0.7862			
		A _E / A ₀ = 0.6549			

Abb. 7 : Propeller Formplan

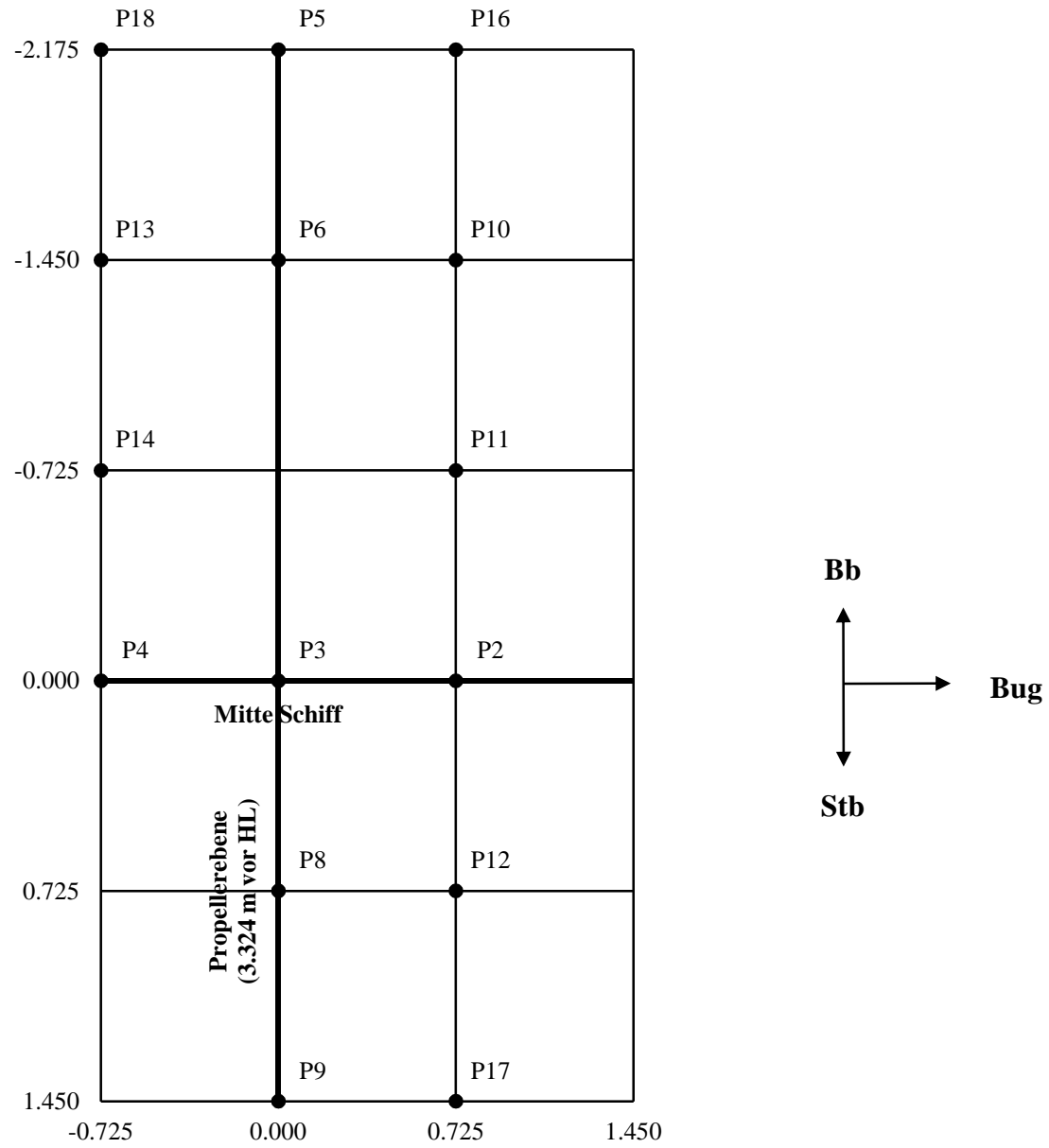
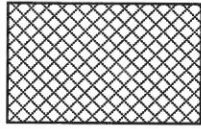
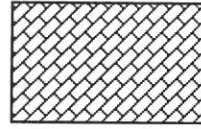


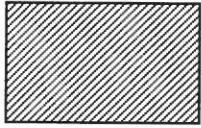
Abb.8: Lage der Druckdosen (Großausführung in Metern)



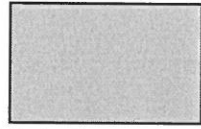
Stabile Schichtkavitation



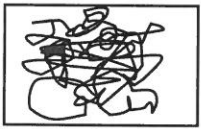
Zeitweise instabile Schichtkavitation



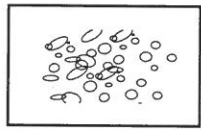
Instabile oder fluktuierende Schichtkavitation



