

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK MW7

LEHRSTUHL FÜR FLUIDMECHANIK  
ABTEILUNG HYDRAULISCHE MASCHINEN

**Kavitation in Wasserturbinen  
Entwicklung eines Monitoringsystems**

Vladyslav Pastushenko

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. W.H. Polifke, Ph.D. (CCNY)

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. R. Schilling
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. B. Stoffel, em.  
Technische Universität Darmstadt

Die Dissertation wurde am 31.10.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14.12.2006 angenommen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>IX</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Kavitation in Wasserturbinen . . . . .	1
1.1.1 Kavitationsproblematik . . . . .	1
1.1.2 Kavitationsarten und -formen . . . . .	3
1.1.3 Kavitationsbeiwert und zulässiger Betriebsbereich einer Was- serturbine . . . . .	4
1.2 Techniken der Kavitationsdiagnose in Wasserturbinen . . . . .	9
1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung . . . . .	15
<b>2 Weiterentwicklung des Kavitationsdiagnosesystems ACOUSTIC EMISSION MONITOR</b>	<b>16</b>
2.1 Versuchsaufbau an einer Kaplan-Modellturbine . . . . .	18
2.2 AEM-Messaufbau und Datenauswertung . . . . .	26
2.3 Aussagekraft des AEM . . . . .	27
2.3.1 Aussagekraft des Körperschalls über die Kavitationsintensität aus den Modellmessungen . . . . .	28
2.3.2 Anlagenmessungen zur AEM-Aussagekraft . . . . .	32
2.3.3 Modellmessungen zur Klärung der Ursache der schwachen RMS-Gradienten in den untersuchten Anlagen . . . . .	35
2.4 Eignung verschiedener Sensorpositionen an einer Kaplanturbine . . . .	43
2.4.1 Versuchsprogramm . . . . .	43

2.4.2	Sensorpositionen zur Diagnose von Eintrittskantenkavitation . . . . .	45
2.4.3	Sensorpositionen zur Diagnose der Kavitation bei Volllast . . . . .	47
2.5	Erosive Stärke der einzelnen Kavitationsformen . . . . .	50
2.5.1	Betriebsweise der untersuchten Anlagen . . . . .	50
2.5.2	Prozentuale Verteilung der kumulierten Kavitationsbelastung auf die einzelnen Kavitationsformen . . . . .	51
2.5.3	Erosionsschäden in den Anlagen . . . . .	53
2.5.4	Vergleich der zu erwarteten zu den tatsächlich aufgetretenen Kavitationsschäden . . . . .	54
2.6	Kontaktqualität Sensor – Turbinenoberfläche . . . . .	56
2.6.1	Modellmessungen zur Sicherung der Kontaktqualität . . . . .	56
2.6.2	Erfahrung aus den Prototypmessungen . . . . .	59
2.6.3	Verfahren zur Prüfung der Kontaktqualität vor Ort . . . . .	60
2.6.4	Schlussfolgerungen zum Kapitel Kontaktqualität . . . . .	60
<b>3</b>	<b>Entwicklung neuer Methoden der Kavitationsdiagnostik</b>	<b>61</b>
3.1	Winkelauflösung der Schallemission . . . . .	62
3.1.1	Versuchsanordnung . . . . .	62
3.1.2	Modellmessungen zur Winkelauflösung . . . . .	64
3.1.3	Anlagenmessungen zur Winkelauflösung . . . . .	76
3.1.4	Schlussfolgerungen zur Winkelauflösung . . . . .	87
3.2	Modulierter RMS-Wert als Maß der an Laufschaufeln anhaftenden Kavitation . . . . .	88
3.3	Differenzierung einzelner Kavitationsformen anhand des an der Tur- binenoberfläche erfassten Körperschalls . . . . .	91
3.3.1	Differenzierung von Kavitationsformen anhand der spektralen Zusammensetzung des Kavitationssignals . . . . .	91
3.3.2	Differenzierung von Kavitationsformen durch Vergleich des an verschiedenen Positionen erfassten Körperschalls . . . . .	95
<b>4</b>	<b>Konzept eines Nachfolge-Kavitationsdiagnosesystems</b>	<b>97</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse und Ausblick</b>	<b>99</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>101</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Kavitationserscheinungen in einer Kaplanmaschine, nach FARHAT [39]	1
1.2	Kavitationsschäden in einer Kaplanmaschine, eigene Fotoaufnahme in Roßhaupten, Februar 2004 . . . . .	2
1.3	Implosionsvorgang einer Kavitationsblase. Schema und Fotoaufnahme, nach KNAPP [67] und BENJAMIN ET. AL. [14] . . . . .	2
1.4	Klassifizierung von Kavitationsformen in einer Kaplanmaschine anhand der Lage auf der Laufschaufel, nach Fa. Voith . . . . .	4
1.5	Normierter Druckverlauf entlang des Laufschaufelprofils in einer Wasserturbine, nach SCHILLING [86]; SS=Saugseite, DS=Druckseite. . .	5
1.6	Ermittlung der kritischen $\sigma$ -Werte aus den $\eta - \sigma$ -Messungen am Modell, nach SCHILLING [86] . . . . .	6
1.7	Kavitationsgrenze über dem Kennfeld einer Kaplanmaschine. Hellblau: Kavitationsgrenze, dunkelblau: gefahrene Betriebspunkte . . . . .	7
1.8	Ursachen und Auswirkungen der Kavitation und meßtechnische Möglichkeiten zu deren Überwachung . . . . .	9
1.9	Anbringungsorte des Körperschallaufnehmers in einer Kaplanmaschine .	11
2.1	Meridianschnitt der Modellmaschine im Universalversuchsstand am FLM	18
2.2	Laufwerk (links) und Saugrohr (rechts) der Modellmaschine . . . . .	19
2.3	Universalversuchsstand am FLM . . . . .	19
2.4	Messsystem des UVS am FLM . . . . .	21
2.5	Bedienungsfläche des Messprogramms für UVS am FLM . . . . .	22
2.6	Kennfeld der Modellmaschine K63j im UVS am FLM . . . . .	23
2.7	Stärke einzelner Kavitationsformen in der Modellmaschine K63j bei $\sigma = 0.55$ . . . . .	24
2.8	Acoustic Emission Monitor . . . . .	26

2.9	Datenfluss im AEM . . . . .	27
2.10	Signalspektren im Betriebspunkt $n_1' = 130min^{-1}$ , $\varphi = 31$ bei den $\sigma$ -Werten 0.5, 0.7, 1.1 und 2.3 . . . . .	28
2.11	Im Modell K63j untersuchte Betriebspunkte . . . . .	30
2.12	Verlauf von $RMS/RMS_{min}$ bei den Filtereinstellungen $100kHz - 1MHz$ , $150kHz - 1MHz$ und $350kHz - 1MHz$ sowie die Fläche der Kavitationsereignisse über $\sigma$ . Betriebspunkt $n_1' = 100min^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ : Eintrittskantenkavitation . . . . .	31
2.13	Verlauf von $RMS/RMS_{min}$ bei den Filtereinstellungen $100kHz - 1MHz$ , $150kHz - 1MHz$ und $350kHz - 1MHz$ sowie die Fläche der Kavitationsereignisse über $\sigma$ . Betriebspunkt $n_1' = 130min^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ : Kavitationsmischform 1 . . . . .	31
2.14	Verlauf von $RMS/RMS_{min}$ bei den Filtereinstellungen $100kHz - 1MHz$ , $150kHz - 1MHz$ und $350kHz - 1MHz$ sowie die Fläche der Kavitationsereignisse über $\sigma$ . Betriebspunkt $n_1' = 150min^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ : Kavitationsmischform 2 . . . . .	32
2.15	Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Ryburg-Schwörstadt . . . . .	33
2.16	Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Neuötting . . . . .	34
2.17	Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Roßhaupten . . . . .	34
2.18	Art und Stärke der Kavitationserscheinungen in Ryburg-Schwörstadt . . . . .	36
2.19	Art und Stärke der Kavitationserscheinungen in Roßhaupten . . . . .	37
2.20	Verteilung der Kavitationsfläche über dem Kennfeld in Ryburg-Schwörstadt, Modellversuch . . . . .	38
2.21	Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Ryburg-Schwörstadt, Prototypmessung . . . . .	38
2.22	Verteilung der Kavitationsfläche über dem Kennfeld in Roßhaupten, Modellversuch . . . . .	39
2.23	Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Roßhaupten, Modellmessung . . . . .	39
2.24	Art und Stärke der Kavitationserscheinungen in der Modellturbine K63j bei den prototypspezifischen $\sigma$ -Werten . . . . .	41
2.25	RMS-Verteilung im Modell bei den prototypspezifischen $\sigma$ -Werten . . . . .	42
2.26	Verteilung der Kavitationsfläche im Modell bei den prototypspezifischen $\sigma$ -Werten . . . . .	42
2.27	Meridianschnitt der Modellturbine K63j mit Sensorpositionen . . . . .	44

2.28	Vergleich der Sensorpositionen nach dem Kriterium des maximalen RMS-Wertes bei Eintrittskantenkavitation . . . . .	45
2.29	Normierte RMS-Werte und Kavitationsfläche über $\sigma$ bei Eintrittskantenkavitation . . . . .	46
2.30	Vergleich der Sensorpositionen nach dem Kriterium des maximalen RMS-Wertes bei einer Mischform aus Flächen-, Außenspalt- und Hohlkehlkavitation . . . . .	48
2.31	Verlauf des normierten RMS-Wertes sowie der Kavitationsfläche über $\sigma$ bei einer Mischform aus Außen-, Nabenspalt- und Flächenkavitation	48
2.32	Verteilung der Betriebsdauer über dem Kennfeld in Ryburg-Schwörstadt vom 2000 – 2003 . . . . .	51
2.33	Verteilung der Betriebsdauer über dem Kennfeld in Roßhaupten vom 2000 – 2003 . . . . .	51
2.34	Kavitationsschäden auf der Saugseite der dritten Laufschaufel in Ryburg-Schwörstadt . . . . .	53
2.35	Kavitationsschäden auf der Saugseite der 1. – 4. und 6. – 7. Laufschaufel in Roßhaupten. Auf der 5. Laufschaufel wurden keine Kavitationsspuren gefunden. . . . .	54
2.36	Messaufbau zur Untersuchung der Signalübertragungscharakteristik .	57
2.37	Übertragungscharakteristik des Ultraschallgell links und des Fettes rechts im Frequenzbereich $350kHz - 1MHz$ . . . . .	58
2.38	Übertragungscharakteristik des Silikonklebers links und des trockenen Kontakts rechts im Frequenzbereich $350kHz - 1MHz$ . . .	58
2.39	Signalabschwächung von Dezember 1999 bis November 2001 in Ryburg-Schwörstadt . . . . .	59
2.40	Signalintensität von 04.2000 bis 11.2003 in Neuötting und Roßhaupten	60
3.1	Arbeitsoberfläche des Messprogramms . . . . .	63
3.2	Sensorpositionen, an denen Untersuchungen zur Winkelauflösung durchgeführt wurden . . . . .	65
3.3	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 100min^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 0.52$ . . . . .	67
3.4	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 100min^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 0.92$ . . . . .	67
3.5	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 100min^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 1.25$ . . . . .	68

3.6	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 100 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 1.75$ . . . . .	68
3.7	Kavitationsfläche als Funktion von $\sigma$ im Betriebspunkt $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ . . . . .	69
3.8	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 0.50$ . . . . .	70
3.9	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 0.70$ . . . . .	70
3.10	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 0.85$ . . . . .	71
3.11	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 1.20$ . . . . .	71
3.12	Kavitationsfläche als Funktion von $\sigma$ im Betriebspunkt $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ . . . . .	72
3.13	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 0.50$ . . . . .	73
3.14	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 0.75$ . . . . .	73
3.15	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 1.20$ . . . . .	74
3.16	Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ bei $\sigma = 1.50$ . . . . .	74
3.17	In Roßhaupten untersuchte Betriebspunkte . . . . .	76
3.18	Sensorpositionen in Roßhaupten . . . . .	77
3.19	In Roßhaupten zur Messung bzgl. der Winkelauflösung eingestellte Betriebspunkte und Verteilung einzelner Kavitationsformen über dem Kennfeld . . . . .	78
3.20	Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 14 in Roßhaupten	80
3.21	Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 11a in Roßhaupten	80
3.22	Polardiagramm, Signalspektrum und Skizze der Kavitation im Messpunkt 9 in Roßhaupten . . . . .	81
3.23	Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 11 in Roßhaupten	81
3.24	Polardiagramm, Signalspektrum und Skizze der Kavitation im Messpunkt 7 in Roßhaupten . . . . .	82
3.25	Polardiagramm, Signalspektrum und Skizze der Kavitation im Messpunkt 6 in Roßhaupten . . . . .	82



3.26	Polardiagramm, Signalspektrum und Skizze der Kavitation im Messpunkt 8 in Roßhaupten . . . . .	83
3.27	In Neuötting untersuchte Betriebspunkte . . . . .	84
3.28	Sensorpositionen in Neuötting . . . . .	85
3.29	Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 4 in Neuötting . .	85
3.30	Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 8 in Neuötting . .	86
3.31	Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 12 in Neuötting .	86
3.32	Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 13 in Neuötting .	86
3.33	Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 16 in Neuötting .	87
3.34	Verlauf des modulierten RMS-Wertes und des $RMS_{>350kHz}$ über $Q'_1$ im Kraftwerk Roßhaupten . . . . .	89
3.35	Verlauf des modulierten RMS-Wertes und des $RMS_{>350kHz}$ über $Q'_1$ im Kraftwerk Neuötting . . . . .	90
3.36	$\Pi(\sigma)$ für Eintrittskantenkavitation und Mischform 2 der Volllastkavitation, Aufnahmen am Deckel . . . . .	92
3.37	$\Pi(\sigma)$ für Eintrittskantenkavitation und Mischform 2 der Volllastkavitation, Aufnahmen am Konus . . . . .	92
3.38	In Roßhaupten zur Messung bzgl. der Winkelauflösung eingestellte Betriebspunkte und Verteilung einzelner Kavitationsformen über dem Kennfeld . . . . .	93
3.39	Verlauf des $RMS_{>150kHz}/RMS_{>350kHz}$ und des Anteils der Eintrittskantenkavitation in Gesamtkavitation über $Q'_1$ in Roßhaupten; linke Skala: $RMS_{>150kHz}/RMS_{>350kHz}$ , rechte Skala: Anteils der Eintrittskantenkavitation . . . . .	94
3.40	Verlauf des $RMS_{Deckel}/RMS_{Konus}$ über $\sigma$ für Mischform 2 und Eintrittskantenkavitation . . . . .	95
3.41	Verlauf des $RMS_{Konus}/RMS_{Spirale}$ über $\sigma$ für Mischform 2 und Eintrittskantenkavitation . . . . .	96

# Tabellenverzeichnis

1.1	Schallaufnehmer und Frequenzmessbereiche die zur Kavitationsdiagnose verwendet werden können . . . . .	13
2.1	Parameter der Kaplan-Modellturbine K63j im UVS am FLM . . . . .	22
2.2	Präsenz einzelner Kavitationsformen in Abhängigkeit von $\sigma$ in den Betriebspunkten $n_1' = 100, 130, 150 \text{min}^{-1}$ , $\varphi = 31^\circ$ . Modellturbine K63j . . . . .	25
2.3	Prototypen, an denen AEM in den Jahren 2000 – 2004 untersucht wurde . . . . .	33
2.4	Prozentualer Anteil der einzelnen Kavitationsformen an der gesamten Kavitationsbelastung der Anlage Roßhaupten in den Jahren 2000–2003	52
2.5	Prozentualer Anteil der einzelnen Kavitationsformen an der gesamten Kavitationsbelastung der Anlage Ryburg-Schwörstadt in den Jahren 2000 – 2003 . . . . .	52
3.1	Kavitationsverhalten in Roßhaupten in ausgewählten Betriebspunkten	79

# Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

## Formelzeichen

$a_0$	[%]	Leitschaufelöffnung
$D$	[m]	Durchmesser, Laufraddurchmesser
$G$	[–]	Übertragungsfunktion
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$H$	[m]	Fallhöhe, Höhe
$M$	[Nm]	Drehmoment
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	Drehzahl
$n_1' = \frac{nD}{H^{0.5}}$	[min <sup>-1</sup> ]	Einheitsdrehzahl
$n_q = n \frac{Q^{0.5}}{H^{0.75}}$	[min <sup>-1</sup> ]	spezifische Drehzahl
$p$	[Pa]	Druck
$P$	[W]	Leistung
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom
$Q_1' = \frac{Q}{D^2 H^{0.5}}$	[m <sup>3</sup> /s]	Einheitsdurchfluss
$u_{in}$	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
$Z$	[–]	Schaufelzahl
$\Delta$	[–]	Differenz
$\eta$	[–]	Wirkungsgrad, Gütegrad
$\vartheta$	[K]	Temperatur
$\Lambda = \frac{RMS_{stromauf}}{RMS_{stromab}}$	[–]	Kennwert zur Differenzierung der Eintrittskantenkavitation
$\Pi = \frac{RMS_{>150kHz}}{RMS_{>350kHz}}$	[–]	Kennwert zur Differenzierung der Eintrittskantenkavitation
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\sigma$	[–]	Kavitationsbeiwert, Thoma-Zahl
$\varphi$	[°]	Laufschaukelwinkel

**Abkürzungen**

AEM	Acoustic Emission Monitor
AD	Analog-Digital
AK	Austrittskante, Außenspaltkavitation
DS	Druckseite
E/s	Events per second
EK	Eintrittskante, Eintrittskantenkavitation
FK	Flächenkavitation
<i>FLM</i>	Lehrstuhl für Fluidmechanik, TU München
FS	Fluidschall
HK	Hohlkehlkavitation
KS	Körperschall
NSK	Nabenspaltkavitation
<i>Re</i>	Reynolds-Zahl
RMS	Root Mean Square, Effektivwert
SS	Saugseite

**Indices**

<i>K<sub>av</sub></i>	Kavitation
<i>K<sub>B</sub></i>	Kavitationsbeginn
<i>K<sub>r</sub></i>	Kritisch
<i>Mod</i>	Moduliert
<i>ow</i>	Oberwasser
<i>opt</i>	Optimal
<i>Tu</i>	Turbine
<i>uw</i>	Unterwasser
<i>Vent</i>	Venturi-Düse
$\infty$	Unendlich

# Zusammenfassung

Schäden durch Kavitationserosion in Wasserturbinen verursachen hohe Instandhaltungskosten und Stillstandszeiten der Maschinensätze. Bei Anwendung eines geeigneten Überwachungssystems, das in zuverlässiger Weise Aufschluss über die momentan vorliegende Kavitationsintensität gibt, ließen sich diese Schäden größtenteils vermeiden. Ein solches, den Anforderungen des Kraftwerksbetreibers entsprechendes System ist derzeit am Markt nicht erhältlich; es existiert jedoch eine Reihe verschiedener im Labormaßstab entwickelter Ansätze zur Lösung des Problems.

In den 90er Jahren wurde im Rahmen eines gemeinsamen Projektes der Fa. Voith GmbH, Heidenheim und des Lehrstuhls für Fluidmechanik der Technischen Universität München ein Verfahren zur automatischen Erfassung von Kavitation in Wasserturbinen entwickelt, das den Namen Acoustic Emission Monitor (AEM) bekommen hat. Das Verfahren stützt sich auf die elektronische Auswertung des Körperschalls, der mit Hilfe eines Körperschallaufnehmers an der Maschinenoberfläche erfasst wird.

Nach einer kurzen Übersicht über die Kavitationsproblematik und bestehende Techniken der Kavitationsdiagnose in Wasserturbinen werden in der vorliegenden Arbeit Untersuchungen zur Verbesserung des bestehenden AEM dargestellt. Anschließend wird Entwicklung neuer Methoden der Kavitationsdiagnostik beschrieben, die die AEM-Aussagekraft verbessern und in das Konzept eines AEM-Nachfolgemodells einfließen.



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Kavitation in Wasserturbinen

#### 1.1.1 Kavitationsproblematik

Der Begriff Kavitation, von lat. cavus – hohl, bezeichnet grundsätzlich die örtliche Bildung von Hohlräumen in flüssigen Medien, die mit Wasserdampf und Gasen gefüllt sind. Dieser Vorgang kann in einem Fluid zum einen durch eine Erhöhung

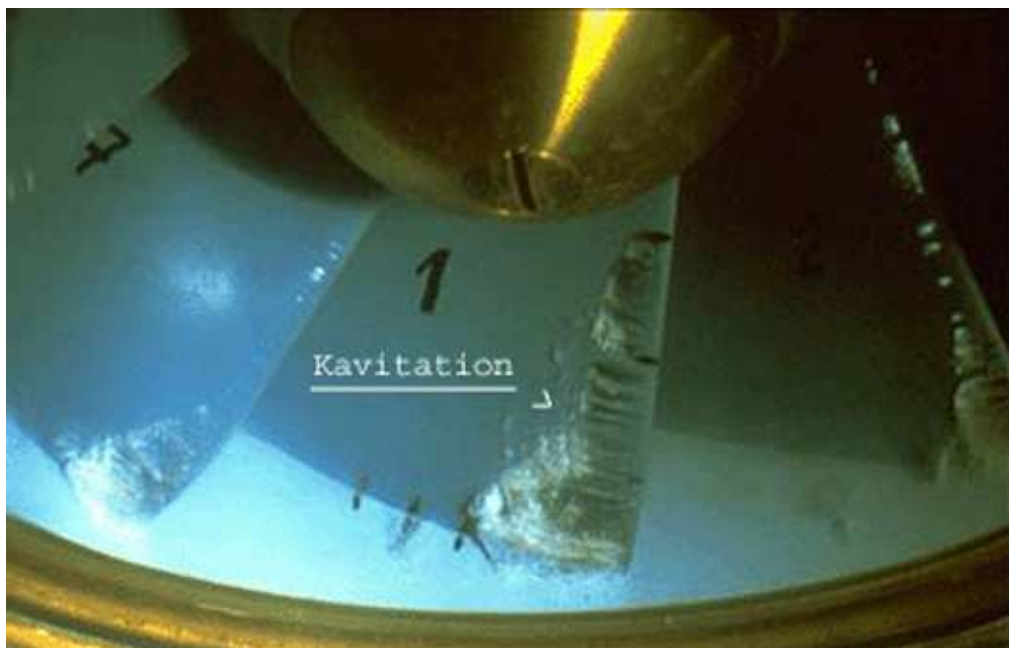


Abbildung 1.1: Kavitationserscheinungen in einer Kaplanturbine, nach FARHAT [39]

der Temperatur bei konstantem Druck und zum anderen durch eine Druckabsenkung bei konstanter Fluidtemperatur hervorgerufen werden. Diese beiden Vorgänge

unterscheiden sich im Wesentlichen durch die charakteristische Zeit, die für den Phasenübergang benötigt wird.

Da der erste Fall im Allgemeinen als Verdampfen oder Sieden bekannt ist, wird üblicherweise nur der zweite Vorgang, die Hohlraumbildung infolge Druckabfalls, als Kavitation bezeichnet.

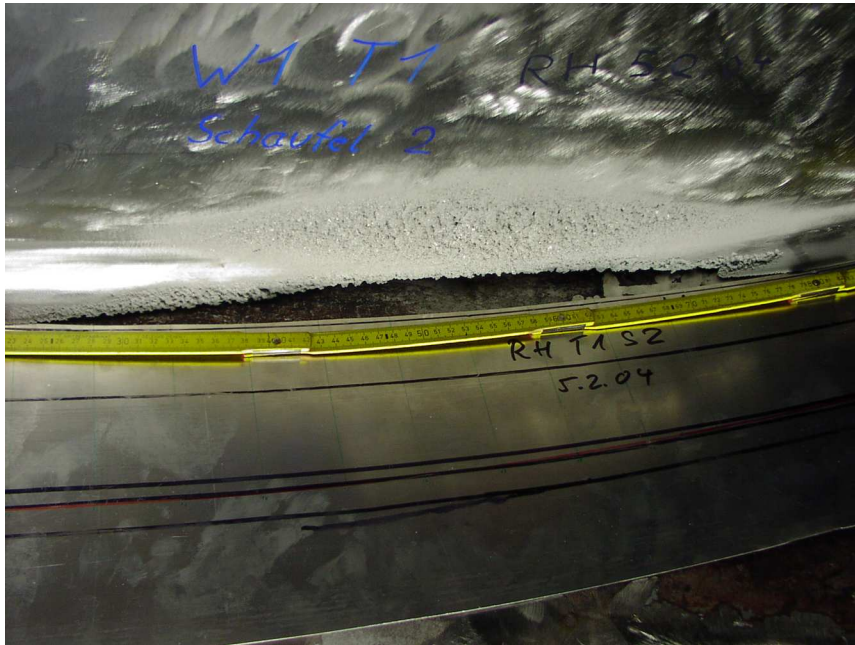


Abbildung 1.2: Kavitationsschäden in einer Kaplanturbine, eigene Fotoaufnahme in Roßhaupten, Februar 2004

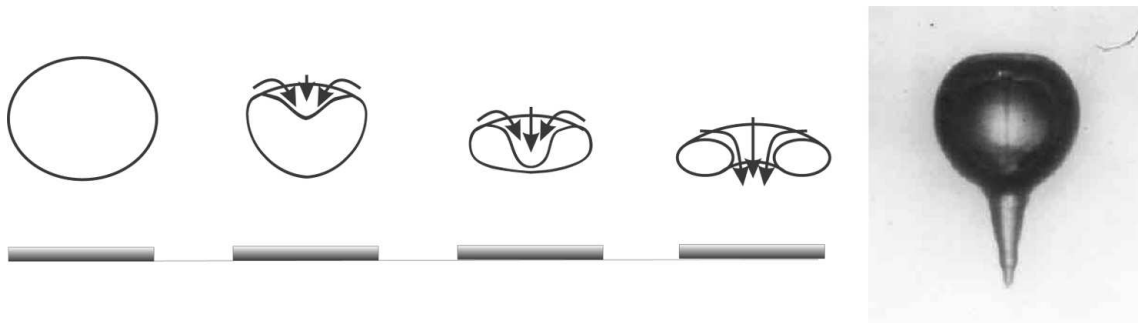


Abbildung 1.3: Implosionsvorgang einer Kavitationsblase. Schema und Fotoaufnahme, nach KNAPP [67] und BENJAMIN ET. AL. [14]

Die Entstehung von Hohlräumen, also die eigentliche Kavitation, die häufig in eng begrenzten Zonen mit niedrigem Druck stattfindet, fügt der Maschinenoberfläche keine Schäden zu. Die Schäden entstehen erst dann, wenn die Kavitationsstrukturen in Zonen höheren Druckes transportiert werden und dort implosionsartig zusammenfallen. In Abb. 1.3 ist ein solcher Implosionsvorgang oder Kollaps schematisch dargestellt. Beim Kollaps formiert sich ein Fluidstrahl, ein sogenannter Mikro-Jet,



der im Durchmesser  $10 - 100\mu\text{m}$  misst und eine Geschwindigkeit von bis zu  $200\text{m/s}$  erreicht. Dadurch entstehen Druckimpulse bis  $10^5\text{bar}$ , siehe BÖHM ET. AL. [17], CHAHINE ET. AL. [27] und LAUTERBORN [69]. Bedingt durch den Druckgradienten sind die Mikro-Jets in der Nähe einer festen Berandung auf deren Oberfläche gerichtet. Mit ihrer extrem hohen kinetischen Energie zerstören sie sogar hochwertige Stähle. Wirken sie längere Zeit auf ein Bauteil ein, ermüdet das Material und wird schließlich aus der Oberfläche herausgelöst, wie z. B. an der Laufschaufel einer Kaplan turbine in Abb. 1.2 auf S. 2.