Nebelartige Kavitation



Wolkenkavitation



Blasen kavitation



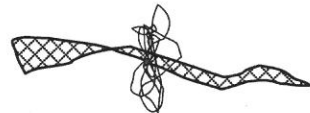
Dünne stabile Wirbelkavitation



Kräftige stabile Wirbelkavitation

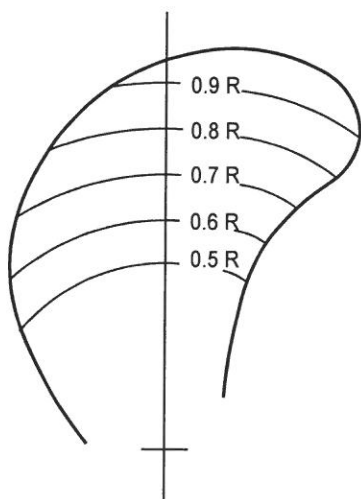


Instabile Wirbelkavitation

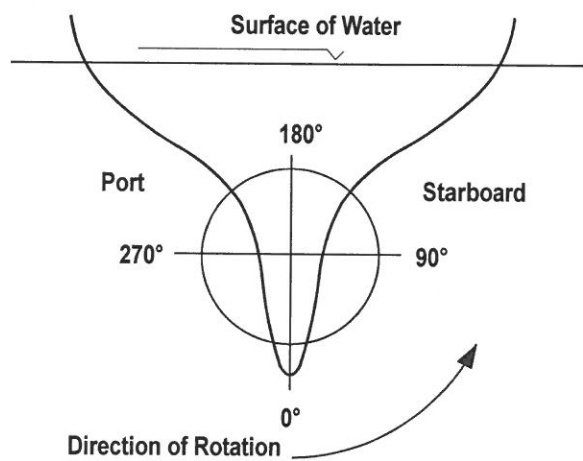


Platzende Wirbelkavitation

Darstellungsweise der Kavitationsarten

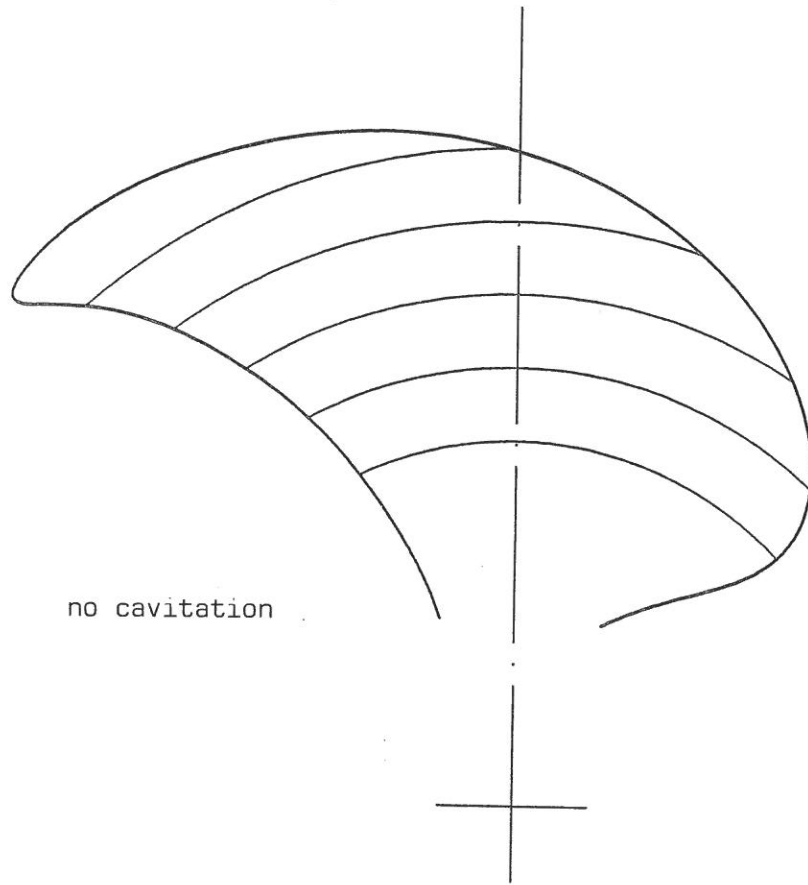


Propellerflügel markiert mit Radien und Erzeugender

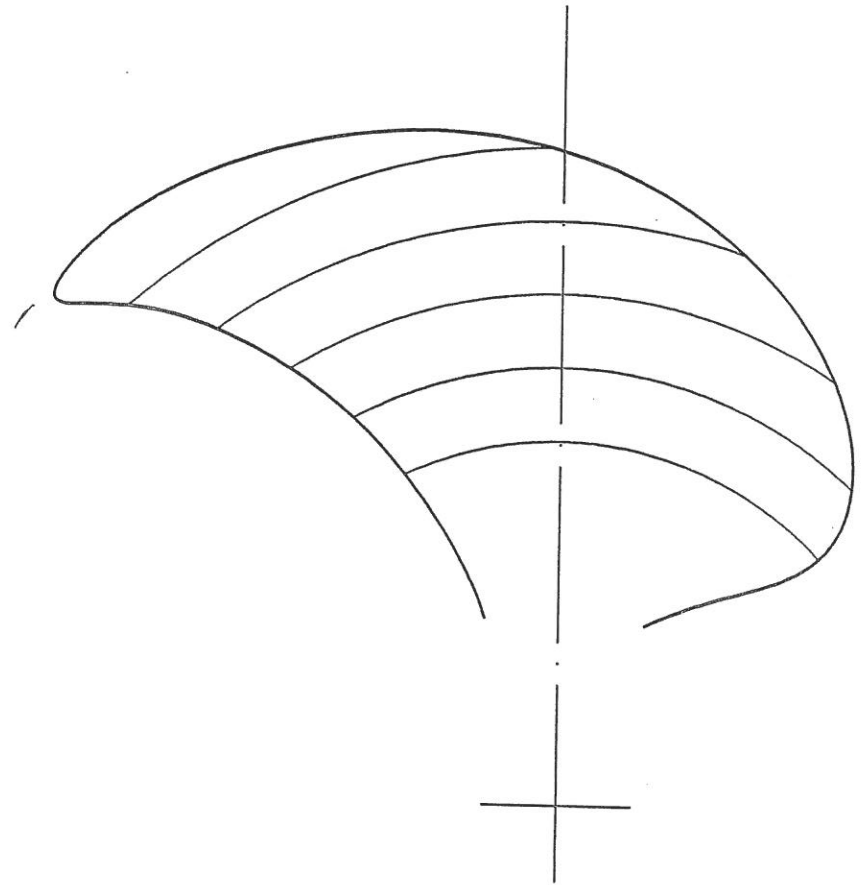


Flügelwinkelpositionen bezogen auf die Erzeugende

Abb. 9: Winkelkonvention und Darstellungsweise der Kavitationsarten

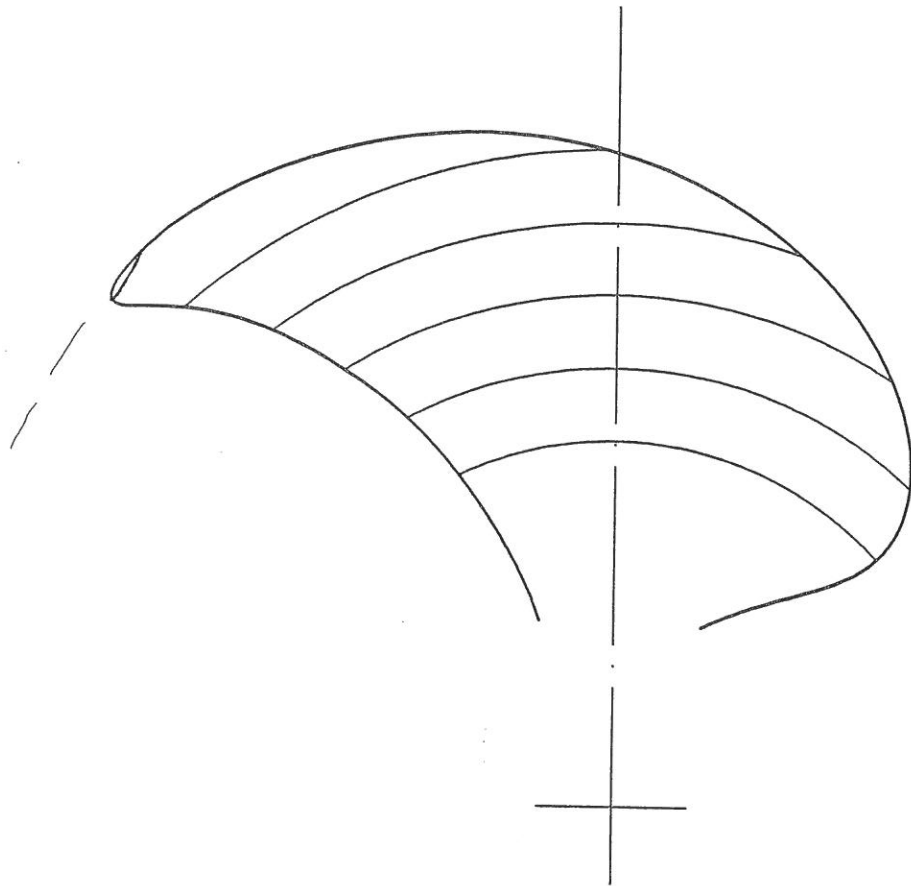