Kavitation tritt in vielen Bereichen der Strömungstechnik auf, zum Beispiel in der Schifffahrt bei Schiffsschrauben, in wasserbaulichen Anlagen – Stollen oder Schussrinnen –, in Motoren – Kavitation in Einspritzdüsen – oder in hydraulischen Maschinen, d.h. in Turbinen und Pumpen. In all diesen Bereichen kann die Kavitation ernste Schäden verursachen, die den weiteren Betrieb der Anlagen einschränken oder im Extremfall sogar unmöglich machen.

### 1.1.2 Kavitationsarten und -formen

Es gibt mehrere Klassifizierungen der Kavitation. In der vorliegenden Arbeit werden mit Bezug auf den kavitationserzeugenden Vorgang folgende Kavitationsarten differenziert:<sup>1</sup>

- Hydrodynamische Kavitation (Engl.: Hydrodynamic cavitation) entsteht bei Druckänderungen im strömenden Fluid, die durch die Geometrie der strömungsführenden Bauteile bedingt sind,
- Akustische Kavitation (Engl.: Acoustic cavitation) entsteht durch Ultraschallwellen, die entsprechende Druckschwankungen verursachen,
- Partikelkavitation (Engl.: Particle cavitation) entsteht bei Bestrahlung des Fluids mit Elementarteilchen

In einer Francis- oder Kaplan turbine, siehe Meridianschnitt einer Kaplan turbine in Abb. 1.9 auf S. 11, entsteht Kavitation vor allem in Bereichen niedriger Drücke und hoher Geschwindigkeiten: im Saugrohr und auf der Saugseite der Laufschaufel. Lokale Kavitationserscheinungen können jedoch auch in Spalten oder – bei einer extremen Schaufelstellung – an der Leitschaufel und auf der Druckseite der Laufschaufel entstehen.

Die Kavitationsformen unterscheiden sich bezüglich der Erosionsrelevanz. Besonders gefährlich ist die Kavitation, die an den Laufschaufeln anhaftet, da deren Implosionen unmittelbar auf die Schaufelfläche wirken.

---

<sup>1</sup>In dieser Arbeit wird ausschließlich Kavitation in Kaplan turbinen betrachtet. Vgl. ROSS [83].

Hier wird wiederum zwischen folgenden Kavitationsformen unterschieden: Eintrittskanten-, Außenspalt-, Nabenspalt- und Flächenkavitation. Diese unterscheiden sich nicht nur durch den Entstehungsort, sondern auch durch die Blasenphysik und ihre Wirkung auf die Schaufeloberfläche, siehe Abb. 1.4. Die Eintrittskantenkavitation kann bei extremen Schaufelstellungen auf der Druckseite der Laufschaufel auftreten, alle anderen Kavitationsformen treten ausschließlich auf der Saugseite auf.

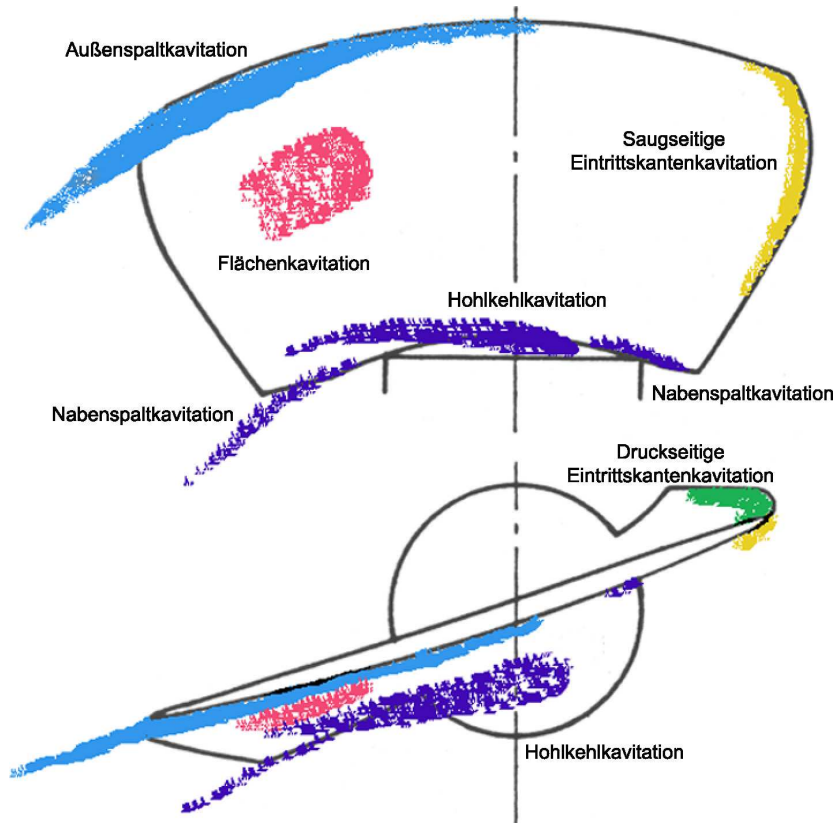


Abbildung 1.4: Klassifizierung von Kavitationsformen in einer Kaplan-turbine anhand der Lage auf der Laufschaufel, nach Fa. Voith

### 1.1.3 Kavitationsbeiwert und zulässiger Betriebsbereich einer Wasserturbine

Das für die Entstehung der Kavitationsblasen erforderliche Druckniveau  $p_{krit}$  ist in der ersten Annäherung gleich dem Sättigungsdampfdruck. Dementsprechend wird die Kavitationsanfälligkeit eines Fluids durch den dimensionslosen Kavitationsbeiwert  $\sigma$  charakterisiert, der als Differenz zwischen dem statischen und dem Sättigungsdampfdruck, dimensionslos gemacht mit dem dynamischen Druck der Anströmung, definiert wird:

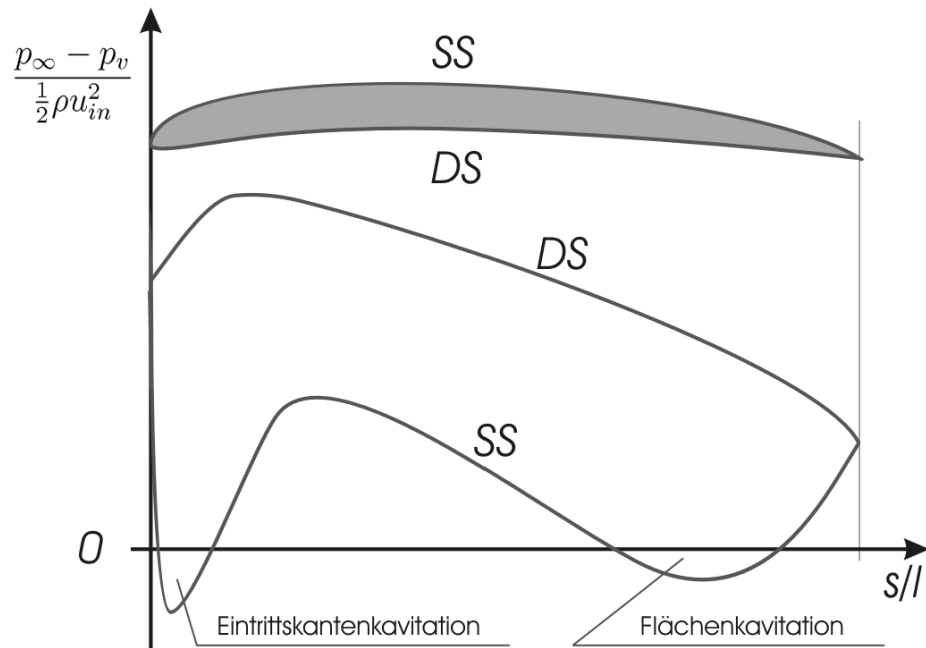


Abbildung 1.5: Normierter Druckverlauf entlang des Laufschaufelprofils in einer Wasserturbine, nach SCHILLING [86]; SS=Saugseite, DS=Druckseite.

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho u_{in}^2}, \quad (1.1)$$

wobei:

$p_\infty$  statischer oder barometrischer Druck,

$p_v$  Sättigungsdampfdruck,

$\rho$  Fluiddichte,

$u_{in}$  Anströmungsgeschwindigkeit.

Für die Kavitation am Laufrad einer Wasserturbine wird der  $\sigma$ -Wert in Form der Thoma-Zahl angegeben, siehe RAABE [82]:

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v - \rho g H_s}{\rho g H}, \quad (1.2)$$

$$H_s = H_{\text{Laufrades}} - H_{uw}, \quad (1.3)$$

wobei:

$p_\infty$  statischer oder barometrischer Druck,

$p_v$  Sättigungsdampfdruck,

$\rho$  Fluiddichte,

$g$  Erdbeschleunigung,

$H_s$  Saughöhe: Höhendifferenz zwischen Laufradaustrittskante und Unterwasserspiegel.

Sowohl der Punkt des Kavitationsbeginns als auch die Kavitationsaggressivität hängen dennoch nicht nur vom statischen Druck, dem Sättigungsdampfdruck und der Fluiddichte ab, sondern auch von einer Reihe von Fluideigenschaften, wie der Anzahl der Kavitationskeime<sup>2</sup>, der Fluidviskosität, der Strömungsgeschwindigkeit, der Turbulenzintensität sowie von den Maschinenabmessungen.<sup>3</sup>

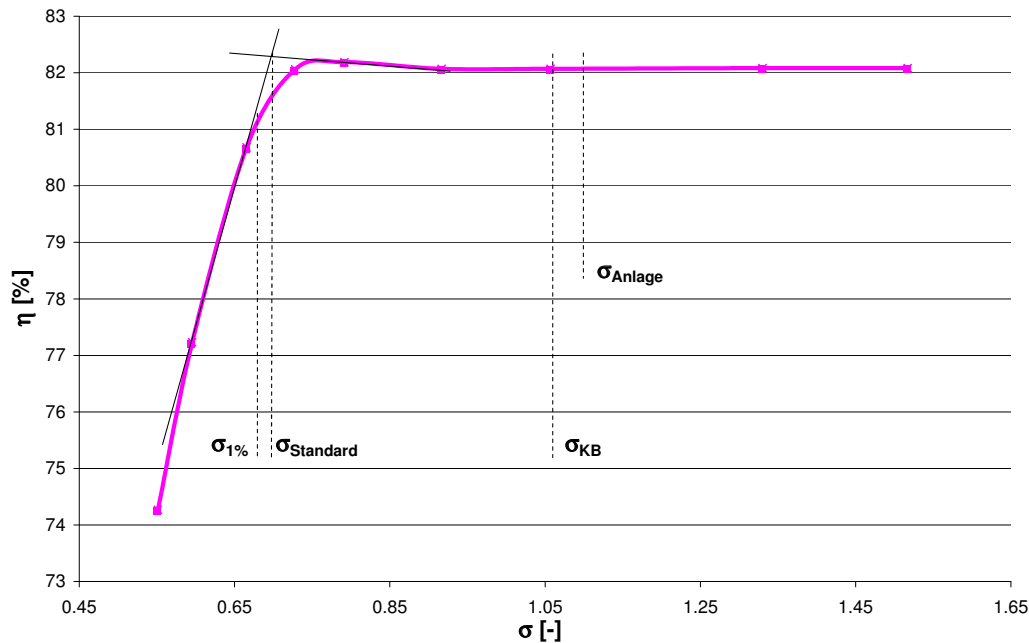


Abbildung 1.6: Ermittlung der kritischen  $\sigma$ -Werte aus den  $\eta - \sigma$ -Messungen am Modell, nach SCHILLING [86]

Die Kennzeichnung der Kavitationsstärke erfolgt anhand charakteristischer  $\sigma$ -Werte:  $\sigma_{KB}$ ,  $\sigma_{Standard}$  und  $\sigma_{0.5\%}$  oder  $\sigma_{1\%}$ .  $\sigma_{KB}$  entspricht der Entstehung erster sichtbaren Kavitationsblasen.<sup>4</sup>  $\sigma_{Standard}$  und  $\sigma_{0.5\%}$  oder  $\sigma_{1\%}$  kennzeichnen dagegen verschiedene Stufen einer stark entwickelten Kavitation. Die Werte 0.5% und 1% beziehen sich auf die Höhe des kavitationbedingten Wirkungsgradabfalls, siehe Abb. 1.6.

<sup>2</sup>Kavitationskeime sind Störstellen im Fluid, die aus Verunreinigungen mit Feststoffpartikeln oder ungelösten Gasen bestehen. Mit ihrer freien Oberfläche dienen sie als Ausgangspunkt für die Verdampfung. Fehlen diese Störstellen, kann die Flüssigkeit sehr hohe Zugspannungen aufnehmen, ohne daß eine Verdampfung auftritt. Man spricht in dem Fall von einer hohen Zerreißfestigkeit des Fluids.

<sup>3</sup>Siehe AKULICHEV [4], AWAD ET. AL. [5], BRENNEN [23], CARON ET. AL. [26], CHALOV ET. AL. [29], EICKMANN [36], GINDROZ ET. AL. [48], HOFMANN ET. AL. [50], KELLER [56] - [64], PAUCHET [78], SAUER [84], STRIEDINGER ET. AL. [94] und WURSTHORN [97].

<sup>4</sup> $\sigma_{KB}$  steht für KavitationsBeginn. In der englischen Literatur wird  $\sigma_{KB}$  entsprechend als  $\sigma_i$  bezeichnet ( $i$  = incipient).

- $\sigma_{0.5\%}$  oder  $\sigma_{1\%}$ : Der Wirkungsgradabfall erreicht 0.5% oder 1%
- $\sigma_{Standard}$ : Schnittpunkt der beiden Tangenten an die  $\eta - \sigma$  - Kurve vor und nach dem Abknicken der Kurve

Eine völlig kavitationssichere Auslegung einer Wasserturbine erfordert einen sehr tiefen Einbau der Maschine im Kraftwerk oder die Einhaltung sehr kleiner Strömungsgeschwindigkeiten, was große Maschinenabmessungen erfordert. Beide Möglichkeiten führen zu sehr hohen Baukosten und sind deshalb aus wirtschaftlichen Gründen selten zu verwirklichen. Man ist daher darauf angewiesen, bei der Betriebsführung der Maschinen Betriebszustände zu vermeiden, in denen Kavitation verstärkt auftritt. Der minimal zulässige  $\sigma$ -Wert wird als  $\sigma_{Kr}$  bezeichnet.<sup>5</sup> Dieser wird betriebspunktabhängig in Modellmessungen ermittelt. Das  $\sigma_{Kr}$  liegt in der Regel zwischen dem  $\sigma_{KB}$  und dem  $\sigma_{1\%}$  und kennzeichnet einen Betriebszustand, in welchem Kavitation bereits auftritt. Die Stärke der Kavitation ist jedoch noch so gering, dass sich Kavitationsschäden am Ende einer vorgegebenen Revisionsperiode mit begrenztem Aufwand reparieren lassen.

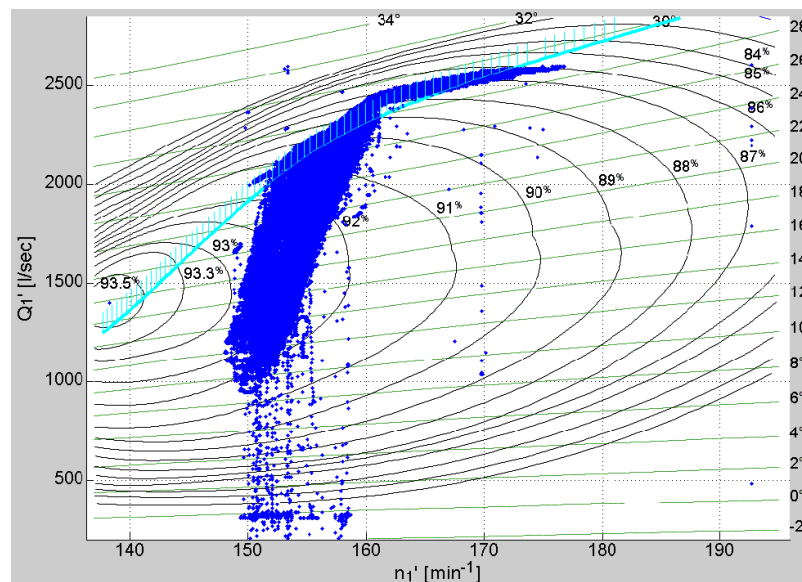


Abbildung 1.7: Kavitationsgrenze über dem Kennfeld einer Kaplanmaschine. Hellblau: Kavitationsgrenze, dunkelblau: gefährliche Betriebspunkte

Der aktuelle  $\sigma$ -Wert ist eine Größe, die beim Betrieb von Turbinen im Kraftwerk üblicherweise nicht berechnet wird. Deshalb gibt der Turbinenbetreiber Kavitationsgrenzen im Betriebskennfeld vor, die nicht überschritten werden dürfen, siehe Abb. 1.7. Die Berechnungen erfolgen anhand von  $\sigma_{Kr}$ , anlagentypischen Unterwasserpegel- und Luftdruckwerten und Temperaturen.

Da das Auftreten der Kavitation jedoch von einer Vielzahl von Parametern wie Temperatur und Qualität des Triebwassers, dem Umgebungsdruck, dem Unterwasserpegel und dem Zustand der Schaufeloberfläche beeinflusst wird, müssen die Grenzen

<sup>5</sup>Kr steht für kritisch.

des zulässigen Betriebsbereiches mit einem großzügigen Sicherheitsabstand festgelegt werden, was zu einer Begrenzung der Anlagenleistung führt, besonders bei großen Wassermengen.

Seitens der Turbinenbetreiber besteht daher Bedarf an einem Online-Diagnosesystem, das die Beurteilung der momentanen Kavitationsbelastung der Anlage erlaubt, so dass ein Betrieb nahe der Kavitationsgrenze möglich ist und die Kavitationsgrenze evtl. kontrolliert überschritten werden kann.

## 1.2 Techniken der Kavitationsdiagnose in Wasserturbinen

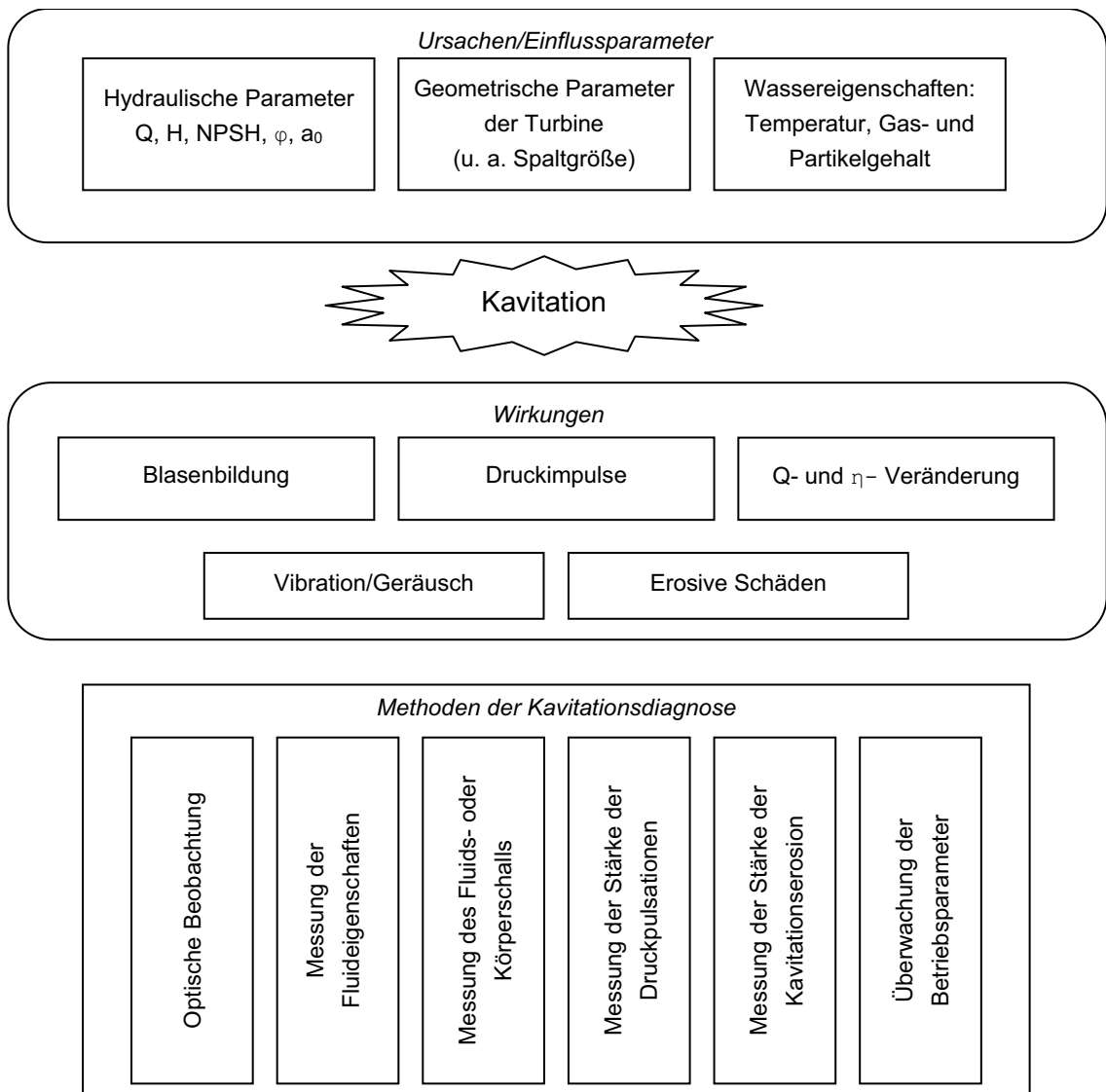


Abbildung 1.8: Ursachen und Auswirkungen der Kavitation und meßtechnische Möglichkeiten zu deren Überwachung

Für Kavitationsmonitoring in Wasserturbinen können mehrere Messverfahren eingesetzt werden, siehe auch Abb. 1.8:

- Fluid- und Körperschallmessung
- Überwachung der Fluideigenschaften
- Online-Überwachung der Kavitationsaggressivität

- Optische Verfahren
- Wirkungsgradüberwachung

Von den Messverfahren ist die erste Gruppe am weitesten entwickelt. Dies liegt vor allem daran, dass zu diesen Messungen im einfachsten Fall keine Umbaumaßnahmen erforderlich sind. Bei der zweiten bis vierten Gruppen werden dagegen oft wesentliche Anlagenumbauten erforderlich, was deren Anwendung stark einschränkt. Gleichzeitig sind diese Verfahren noch nicht genügend erforscht. Die Wirkungsgradüberwachung kann in der Anlage nicht angewandt werden, weil sich hier ein kleiner Wirkungsgradabfall wegen fehlender Volumenstrommessung nicht nachweisen lässt.

Im Folgenden werden die Messprinzipien der vier ersten Verfahrensgruppen kurz dargestellt.

### 1. Fluid- und Körperschallmessung

Die Gruppe Fluid- und Körperschallmessung besteht aus einer Reihe von Messverfahren. Die Unterschiede beziehen sich vor allem auf folgende Merkmale:

- Messort:
  - am Turbinengehäuse außen
  - im Turbineninnern, speziell am Laufrad
- untersuchter Schalltyp: Fluid- oder Körperschall,
- Frequenzmessbereich
- Datenauswertungsverfahren.

#### (a) Messort am Turbinengehäuse<sup>6</sup>

Aus dem Körperschall kann eine Reihe von Informationen über den Kavitationsstand gewonnen werden. Der Informationsgehalt hängt vom Datenauswertungsverfahren ab.

Die größte Verbreitung hat die Messung der *Signalintensität* (RMS-Wert) gefunden, die mit der Kavitationsintensität in einem breiten Signalfrequenzband von  $1Hz$  bis  $100MHz$  stark korreliert ist.

Die Aussagekraft der Signalintensität wird jedoch durch folgende zwei Faktoren begrenzt:

- Der von Kavitation erzeugte Schall ändert sich auf dem Weg vom Entstehungsort bis zum Sensor deutlich. Diese Signaländerung, sowohl in der Intensität als auch in der spektralen Zusammensetzung,

---

<sup>6</sup>Zur Körperschallerfassung am Turbinengehäuse siehe ABBOT [1] und [2], BAJIC [10], [11] und [12], BÖHM ET. AL. [18], BOURDON ET. AL. [20], [21] und [22], FARHAT ET. AL. [42] – [44] und [46], GUENNOUN ET. AL. [49], KAYE ET. AL. [53], KLOCKGETHER [66], SCHULLER [89], SKINNER ET. AL. [91], STAUDENRAUS ET. AL. [92], VIZMANOS ET. AL. [95].



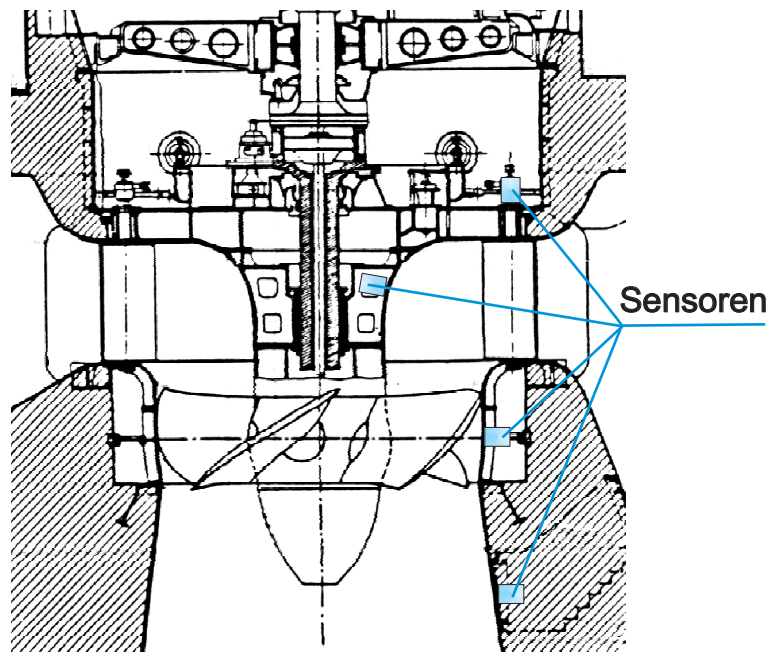


Abbildung 1.9: Anbringungsorte des Körperschallaufnehmers in einer Kaplanmaschine

ist anlagebauabhängig und lässt sich nur schwer berechnen. Entsprechende Modellierungen sind zurzeit noch nicht entwickelt.

Einen anwendbaren Einsatz zur Lösung dieses Problems bietet die In-Situ-Kalibrierung.<sup>7</sup> Am Ort der Kavitationsentstehung wird ein künstliches Signal erzeugt. Durch einen Intensitätsvergleich über die gesamte in Frage kommende spektrale Charakteristik zwischen dem Ursprungssignal und dem am Turbinengehäuse erfassten Signal ergibt sich eine Übertragungsfunktion der Anlage, die bei den anschließenden Kavitationsmessungen messtechnisch berücksichtigt wird.

- Mit steigender Anzahl der Kavitationsblasen wächst auch die Signaldämpfung im Fluid. Bei einer starken Kavitation spiegelt die Schallintensität an der Turbinenoberfläche die Intensität der Kavitation nicht mehr wider.<sup>8</sup>

Mit Hilfe anderer Datenauswertungsverfahren können aus dem am Turbinengehäuse erfassten Signal auch weitere Informationen gewonnen werden. Unter anderem geht es hier um:

- Kavitationsverteilung auf einzelne Laufschaufeln,<sup>9</sup>
- Anteil der an den Laufschaufeln anhaftenden Kavitation,<sup>10</sup>

<sup>7</sup>Im Englischen: Dynamic Calibration.

Zur In-situ-Kalibrierung siehe ABBOT [1], BOURDON ET. AL. [21], ESCALER ET. AL. [37], FARHAT ET. AL. [43] und [44], KAYE ET. AL. [53] und [55], LOHRBERG ET. AL. [72] und SCHULLER [89].

<sup>8</sup>Siehe Kap. 2.3.1 S. 28 vorliegender Arbeit.

<sup>9</sup>Siehe FARHAT ET. AL. [42], KAYE ET. AL. [54] und Kap. 3.1 ab S. 62 vorliegender Arbeit.

<sup>10</sup>Siehe ESCALER [37] und KAYE & FARHAT [54] und Kap. 3.2 ab S. 88 vorliegender Arbeit.

- Differenzierung einzelner Kavitationsformen:<sup>11</sup>
  - durch Vergleich der Signalstärke stromab- und aufwärts vom Laufrad,
  - durch die spektrale Charakteristik des Signals

(b) Messort im Turbineninnern

Die Aussagekraft der Schallmessungen kann durch eine Sensorplatzierung in unmittelbarer Nähe zum Kavitationsentstehungsort verbessert werden. Das Hauptproblem dieses Verfahrens bleibt die Datenübertragung vom Sensor und dessen Energieversorgung. Die möglichen Lösungen hängen von der Wahl der Sensoreinbringung ab: stationär oder temporär, am Laufrad oder am Laufradmantel.

Stationäre Messungen erlauben eine langfristige Online-Überwachung, erfordern jedoch große Umbauten am Turbinengehäuse, besonders bei der Wahl der im Laufrad integrierten Messungen.<sup>12</sup>

Für bereits bestehende Turbinen sollte daher evtl. der temporäre Sensoreinsatz bevorzugt werden. Ein autonomer Sensor wird im Turbineninnern für eine begrenzte Zeit platziert und erfasst Daten solange die Energieversorgung reicht. Der Sensor kann entweder unmittelbar nach den Messungen abmontiert werden oder bis zur nächsten Revision in der Turbine verbleiben. Die Daten können entweder online per Funk übertragen oder nach dem Sensorabbau aus dem Sensorspeicher abgelesen werden.

(c) Frequenzmessbereich und Auswahl des Sensors:

Wie im Punkt 1a, S. 10 bereits erwähnte, zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen der Intensität des Fluid- oder Körperschalls und der Kavitationsstärke in einem breiten Frequenzbereich von  $1\text{Hz}$  bis  $100\text{MHz}$ . Zur Auswahl des Frequenzbereiches gibt es in der Literatur verschiedene Einsätze:

- Niederfrequent breitbandig,
- Hochfrequent breitbandig,
- Niederfrequent schmalbandig,
- Hochfrequent, moduliert mit einer Niederfrequenz, z.B. mit der Turbinendrehfrequenz

Die Auswahl der Sensoren hängt vom Schalltyp, Fluid oder Körperschall, dem Frequenzmessbereich und der gewünschten Sensorempfindlichkeit ab. Im Fluid finden Hydrophone oder Wechseldruckaufnehmer ihren Einsatz, für den Körperschall werden Beschleunigungssensoren oder Körperschallaufnehmer benutzt. In Tab. 1.1 sind Sensoren aufgelistet, die für Kavitationsdiagnose eingesetzt werden können.<sup>13</sup>

<sup>11</sup>Siehe Kap. 3.3 ab S. 91 vorliegender Arbeit.

<sup>12</sup>Zu im Laufrad integrierten Messungen siehe BELLET ET. AL. [13], BOURDON ET. AL. [19] und [22], CARON ET. AL. [26] DREISS [35], FARHAT ET. AL. [47], LOHRBERG ET. AL. [72] und [73], LOWYS ET. AL. [75] und STOFFEL [93].

<sup>13</sup>Siehe auch SCHULLER [89].

Tabelle 1.1: Schallaufnehmer und Frequenzmessbereiche die zur Kavitationsdiagnose verwendet werden können

Aufnehmer	Schalltyp <sup>14</sup>	Frequenzmeßbereich	Sensorbeispiel
Hydrophone	FS	0.1Hz – 180kHz	Brüel&Kjær 8103 [12] und [24]
Wechseldruckaufnehmer	FS	bis 125 kHz	Kulite XTM-190M [74] und [68]
Beschleunigungsaufnehmer	KS	0.1Hz – 12kHz 1Hz – 60kHz	Brüel&Kjær 4371 [12], [42] und [25] Brüel&Kjær 8309 [25]
Körperschallaufnehmer	KS	100kHz – 1.2MHz	Typ WD von Physical Accoustics [79]

## 2. Online-Überwachung der Kavitationsaggressivität<sup>15</sup>

Im kavitationsaggressiven Bereich wird ein elektrochemischer Sensor platziert, dessen empfindliches Element aus polierter Metallmembrane besteht. Die Kavitationsimplosionen verändern die Struktur der Membrane, was sich durch deren elektrochemische Kapazität messen lässt.<sup>16</sup> Die Messung ist wegen der Abnutzung der Membran zeitlich begrenzt.

## 3. Überwachung der Fluideigenschaften

Für die Kavitationserkennung kann auch die Veränderung der Fluideigenschaft beim Kavitationsauftritt verwendet werden. In der Literatur gibt es diesbezüglich Beschreibungen der Überwachung von zwei Parametern:

### (a) Elektrochemischer Fluidwiderstand,

der von der Dichte und Größe der Kavitationsblasen abhängt, siehe Patent von DECHEMA [33] und ADAM ET. AL. [3]

### (b) Stärke der Schallabsorption im Fluid:

Das Fluid wird mit einem akustischen Signal durchstrahlt. Aus der Stärke der von der Wellenlänge abhängigen Schallabsorption wird der Rückschluss auf die Anzahl der Kavitationsblasen und deren Größe gezogen. Die Messung basiert auf der Blaseneigenschaft, Schallwellen bestimmter Längen zu absorbieren, siehe CHAHINE ET. AL. [28].

<sup>14</sup>FS = Fluidschall, KS = Körperschall

<sup>15</sup>Eine offline Version dieser Methode – Messung der kumulierten Kavitationsbelastung – ist unter dem Namen "pitting"-Messung oder Pit-Count Methode bekannt und wird im Labor breit verwendet: Eine Probe aus weichem Material wird in die Kavitationszone für eine längere Zeit platziert. Nach dem Probenabbau wird unter dem Mikroskop die Stärke der Beschädigungen – Anzahl der Kavitationsstiche (im Englischen Pitting) pro Flächeneinheit aufgenommen. Daraus werden Rückschlüsse über die Kavitationsaggressivität gezogen. Siehe BACHERT ET. AL. [7], BACHERT ET. AL. [6] und [7], BESOLD [15], FARHAT ET. AL. [45] und LOHRBERG ET. AL. [70] und [72].

<sup>16</sup>siehe BOURDON ET. AL. [20], DOREY ET. AL. [34]; Patente von BEKAERT [77], von Fa. HYDRO-QUEBEC [51] und aus Tulsa [30]

Eine Anwendung dieser Methoden zur Online-Diagnostik wird durch umfangreiche Umbauten im Turbinengehäuse erschwert. Außerdem lässt sich aus der vorhandenen Literatur nicht ableiten, wie genau diese Verfahren sind und ob sich diese für Kavitationsmonitoring eingesetzt werden können.

#### 4. Optische Verfahren

Optische Verfahren werden hauptsächlich bei Laboruntersuchungen eingesetzt. Die Bauweise der Prototypen lässt meistens keinen visuellen Zugang zum Laufrad zu.

- (a) Erfassung der Dichte der Kavitationsblasen im Wasser mit Hilfe eines Lasers, siehe EICKMANN [36] und Patent von Fa. GENERAL ELECTRIC [80].

Dieses Verfahren ist für eine beginnende Kavitation geeignet, solange die Kavitationsblasen einzeln bleiben. Das allein macht die Methode für Wasserturbinenüberwachung ungeeignet.

- (b) Automatisierte Erkennung der Größe der Kavitationserscheinungen: Bildaufnahmen im Kavitationsbereich mit anschließender intelligenter Bildbearbeitung.

Der Stand der Technik in der Bildbearbeitung reicht für solche eine Erkennungsmethodik aus. Das Einbringen einer Kamera in eine Wasserturbine und deren dauerhafter Betrieb ist jedoch problematisch.<sup>17</sup>

Die meisten der oben beschriebenen Kavitationsdiagnoseverfahren, wie die

- Messung der Kavitationsaggressivität,
- Überwachung der Fluideigenschaften,
- optische Messungen oder
- Schallüberwachung in unmittelbarer Nähe zum Ort der Kavitationsentstehung

erfordern eine umfangreiche Veränderung der Turbinenanlage, was bei bestehenden Kraftwerken nicht wirtschaftlich ist.<sup>18</sup> Diese Methoden finden ihre Anwendung vor allem im Labor.

Die Körperschallmessung am Turbinengehäuse bleibt daher das meist verbreitete Kavitationsdiagnoseverfahren. Mit Hilfe neuer Signalverarbeitungstechniken können aus dem Signal neue Informationen über den Kavitationszustand gewonnen werden.

---

<sup>17</sup>Zur intelligenten Bildbearbeitung siehe ISERMANN [52] und KINNEBROCK [65]. Zur Anwendung anderer optischer Methoden zu Kavitationsuntersuchungen siehe BACHERT ET. AL. [8] und [9], COUTY ET. AL. [31] und [32], FARHAT ET. AL. [40], LOHRBERG ET. AL. [71] und LUDWIG ET. AL. [76]

<sup>18</sup>Wegen der großen Lebensdauer der Wasserkraftwerke ist der Anteil der neu gebauten Anlagen relativ klein.

Eine große Schwäche der Körperschallmessungen am Turbinengehäuse bleibt, dass diese die Veränderung des Kavitationssignals auf dem Wege vom Entstehungsort an der Laufschaufel bis zum Sensor an der Turbinenoberfläche in der Regel nicht berücksichtigen. Dies macht Entwicklung von Kalibrierungsverfahren notwendig.

### **1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

In dieser Arbeit wird zuerst die langfristige Aussagekraft des in den 90er Jahren am Lehrstuhl für Hydraulische Maschinen der TU München entwickelten Kavitationsdiagnosesystems, des Acoustic Emission Monitors (AEM) untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen werden weitere Verbesserungsmöglichkeiten des AEM untersucht und ein Nachfolgemodell konzipiert.

## Kapitel 2

# Weiterentwicklung des Kavitationsdiagnosesystems ACOUSTIC EMISSION MONITOR

Im Rahmen einer Zusammenarbeit des Lehrstuhles für Fluidmechanik (FLM) der Technischen Universität München mit J.M. Voith GmbH wurde in den 90er Jahren ein Kavitationsdiagnosesystem mit dem Namen Acoustic Emission Monitor (AEM) entwickelt. Der AEM ermittelt das Auftreten von Kavitation in einer Wasserturbine nach der Analyse des hochfrequenten Anteils des an der Turbinenoberfläche erfassten Körperschalls und gibt zwei mit der Kavitationsstärke sinnvoll korrelierte Messwerte, RMS und E/s, aus.<sup>1</sup>

Im Rahmen dieses Projektes wurden am FLM Modelluntersuchungen zur AEM-Aussagekraft durchgeführt, die gezeigt haben, dass die beiden Messwerte RMS und E/s

- mit der Kavitationsintensität gut korreliert sind und
- das Kavitationsgeschehen in einer Modellturbine gut abbilden.<sup>2</sup>

In einem nächsten Schritt sollte nun die Anwendung des AEM in realen Anlagen erprobt werden. Hierzu wurden drei Anlagen mit Kaplan turbinen mittlerer bis hoher Fallhöhe ausgewählt, in denen relativ starke Kavitation auftritt, die Anlagen Ryburg-Schwörstadt, Neuötting und Roßhaupten. In diesen Anlagen wurde an jeweils einer Turbine ein AEM-System und eine PC-basierte Messwerterfassung installiert, die es gestattete, sowohl die AEM-Messwerte als auch relevanten Betriebspunkt daten über einen Zeitraum von mehreren Jahren kontinuierlich aufzuzeichnen.

---

<sup>1</sup>Zur Entwicklung anderer Online-Kavitationsdiagnosesysteme siehe FARHAT ET. AL. [44] und Patente von Fa. BUSCH [81] und Fa. VOITH [96].

<sup>2</sup>Siehe SCHNEIDER und KNAPP [88].

Das Ziel der Versuche, die im Zeitraum von Anfang 2000 bis Ende 2003 durchgeführt wurden, war festzustellen, wie gut das Kavitationsgeschehen in einem Prototyp durch den AEM abgebildet wird.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass sowohl  $RMS$  als auch  $E/s$  über dem Kennfeld aller drei Kraftwerke relativ schwache Gradienten aufwiesen.

Zur Feststellung der Ursache wurde das Kavitationsverhalten der Anlagen wie folgt analysiert:

- Für die Betriebspunkte oberhalb des Optimums, d.h.  $\varphi > \varphi_{opt}$ : anhand vorhandener Voith-Modellmessungen
- Für die Betriebspunkte unterhalb des Optimums, d.h.  $\varphi < \varphi_{opt}$ , lagen keine Messungen vor. Es mussten daher neue Modellversuche durchgeführt werden. Hierzu wurde eine der Anlage Roßhaupten ähnliche Modellturbine gebaut und im Universalversuchstand des FLM untersucht

Darüber hinaus wurden im Modell grundlegende Punkte wie die Aussagekraft der am Turbinengehäuse erfassten Schallintensität, der optimale Schallabgriffspunkt und Maßnahmen zur Sicherung der Kontaktqualität untersucht.

Nach dem Vergleich der zu erwartenden Kavitationsschäden mit den tatsächlich aufgetretenen konnten außerdem Rückschlüsse über die erosive Stärke der einzelnen Kavitationsformen gezogen werden.

Die Ergebnisse der in den Jahren 2000 – 2004 durchgeführten Anlagen- und Modellmessungen zur Verbesserung der Aussagekraft des AEM werden in diesem Kapitel dargestellt.

## 2.1 Versuchsaufbau an einer Kaplan-Modell-turbine

### Fertigung und Einbau eines Axiallaufrades in den UVS

Zur Durchführung der für diese Arbeit notwendigen Kavitationsmessungen wurde in den Jahren 1999 – 2000 am FLM eine Kaplan-Modellturbine konstruiert und in das bestehende Universalversuchsstand (UVS) eingebaut.

Das Laufrad der neuen Modellturbine wurde am FLM auf Basis der Laufradgeometrie K63j von Fa. Voith GmbH konstruiert und gefertigt, siehe Meridianschnitt der Modellturbine in Abb. 2.1.<sup>3</sup>

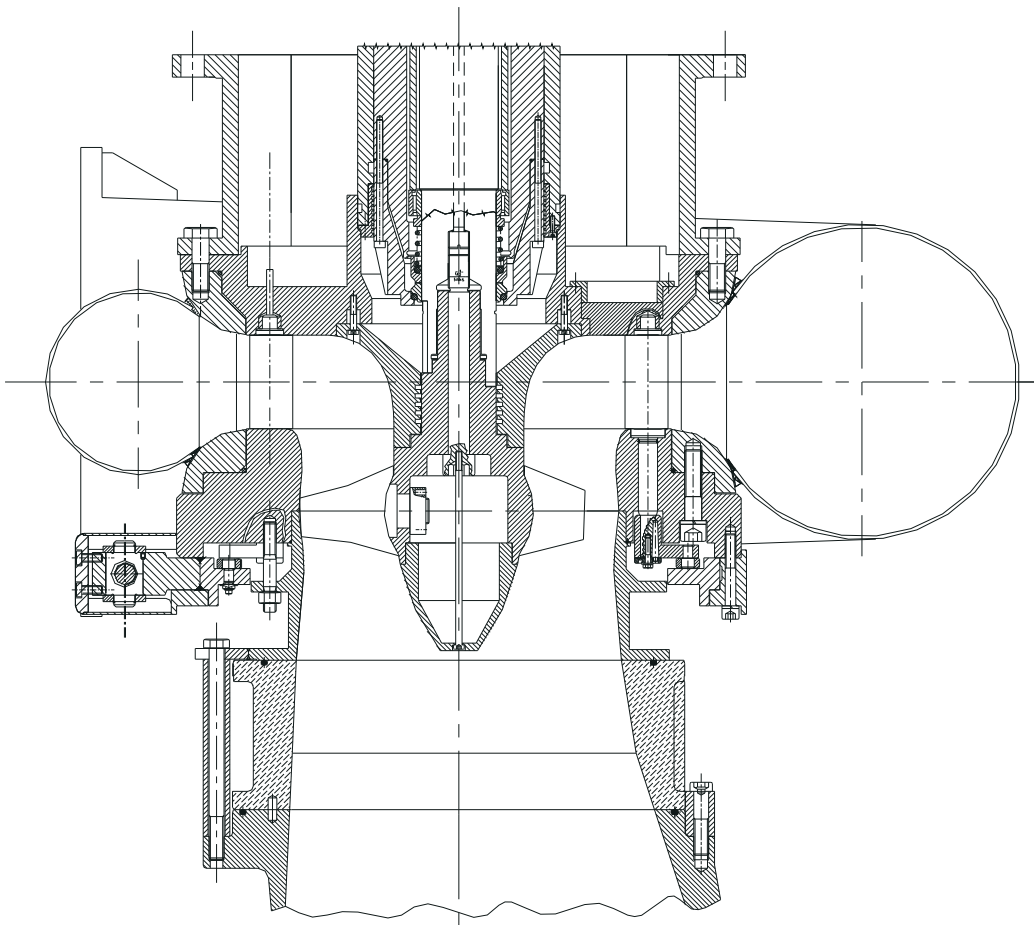


Abbildung 2.1: Meridianschnitt der Modellturbine im Universalversuchsstand am FLM

Der UVS ist ein geschlossener Versuchsstand, der aus Pumpe, Oberwasserkessel, Modellturbine, Saugrohr und Unterwasserkessel besteht, siehe Abb. 2.3. Der Be-

<sup>3</sup>Unter Anpassung an ein von Escher Wyss zur Verfügung gestelltes Saugrohr mussten noch weitere Umbauteile konstruiert und gefertigt werden.



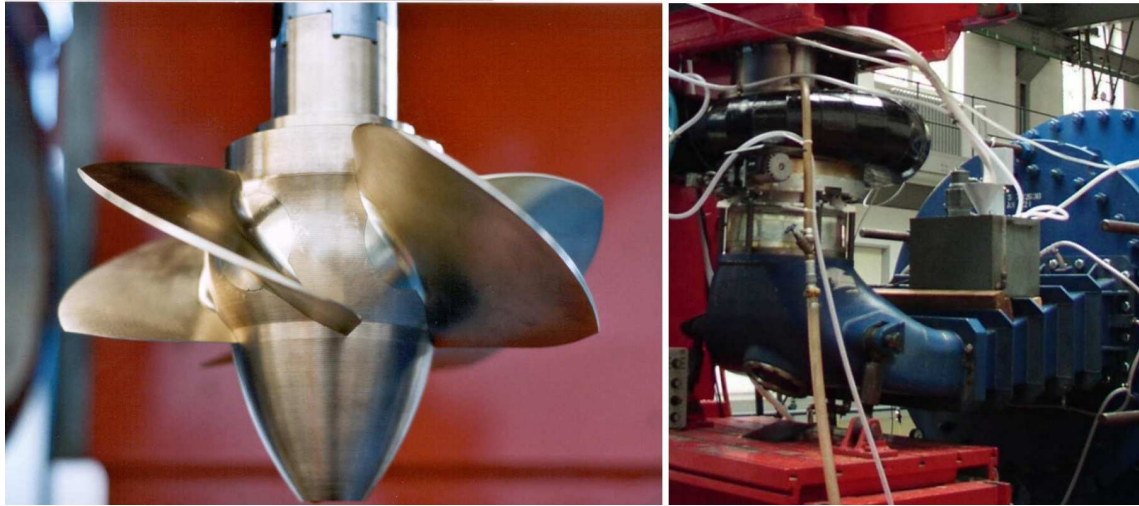


Abbildung 2.2: Laufwerk (links) und Saugrohr (rechts) der Modellturbine

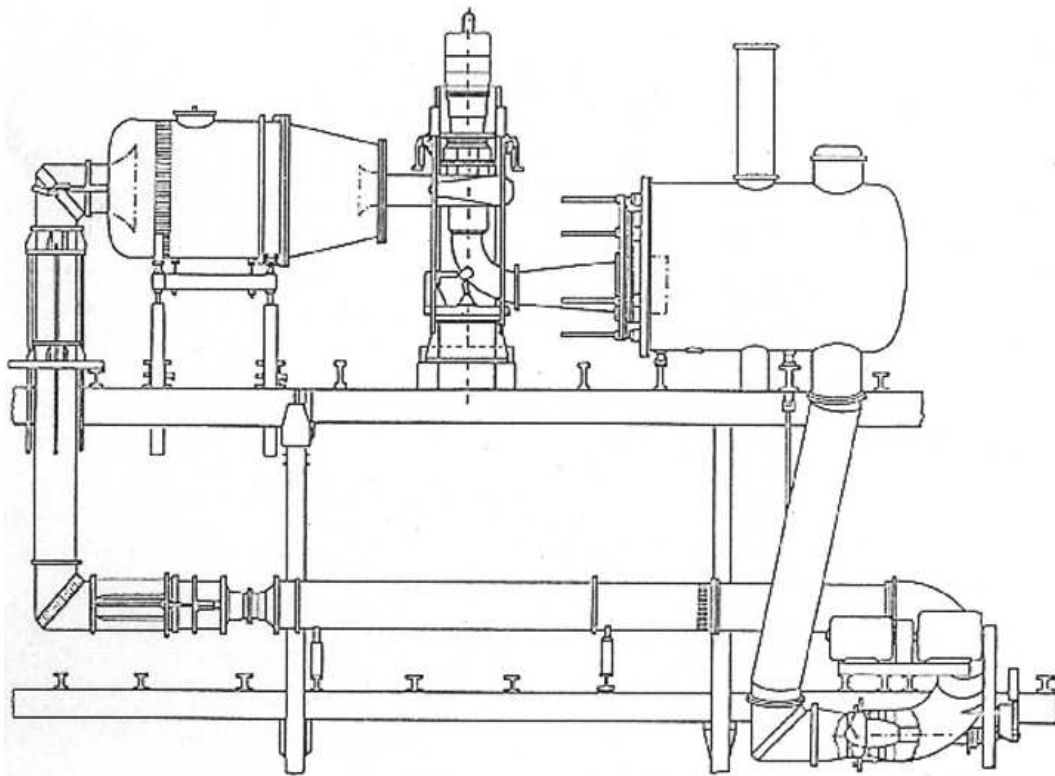


Abbildung 2.3: Universalversuchsstand am FLM

triebspunkt der Modellturbine wird hier durch Pumpendrehzahl, Leitapparatstellung, Laufschaufelwinkel und Turbinendrehzahl eingestellt. Der Kavitationsbeiwert  $\sigma$  wird durch Senkung oder Erhöhung des Gesamtdruckniveaus eingestellt. Hierzu wird am Domschacht des Unterwasserkessels ein entsprechendes Über- oder Unterdruck aufgeprägt.

## Aufbau eines Meßsystems am UVS

Am UVS wurde ein PC-basiertes Meßsystem aufgebaut, das es gestattet, sowohl den Betriebspunkt der Modellturbine zu erfassen als auch Kavitationssignale aufzunehmen und auszuwerten.

Die Anforderungen an die Datenerfassung und Datenauswertung waren durch das Versuchsprogramm bestimmt:

- Ermittlung des Betriebspunktes inkl.  $\sigma$ -Wert,
- Aufzeichnung des Körperschallsignals,
- digitale Filterung des Körperschallsignals,
- Ermittlung der Körperschallintensität  $RMS$ , des  $E/s$ -Wertes und der Signalspektren,
- Winkelauflösung: Korrelation des Signals zur momentanen Relativstellung von Laufrad und Leitrad<sup>4</sup>,
- Ermittlung der Intensität des durch die Turbinendrehfrequenz bzw. durch deren Harmonischen modulierten RMS-Wertes<sup>5</sup>.

Die Messwerterfassung wurde in LabView realisiert. Abbildung 2.4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Datenerfassung.