$\Phi = 0^\circ - 170^\circ$

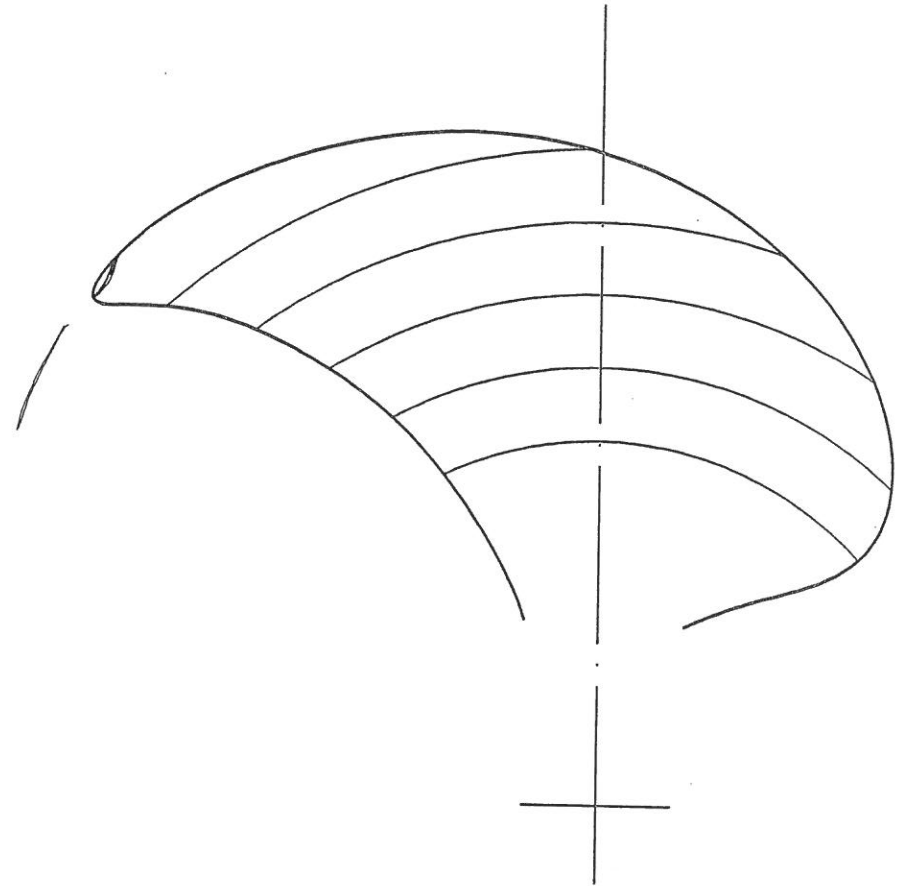


$\Phi = 180^\circ - 190^\circ$

Fig. 10: Back Cavitation, PD = 6522 kW, E -5°

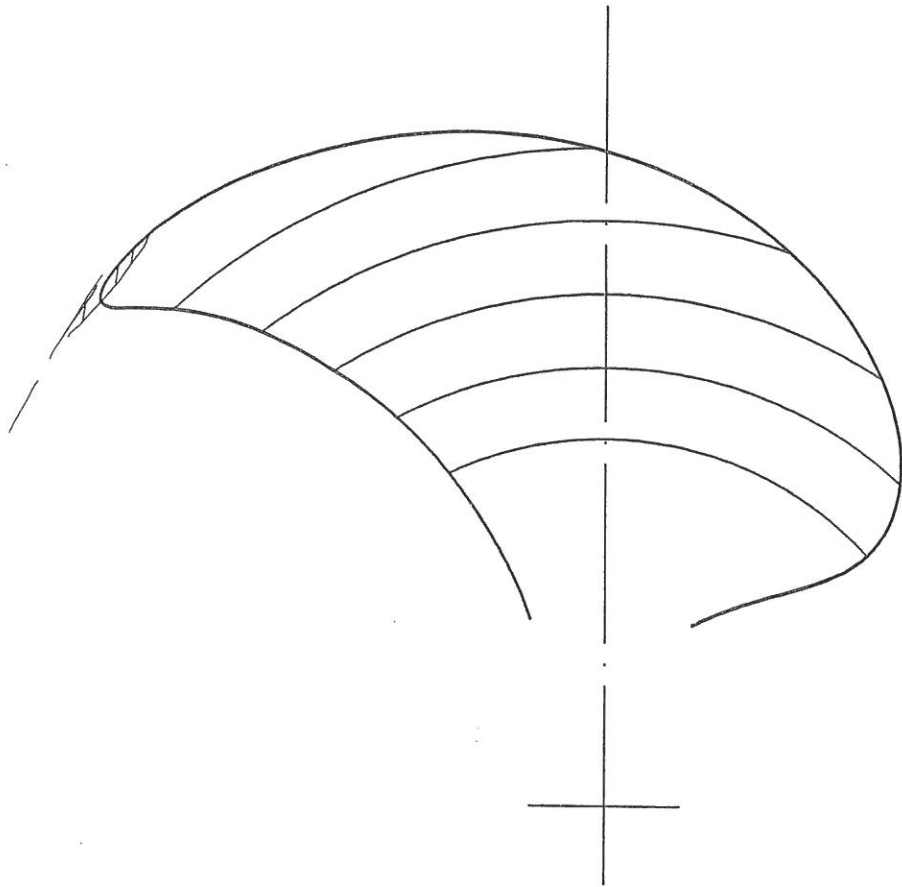


$\Phi = 200^\circ$

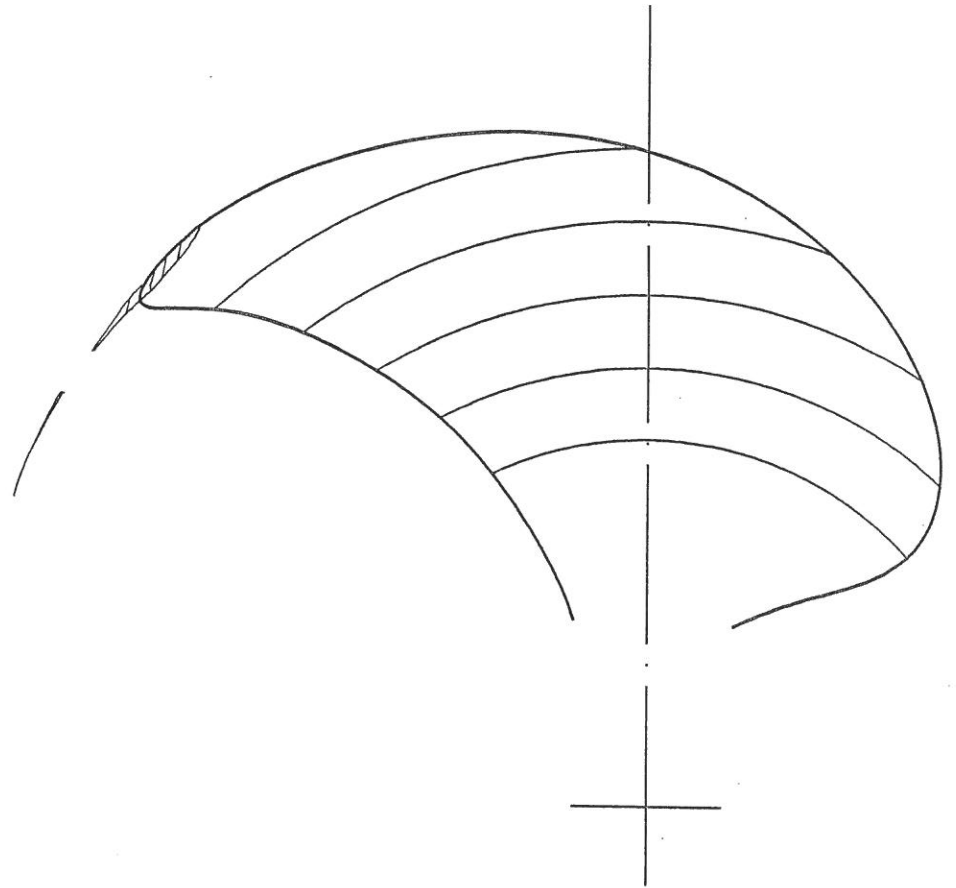


$\Phi = 210^\circ$

Fig. 11: Back Cavitation, PD = 6522 kW, E -5°

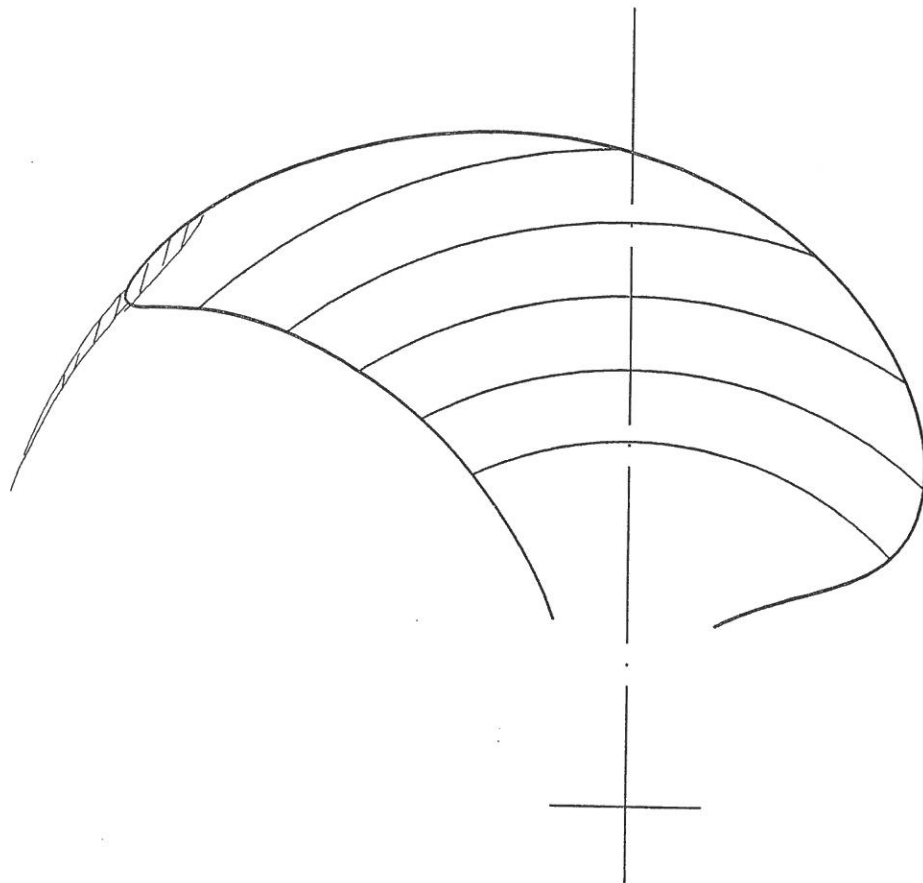


$\Phi = 220^\circ$

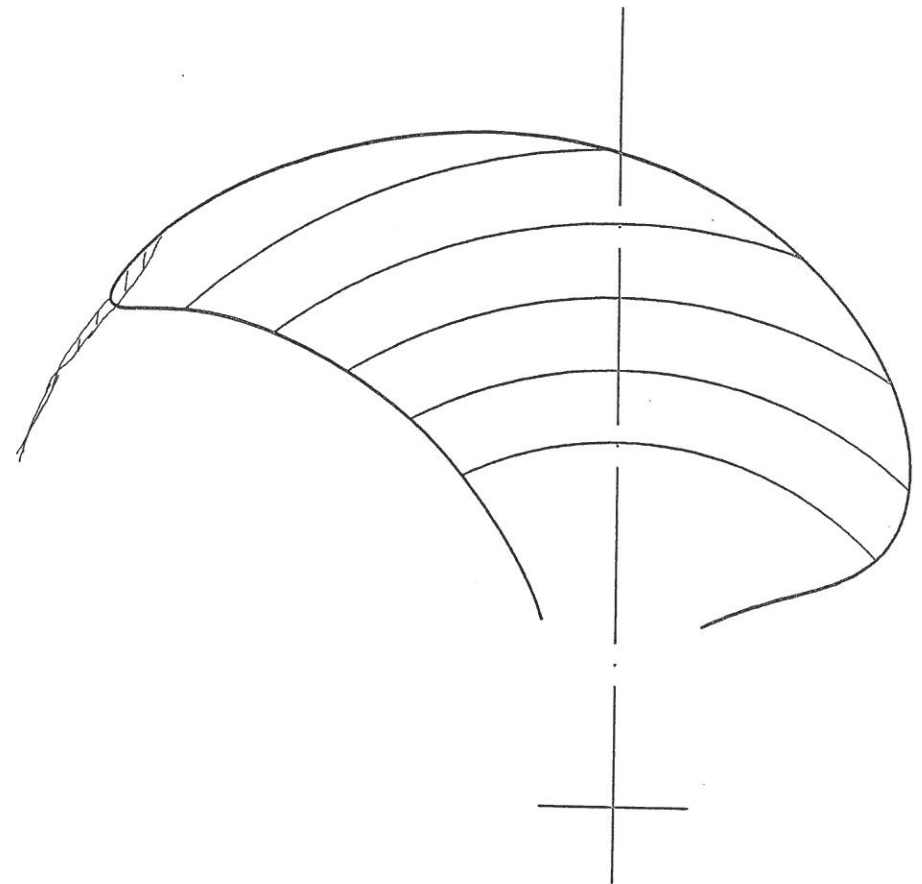


$\Phi = 230^\circ$

Fig. 12: Back Cavitation, PD = 6522 kW, E -5°

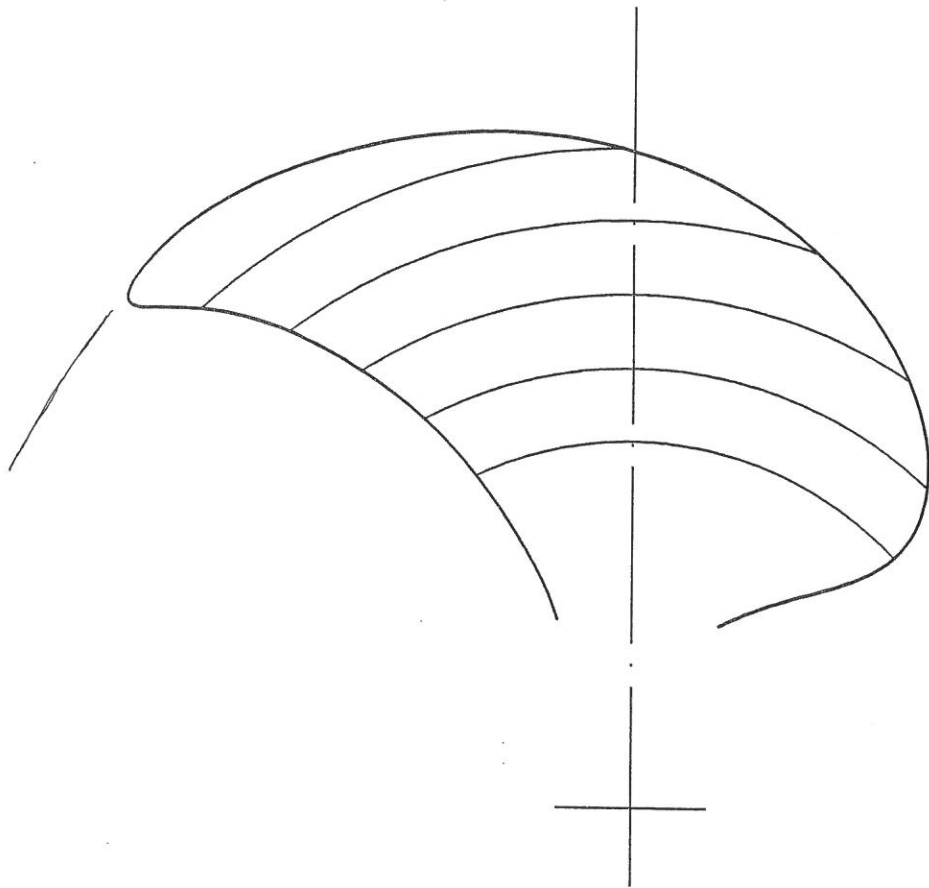


$\Phi = 240^\circ$

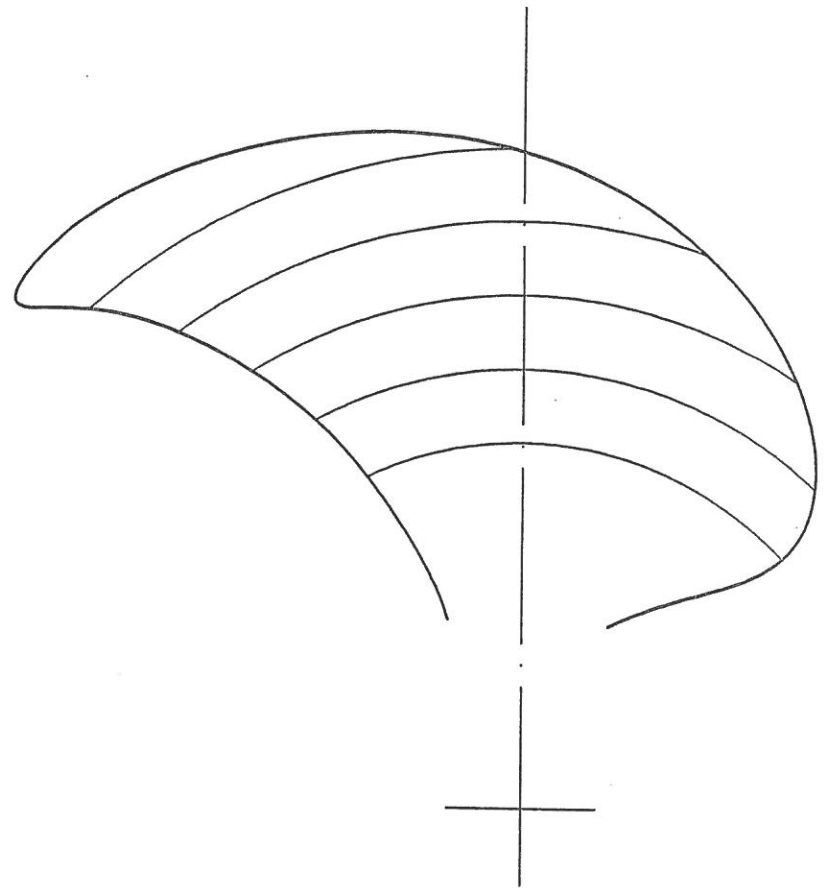


$\Phi = 250^\circ$