Die Betriebspunktdaten  $\Delta p_{ow\_uw}$ ,  $p_{vent}$ ,  $p_{uw}$ ,  $M$ ,  $a_0$ ,  $n_{Tu}$  und  $\vartheta$  werden durch einen AD-Wandler bei einer Abtastrate von  $20kSamples/s$  erfasst. Nach entsprechender Umrechnung werden sie in der Bedienungsoberfläche des Programms dargestellt und auf Wunsch zusammen mit einem Zeitstempel in einem ASCII-File gespeichert.

Das Kavitationssignal wird durch den zweiten AD-Wandler mit einer Abtastrate bis zu  $5MSamples/s$  aufgezeichnet. Die digitalisierten Körperschalldaten können auf Wunsch direkt in ein File gespeichert werden. Sonst werden diese kontinuierlich durch ein frei parametrierbares Filter geleitet und an die Auswertungsmodule weitergegeben.

Das Programmpaket zur Messwerterfassung besteht aus mehreren Modulen. In Abb. 2.5 ist die Bedienungsoberfläche eines Programms dargestellt, das folgende Funktionen und Darstellungen unterstützt:

- Betriebspunktdaten:
  - Zeitliche Darstellung einzelner Turbinenparameter, siehe Graphen rechts in der Abbildung,

---

<sup>4</sup>Siehe Kap. 3.1.

<sup>5</sup>Siehe Kap. 3.2.

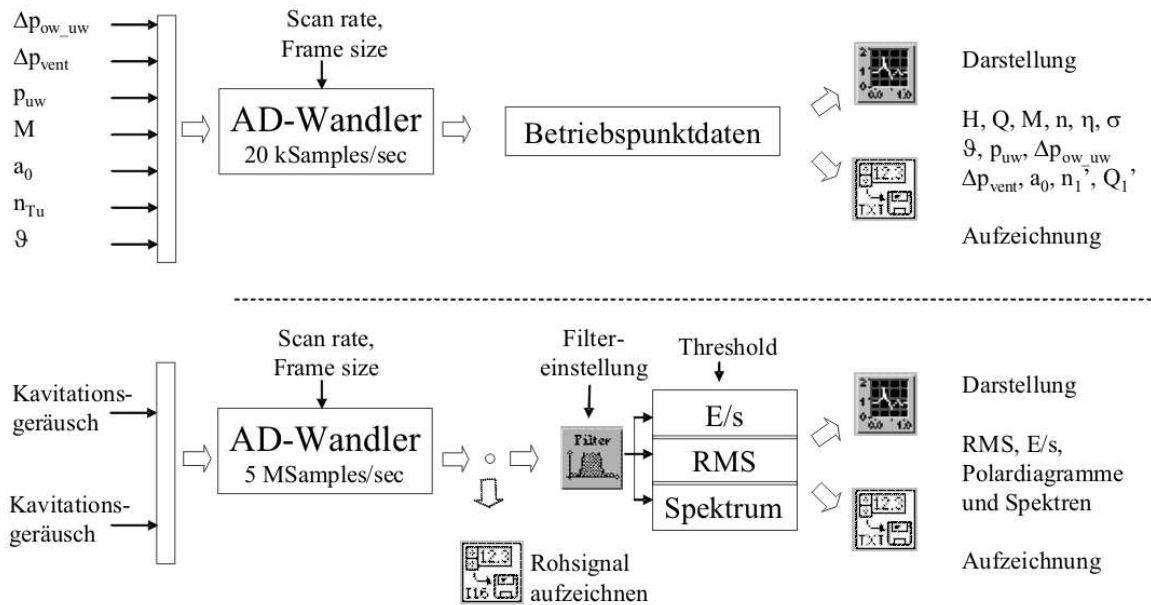


Abbildung 2.4: Messsystem des UVS am FLM

- Betriebspunktdaten im Kennfeld in Einheitswerten  $n_1'$  und  $Q_1'$ ,
- Körperschall, siehe Bereich links oben in der Abbildung,
  - Verlauf über der Zeit,
  - Aufzeichnung der Signaldaten, nach Wunsch,
  - Filtereinstellung,
  - Spektrale Charakteristika.

Zur Untersuchungen bzgl. der Winkelauflösung wird im Kap. 3.1 ein anderes Programmmodul verwendet, siehe Abb. 3.1 auf S. 63.

### Vorbereitung der Modellturbine zu Kavitationsuntersuchungen

Da die Modellturbine eine Kombination des vorhandenen Spiralgehäuses und Leitapparates mit dem in diesem Zusammenhang nicht untersuchten Laufrad K63j darstellte, wurde deren Kennfeld neu ermittelt, siehe Abb. 2.6 und Tab. 2.1.

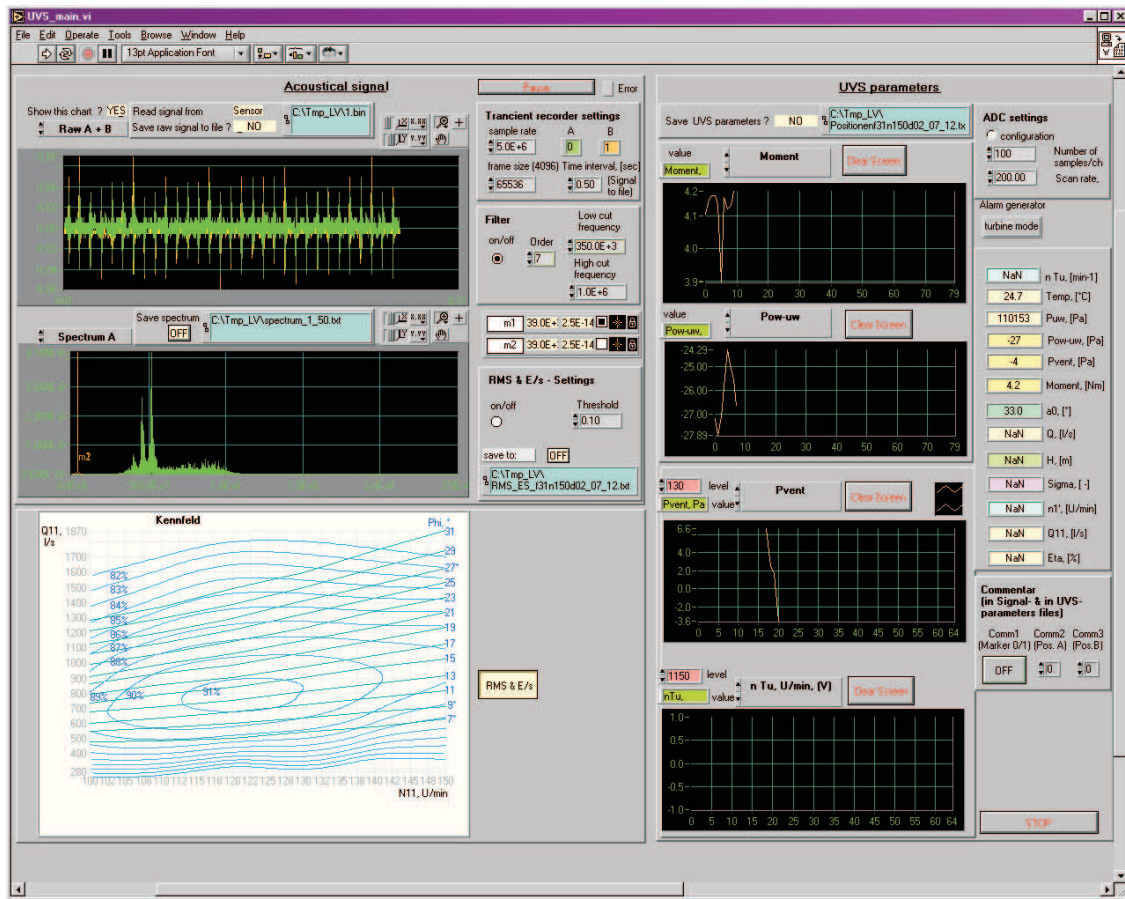


Abbildung 2.5: Bedienungsfläche des Messprogramms für UVS am FLM

Tabelle 2.1: Parameter der Kaplan-Modellturbine K63j im UVS am FLM

Fallhöhe $H_{max}$ [m]	Durchfluss $Q_{max}$ [m <sup>3</sup> /s]	Einheitsdrehzahl $n_1'_{opt}$ [min <sup>-1</sup> ]	Einheitsdurchfluss $Q_1'_{opt}$ [l/s]	Schnellläufigkeit $n_{qopt}$ [min <sup>-1</sup> ]	Reynoldszahl $Re_{max}$ [-]	Thomazahl $\sigma$ [-]	Lauf- rad		Drehzahl $n$ [min <sup>-1</sup> ]
							$D$ [m]	$Z$ [-]	
12	350	121	800	109	6E6	0.45-2.2	0.3	5	600-1400

Das Kavitationsverhalten der Modellturbine war ebenfalls unbekannt und musste zunächst ermittelt werden. Hierzu wurde folgendes Vorgehen festgelegt: Für Betriebspunkte bei  $n_1' = 100, 110, 120, 130, 140$  und  $150 \text{ min}^{-1}$  und  $\varphi = 5, 7, 11, \dots, 27, 29, 31^\circ$  wurde der  $\sigma$ -Wert über den Kavitationsbeginn  $\sigma_{KB}$  hinaus bis zum niedrigsten erreichbaren Wert abgesenkt. Die Kavitationsereignisse auf den Laufschaufeln wurden visuell beobachtet und skizziert.<sup>6</sup>

Am Laufrad dieser Modellturbine treten betriebspunkt- und  $\sigma$ -abhängig vier verschiedene Kavitationsformen auf: Eintrittskantenkavitation, Außenspaltkavitation,

<sup>6</sup>Diese Daten wurden anschließend u.a. zur Auswertung der Kavitationsmessungen verwendet, siehe Abb. 3.14 auf S. 73.

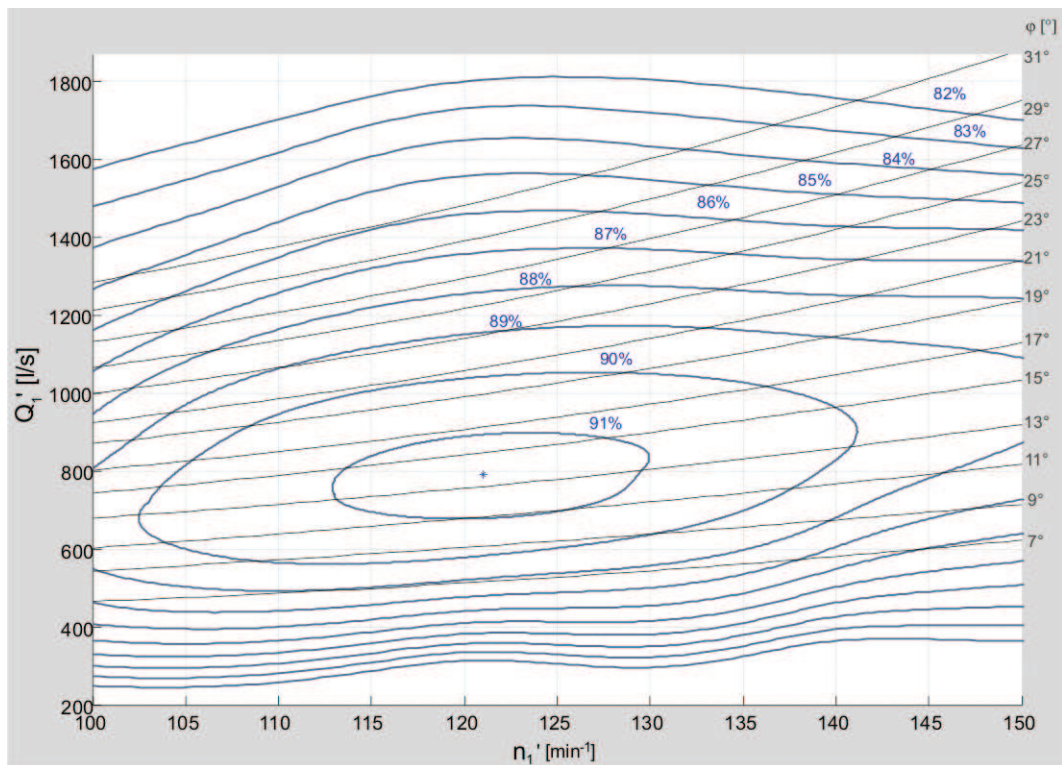


Abbildung 2.6: Kennfeld der Modellturbine K63j im UVS am FLM

Hohlkehlkavitation und Flächenkavitation. Alle Kavitationsformen treten hier ausschließlich auf der Saugseite auf.

Aus den Skizzen wurde abgeleitet, wie groß die von einzelnen Kavitationsformen bedeckte Fläche ist. Abb. 2.7 auf S. 24 zeigt diese in ausgewählten Betriebspunkten bei  $\sigma = 0.55$ . Die einzelnen Kavitationsformen sind in dieser Modellturbine wie folgt über dem Kennfeld verteilt:

- Eintrittskantenkavitation und Außenspaltkavitation nahe der Eintrittskante treten auf bei:
  - $n_1' = 100 \text{ min}^{-1}$  und allen  $\varphi = 5^\circ - 31^\circ$  und
  - $n_1' = 100 - 120 \text{ min}^{-1}$  und  $\varphi = 21^\circ - 31^\circ$ ,
- Außenspaltkavitation tritt im mittleren Schaufelbereich oder nahe der Eintrittskante im fast ganzen Kennfeld auf; eine schwache Kavitation tritt sogar nahe am Optimalbetriebspunkt auf,
- Flächen-, Nabenspalt- und Hohlkehlkavitation treten hauptsächlich bei Vollast auf: bei  $n_1' > 130 \text{ min}^{-1}$  und  $\varphi > 29^\circ$ . Deren Präsenz und Stärke sind stark  $\sigma$ -abhängig, siehe Tab. 2.2.

Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen zur Sensorposition, Winkelauflösung oder zum modulierten *RMS*-Wert wurden in drei Betriebspunk-

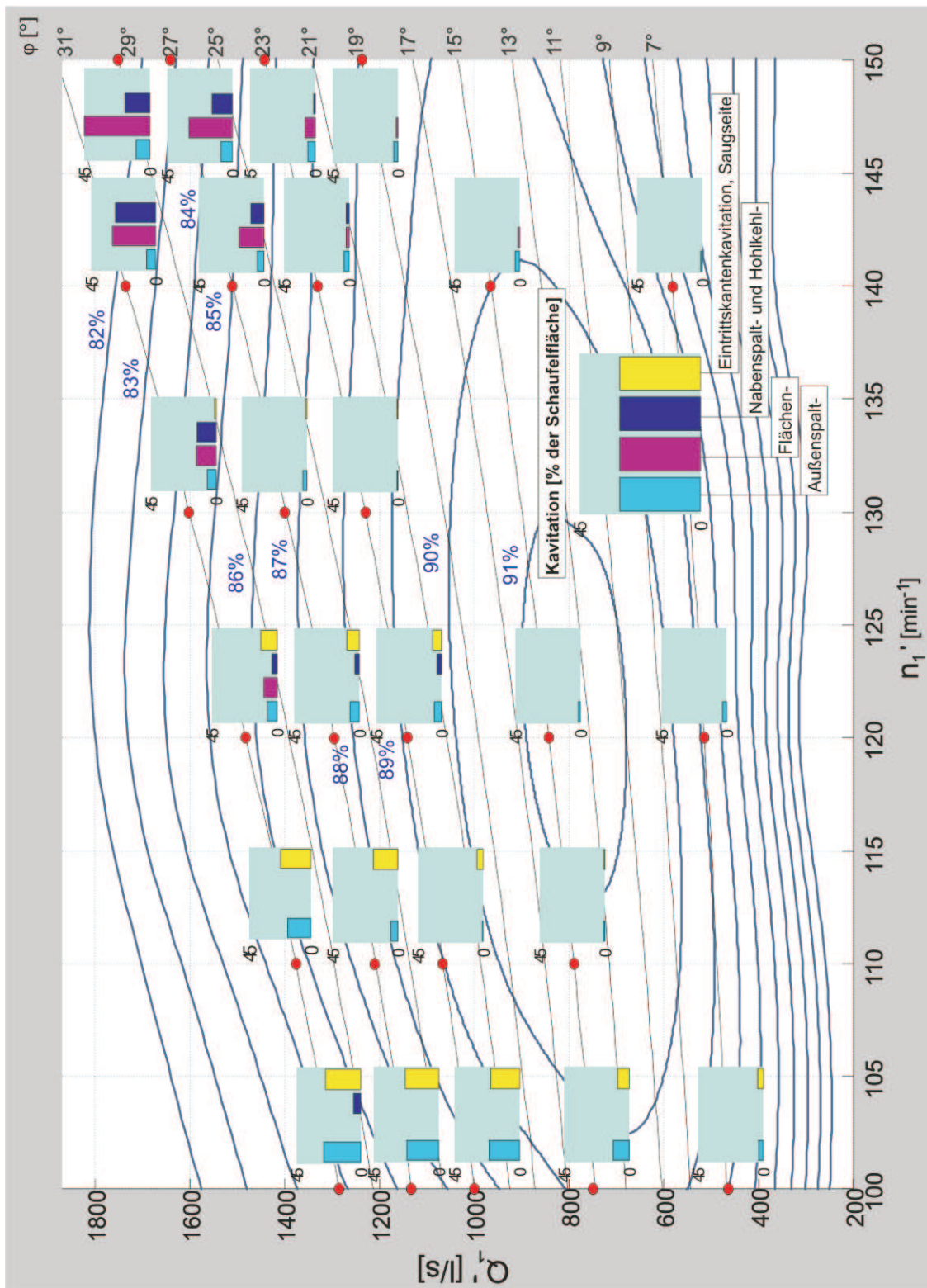


Abbildung 2.7: Stärke einzelner Kavitationsformen in der Modellturbine K63j bei  $\sigma = 0.55$

ten durchgeführt, in denen verschiedenen Kavitationsstärken von Null auf über 30% eingestellt werden konnten:  $n_1' = 100, 130, 150 \text{min}^{-1}$  bei  $\varphi = 31^\circ$ . Das Vorliegen der

einzelnen Kavitationsformen in Abhängigkeit von  $\sigma$  ist für diese Punkte in Tab. 2.2 dargestellt.

*Tabelle 2.2: Präsenz einzelner Kavitationsformen in Abhängigkeit von  $\sigma$  in den Betriebspunkten  $n_1' = 100, 130, 150 \text{ min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ . Modellturbine K63j*

$n_1' [\text{min}^{-1}]$	$\sigma [-]$	Art der Kavitation
100	$< 2.10$	Eintrittskantenkavitation
130	$> 1.2$	keine sichtbare Kavitation
	$< 1.20$	Außenspaltkavitation
	$< 0.85$	+ Hohlkehlkavitation
	$< 0.70$	+ Flächenkavitation
	$< 0.65$	+ Eintrittskantenkavitation
150	$> 1.25$	keine sichtbare Kavitation
	$< 1.25$	Außenspaltkavitation
	$< 0.90$	+ Flächenkavitation
	$< 0.85$	+ Hohlkehlkavitation

Die oben dargestellten Erkenntnisse der Kavitationsverteilung in der Modellturbine dienen ausschließlich als Grundlage für Kavitationsmessungen im Modell. Die Ergebnisse können nicht ohne weiteres auf den übertragen werden. Im Modellversuch war für alle Betriebspunkte der gleiche  $\sigma$ -Wert eingestellt. Anlagenmessungen in Ryburg-Schwörstadt, Roßhaupten und Neuötting haben jedoch gezeigt, dass der  $\sigma$ -Wert im Prototyp jedoch stark von der Fallhöhe abhängt. Kleine  $n_1'$ -Werte und entsprechend große Fallhöhen treten dort bei niedrigem Unterwasserpegel auf, was eine starke Absenkung des  $\sigma$ -Wertes bedingt, siehe Gleichung 1.2 auf S. 5.

## 2.2 AEM-Messaufbau und Datenauswertung

Der Acoustic Emission Monitor besteht aus einem Körperschallaufnehmer und einer Signalverarbeitungseinheit mit folgenden Funktionen, siehe Abb. 2.8:

1. Vorverstärkung des Signals,
2. Hochpassfilterung,
3. Ermittlung der Kavitationskennwerte  $RMS$  und  $E/s$ .<sup>7</sup>

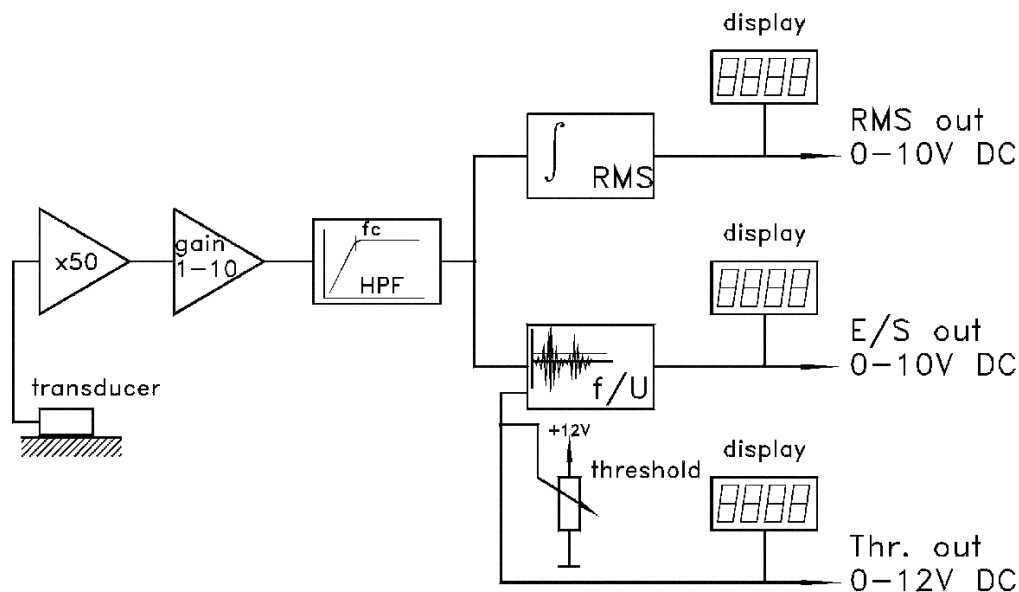


Abbildung 2.8: Acoustic Emission Monitor

Neben den AEM-Messwerten  $RMS$  und  $E/s$  werden in den Kraftwerken die für die Bestimmung des Betriebspunktes und der Kavitationszahl  $\sigma$  erforderlichen Turbinendaten wie Luftdruck, Fallhöhe, Unterwasserpegel, Laufradöffnung etc. aufgenommen.

Die erfassten Messwerte wurden samt Datum in eine Datei gespeichert. Die Datenauswertung erfolgte auf einem Zentralrechner, wo die Daten von allen Kraftwerksrechnern gesammelt wurden.

Die Datenauswertung und -darstellung erfolgte in drei Schritten, siehe Abb. 2.9:

<sup>7</sup> $RMS$ : Root Mean Square oder Effektivwert;

$E/s$ : Events per second – Anzahl der Signalspitzen, die einen bestimmten Schwellenwert in einer Sekunde überschreiten.

Siehe auch SCHNEIDER und KNAPP [88] und BACHERT ET. AL. [7].



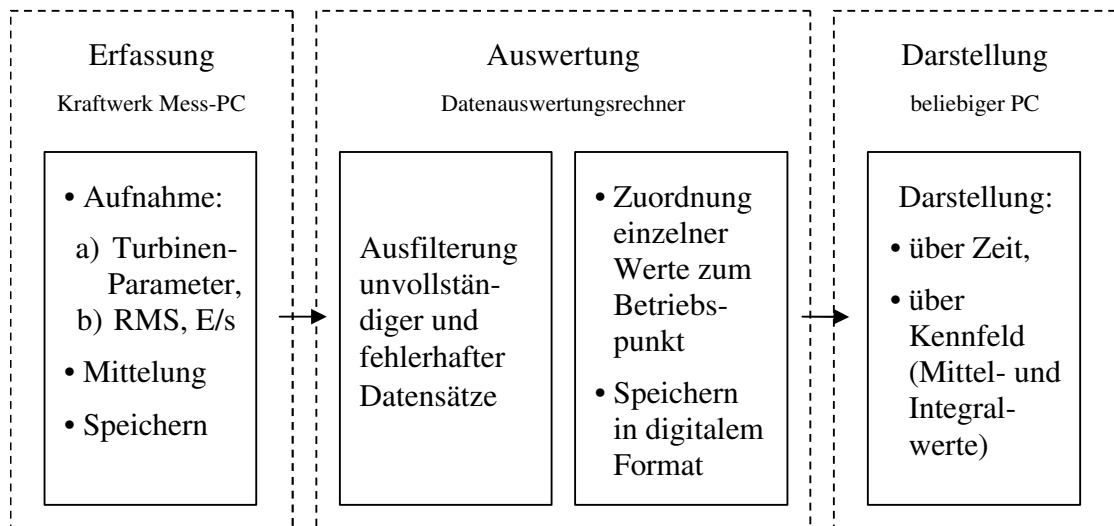


Abbildung 2.9: Datenfluss im AEM

- Datenplausibilisierung,  
Ausfilterung unvollständiger und eindeutig fehlerhafter Datensätze.
- Datenvorbereitung,  
Die RMS-, E/s- und  $\sigma$ -Werte sowie die Turbinenparameter wurden dem aktuellen Datum und dem Betriebspunkt zugeordnet und zeitlich und über dem Kennfeld gemittelt.
- Datendarstellung,  
Die momentanen und zeitlich gemittelten Werte wurden über der Zeit und über dem Kennfeld dargestellt, wobei eine in *MATLAB* entwickelte grafische Oberfläche bei der Datendarstellung zu Grunde lag.

## 2.3 Aussagekraft des AEM

In diesem Kapitel werden die Modellmessungen bzgl. der Aussagekraft der Intensität des an der Turbinenoberfläche erfassten Körperschalls über die Kavitationsintensität dargestellt. Es wird untersucht, welche Frequenzbereiche des Körperschalls zwischen  $100\text{kHz}$  und  $1\text{MHz}$  sich am besten zur Kavitationsdiagnose eignen.

Danach werden Ergebnisse des langfristigen AEM-Einsatzes in den Anlagen geschildert.

Anschließend werden die Modellmessungen dargestellt, in denen geklärt wird, ob die in den Anlagen festgestellten schwachen RMS-Modulationen über dem Kennfeld das tatsächliche Kavitationsgeschehen in den Turbinen abbilden.

### 2.3.1 Aussagekraft des Körperschalls über die Kavitationsintensität aus den Modellmessungen

Die Impllosionen von Kavitationsblasen senden einen breitbandigen Schall aus, der überwiegend im hochfrequenten Bereich liegt. Gleichzeitig werden die Turbinenbauteile von den kavitationsbegleitenden Druckschwankungen zu Eigenschwingungen angeregt, die an der Turbinenoberfläche als breitbandiges Geräusch registriert werden. Zur Kavitationsdiagnose kann im Allgemeinen die Intensität des Kavitationsignals sowohl im nieder-, als auch im hochfrequenten Bereich verwendet werden.

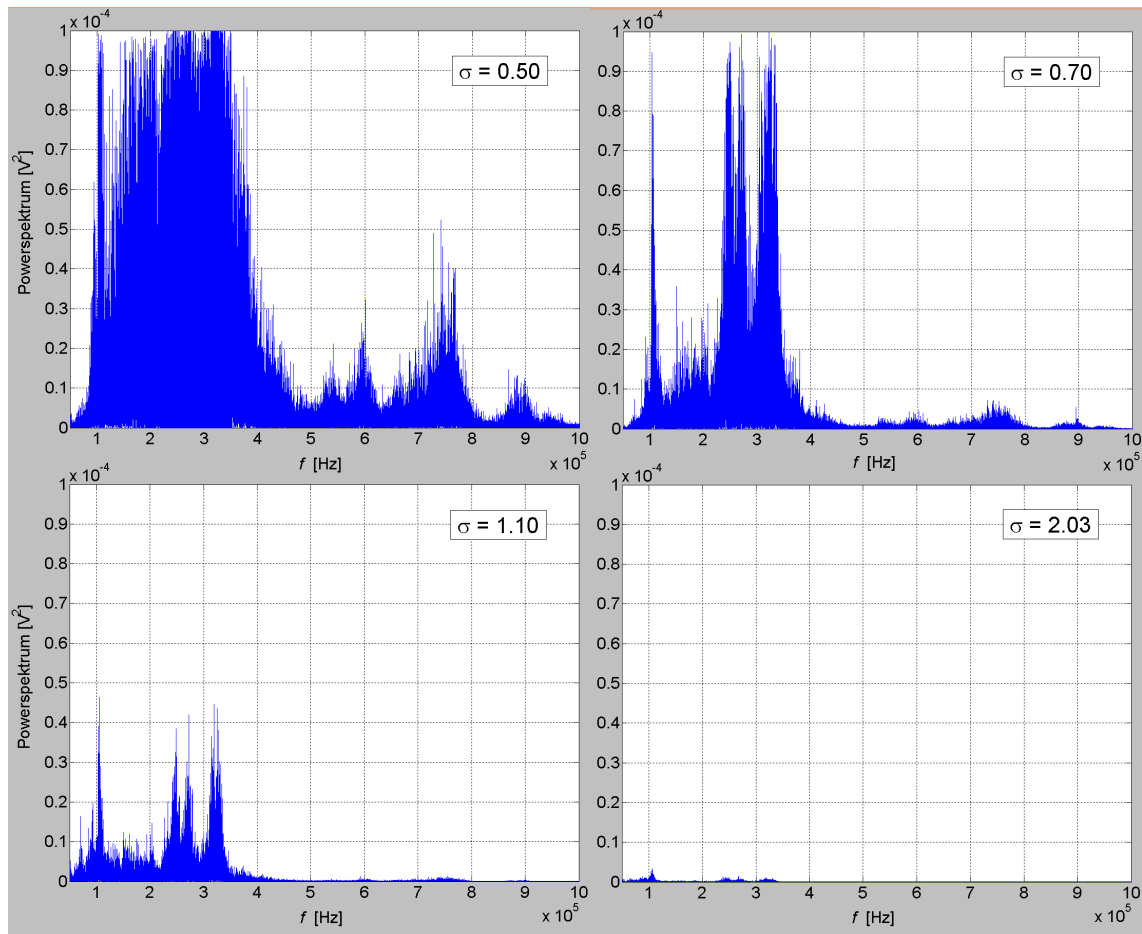


Abbildung 2.10: Signalspektren im Betriebspunkt  $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31$  bei den  $\sigma$ -Werten 0.5, 0.7, 1.1 und 2.3

Da im niederfrequenten Bereich nicht nur die durch Kavitation verursachten Schwingungen vertreten sind sondern auch Geräusche aus der Turbulenz der Strömung, aus instationären Strömungseffekten wie Leit-/Laufschaufel-Interaktion sowie aus mechanischen Quellen wie Lager und Dichtungen wurde zur Kavitationsdiagnose nur der hochfrequente Signalanteil  $> 100 \text{kHz}$  herangezogen.

In den Modellmessungen musste untersucht werden, welcher Teilbereich für die Kavitationsdiagnose am besten geeignet ist:  $100kHz - 1MHz$ ,  $150kHz - 1MHz$  oder  $350kHz - 1MHz$ . Dazu werden spektrale Charakteristika eines Kavitationssignals im Frequenzbereich  $100kHz - 1MHz$  für verschiedene Kavitationsstärken analysiert, siehe Abb. 2.10, S. 28:

- Bei  $\sigma = 0.5$  ist eine stark entwickelte Kavitation vertreten, die sich über 50% der Schaufelfläche erstreckt,
- bei  $\sigma = 0.7$  beträgt die Kavitationsfläche ca. 20%,
- bei  $\sigma = 1.1$  nur ca. 1% und
- bei  $\sigma = 2.03$  konnte die Kavitation visuell nicht erkannt werden.<sup>8</sup>

Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass zur Kavitationsdiagnose prinzipiell sowohl der ganze untersuchte Frequenzbereich  $100kHz - 1MHz$  als auch seine Teilbereiche  $150kHz - 1MHz$  oder  $350kHz - 1MHz$  verwendet werden können.

Um festzustellen, welcher der betrachteten Frequenzbereiche am besten geeignet ist, wurde die Korrelation der Signalintensität und der Kavitationsfläche  $RMS(Kavitationsfläche)$  anhand folgender Kriterien verglichen:

- maximale Signalsignifikanz bezüglich Kavitation; diese wird durch die Relation  $RMS_{max}/RMS_{min}$  definiert,
- maximale (und möglichst konstante) Steilheit der Funktion  $RMS = RMS(Kavitationsintensität)$  für alle relevanten  $\sigma$ -Werte.

Die Messungen wurden für drei verschiedene Frequenzbereiche und Kavitationsformen durchgeführt:

- Frequenzbereiche:  $100kHz - 1MHz$ ,  $150kHz - 1MHz$  und  $350kHz - 1MHz$ ,
- Kavitationsformen:
  - Eintrittskantenkavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 100min^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ ,
  - Volllastkavitation, Form 1: eine Mischform aus Eintrittskanten-, Außenspalt-, Hohlkehl- und Flächenkavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 130min^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ ,
  - Volllastkavitation, Form 2: eine Mischform aus Außenspalt-, Hohlkehl- und Flächenkavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 150min^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ .

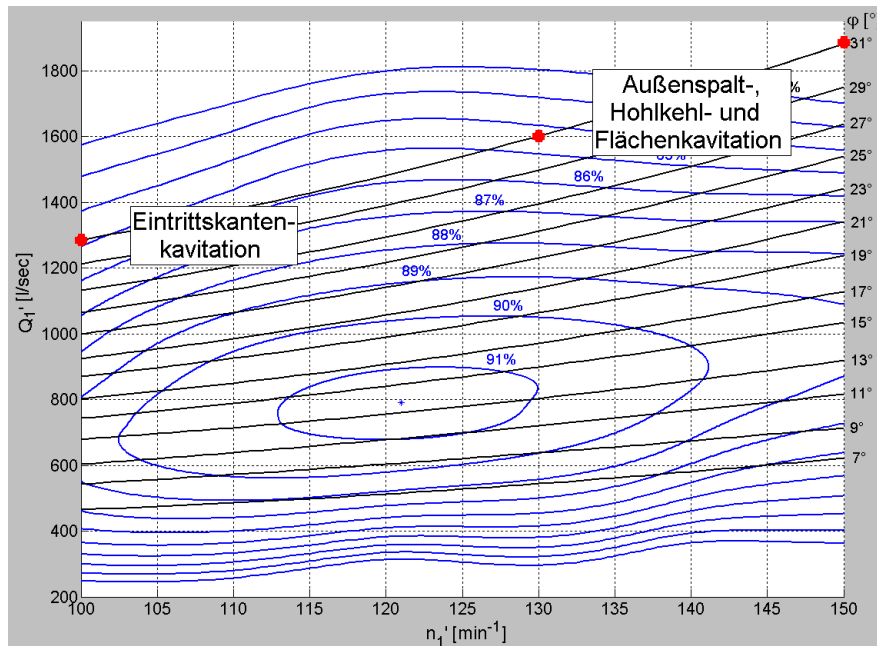


Abbildung 2.11: Im Modell K63j untersuchte Betriebspunkte

Der Körperschall wurde am Turbinendeckel erfasst, da dies an Prototypen meistens die einzig zugängliche Sensorposition ist.<sup>9</sup>

Die Abb. 2.12 – 2.14 auf S. 31 – 32 zeigen den Verlauf  $RMS_{>100kHz}$ ,  $RMS_{>150kHz}$  und  $RMS_{>350kHz}$  über  $\sigma$  in den Betriebspunkten  $n_1' = 100, 130$  und  $150 \text{ min}^{-1}$  bei  $\varphi = 31^\circ$ . In jeder Abbildung ist gleichzeitig die *Kavitationsfläche* =  $f(\sigma)$  angegeben, Maßangaben in der rechten Skala.

Aus Abb. 2.12 ist ersichtlich, dass zur Diagnose der *Eintrittskantenkavitation* keiner der drei untersuchten Frequenzbereiche  $RMS_{>100kHz}$ ,  $RMS_{>150kHz}$  und  $RMS_{>350kHz}$  uneingeschränkt verwendet werden kann. Die Verläufe von  $RMS_{>350kHz}$  und  $RMS_{>150kHz}$  sind im mittleren  $\sigma$ -Bereich nahezu konstant, die Kurve  $RMS_{>100kHz}$  fällt sogar leicht ab.

Die Signalsignifikanz ist für diese Kavitationsform auch relativ klein. Bereits eine beginnende Kavitation bei  $\sigma = 2.1$  ruft ein vergleichsweise starkes Signal hervor, das mit der Kavitationszunahme nur mäßig steigt.

Die Volllastkavitation im zweiten und dritten untersuchten Betriebspunkt lässt sich durch alle drei Werte  $RMS_{>100kHz}$ ,  $RMS_{>150kHz}$  und  $RMS_{>350kHz}$  gut diagnostizieren, siehe Abb. 2.13 und 2.14.<sup>10</sup>

Aus den Abb. 2.13 und 2.14 ist außerdem erkennbar, dass eine stark entwickelte Kavitation die Schallübertragung stark beeinträchtigt, was auf eine starke Signaldämpf-

<sup>8</sup>Siehe auch den Zusammenhang *Kavitationsfläche* =  $f(\sigma)$  in Abb. 3.7 auf S. 69.

<sup>9</sup>Siehe Turbinenmeridianschnitt in Abb. 1.9, S. 11.

<sup>10</sup>Dieses Ergebnis bleibt auch davon unberührt, dass sich der prozentuale Anteil einzelner Kavitationsformen über  $\sigma$  stark verändert, siehe Tab. 2.2 auf S. 25.

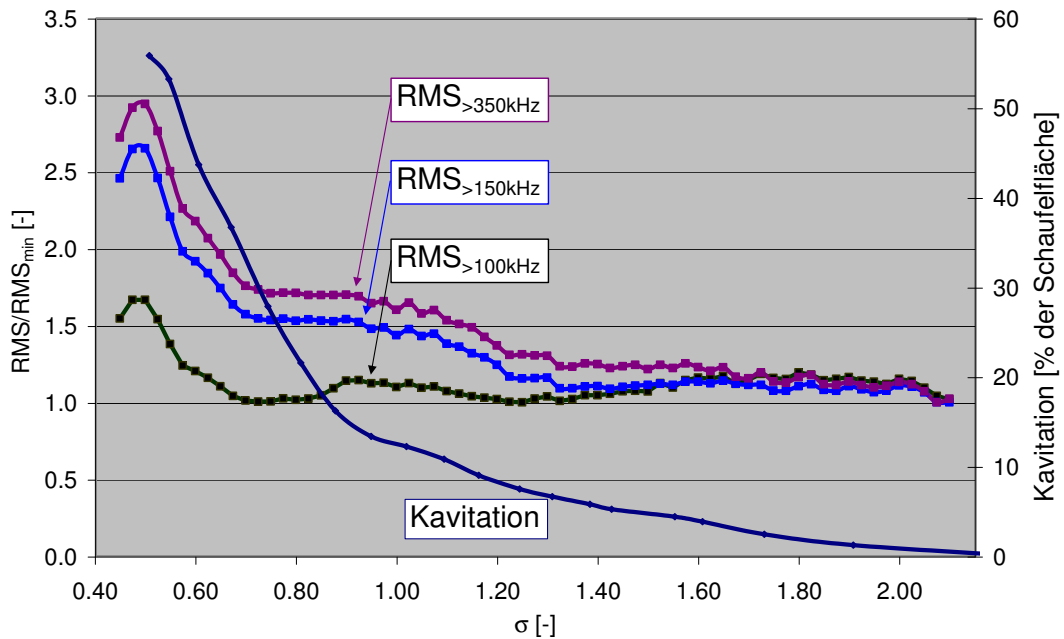


Abbildung 2.12: Verlauf von  $RMS/RMS_{min}$  bei den Filtereinstellungen  $100kHz - 1MHz$ ,  $150kHz - 1MHz$  und  $350kHz - 1MHz$  sowie die Fläche der Kavitationsereignisse über  $\sigma$ . Betriebspunkt  $n_1' = 100min^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ : Eintrittskantenkavitation

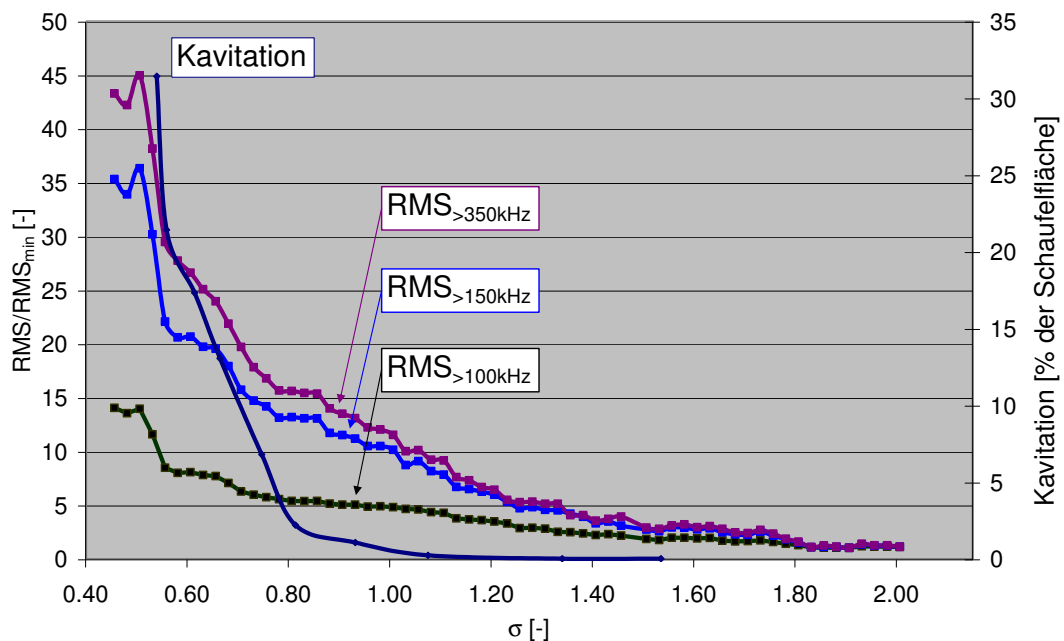


Abbildung 2.13: Verlauf von  $RMS/RMS_{min}$  bei den Filtereinstellungen  $100kHz - 1MHz$ ,  $150kHz - 1MHz$  und  $350kHz - 1MHz$  sowie die Fläche der Kavitationsereignisse über  $\sigma$ . Betriebspunkt  $n_1' = 130min^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ : Kavitationsmischform 1

fung bei Vergrößerung des Blasenanteils im Fluid zurückzuführen ist. Solche Tendenzen konnten in allen drei untersuchten Frequenzbereichen beobachtet werden.

Von den drei untersuchten Frequenzbereichen wiesen  $RMS_{>150kHz}$  und  $RMS_{>350kHz}$

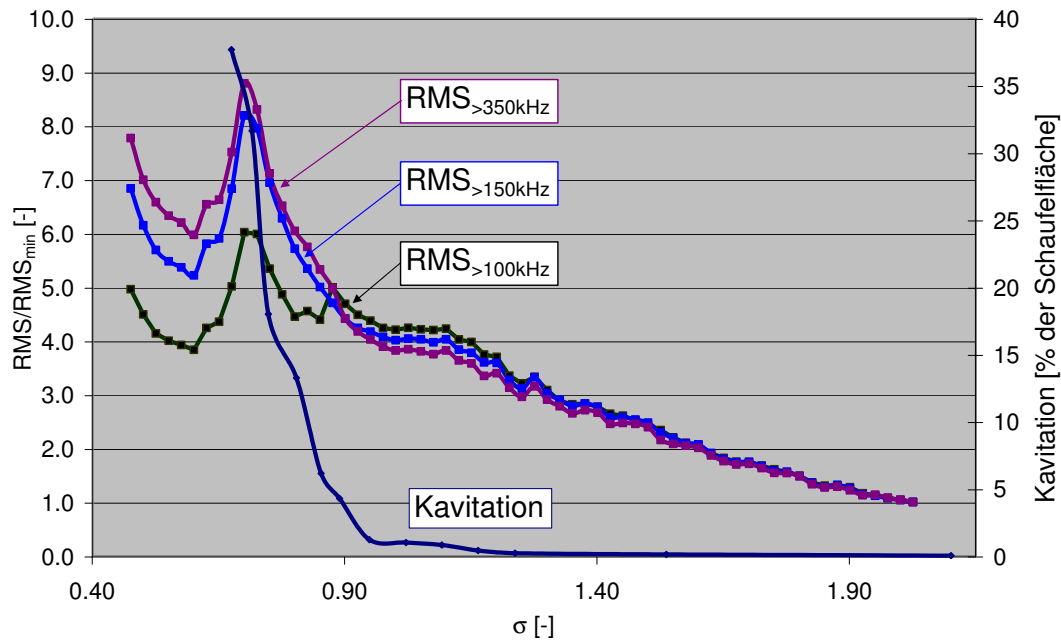


Abbildung 2.14: Verlauf von  $RMS/RMS_{min}$  bei den Filtereinstellungen  $100kHz - 1MHz$ ,  $150kHz - 1MHz$  und  $350kHz - 1MHz$  sowie die Fläche der Kavitationsereignisse über  $\sigma$ . Betriebspunkt  $n_1' = 150min^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ : Kavitationsmischform 2

die größten Signalsignifikanzwerte aus. Das gilt für alle drei untersuchten Kavitationsformen. Gleichzeitig spiegelten diese Werte die Eintrittskantenkavitation am besten wider.

Daher kann der Schluss gezogen werden, dass aus den drei untersuchten Frequenzbereichen  $100kHz - 1MHz$ ,  $150kHz - 1MHz$ ,  $350kHz - 1MHz$  die Bereiche  $150kHz - 1MHz$  und  $350kHz - 1MHz$  zur Kavitationsdiagnose besser geeignet sind als der Bereich  $100kHz - 1MHz$ . Deshalb sollte der Bereich  $350kHz - 1MHz$  bevorzugt angewendet werden.

### 2.3.2 Anlagenmessungen zur AEM-Aussagekraft

Alle Turbinen in den untersuchten Anlagen waren Kaplan-Turbinen. Die Turbinen in Ryburg-Schwörstadt und Neuötting sind mit Halbspiralen, Roßhaupten mit einer Vollspirale ausgeführt.

In den Kraftwerken Ryburg-Schwörstadt, Neuötting und Roßhaupten konnten folgende Merkmale der Verteilung der RMS- und E/s-Mittelwerte über dem Kennfeld beobachtet werden, siehe Abb. 2.15 – 2.17, S. 33 – 34:<sup>11</sup>

- Der RMS-Wert steigt über  $Q_1'$ . Nach Überschreitung eines bestimmtem  $Q_1'$ -

<sup>11</sup>Das Verhalten des RMS- und E/s-Wertes war bei den durchgeführten Prototypmessungen weitgehend ähnlich. Daher wird im Folgenden nur der RMS-Wert präsentiert.

Tabelle 2.3: Prototypen, an denen AEM in den Jahren 2000 – 2004 untersucht wurde

Kraftwerk	Fallhöhe	Durchfluss	Einheitsdrehzahl	Einheitsdurchfluss	Schnellläufigkeit	Lauf- rad		Drehzahl
	$H$ [m]	$Q_{max}$ [m <sup>3</sup> /s]	$n'_{opt}$ [min <sup>-1</sup> ]	$Q'_{opt}$ [l/s]	$n_{qopt}$ [min <sup>-1</sup> ]	$D$ [m]	$Z$ [–]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]
Ryburg-Schw.	8–12	365	138	1400	159	7.0	4	75
Neuötting	4.5–7.5	170	141	1250	158	5.5	4	68
Roßhaupten	20–37	87	107	760	94	3.5	7	200

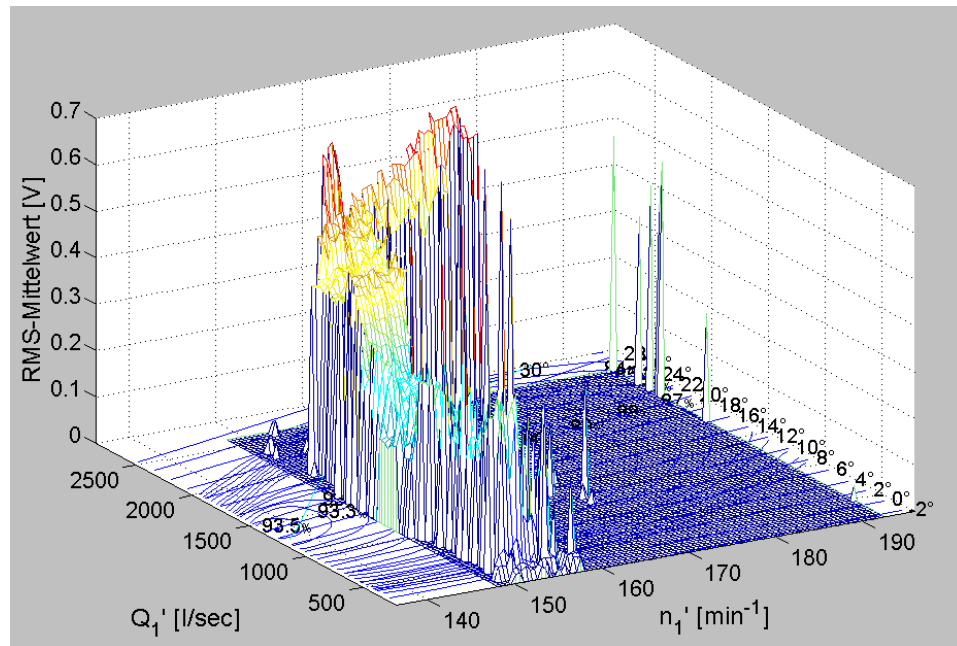


Abbildung 2.15: Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Ryburg-Schwörstadt

Wertes nimmt die Signalintensität leicht ab.

- Der RMS-Wert erreicht sein Maximum nahe  $n'_{opt}$ ; bei  $n_1' > n'_{opt}$  nimmt er zuerst leicht ab und steigt bei großen  $n_1'$ -Werten wieder an: U-Form entlang der  $n_1'$ -Achse.
- Eine U-Form zeigt sich in Roßhaupten auch entlang der  $Q_1'$ -Achse. In der Abb. 2.17 ist daher eine Pokalform deutlich erkennbar. In den anderen Kraftwerken konnte eine solche RMS-Verteilung nicht festgestellt werden, was jedoch durch den Mangel an eingestellten Betriebspunkten bedingt sein kann.<sup>12</sup>

Aus den Abb. 2.15 – 2.17 sind relativ schwache Gradienten des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld ersichtlich. In keinem der drei Kraftwerke wurde ein Betriebs-

<sup>12</sup>In den Anlagen Roßhaupten und Neuötting wurden im Zeitraum 2000 – 2003 keine Betriebspunkte bei großen  $Q_1'$  und kleinen  $n_1'$  eingestellt.