Fig. 13: Back Cavitation, PD = 6522 kW, E -5°

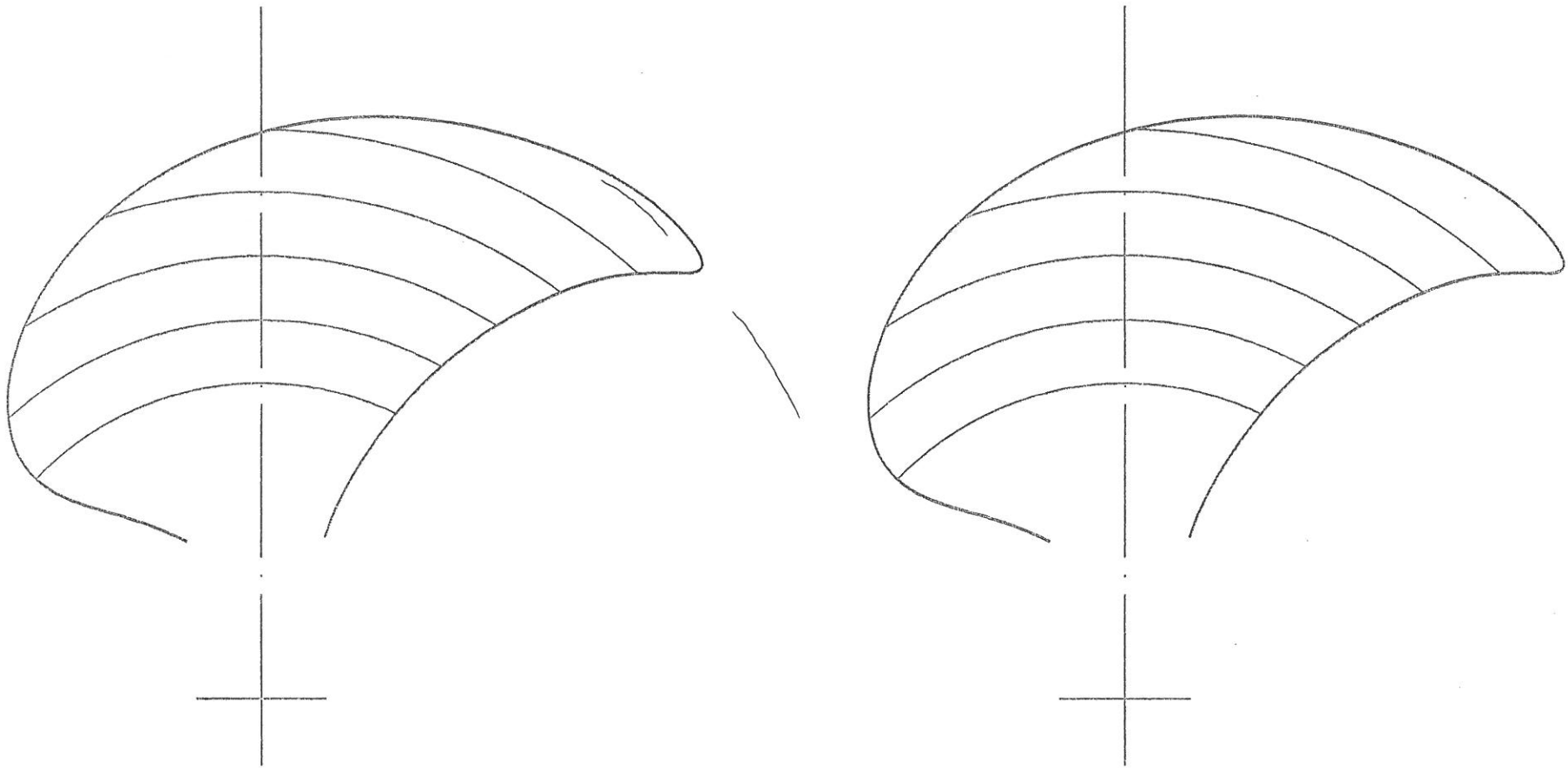


Phi = 260° - 270°



Phi = 280° - 350°

Fig. 14: Back Cavitation, PD = 6522 kW, E -5°



$\Phi = 100^\circ - 120^\circ$

Fig. 15: Face Cavitation, PD = 6522 kW, E -5°

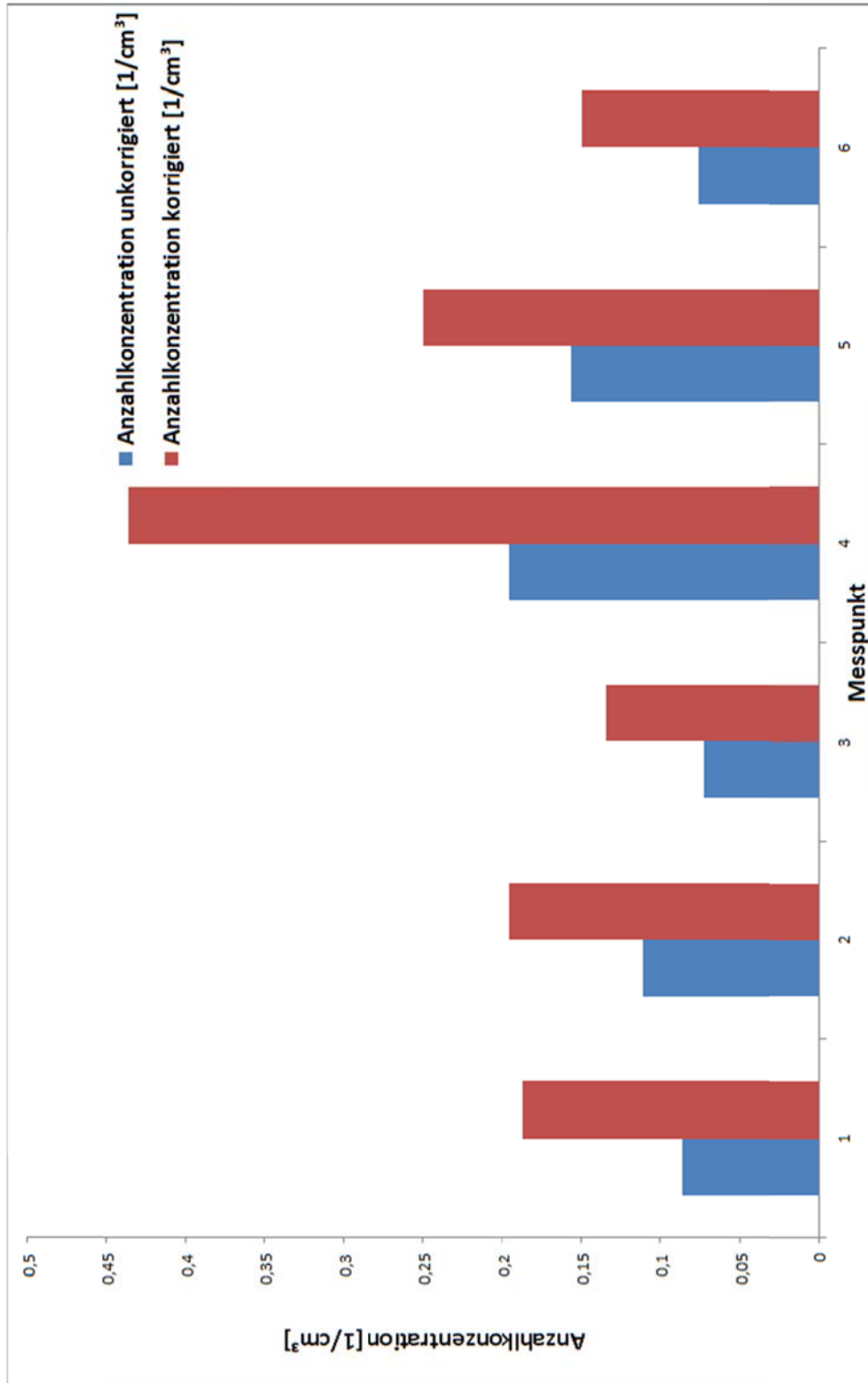


Abb. 16: Anzahlkonzentration (Quelle: UniRo)

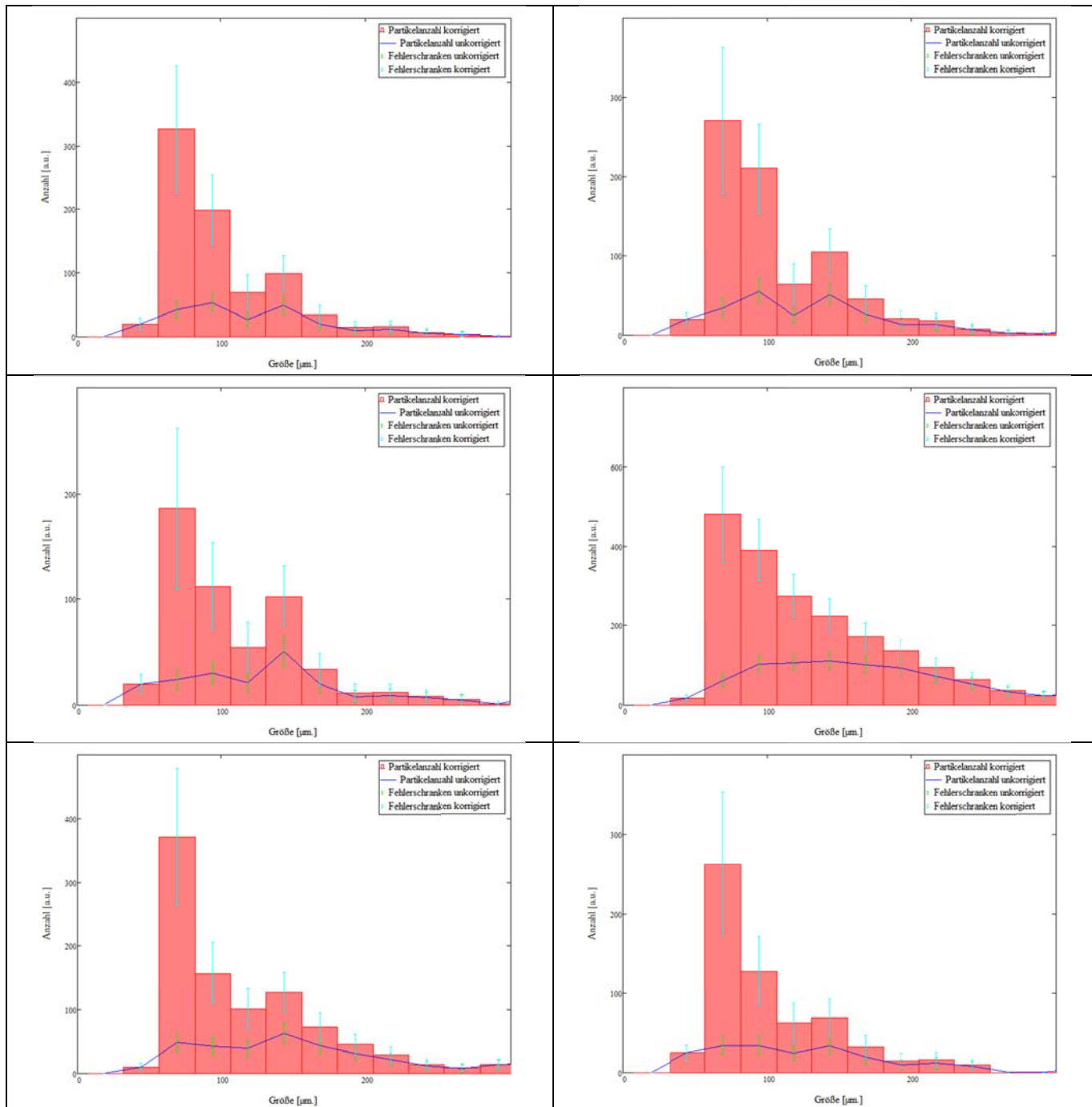


Abb. 17: Keimpektren (Quelle: UniRo)

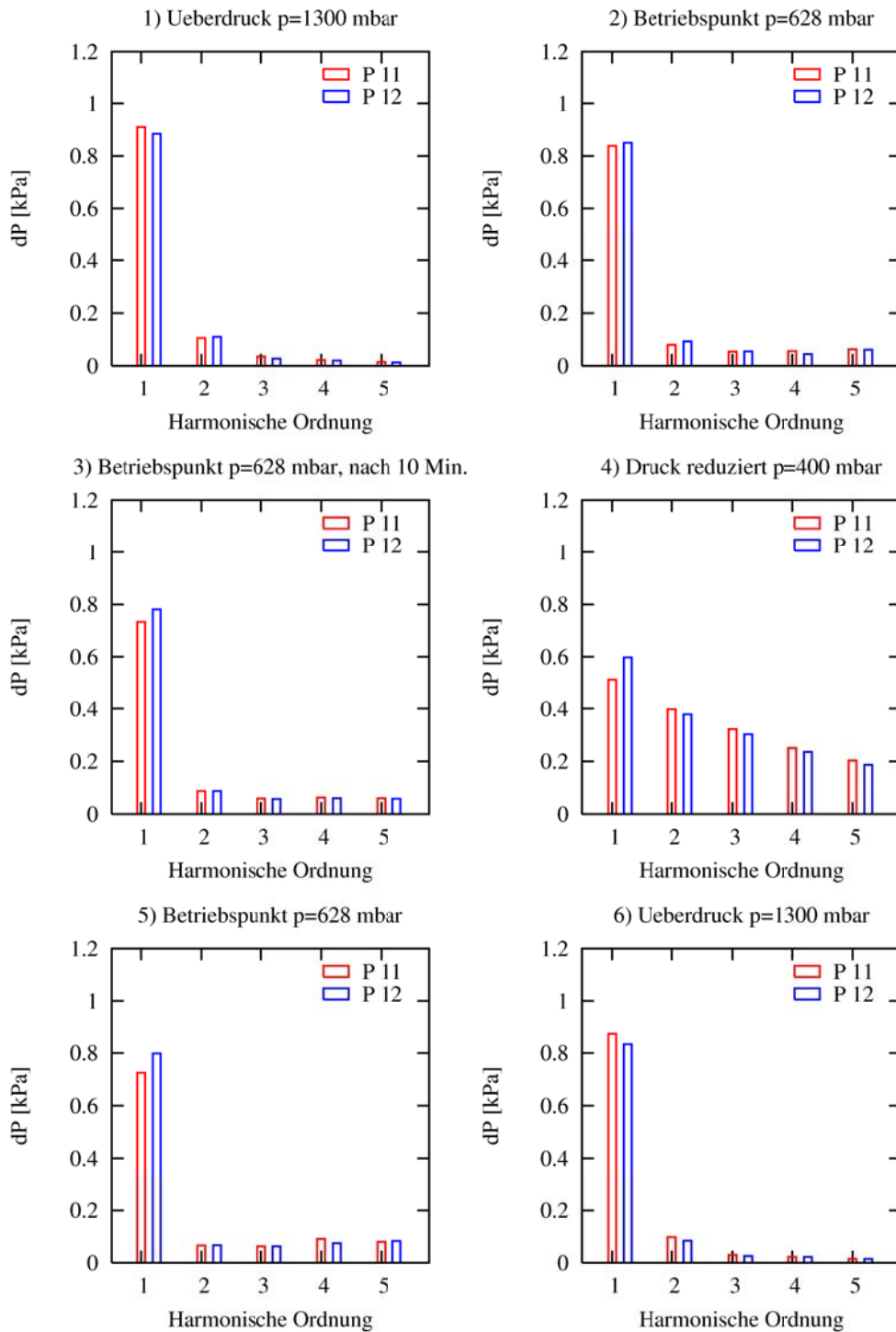


Abb. 18: Druckamplituden parallel zu den 5 Betriebszuständen der IPI-Messungen

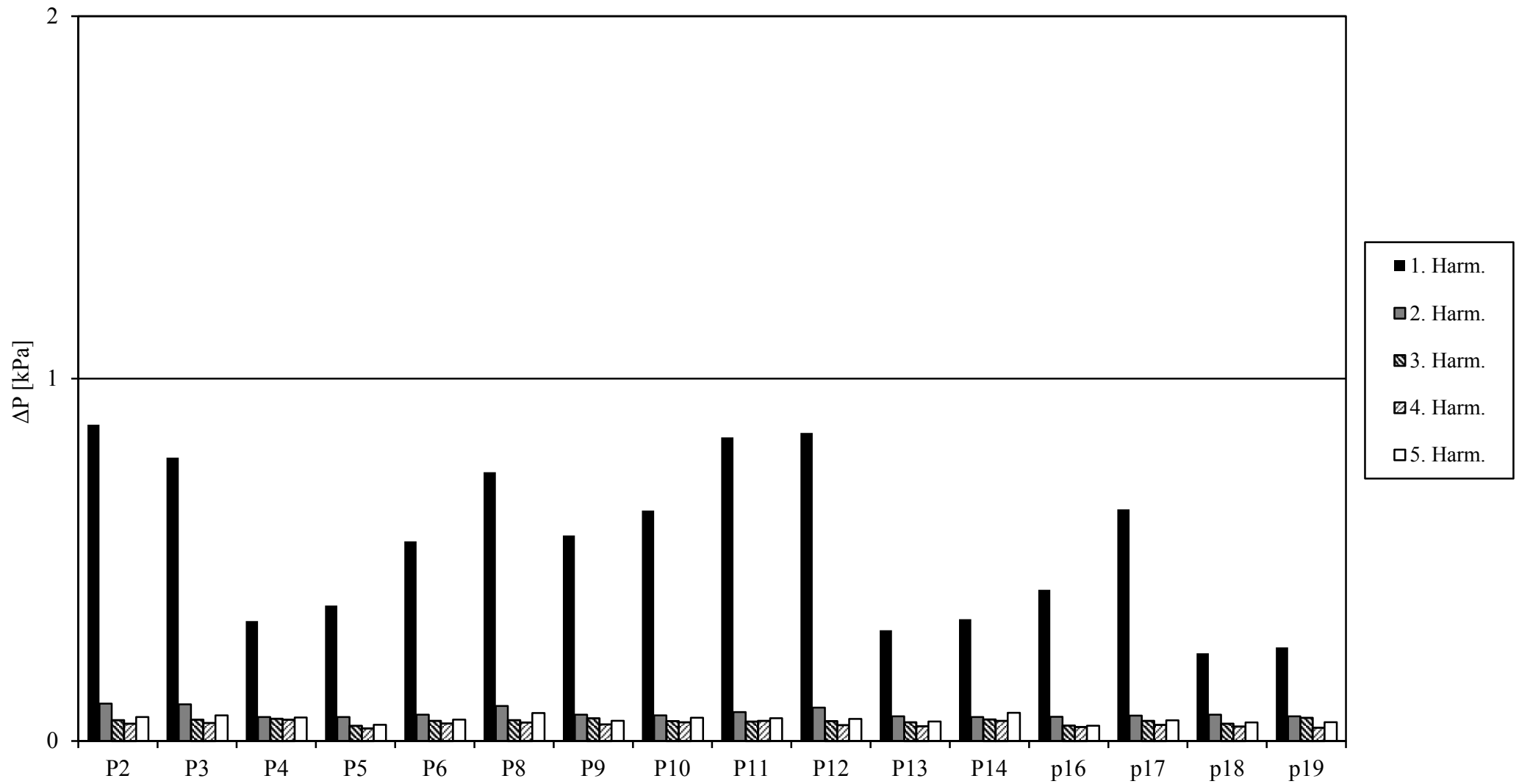
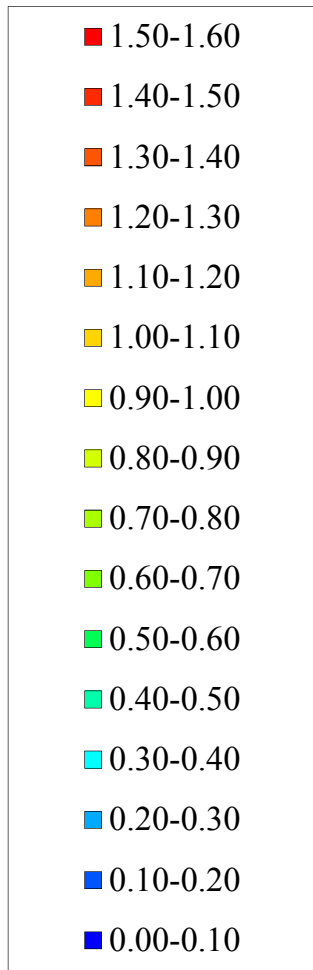