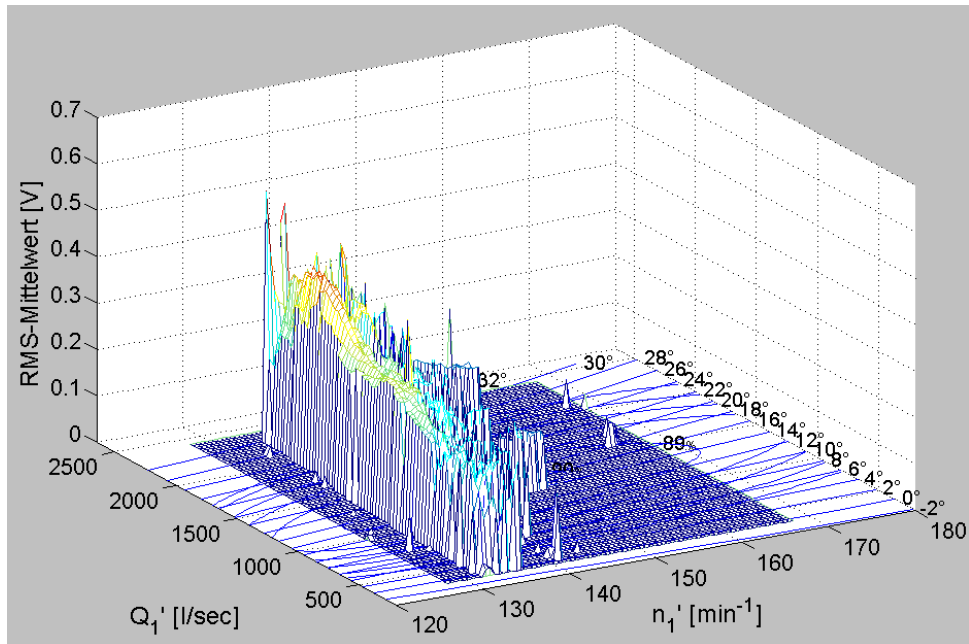


Abbildung 2.16: Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Neuötting

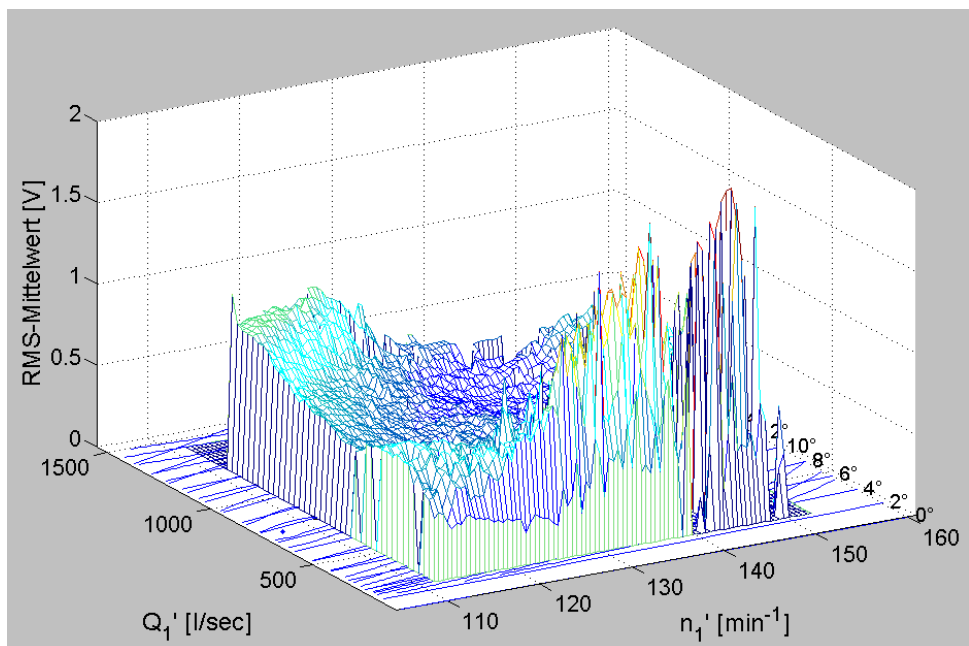


Abbildung 2.17: Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Roßhaupten

punkt gefunden, in welchem das Kavitationssignal so klein war, wie dies bei kavitationsfreiem Betrieb zu erwarten wäre.



### 2.3.3 Modellmessungen zur Klärung der Ursache der schwachen RMS-Gradienten in den untersuchten Anlagen

Die beobachtete schwache RMS-Modulation über dem Kennfeld legt die Vermutung nahe, dass die Turbine in keinem Betriebspunkt völlig kavitationsfrei läuft. Da das Kavitationsgeschehen in der Anlage während der Messungen nicht beobachtet werden konnte, waren zusätzliche Modellmessungen notwendig.

Für die Betriebspunkte oberhalb des Optimums waren bereits Kavitations-Modellmessungen vom Turbinenhersteller vorhanden. Im Kennfeldbereich unterhalb des Optimums wurden zusätzliche Messungen an einer Modellturbine am FLM durchgeführt.

#### Analyse des Kavitationsverhaltens oberhalb Optimums anhand von Modellmessungen von Fa. Voith

Für die Anlagen Ryburg-Schwörstadt und Roßhaupten bestand die Möglichkeit, die RMS-Werte mit dem in Modellmessungen des Turbinenherstellers beobachteten Kavitationsverhalten zu vergleichen.

Aus den Modellmessungen wurden für die in den Kraftwerken vorgekommenen Kavitationsformen Außenspalt-, Flächen-, Nabenspalt- und Eintrittskantenkavitation die von der Kavitation bedeckten Flächen gemessen. In jedem Betriebspunkt wurden nur die  $\sigma$ -Werte in Betracht gezogen, die in den Jahren 2000 – 2003 in den Anlagen tatsächlich vorkamen.<sup>13</sup>

Die Verteilung der einzelnen Kavitationsformen über dem Kennfeld ist in Abb. 2.18 und 2.19 S. 36 und 37 dargestellt. Die karierte Fläche im Hintergrund zeigt die in den Kraftwerken Ryburg-Schwörstadt und Roßhaupten in den Jahren 2000 – 2003 eingestellten Betriebspunkte.

Aus den Abb. 2.18 und 2.19 ist ersichtlich, dass die beiden Anlagen im oberen Kennfeldbereich  $\varphi > \varphi_{opt}$  in nahezu keinem der in den Jahren 2000 – 2003 eingestellten Betriebspunkte völlig kavitationsfrei waren, wodurch auch die relativ schwache Modulation des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld weitgehend erklärt ist.

In Abb. 2.20 – 2.23, S. 38 – 39 ist für die Anlagen Roßhaupten und Ryburg-Schwörstadt jeweils die im Modellversuch ermittelte von Kavitation bedeckte Schauelfläche der Verteilung des RMS-Wertes gegenübergestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Abhängigkeit des RMS-Mittelwertes von der Kavitationsintensität stark nichtlinear ist. Das Kavitationsgeschehen der Anlagen wird dennoch durch den RMS-Mittelwert gut wiedergespiegelt.

---

<sup>13</sup>Für die Darstellung wurde der  $\sigma$ -Mittelwert gezogen. Diese Vereinfachung ist daher zulässig, dass die Schwankung der  $\sigma$ -Werte in einem Betriebspunkt in den untersuchten Jahren nur geringfügig ausfiel.

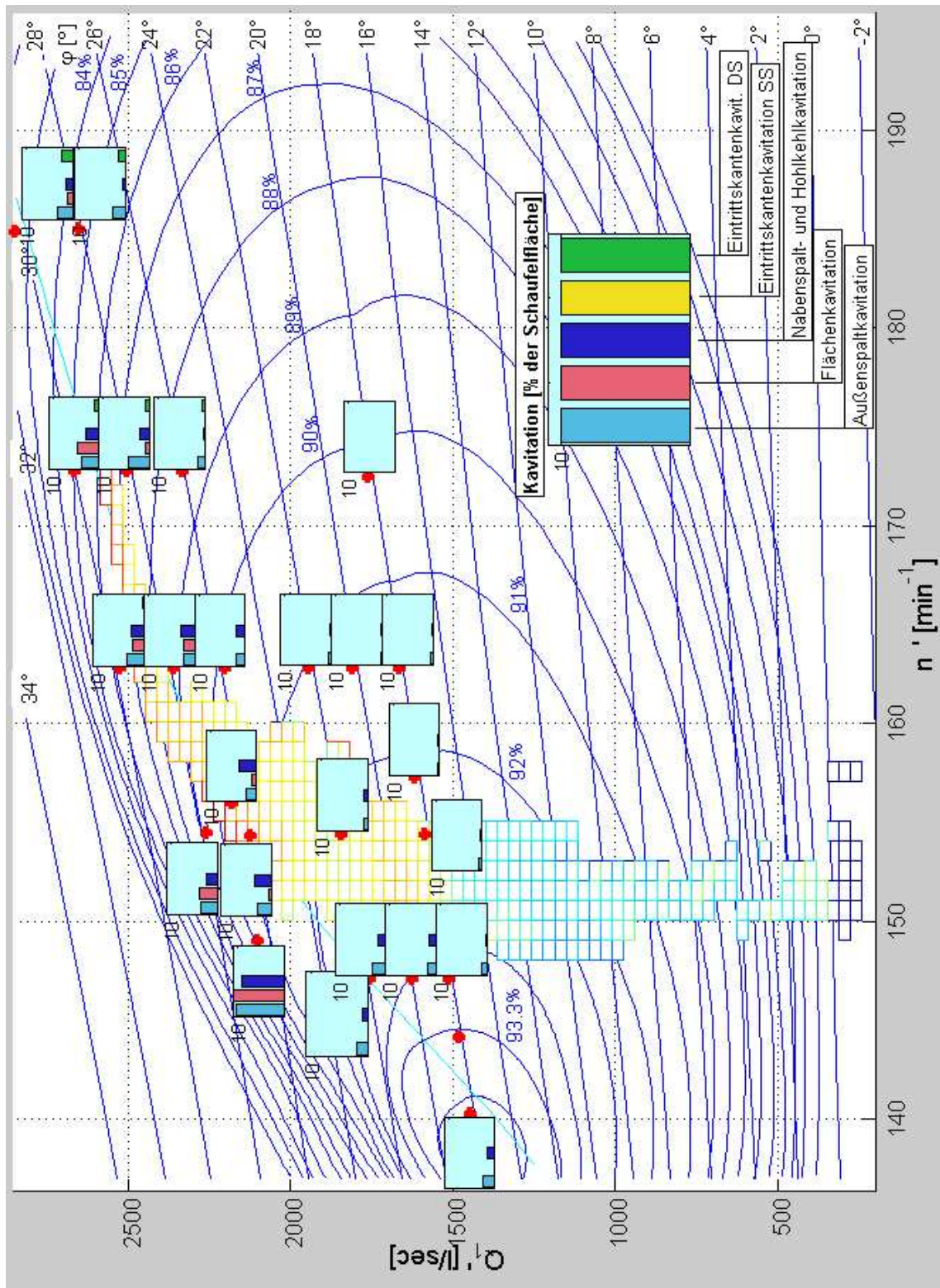


Abbildung 2.18: Art und Stärke der Kavitationserscheinungen in Ryburg-Schwörstadt

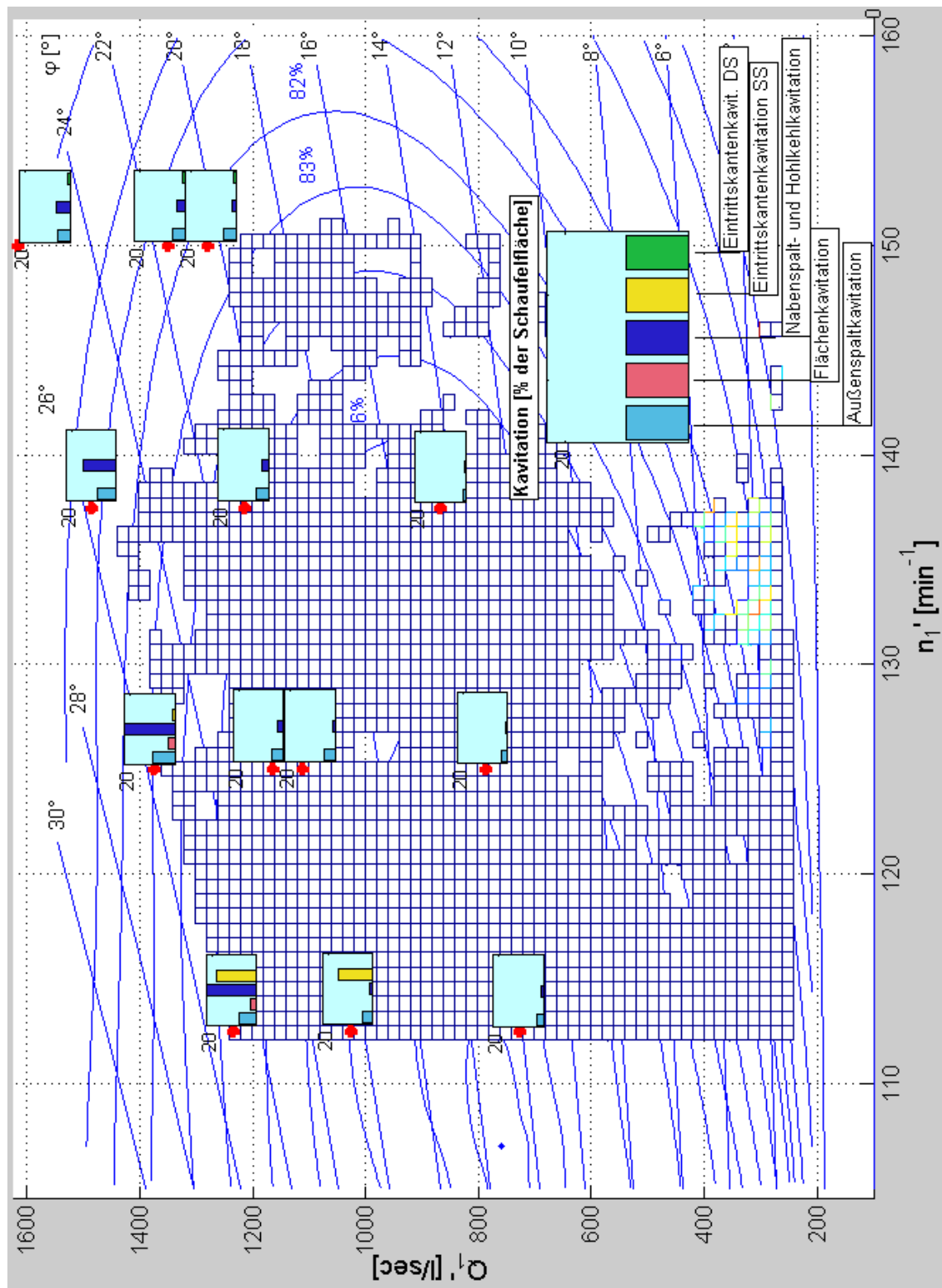


Abbildung 2.19: Art und Stärke der Kavitationserscheinungen in Roßhaupten

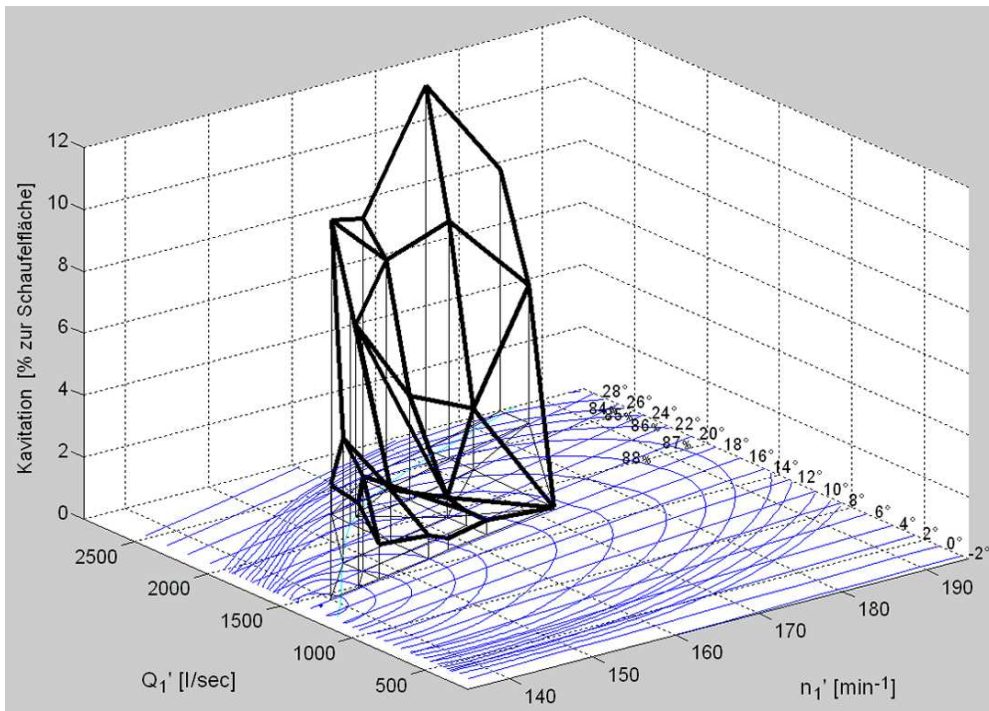


Abbildung 2.20: Verteilung der Kavitationsfläche über dem Kennfeld in Ryburg-Schwörstadt, Modellversuch

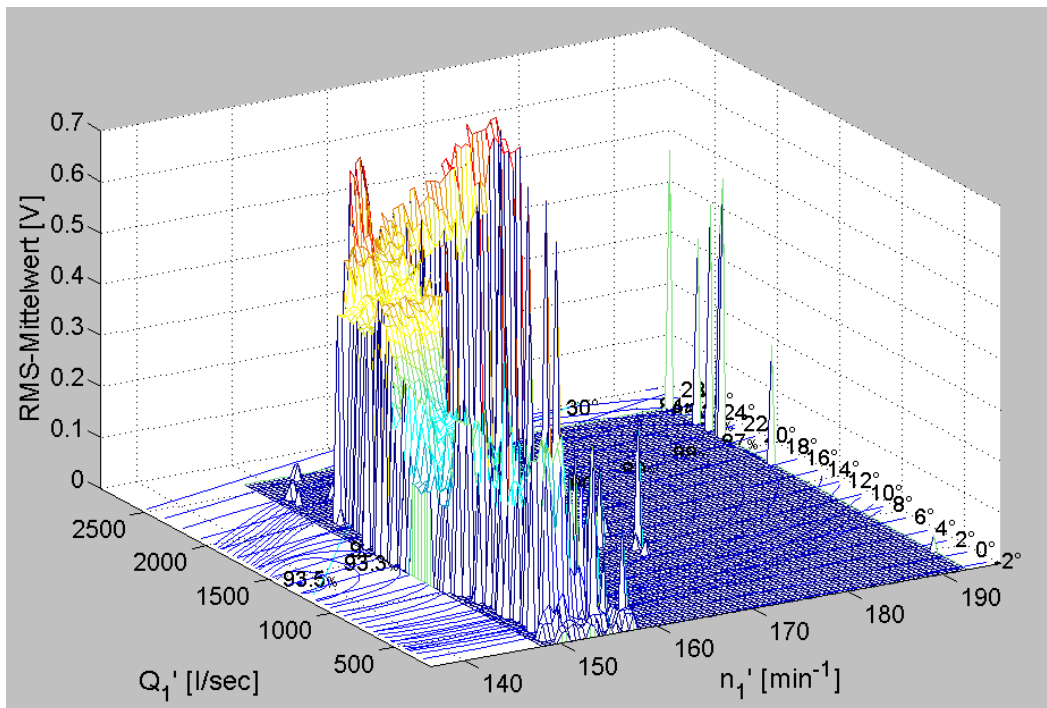


Abbildung 2.21: Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Ryburg-Schwörstadt, Prototypmessung

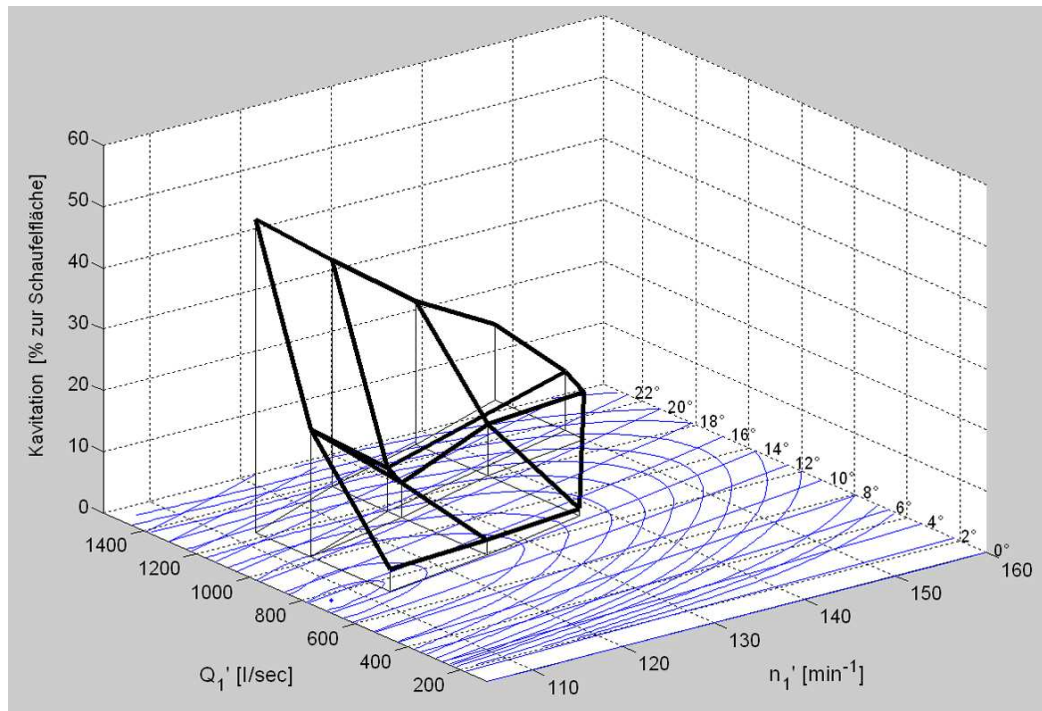


Abbildung 2.22: Verteilung der Kavitationsfläche über dem Kennfeld in Roßhaupten, Modellversuch

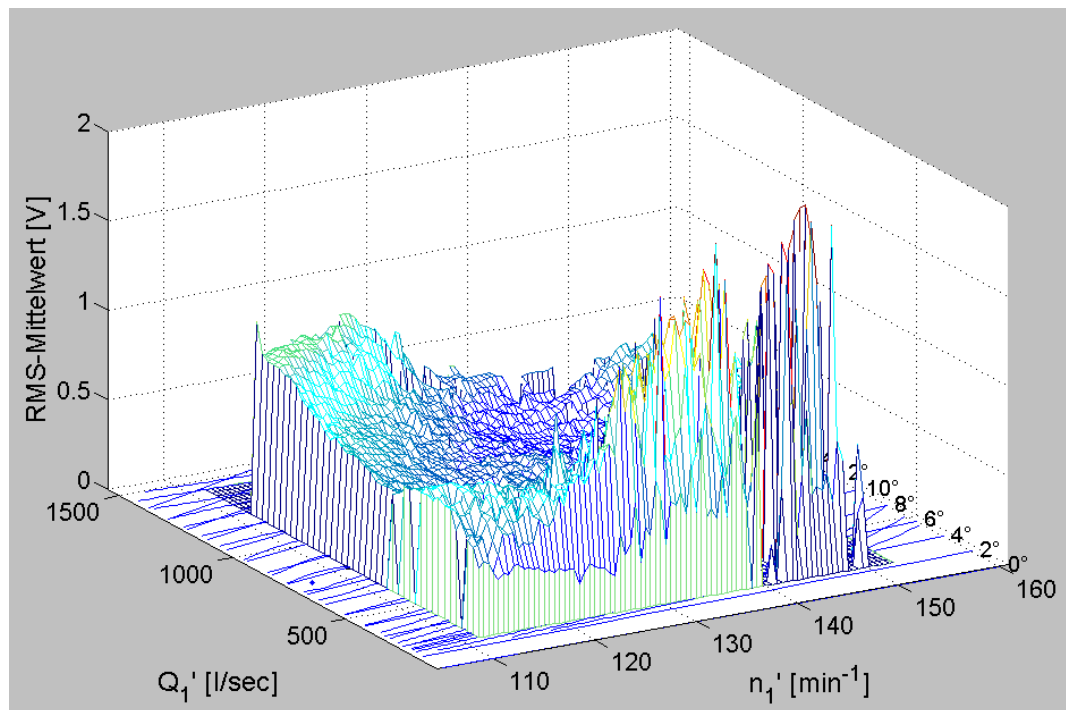


Abbildung 2.23: Verteilung des RMS-Mittelwertes über dem Kennfeld in Roßhaupten, Modellmessung

## Analyse des Kavitationsverhaltens der Prototypen in Betriebspunkten unterhalb des Optimums

In Kapitel 2.3.2 wurde die Vermutung bestätigt, dass die in den Anlagen beobachtete schwache Modulation des RMS-Wertes über dem Kennfeld durch eine verhältnismäßig starke Präsenz von Kavitation in allen untersuchten Punkten verursacht worden ist. Daten bzgl. des Kavitationsverhaltens waren jedoch nur für die Betriebspunkte oberhalb des Optimums  $\varphi > \varphi_{opt}$  vorhanden.

Zur Klärung des Kavitationsverhaltens der Turbinen im unteren Kennfeldbereich wurden am FLM Modellmessungen an der Turbine K63j durchgeführt. Die  $\sigma$ -Werte wurden den Untersuchungsberichten Ryburg-Schwörstadt, Roßhaupten und Neuötting entnommen. Analog zu den Kraftwerken wurden im Modell nur Betriebspunkte mit  $n_1' > n_{1'opt}$  eingestellt.

In Abb. 2.24 auf S. 41 ist dargestellt, wie stark die einzelnen Kavitationsformen in den unterschiedlichen Betriebspunkten der Modellturbine vertreten sind. Analog zu Ryburg-Schwörstadt und Roßhaupten tritt Kavitation bei allen  $(Q_1', n_1')$ -Werten für  $\varphi > \varphi_{opt}$  auf, vergleiche Abb. 2.24 mit den Abb. 2.18 und 2.19 auf S. 36 und 37. Auch im Bereich  $\varphi < \varphi_{opt}$  konnte bei  $n_1' < n_{1'opt}$  deutliche Außenspaltkavitation beobachtet werden.<sup>14</sup> Diese spiegelt sich im RMS-Signal deutlich wider.

Die im Modell gewonnenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass das in den Prototypen unterhalb des Optimums registrierte Signal von Kavitation hervorgerufen werden konnte.

Die Körperschallintensität unterhalb des Optimums war im Modell schwächer als in den Prototypen ausgeprägt. Dies kann dadurch bedingt sein, dass der Laufradspalt bei diesen seit ca. 30 – 40 Jahren in Betrieb befindlichen Prototyp-Turbinen größer ist, als dies der Modellähnlichkeit entspricht. Dies würde erklären, dass die Außenspaltkavitation in den Prototypen im unteren Kennfeldbereich deutlich stärker vertreten ist.

In diesen Modellmessungen hat sich außerdem nochmals bestätigt, dass das Kavitationssignal durch eine entwickelte Kavitation stark gedämpft wird, siehe Betriebsbereich  $n_1' = 120 - 125 \text{ min}^{-1}$  und  $Q_1' = 1300 - 1500 \text{ m}^3/\text{s}$  in Abb. 2.25 und 2.26 auf S. 42. Trotz einer vielfachen Zunahme der Kavitationsstärke blieb die Signalintensität nahezu konstant. Die Kavitationsfläche erreichte in diesem Moment ca. 20% der Schaufelfläche.

---

<sup>14</sup>Bei  $n_1' \geq n_{1'opt}$  konnte keine Kavitation visuell erkannt werden.