Abb. 19: Druckamplituden (Großausführung)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5



Amplituden in
Kilopascal
(Großausführung)

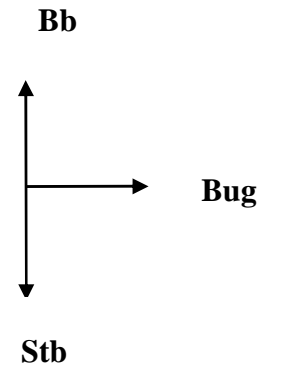
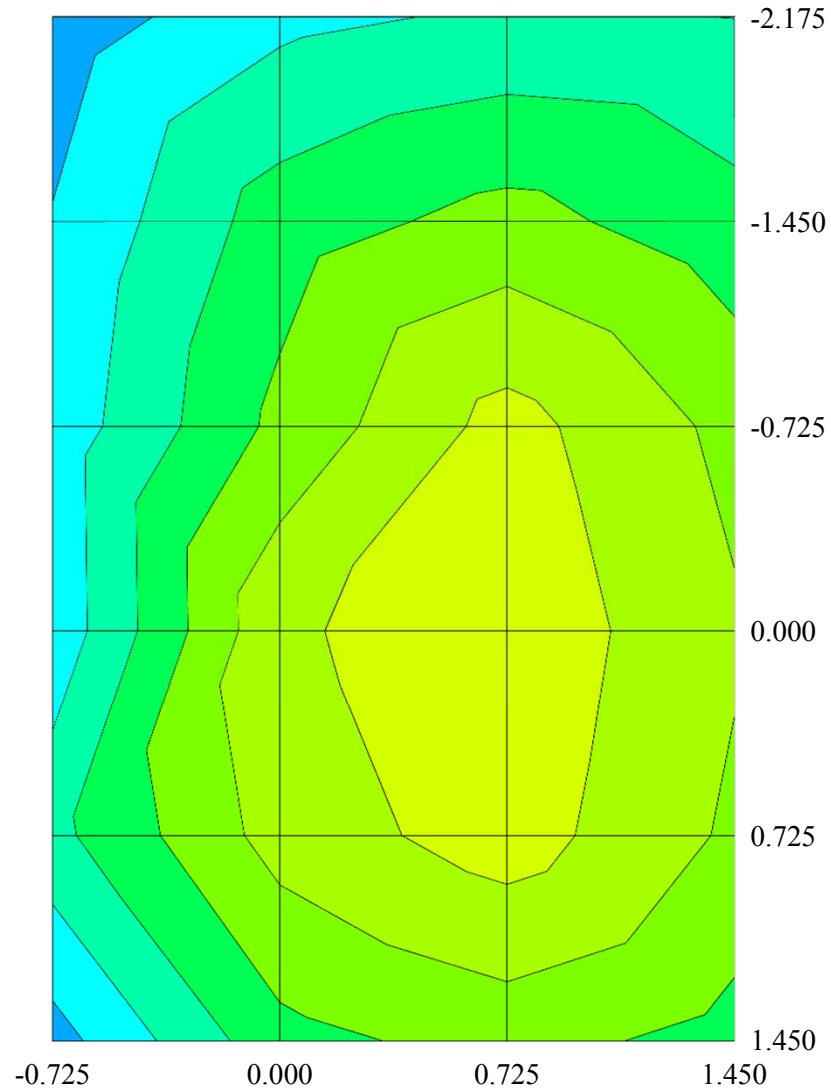


Abb. 20 : Räumliche Verteilung der Amplituden - 1. Harmonische [kPa]
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5

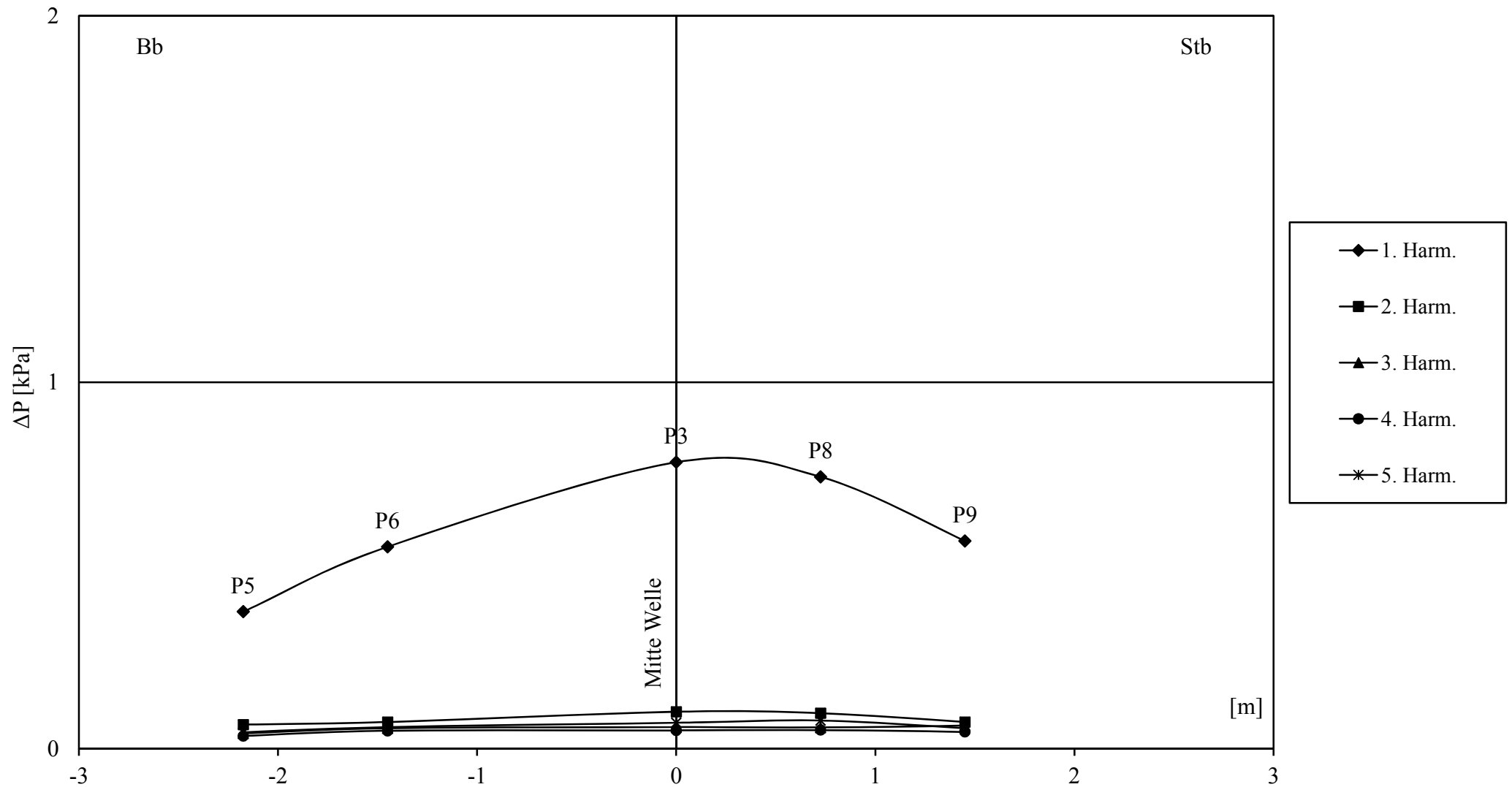


Fig. 21a: Amplituden in der Propellerebene (Großausführung)
 PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5

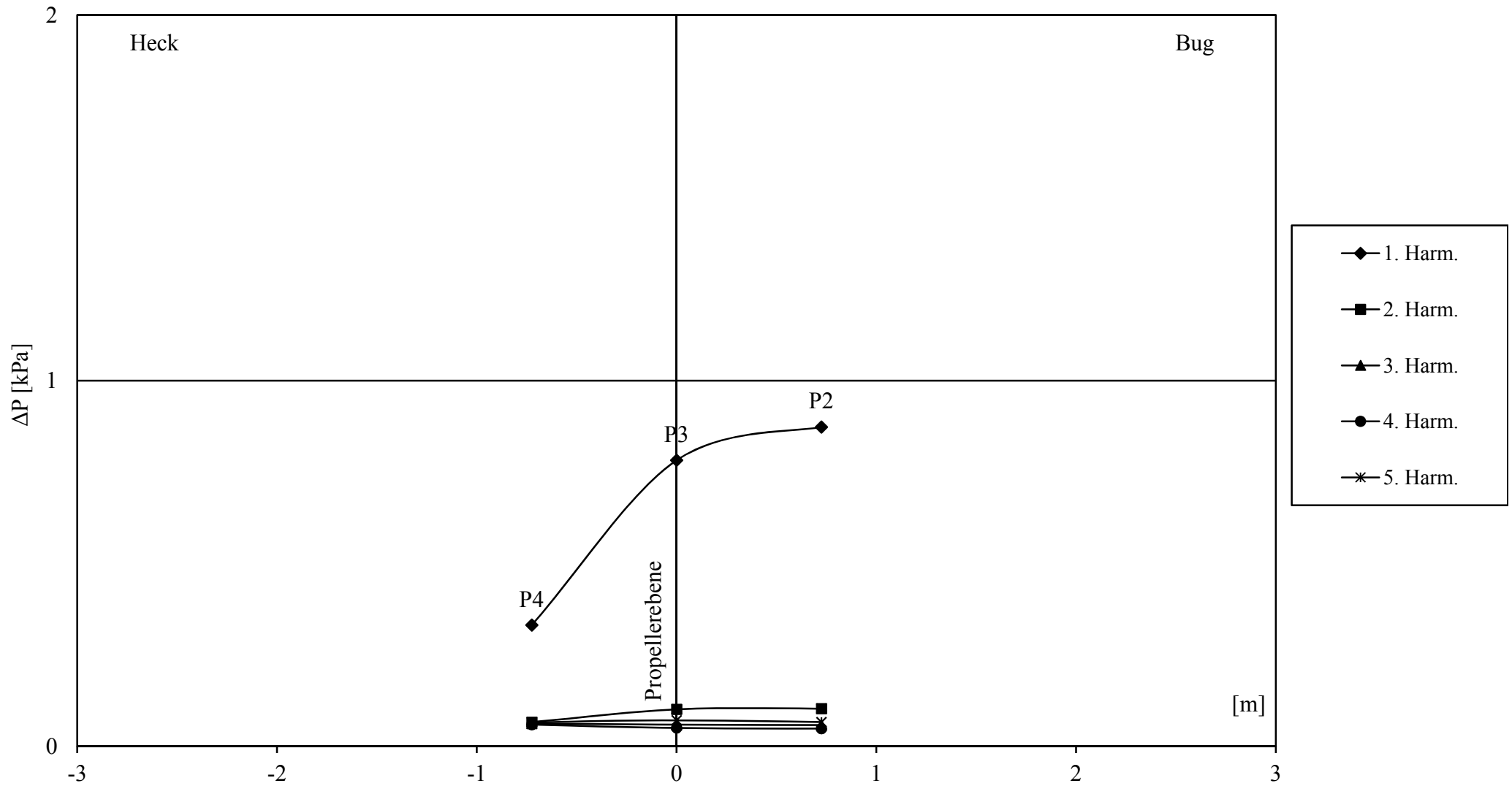


Fig. 21b: Amplituden entlang der Propellerwelle (Großausführung)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5

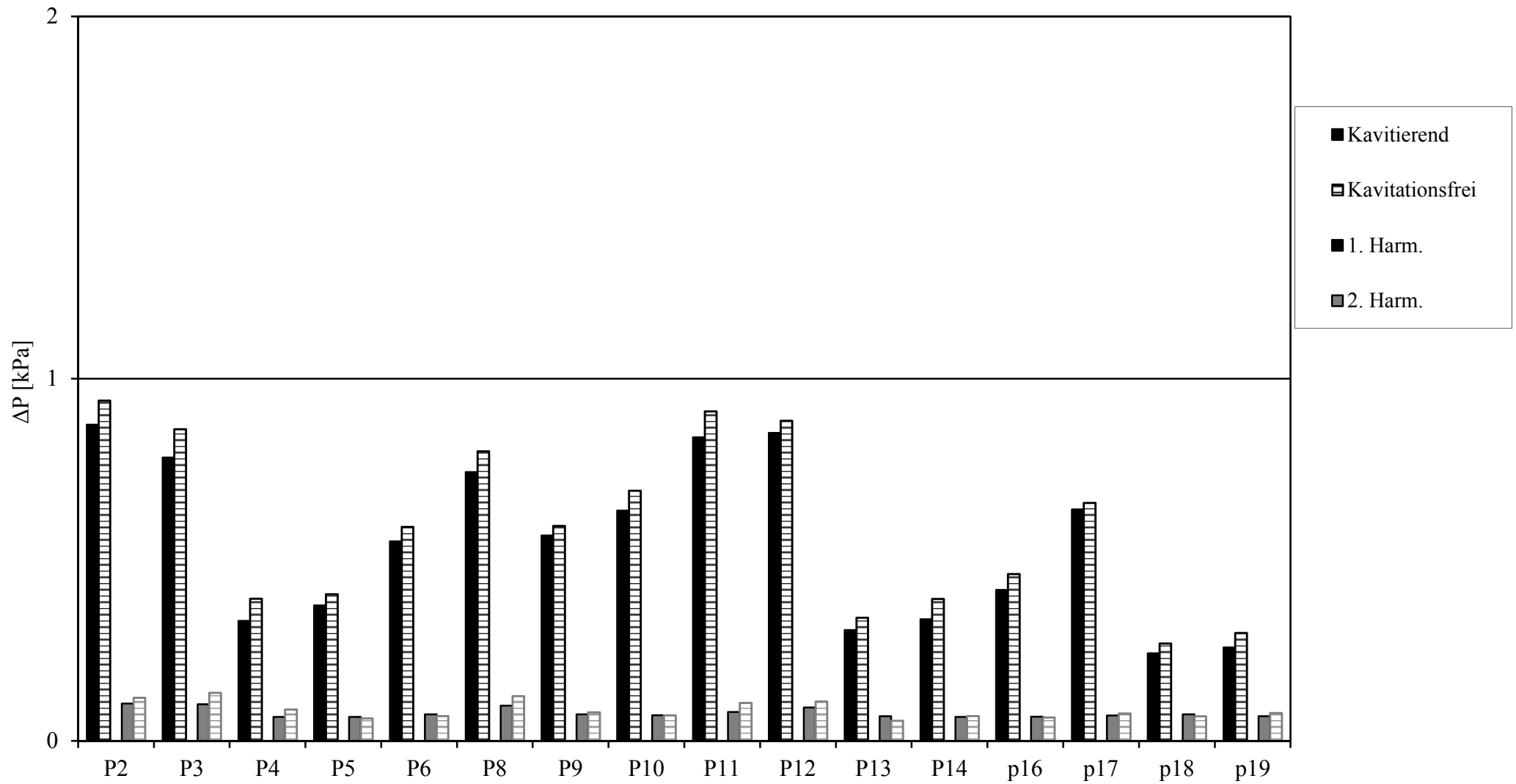


Abb. 22: Kavitationseinfluss auf die Druckamplituden (auf die Großausführung umgerechnet)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5

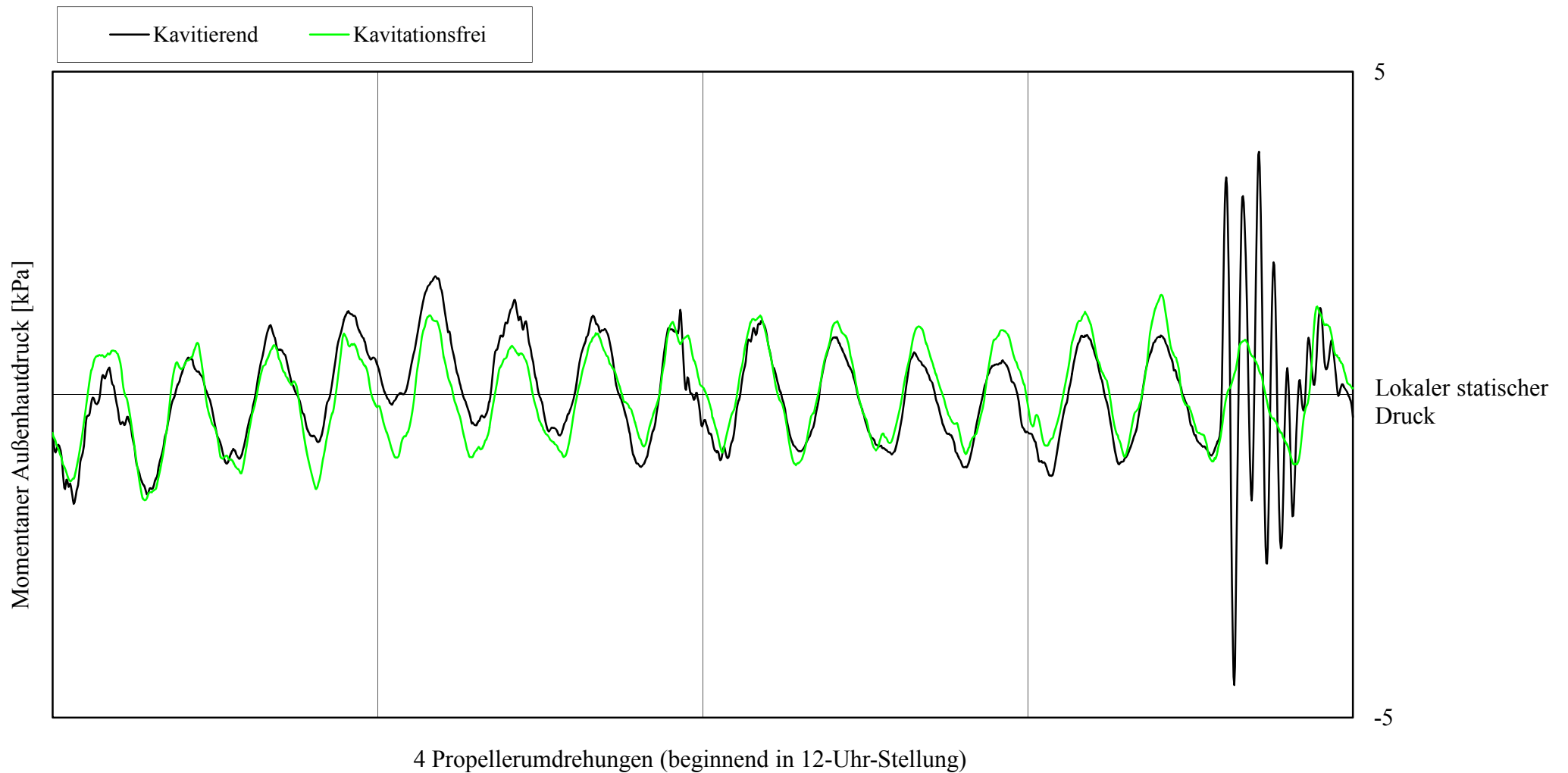


Abb. 23: Teilstück der Druck-Zeit-Funktion am Aufnehmer P2 (Großausführung)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5

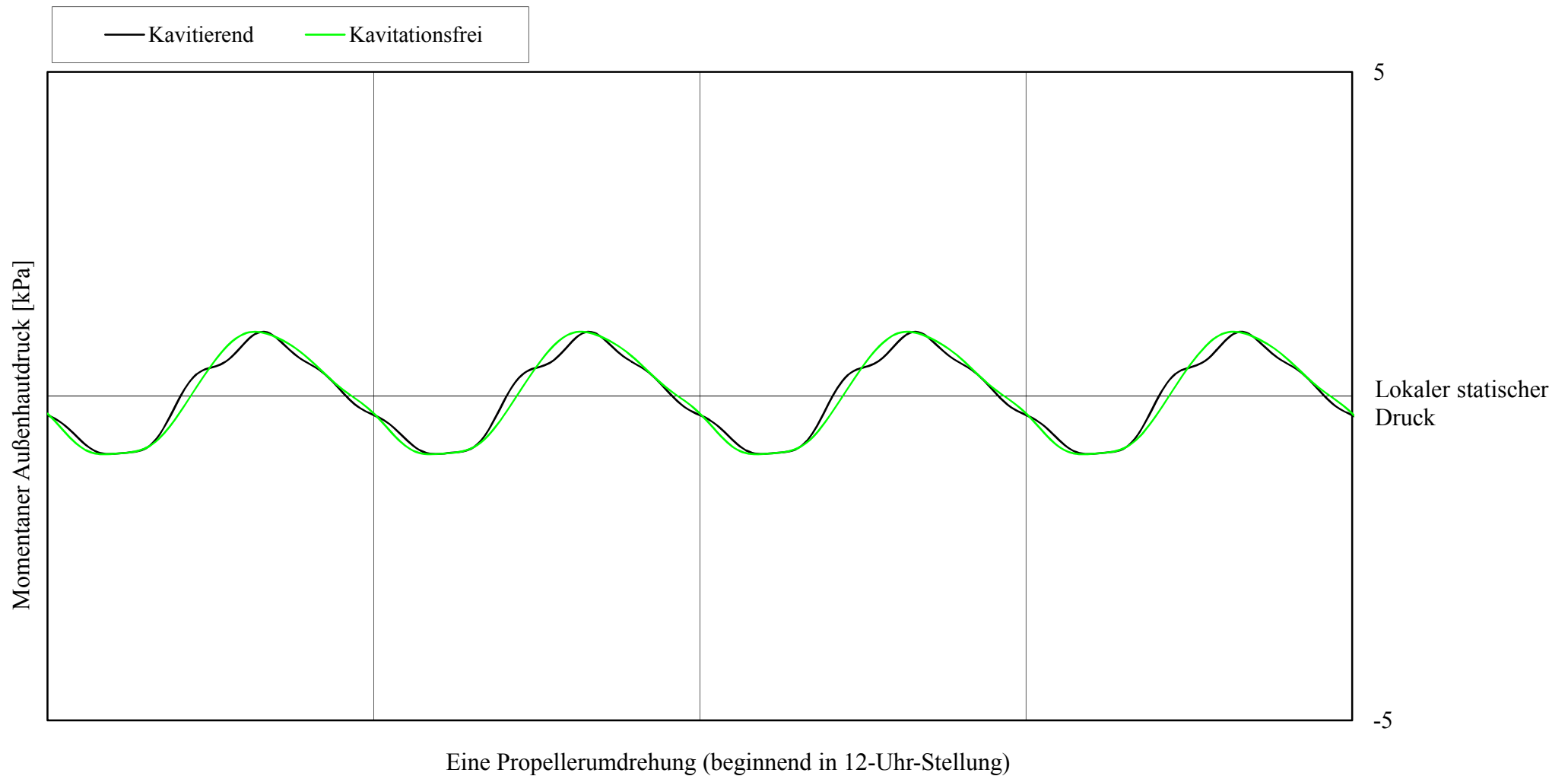


Abb. 24: Rekonstruktion eines charakteristischen Druck-Zeit-Signals für Aufnehmer P2 (Großausführung)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5