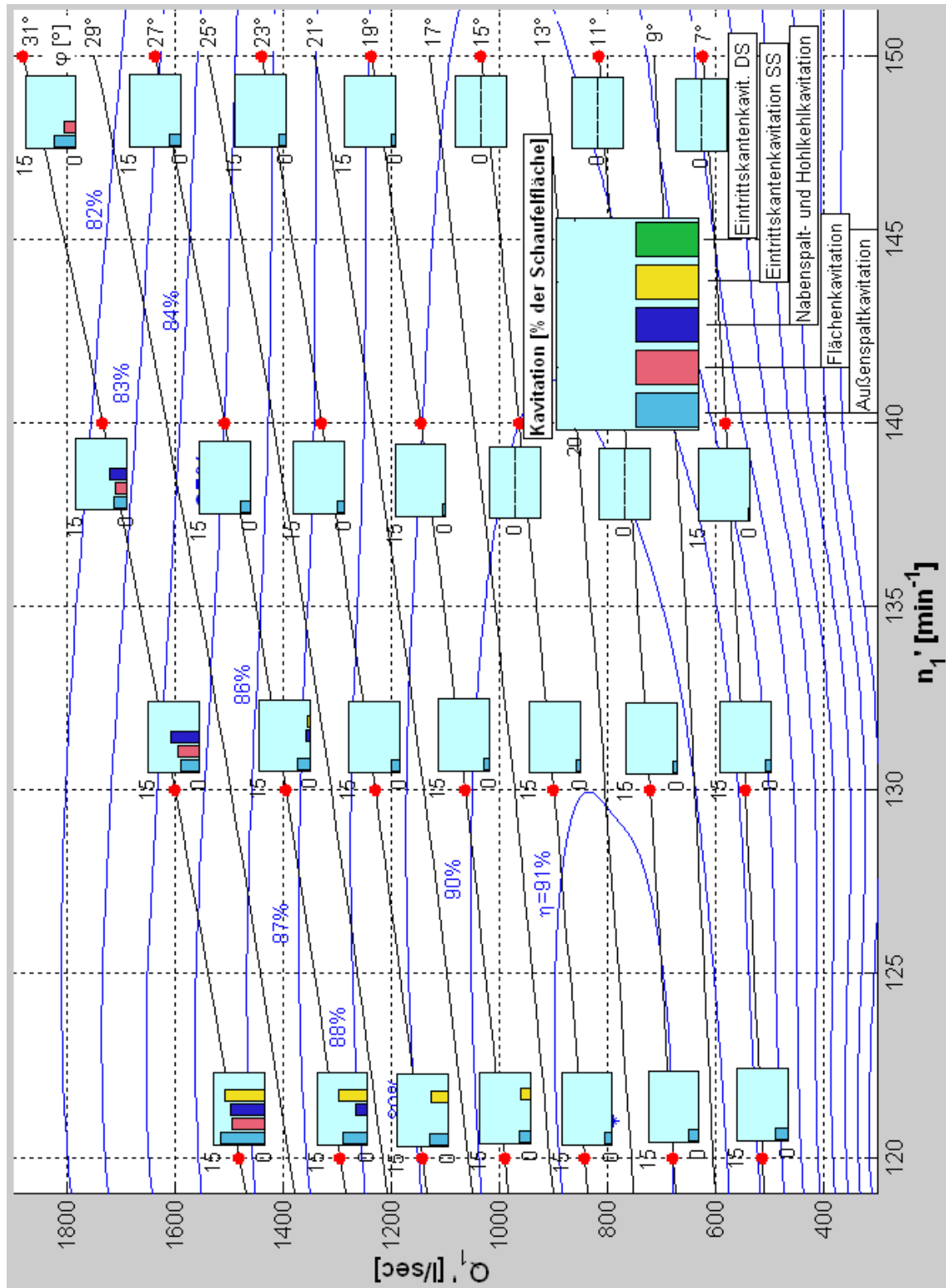


Abbildung 2.24: Art und Stärke der Kavitationserscheinungen in der Modellturbine K63j bei den prototypspezifischen  $\sigma$ -Werten

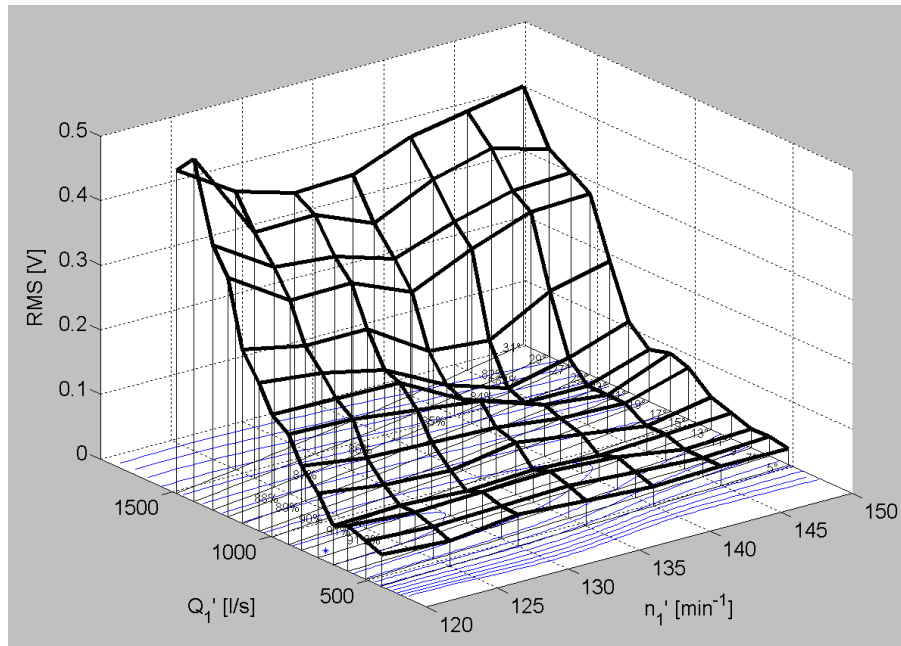


Abbildung 2.25: RMS-Verteilung im Modell bei den prototypspezifischen  $\sigma$ -Werten

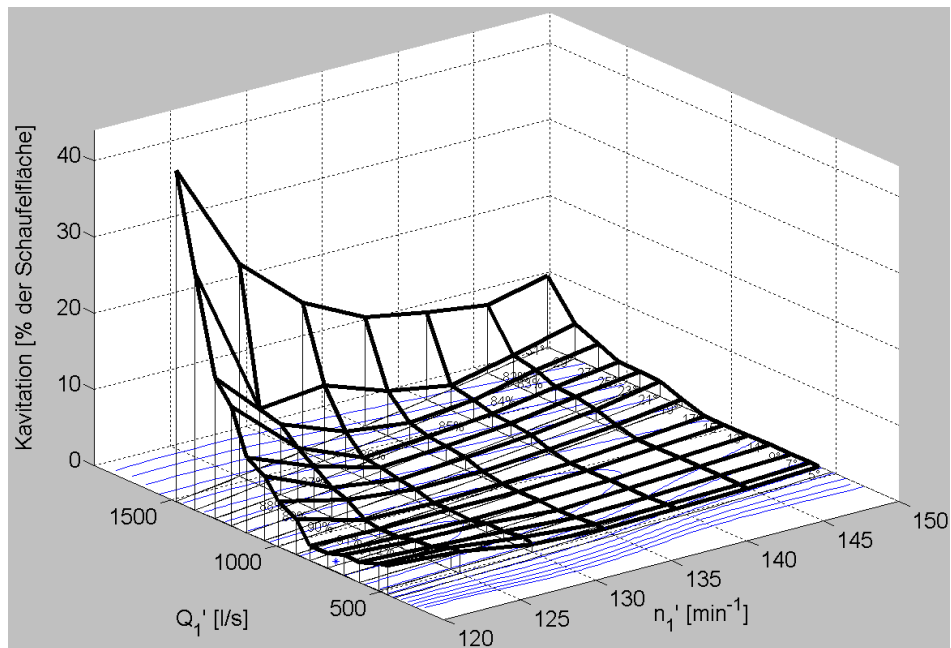


Abbildung 2.26: Verteilung der Kavitationsfläche im Modell bei den prototypspezifischen  $\sigma$ -Werten



## 2.4 Eignung verschiedener Sensorpositionen an einer Kaplanmaschine

Die Intensität und die Qualität der am Turbinengehäuse erfassten Signale sind deutlich von der gewählten Sensorposition abhängig.

Grundsätzliche Kriterien für eine optimale Sensorposition sind ein möglichst geringer Abstand von der Kavitationszone sowie günstige Schallübertragungsverhältnisse, d.h. eine nicht zu dicke und homogene Gehäusewand aus nur schwach dämpfendem Material.

Die Auswahl der Sensorposition hängt zusätzlich von Turbinentyp und -bauart und von dem untersuchten Kavitationstyp ab.

In dieser Arbeit wird die Sensorposition gesucht, die für eine Kaplan-Turbine am besten geeignet ist.<sup>15</sup>

Die Auswahl erfolgt anhand folgender Kriterien:

- maximale Signalintensität (max. RMS-Wert),
- maximale Signifikanz des Signals bezüglich Kavitation; diese wird durch die Relation  $RMS_{max}/RMS_{min}$  definiert,
- maximale und möglichst stetiger Steilheit der Funktion  $RMS = RMS(Kavitationsintensität)^{16}$  für alle relevanten  $\sigma$ -Werte.

### 2.4.1 Versuchsprogramm

Die Untersuchungen zum Vergleich der verschiedenen Sensorpositionen wurden an der im Laboratorium des Lehrstuhls für Fluidmechanik vorhandenen Kaplan-Vollspiral-Modellmaschine durchgeführt.

Es wurden insgesamt 14 Positionen betrachtet, davon fünf am Turbinendeckel, vier an der Spirale, eine am unteren Leitradring sowie je zwei am Zwischenkonus und am Saugrohr, siehe Abb. 2.27, S. 44.

---

<sup>15</sup>Bei Kaplan-Halbspiral-Maschinen kommen meistens nur Abgriffspunkte im Bereich des Leitrades und des Wasserführungsschildes in Frage. Der Sensor kann an solchen Maschinen weder an der Halbspirale noch am Saugrohr installiert werden, weil diese einbetoniert und üblicherweise nicht zugänglich sind.

An einer Kaplan-Vollspiral-Maschine können außerdem Abgriffspunkte im Bereich des Saugrohres in Betracht gezogen werden.

Abgesehen von örtlichen Beschränkungen sollte in den Laborversuchen geklärt werden, welche Sensorpositionen zur Detektierung und Quantifizierung der vorhandenen Kavitationsformen am besten geeignet sind.

<sup>16</sup>Als Maß der Kavitationsintensität wurde der Anteil der von Kavitationsblasen bedeckten Schaufelfläche verwendet.

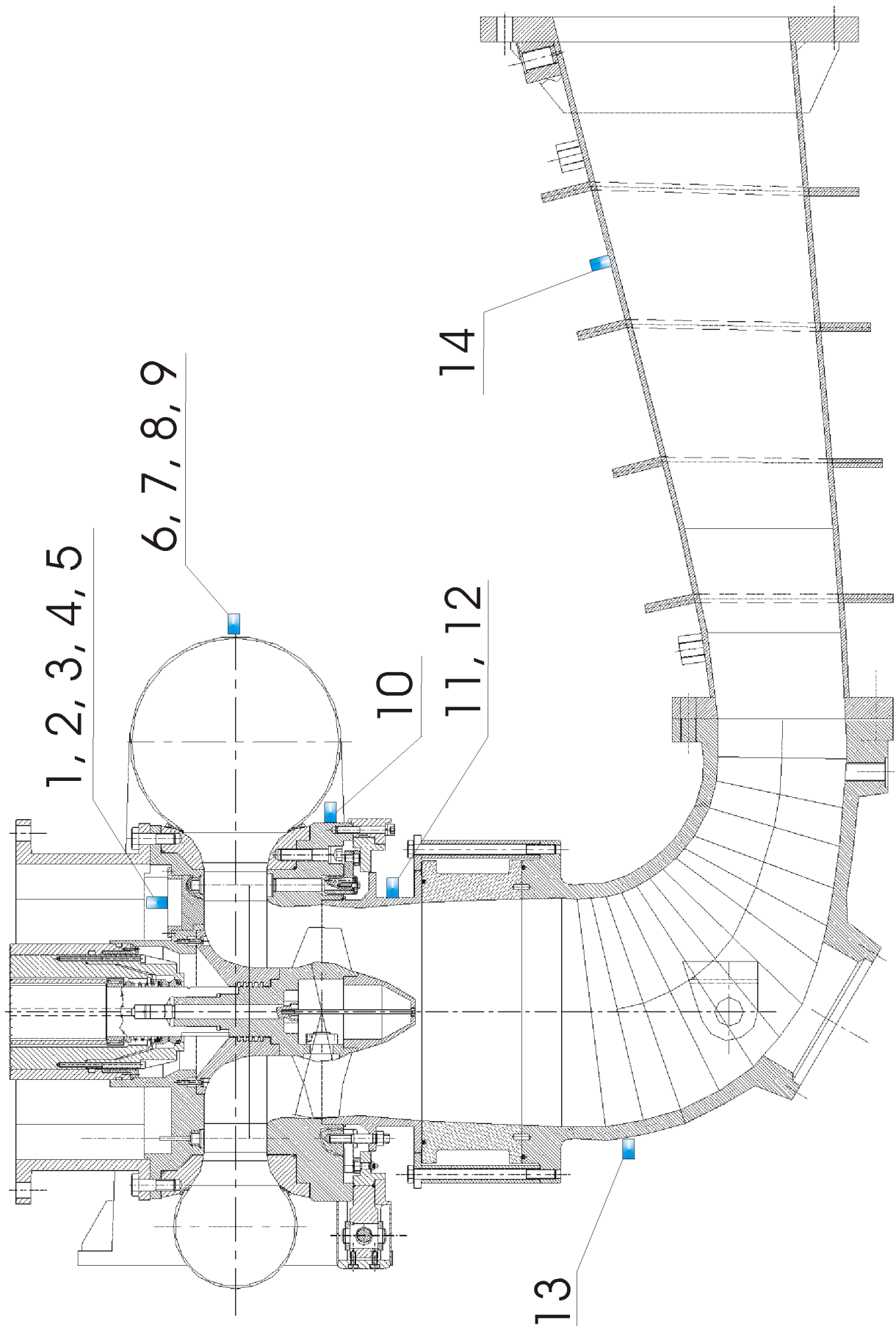


Abbildung 2.27: Meridianschnitt der Modellturbine K63j mit Sensorpositionen

Die Messungen wurden für zwei Frequenzbereiche und für zwei verschiedene Kavitationsformen durchgeführt:

- Frequenzbereiche:  $150kHz - 1MHz$  und  $350kHz - 1MHz$ ,<sup>17</sup>
- Kavitationsformen:
  - Eintrittskantenkavitation: Betriebspunkt  $n_1' = 100min^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ ,
  - Mischform aus Außenspalt-, Hohlkehl- und Flächenkavitation:<sup>18</sup>Betriebspunkt  $n_1' = 150min^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ .

## 2.4.2 Sensorpositionen zur Diagnose von Eintrittskantenkavitation

### Vergleich der Sensorpositionen nach dem Kriterium des maximalen RMS-Wertes

Diese Untersuchungen wurden im Betriebspunkt  $n_1' = 100min^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  durchgeführt, wo bei allen  $\sigma$ -Werten ausschließlich Eintrittskantenkavitation auftritt. Der maximale RMS-Wert wurde hier bei  $\sigma = 0.7$  erreicht.

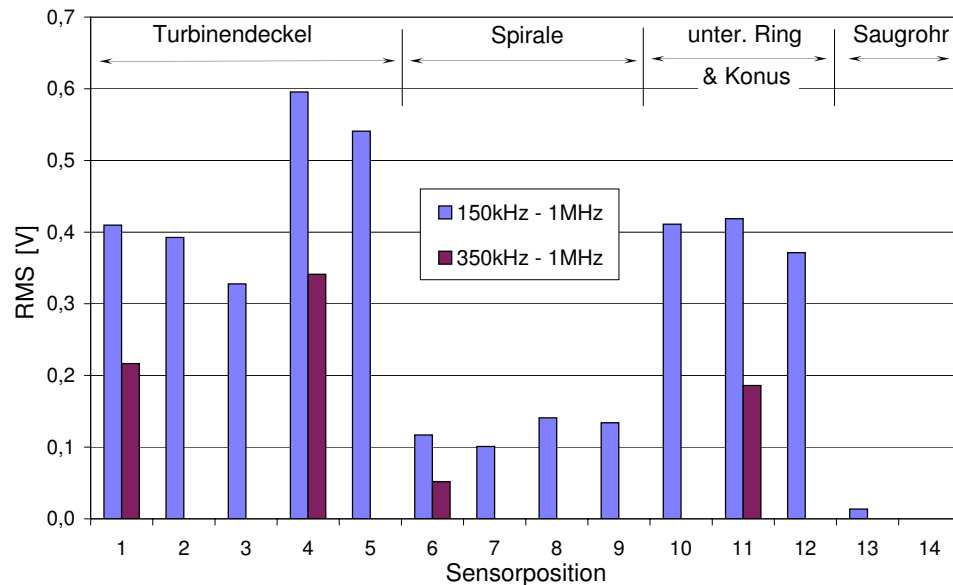


Abbildung 2.28: Vergleich der Sensorpositionen nach dem Kriterium des maximalen RMS-Wertes bei Eintrittskantenkavitation

<sup>17</sup>Diese Filtereinstellungen haben sich bei den im Kap. 2.3.1, S. 28 beschriebenen Modellmessungen als nahezu gleichwertig erwiesen.

Mit der Filtereinstellung  $150kHz - 1MHz$  wurden alle 14 Positionen untersucht, mit  $350kHz - 1MHz$  nur die Positionen 1 und 4 (Turbinendeckel), 6 (Spirale) und 11 (Auslaufkonus).

<sup>18</sup>Die Zusammensetzung hängt vom  $\sigma$ -Wert ab, siehe Tab. 2.2, S. 25

In Abb. 2.28 sind die an verschiedenen Sensorpositionen erfassten  $RMS_{max}$ -Werte dargestellt.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die besten Positionen hinsichtlich des Kriteriums des maximalen RMS-Wertes *am Turbinendeckel, am unteren Leitradring und am Auslaufkonus* liegen. Dies gilt für die beiden untersuchten Frequenzbereiche.

Sensorpositionen am Saugrohr sind zur Diagnose der Eintrittskantenkavitation ungeeignet.

### Vergleich der Sensorpositionen nach den Kriterien maximaler Signifikanz des RMS-Wertes und stetiger RMS-Kurven-Steilheit über $\sigma$

Der Untersuchungsumfang zu diesem Punkt wurde auf drei Sensorpositionen begrenzt: Position 4 am Turbinendeckel, 6 an der Spirale und 11 am Auslaufkonus.

Für die Auswertung anhand der Kriterien maximaler Signifikanz und stetiger RMS-Kurven-Steilheit wurde in Abb. 2.29 auf S. 46 der Verlauf des normierten RMS-Wertes  $RMS/RMS_{min}$  über  $\sigma$  abgebildet. Die gestrichelte Kurve stellt den durch Kavitation belasteten Anteil der Schaufelfläche dar. Die RMS-Werte in der Abb. wurden bei der Filtereinstellung  $350kHz - 1MHz$  erfasst. Werte im Frequenzbereich  $150kHz - 1MHz$  waren diesen ähnlich.

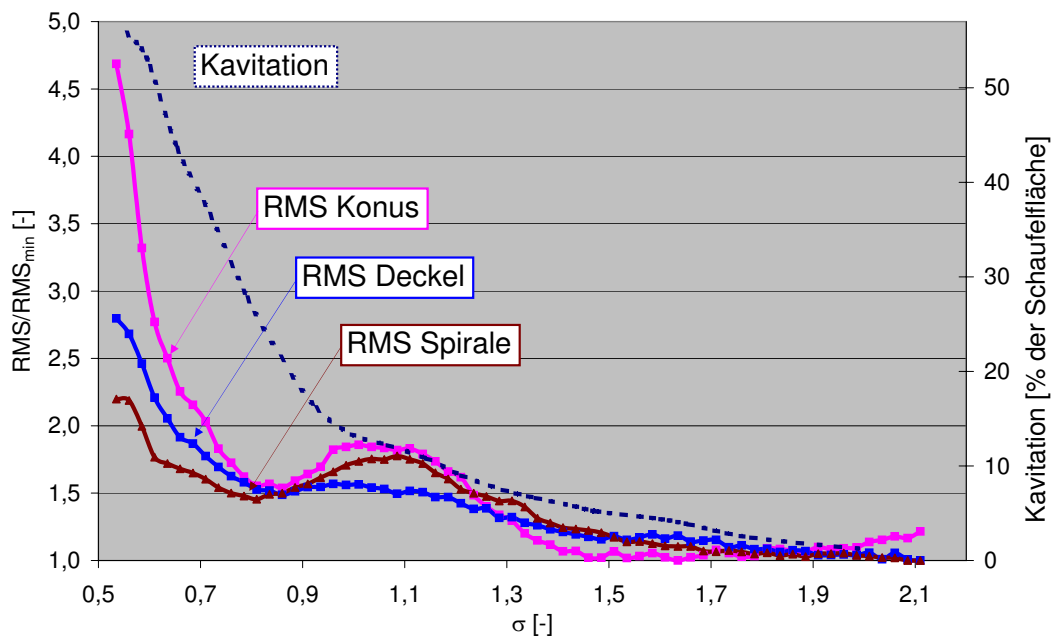


Abbildung 2.29: Normierte RMS-Werte und Kavitationsfläche über  $\sigma$  bei Eintrittskantenkavitation

Aus Abb. 2.29 ist ersichtlich, dass die Signifikanz für die Positionen am Auslaufkonus am größten ist.

Gleichzeitig wird deutlich, dass der Verlauf des RMS-Wertes an keiner der untersuchten Sensorpositionen dem Kriterium stetiger Steilheit im ganzen Messbereich entspricht. Im mittleren  $\sigma$ -Bereich bleibt der RMS-Wert trotz der Zunahme der Kavitationsintensität konstant oder nimmt sogar leicht ab.

Am günstigsten bezüglich den Kriterien maximaler Signifikanz und stetiger RMS-Kurven-Steilheit ist die Position am Deckel, wo eine relativ gute Zuordnung von Kavitationsintensität und Signalstärke beobachtet wird.

Da die Position am Deckel auch nach dem Kriterium des maximalen RMS-Wertes die beste ist, kann der Schluss gezogen werden, dass *zur Diagnose von Eintrittskantenkavitation diejenigen Sensorpositionen am besten geeignet sind, die sich am nächsten zum Kavitationsentstehungsort stromaufwärts befinden.*

Positionen stromabwärts können auch begrenzt angewendet werden, sie liefern jedoch eine weniger stetiger Korrelation.

Dagegen sollten die Sensorpositionen an der Spirale und am Saugrohr zur Diagnose der Eintrittskantenkavitation nicht verwendet werden.

### 2.4.3 Sensorpositionen zur Diagnose der Kavitation bei Volllast

#### Auswahl der Sensorposition nach dem Kriterium des maximalen RMS-Wertes

In Volllast, bei großer Wasserführung des Flusses, werden Kaplan turbinen in der Regel mit großer Leit- und Laufradöffnung bei  $n_1' > n_{1'opt}$  betrieben. Hier tritt normalerweise eine Mischform von Flächen-, Außenspalt- und Hohlkehlkavitation auf.

Im Folgenden werden Sensorpositionen zum Detektieren dieser Mischform im Betriebspunkt  $n_1' = 150 \text{ min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  der Modellturbine untersucht. Der maximale RMS-Wert wurde hier bei  $\sigma = 0.45$  erreicht.<sup>19</sup>

In Abb. 2.30 auf S. 48 sind an verschiedenen Sensorpositionen erfasste RMS-Werte dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die besten Positionen hinsichtlich des ersten Kriteriums am *Auslaufkonus* und am *Turbinendeckel* liegen.

Die Sensorpositionen am Saugrohr sind zur Diagnose dieser Kavitationsform ungeeignet.

---

<sup>19</sup>Zusammensetzung dieser Mischform aus einzelnen Kavitationsformen in Abhängigkeit von  $\sigma$  siehe in Tab. 2.2 auf S. 25.

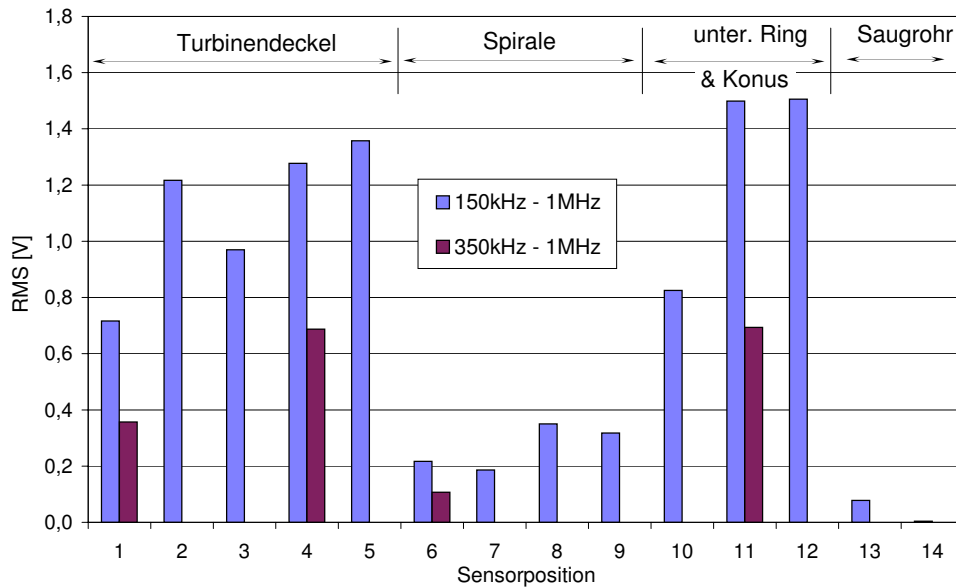


Abbildung 2.30: Vergleich der Sensorpositionen nach dem Kriterium des maximalen RMS-Wertes bei einer Mischform aus Flächen-, Außenspalt- und Hohlkehlkavitation

### Auswahl der Sensorposition nach den Kriterien maximaler Signifikanz des RMS-Wertes und stetiger RMS-Kurven-Steilheit über $\sigma$

Analog zur Eintrittskantenkavitation wurde der Untersuchungsumfang auch hier auf drei Positionen begrenzt: Position 4 am Turbinendeckel, 6 an der Spirale und 11 am Auslaufkonus.