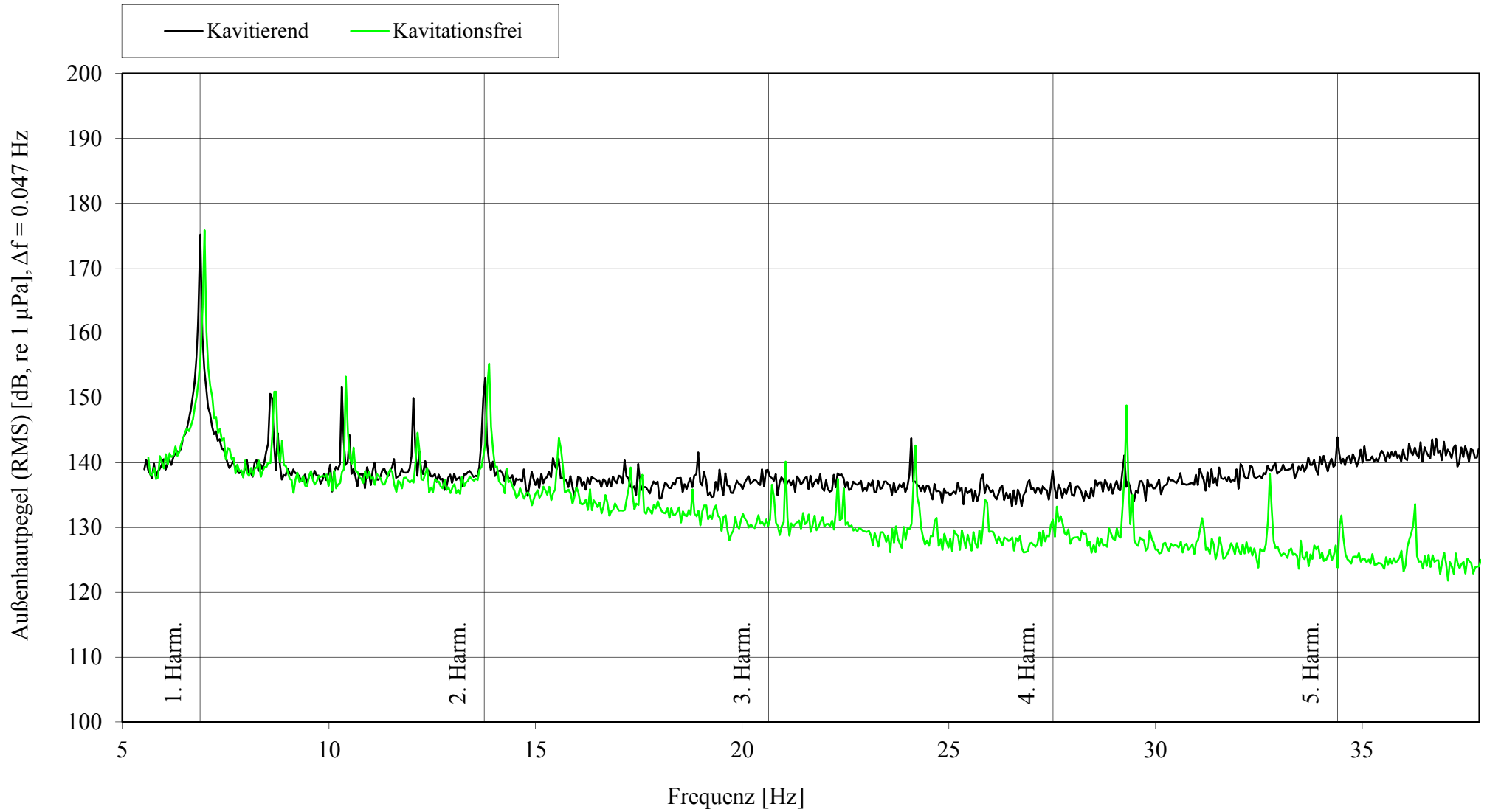


Abb. 25: Frequenzspektrum am Aufnehmer P2 (Großausführung)
PD=6522 kW, Vs=16.4kn, E-5

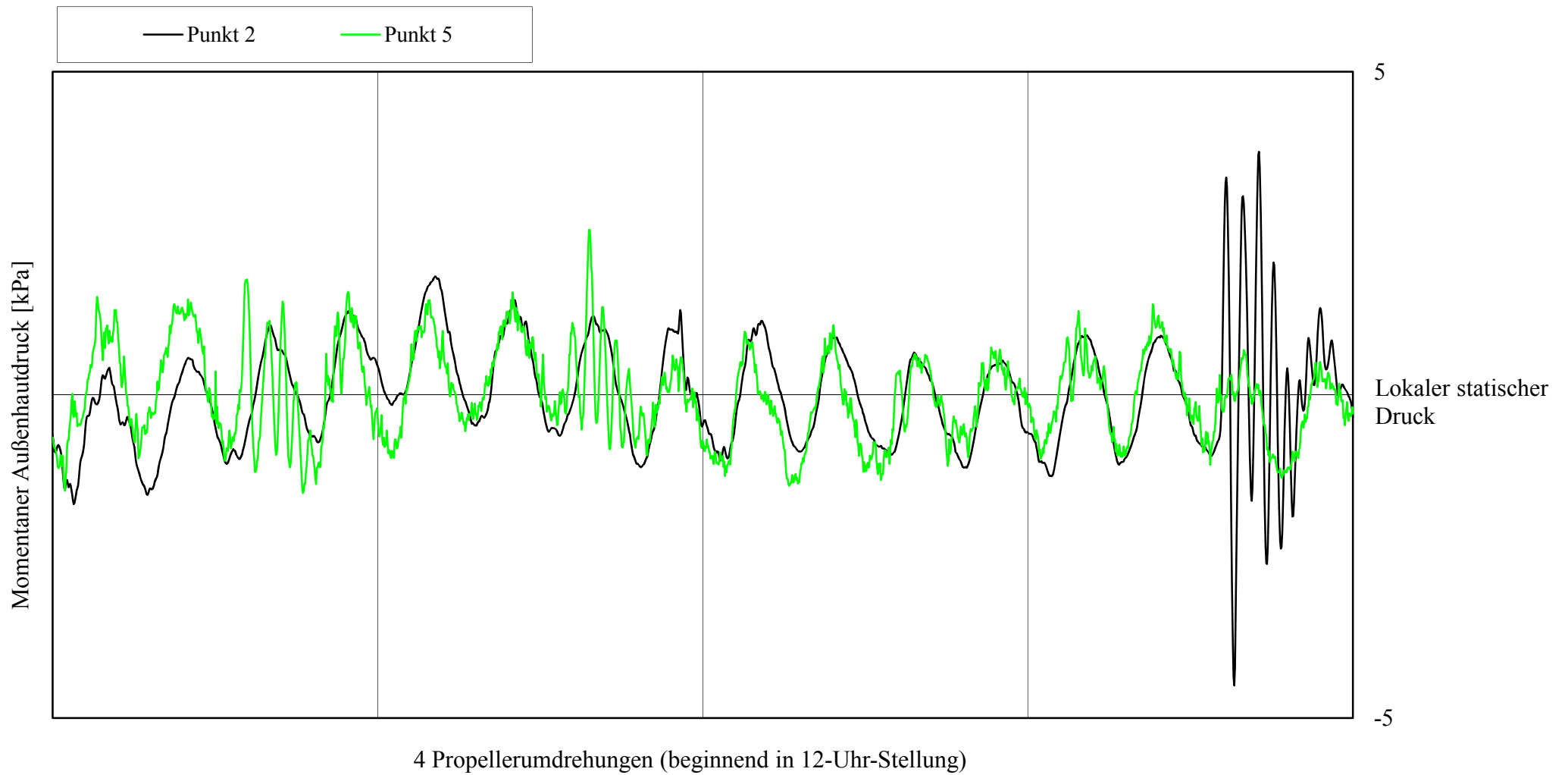


Abb. 26: Teilstück der Druck-Zeit-Funktion am Aufnehmer P2 (Großausführung)
Punkt 2 / Punkt 5

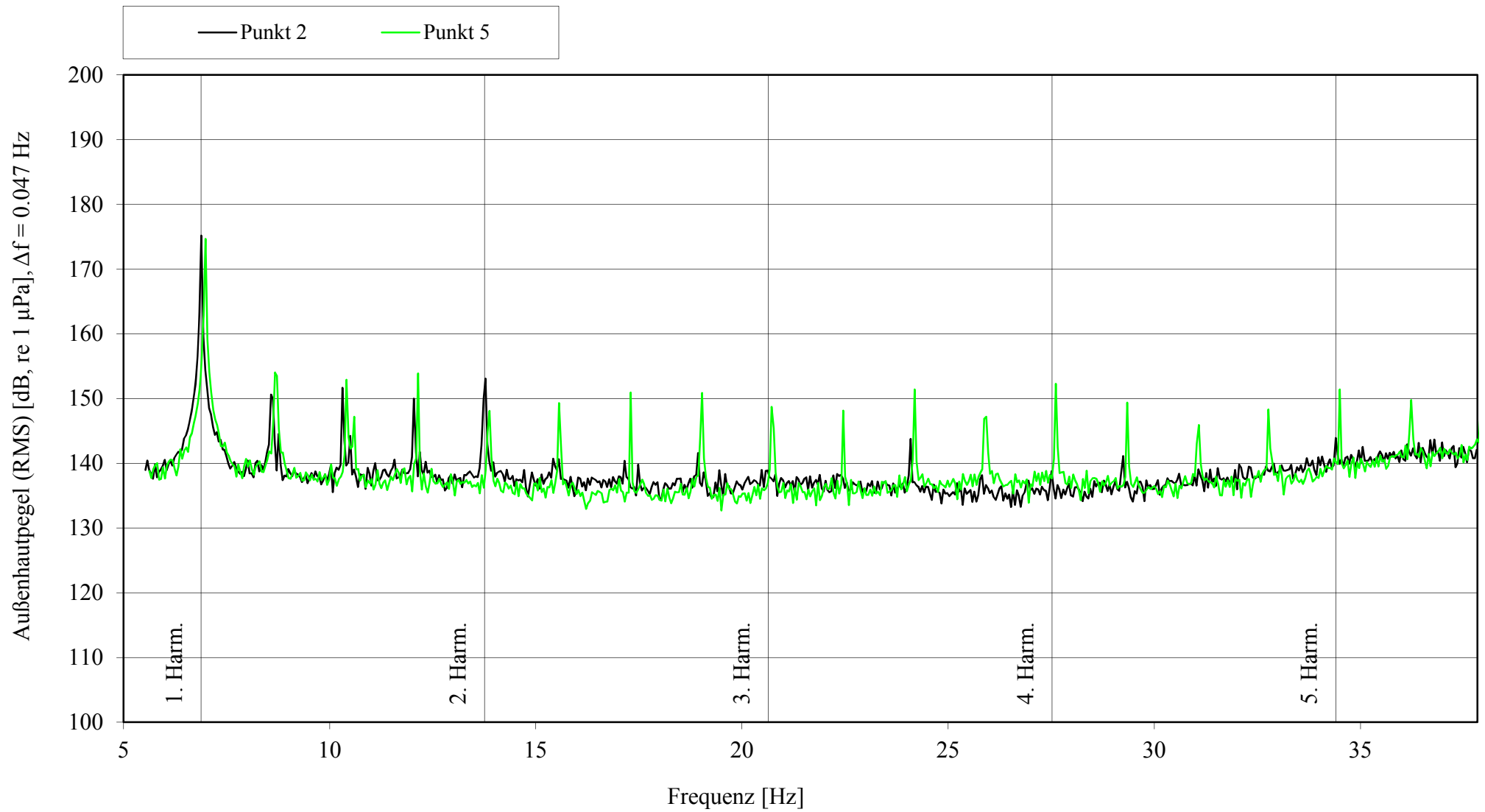


Abb. 27: Frequenzspektrum am Aufnehmer P2 (Großausführung)
Punkt 2 / Punkt 5

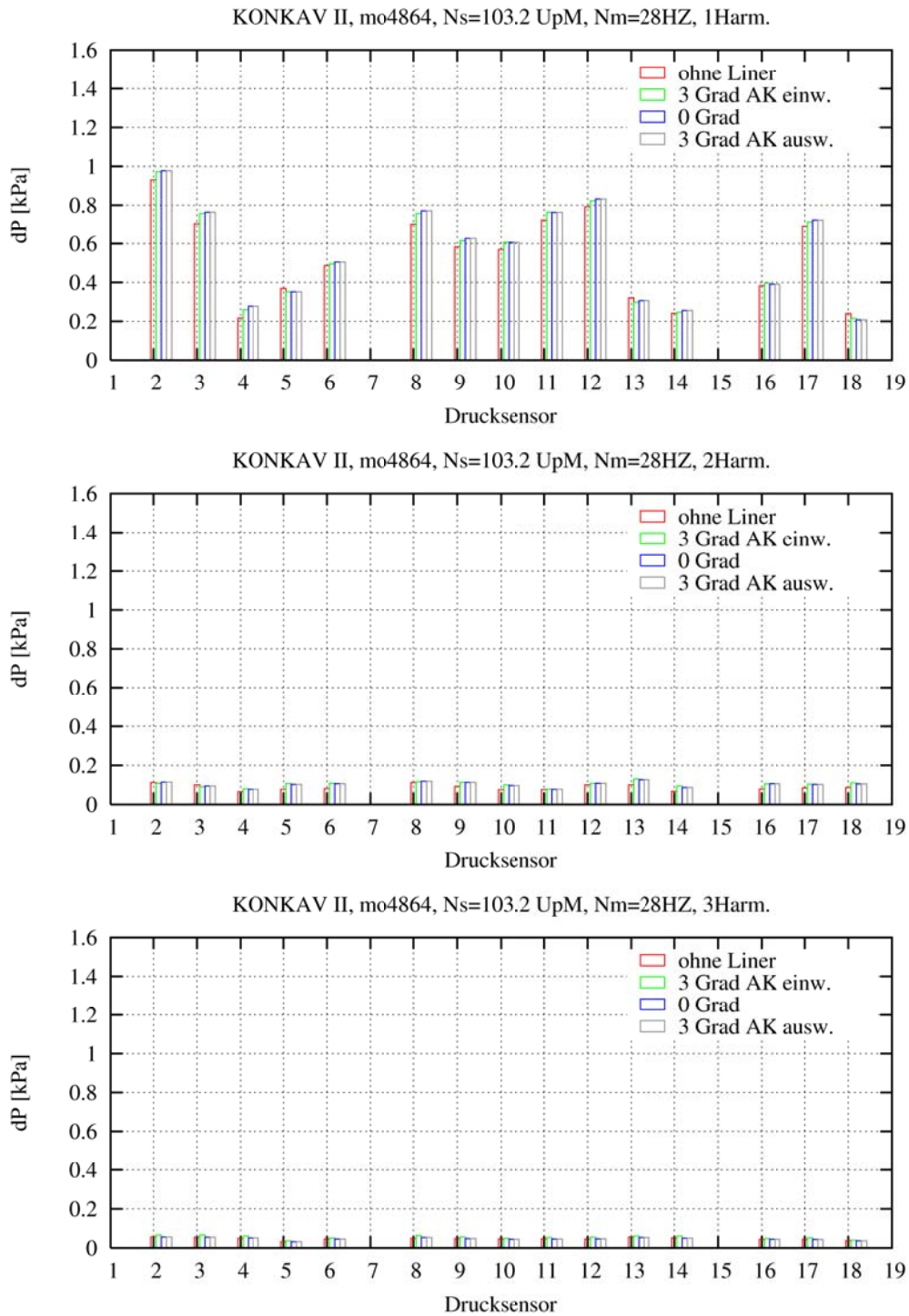


Abb. 28: Druckimpulse ohne und mit Flow-Liner, 1-3 Harmonische

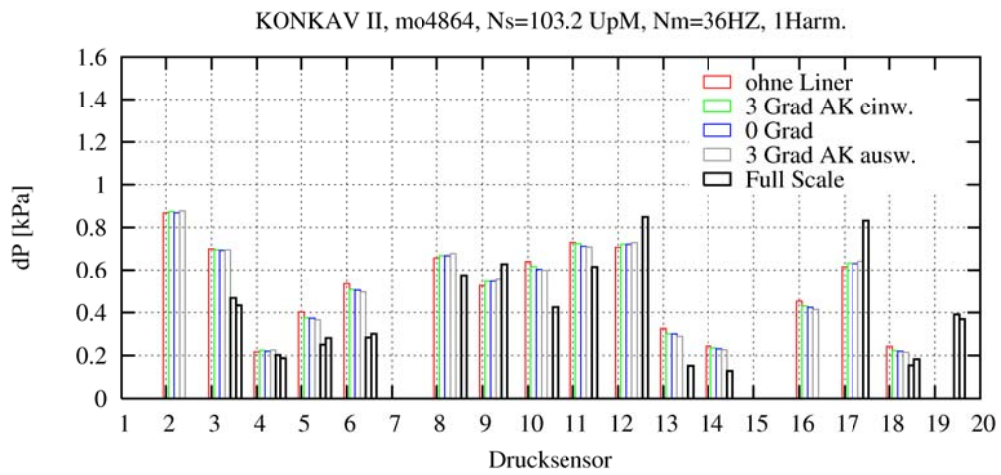
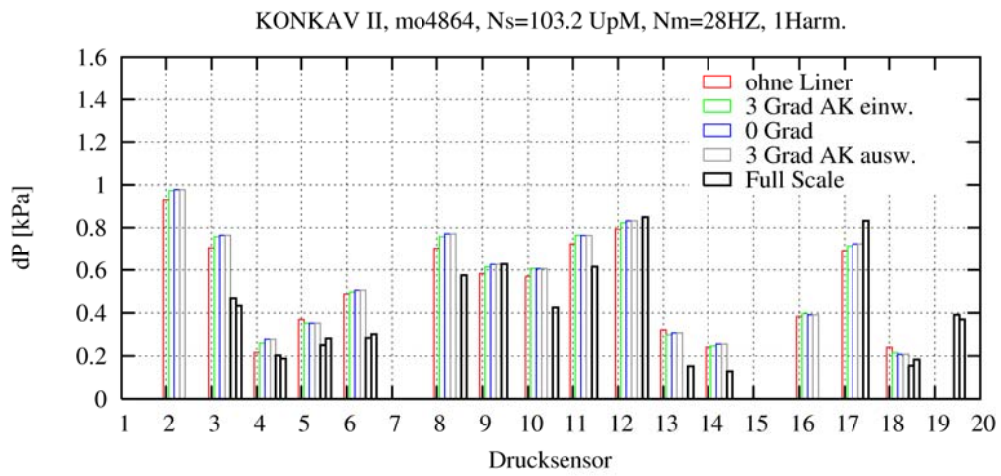


Abb. 29: Druckimpulse ohne und mit Flow-Liner, 1 Harmonische, n=28Hz und 36Hz

Harmonische Analyse von Druck-Zeitfunktionen

Die Ermittlung der Harmonischen Koeffizienten des gemessenen Druck-Zeitsignals ist notwendig, um die vom kavitierenden Propeller erzeugten Druckimpulse beurteilen zu können, und um Eingangsdaten für eine Vibrationsanalyse der Stahlstruktur zu schaffen. Es wird daher der zeitabhängige Druck $P_{(\varphi)}$ mit Hilfe in die Modellaußenhaut eingebauter, elektronischer Druckaufnehmer über ein Intervall von m Propellerumdrehungen gemessen (normalerweise gilt $m = 384$). Die momentanen Druckwerte werden während des Kavitationsversuches mit einer Auflösung von 1° aufgezeichnet. Als Beispiel ist im Bericht ein kurzer Ausschnitt des Druck-Zeitsignals enthalten. Umfangreiche Untersuchungen sind bei der HSVA zur Zeit im Gange, um Schlußfolgerungen bezüglich der Kavitationsphänomene aus dem Charakter der Druck-Zeitfunktion zu gewinnen. Momentan ist die Darstellung lediglich hilfreich, um die Periodizität des Zeitsignals zu beurteilen, die in direktem Zusammenhang mit der Stabilität der Kavitation im Modellversuch steht.

Im ersten Schritt werden die Modelldrücke $P_{Mod(\varphi)}$ dann in dimensionslose K_P -Werte nach der Formel

$$K_{P(\varphi)} = \frac{P_{Mod(\varphi)}}{\rho_{Tunnel} n_{Mod}^2 D_{Mod}^2} \quad (1)$$

umgewandelt.

Parallel wird ein elektronischer Impuls aufgezeichnet, der vom Dynamometer in einer bestimmten, vom Modelleinbau abhängigen Winkelstellung β des Propellers erzeugt wird. Mit Hilfe dieses Signals kann die große Zahl von Stützstellen in m Datensätze aufgeteilt werden, die jeweils eine Umdrehungen von β bis $\beta + 360^\circ$ enthalten. Diese m Datenfelder werden getrennt mit Hilfe eines konventionellen Programms zur Fourier-Transformation analysiert, sodaß m Datensätze von a_n - und b_n -Werten entstehen. Für diese gilt

$$K_{P(\varphi)} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n(\varphi - \beta)) + b_n \sin(n(\varphi - \beta)) \quad (2)$$

Gleichung (2) kann einfach in die Form

$$K_{P(\varphi)} = \sum_{n=0}^{\infty} \Delta K_{P,n} \cos(n\varphi - \varphi_{0,n}) \quad (3)$$

gebracht werden, wobei

$$\Delta K_{P,n} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4)$$

und

$$\tan \varphi_{0,n} = \frac{a_n \sin(n\beta) + b_n \cos(n\beta)}{a_n \cos(n\beta) - b_n \sin(n\beta)} \quad (5)$$

gilt. Auf diese Weise erhält man für jede Propellerumdrehung einen Satz von $\Delta K_{P,n}$ - und $\varphi_{0,n}$ -Werten. Der Phasenwinkel $\varphi_{0,n}$ in Gleichung (3) bezieht sich bereits auf die 0° -Position (6-Uhr-Stellung) des Propellerflügels Nr. 1.

Theoretisch müßte ein z -flügliger Propeller ein Drucksignal erzeugen, das aus z gleichen Perioden pro Umdrehung besteht. Folglich müßten alle $\Delta K_{P,n}$ -Werte mit $n/z \notin \mathbb{N}^0$ gleich Null sein. Tatsächlich sind diese $\Delta K_{P,n}$ -Werte sehr klein, aufgrund geringfügiger Unterschiede im Kavitationsverhalten der Propellerflügel, sowie aufgrund von Inhomogenitäten im Blasen- und Keimgehalt des Tunnelwassers aber nicht exakt Null. Für die weitere Analyse werden sie jedoch nicht berücksichtigt. Außerdem beschränkt sich die weitere Auswertung auf die ersten fünf Harmonischen der Propellerblattfrequenz ($\Delta K_{P,z}, \Delta K_{P,2z}, \dots, \Delta K_{P,5z}$).

Im nächsten Schritt müssen die m $\Delta K_{P,n}$ - und $\varphi_{0,n}$ -Datensätze gemittelt werden. Während dies für die $\Delta K_{P,n}$ -Werte einfach nach der Gleichung

$$\overline{\Delta K}_{P,n} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta K_{P,n,i}}{m} \quad (6)$$

geschehen kann, ist für die Phasenwinkel $\varphi_{0,n}$ eine schrittweise Berechnung nach der Formel

$$\varphi_{0,n}^{-(1)} = \varphi_{0,n,1} \quad , \quad \varphi_{0,n}^{-(i)} = \varphi_{0,n}^{-(i-1)} + \frac{d\left(\varphi_{0,n}^{-(i-1)}, \varphi_{0,n,i}\right)}{i} \quad (7)$$

erforderlich, da z.B. der korrekte Mittelwert von 10° und 350° nicht 180° (wie nach Gl. (6)), sondern 0° ist. In Gleichung (7) bezeichnet der Ausdruck $\varphi_{0,n}^{-(i)}$ den Mittelwert von $\varphi_{0,n}$, gemittelt über die ersten i Propellerumdrehungen. Der Ausdruck $d\left(\varphi_{0,n}^{-(i-1)}, \varphi_{0,n,i}\right)$ ist der kürzeste Winkelabstand zwischen dem aktuellen Mittelwert und dem Phasenwinkel der nachfolgenden Propellerumdrehung (z.B. $d(350^\circ, 10^\circ) = 20^\circ$).

Zusätzlich zu den Mittelwerten werden die Standardabweichungen σ_n von $\Delta K_{P,n}$ und $\varphi_{0,n}$ nach den Formeln

$$\sigma_{n(\overline{\Delta K}_{P,n})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(\overline{\Delta K}_{P,n} - \Delta K_{P,n,i}\right)^2}{m}} \quad (8)$$

und

$$\sigma_{n(\bar{\varphi}_{0,n})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m d(\bar{\varphi}_{0,n}^{(m)}, \varphi_{0,n,i})^2}{m}} \quad (9)$$

berechnet. Diese Werte geben ein Maß für die Variation der Druckamplituden von einer Propellerumdrehung zur anderen an.

Abschließend werden die gemittelten Harmonischen Komponenten $\Delta\bar{K}_{P,n}$ und ihre Standardabweichungen $\sigma_{n(\Delta\bar{K}_{P,n})}$ in Großausführungswerte nach den Gleichung

$$\Delta P_{GA,n} = \Delta\bar{K}_{P,n} \rho_{See} n_{GA}^2 D_{GA}^2 \quad (10)$$

und

$$\sigma_{n(\Delta P_{GA,n})} = \sigma_{n(\Delta\bar{K}_{P,n})} \rho_{See} n_{GA}^2 D_{GA}^2 \quad (11)$$

rücktransformiert.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen nach Gleichung (6) bis (11) sind das Endergebnis der Analyse. Sie sind in den Berichtstabellen angegeben. Mit Hilfe dieser Werte kann ein gemitteltes Großausführungs-Druck-Zeitsignal nach der Formel

$$P_{GA(\varphi)} = \sum_{n=z, 2z, \dots} \Delta P_{GA,n} \cos(n\varphi - \varphi_{0,n}) \quad (12)$$

generiert werden. Es soll hier nochmals erwähnt werden, daß die Winkel β , φ und φ_0 mit dem Propellerdrehsinn zählen und mit 0° in der 6-Uhr-Stellung beginnen.