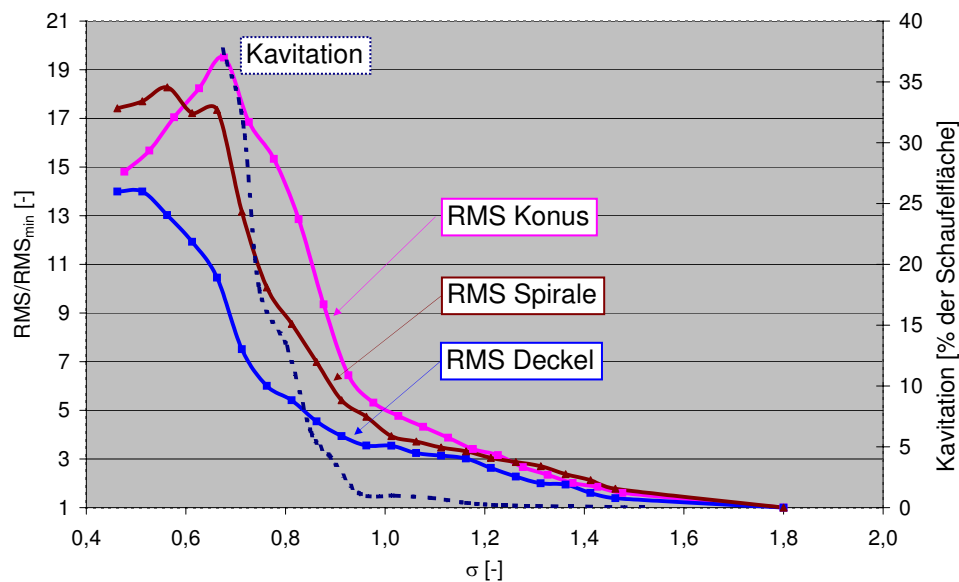


Abbildung 2.31: Verlauf des normierten RMS-Wertes sowie der Kavitationsfläche über  $\sigma$  bei einer Mischform aus Außen-, Nabenspalt- und Flächenkavitation

In Abb. 2.31 sind die an diesen Positionen erfassten  $RMS/RMS_{min}$ -Werte über

$\sigma$  dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass hinsichtlich dem Kriteriums der möglichst hohen Signifikanz kein ausschlaggebender Unterschied zwischen einzelnen untersuchten Sensorpositionen festzustellen ist: an allen untersuchten Positionen ist eine gute Signifikanz vorhanden.

Hinsichtlich des Kriteriums stetiger Steilheit der Funktion  $RMS(Kavitationsfläche)$  in ganzem  $\sigma$ -Bereich erwies sich die Position am Turbinendeckel als die beste. Hier war die Schalldämpfung bei kleinen  $\sigma$ -Werte die geringste.

Hieraus lässt sich folgern, dass, wie auch für die Eintrittskantenkavitation, *zur Diagnose dieser Kavitations-Mischform diejenigen Sensorpositionen am besten geeignet sind, die möglichst nah zur Kavitationszone stromaufwärts liegen.*

Zum Detektieren einer schwach entwickelten Kavitation können auch die Positionen stromabwärts und an der Spirale verwendet werden.

## 2.5 Erosive Stärke der einzelnen Kavitationsformen

Aus dem Vergleich der in den Anlagen Ryburg-Schwörstadt und Roßhaupten zu erwartenden mit der tatsächlich aufgetretenen Kavitationserosion ließen sich Schlüsse über die relative erosive Stärke der einzelnen betrachteten Kavitationsformen ziehen. Dafür waren folgende Einzelschritte notwendig:

- Das Kavitationsverhalten der Anlagen wurde aus den Modellmessungen des Turbinenherstellers ermittelt, siehe Kap. 2.3.3, S. 35.
- Die Betriebsweise der Anlagen wurde durch die PC-Datenerfassung festgehalten. Aus diesen Daten konnte ermittelt werden, wie oft und wie lange einzelne Betriebspunkte im untersuchten Zeitraum 2000 – 2003 eingestellt waren.
- Aus dem Kavitationsverhalten und der Betriebsweise wurde die prozentuale Verteilung der kumulierten Kavitationsbelastung auf die einzelnen Kavitationsformen bestimmt. Hieraus wurde die Verteilung der erwarteten Kavitationserosion abgeleitet, wobei angenommen wurde, dass die erosive Stärke aller betrachteten Kavitationsformen im gleichen Verhältnis zur deren Fläche steht.
- Die tatsächlich aufgetretene Kavitationsschäden wurden bei Revisionen im Jahre 2004 dokumentiert.

### 2.5.1 Betriebsweise der untersuchten Anlagen

Die Betriebsweise der beiden Anlagen ist durch folgende Zielsetzungen geprägt:

- Maximierung der abgegebenen Leistung,
- Einhaltung der wasserwirtschaftlichen Vorgaben,
- Einhaltung des von dem Turbinenhersteller vorgegebenen Leistungsgarantiebereiches und der Kavitationsgrenzen.

Dementsprechend wurden die Maschinen im untersuchten Zeitraum 2000 – 2003 überwiegend bei  $n_1'$ -Werten nahe  $n_{1'opt}$  und großen  $Q_1'$ -Werten betrieben, siehe Abb. 2.32 und 2.33 auf S. 51. Es wurden nur Betriebspunkte mit  $n_1' > n_{1'opt}$  eingestellt.

Die Betriebsweise beider Anlagen Ryburg-Schwörstadt und Roßhaupten unterscheidet sich durch die Breite des  $n_1'$ -Bereichs. In Ryburg-Schwörstadt wird der Oberwasserpegel entsprechend den wasserrechtlichen Vorschriften streng konstant gehalten. Eine Verringerung der Fallhöhe ergibt sich nur bei Hochwasser; somit werden die höheren  $n_1'$ -Werte nur bei voll geöffneter Turbine gefahren. Die Anlage Roßhaupten wird dagegen bei verschiedenen Fallhöhen betrieben, da der Forgensee als Hochwasserrückhaltebecken bewirtschaftet wird.



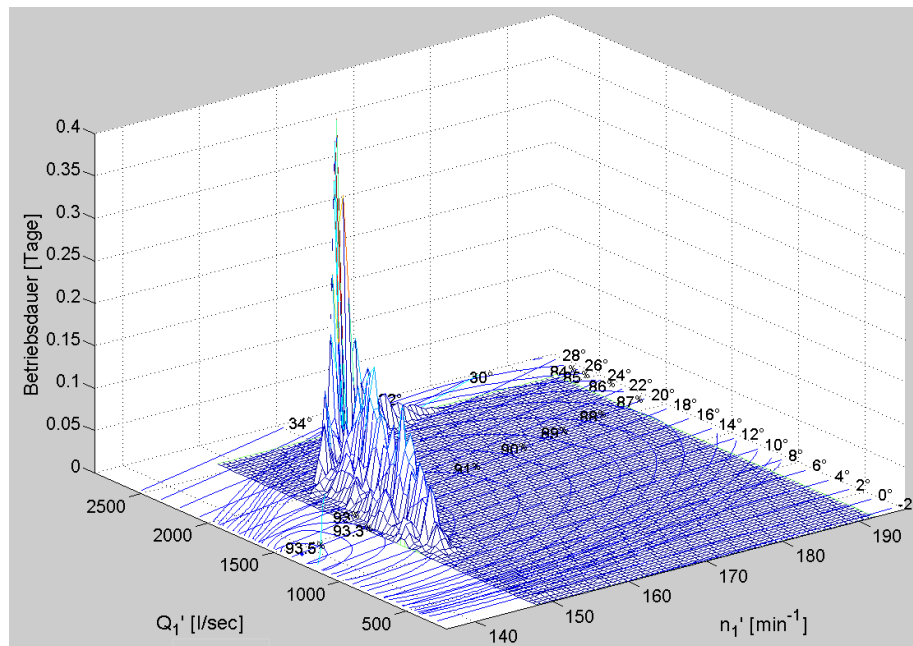


Abbildung 2.32: Verteilung der Betriebsdauer über dem Kennfeld in Ryburg-Schwörstadt vom 2000 – 2003

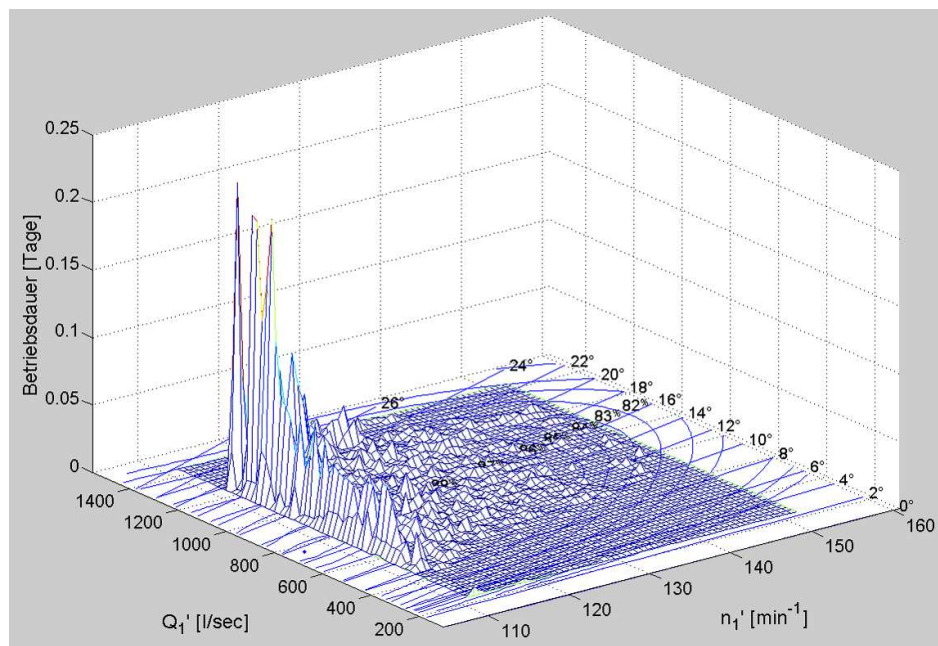


Abbildung 2.33: Verteilung der Betriebsdauer über dem Kennfeld in Roßhaupten vom 2000 – 2003

## 2.5.2 Prozentuale Verteilung der kumulierten Kavitationsbelastung auf die einzelnen Kavitationsformen

Hier wird prozentuale Verteilung der 2000 – 2003 in Ryburg-Schwörstadt und Roßhaupten kumulierten Kavitationsbelastung auf die einzelnen Kavitationsformen dar-

gestellt. Diese wird aus dem Vergleich der im letzten Kapitel dargestellten Betriebsweise der Anlagen mit der Verteilung der Kavitationsformen über dem Kennfeld, siehe Abb. 2.18 und 2.19 auf S. 36 und 37, abgeleitet. In Tab. 2.4 und 2.5 ist dargestellt, wie stark und oft die einzelnen Kavitationsformen im Zeitraum 2000 – 2003 auftraten.<sup>20</sup>

*Tabelle 2.4: Prozentualer Anteil der einzelnen Kavitationsformen in der Kavitationsbelastung der Anlage Roßhaupten in den Jahren 2000 – 2003*

Kavitationsform	Kavitationsfläche, Mittelwert [% v. Schaufel]	Häufigkeit des Auftretens [% Betriebszeit]	Belastung = Fläche x Häufigkeit [-]	Anteil in Gesamtkavitation [%]
Nabenspalt- & Hohlkehl-	11%	90%	0.099	42%
Eintrittskanten-, saugseitig	9%	80%	0.072	30%
Außenspalt-	7%	90%	0.063	27%
Flächenkavitation	1.5%	20%	0.003	1%

*Tabelle 2.5: Prozentualer Anteil der einzelnen Kavitationsformen in der Kavitationsbelastung der Anlage Ryburg-Schwörstadt in den Jahren 2000 – 2003*

Kavitationsform	Kavitationsfläche, Mittelwert [% v. Schaufel]	Häufigkeit des Auftretens [% Betriebszeit]	Belastung = Fläche x Häufigkeit [-]	Anteil in Gesamtkavitation [%]
Nabenspalt- & Hohlkehl-	2.2%	80%	0.018	53%
Außenspalt-	1.8%	80%	0.014	43%
Flächen-	0.3%	40%	0.001	4%
Eintrittskantenkav. druckseitig	0.2%	10%	0.0002	0.4%

Insgesamt war die Kavitation in der Anlage Roßhaupten wesentlich stärker ausgeprägt als in Ryburg-Schwörstadt. Qualitativ ist das Kavitationsverhalten beider Anlagen ähnlich, was Außenspalt-, Nabenspalt- und Hohlkehlkavitation sowie Flächenkavitation betrifft. Bzgl. der Eintrittskantenkavitation ist es jedoch unterschiedlich: in Roßhaupten tritt sie saugseitig und in Roßhaupten druckseitig auf.

Am wesentlichsten waren die Anlagen durch folgende Kavitationsformen belastet:

- Roßhaupten: Nabenspalt- und Hohlkehlkavitation, Eintrittskanten- und Außenspaltkavitation,

<sup>20</sup>Als Maß der Kavitationsstärke wird hier die durch Kavitation bedeckte Fläche der Schaufel herangezogen

- Ryburg-Schwörstadt: Nabenspalt, Hohlkehl- und Außenspaltkavitation.

### 2.5.3 Erosionsschäden in den Anlagen

Sowohl in Ryburg-Schwörstadt als auch in Roßhaupten tritt eine merkliche Kavitationserosion auf. Entsprechende Kavitationsschäden wurden sowohl bei den in den Jahren 2004, 1999 als auch bei den früheren Turbinenrevisionen festgestellt.

#### Revisionsbefund Ryburg-Schwörstadt

In Ryburg-Schwörstadt hat die Kavitation ihre Spuren auf der Saugseite aller fünf Laufschaufeln hinterlassen.

Die verhältnismäßig geringen Erosionen waren auf der Saugseite nahe der Austrittskante und dem Außenspalt zu finden. Die Ausdehnung betrug jeweils ca.  $50 \times 350 \text{ mm}$ , die Tiefe bis  $3 \text{ mm}$ , siehe Skizze einer Laufschaufel mit Kavitationsschäden in Abb. 2.34.

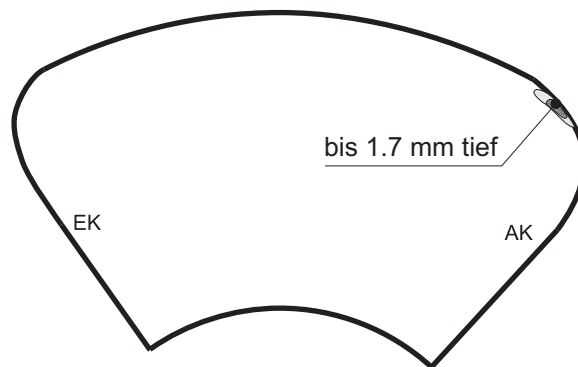


Abbildung 2.34: Kavitationsschäden auf der Saugseite der dritten Laufschaufel in Ryburg-Schwörstadt

#### Revisionsbefund Roßhaupten

Die Kavitationsschäden in Roßhaupten lagen auch überwiegend am Außenspalt; sie waren wesentlich stärker als in Ryburg-Schwörstadt, siehe Abb. 2.35 auf S. 54.

Die Intensität der Beschädigungen der einzelnen sieben Laufschaufeln war unterschiedlich. An drei waren starke Kavitationsschäden vorhanden, an drei weiteren nur schwache und an einer gar keine.

Auch an der Nabe wurden Kavitationsbeschädigungen festgestellt. Die Beschädigungen waren relativ klein. Dies liegt jedoch offenbar daran, dass diese Stellen bei einer früheren Turbinenrevision mit einem gegen Kavitationserosion hochresistenten

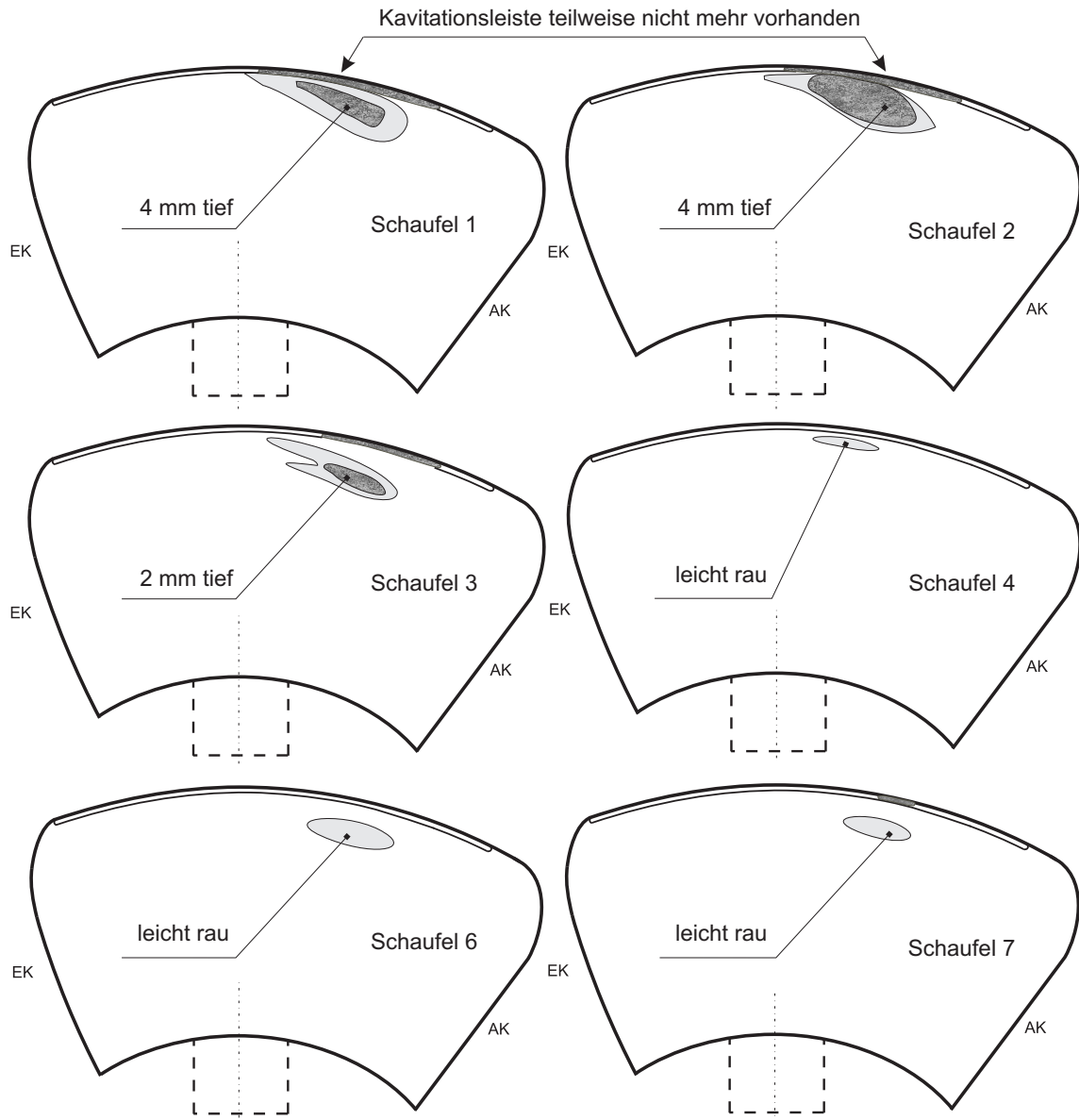


Abbildung 2.35: Kavitationsschäden auf der Saugseite der 1. – 4. und 6. – 7. Laufschaufel in Roßhaupten. Auf der 5. Laufschaufel wurden keine Kavitationsspuren gefunden.

Material verschweißt worden sind. Aus dem Revisionsbericht 1980 und nach Angaben des Kraftwerkspersonals ist bekannt, dass bei früheren Revisionen stets große Kavitationsschäden an der Nabe festgestellt wurden.

## 2.5.4 Vergleich der zu erwarteten zu den tatsächlich aufgetretenen Kavitationsschäden

Im Folgenden sind die zu erwartenden den tatsächlich aufgetretenen Erosionszuständen gegenübergestellt:

- Roßhaupten:
  - ERWARTET anhand der Art der Kavitationsbelastung: Schäden von Nabenspalt-, Hohlkehl-, Eintrittskanten- und Außenspaltkavitation,
  - IST: Schäden von Nabenspalt-, Hohlkehl- und Außenspaltkavitation, keine Spuren der Eintrittskantenkavitation
- Ryburg-Schwörstadt:
  - ERWARTET: schwache Schäden von Nabenspalt- und Hohlkehl- und Außenspaltkavitation
  - IST: schwache Schäden von Außenspaltkavitation

Der Vergleich zeigt eine unterschiedliche Übereinstimmung der zu erwartenden mit den tatsächlich aufgetroffenen Erosionsschäden bei den einzelnen Kavitationsformen:

- Außenspaltkavitation: volle Übereinstimmung
- Nabenspalt- und Hohlkehlkavitation: gute Übereinstimmung in Roßhaupten, keine Übereinstimmung in Ryburg-Schwörstadt.

Hieraus lässt sich noch kein Rückschluss über die erosive Stärke dieser Kavitationsform ziehen, da die Kavitation in Ryburg-Schwörstadt allgemein nur schwach ausgeprägt war. Es liegt trotzdem die Vermutung nahe, dass eine schwach ausgeprägte Nabenspalt- und Hohlkehlkavitation für die Anlagen nicht gefährlich ist.

- Flächenkavitation: Das Kavitationsniveau dieser Form war vernachlässigbar klein. Daher konnten keine Rückschlüsse über ihre relative Erosionsstärke gezogen werden.
- Eintrittskantenkavitation: hier wurde eine deutliche Diskrepanz zwischen erwarteter und tatsächlicher Erosion gefunden.

Obwohl die Laufradschaufeln in Roßhaupten über 3/4 der Laufzeit unter der Einwirkung einer starken, bis 18% der Schaufelfläche bedeckenden, Eintrittskantenkavitation standen, wurden hier keine Schäden beobachtet. Daraus lässt sich Schluss ziehen, dass *die Eintrittskantenkavitation deutlich weniger erosionsaggressiv ist als die Außenspalt- oder Nabenspaltkavitation.*

## 2.6 Kontaktqualität Sensor – Turbinenoberfläche

Für einen permanenten Einsatz des AEM in Wasserkraftanlagen ist die langfristige Stabilität der Signalübertragung von der Turbinenoberfläche an den Sensor von entscheidender Bedeutung. Diese hängt vor allem von der Langzeitstabilität des verwendeten Kontaktmittels ab.

Im Rahmen der ursprünglichen AEM-Entwicklung wurden am FLM verschiedene Kontaktmittel untersucht. Die Untersuchungen haben u.a. gezeigt, dass Fett und Ultraschallgell das Kavitationssignal gut übertragen und daher für AEM-Messungen geeignet sind. Damals wurden jedoch keine langfristigen Untersuchungen der Übertragungsqualität durchgeführt.

Für die AEM-Installation in den drei Kraftwerksanlagen wurden im Jahre 1999 folgende Kontaktmittel verwendet:

- in Ryburg-Schwörstadt: Fett *LGMT3/1* von Fa. SKF, Belgien
- in Roßhaupten und Neuötting: Silikonkleber *RTV162* von Fa. GE Silicones, Italien

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden am FLM weitere Untersuchungen hinsichtlich des Kontaktmittels durchgeführt, die in diesem Kapitel zusammen mit den Erfahrungen aus den Prototypmessungen dargestellt werden.

### 2.6.1 Modellmessungen zur Sicherung der Kontaktqualität

In Abb. 2.36 auf S. 57 ist der Messaufbau dargestellt, der zur Untersuchung der Signalübertragungscharakteristik des Kontaktmittels und der Sensorhalterung am FLM verwendet wurde.

Als Sender und Empfänger werden hier zwei Körperschallaufnehmer verwendet. Am Sender wird ein sinusförmiges Signal angelegt, das den vollen Frequenzmessbereich von  $100\text{kHz} - 1\text{MHz}$  wiederkehrend durchfährt.

Aus den Intensitäten der Eingang- und Ausgangssignale wird die Signalübertragungscharakteristik über der Frequenz berechnet:<sup>21</sup>

$$G(f) = 10 \cdot \log_{10} \frac{RMS_{Empfänger}(f)}{RMS_{Sender}(f)}. \quad (2.1)$$

Eine mit diesem Messaufbau ermittelte Übertragungscharakteristik beinhaltet grundsätzlich zusätzlich zu der gesuchten auch die Übertragungscharakteristika der

<sup>21</sup>Die Übertragungscharakteristik  $G = G(f)$  zeigt in logarithmischen Einheiten, wie stark das Signal bei verschiedenen Frequenzen gedämpft wird.

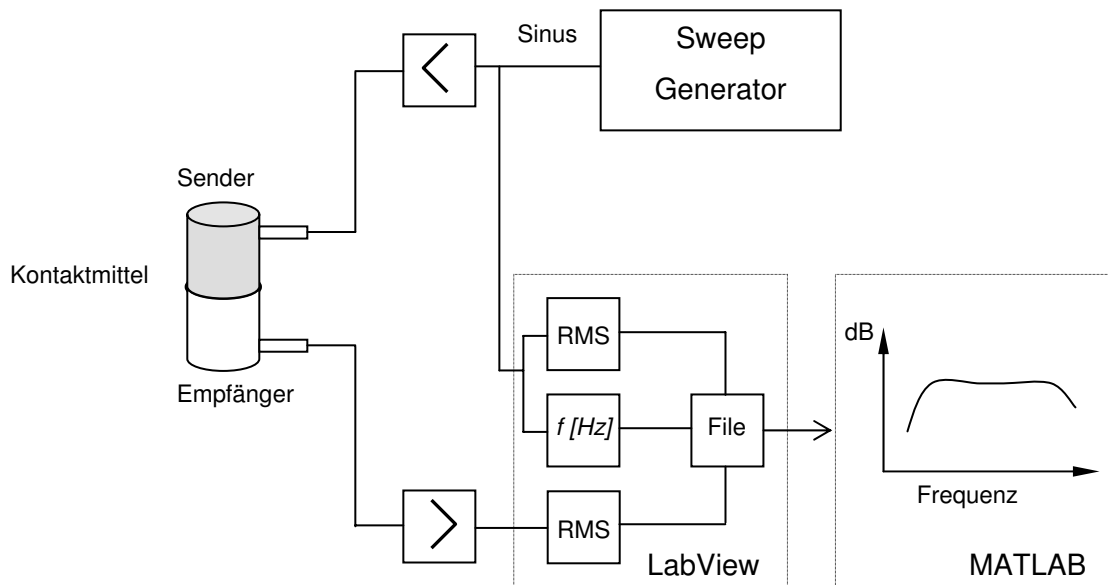


Abbildung 2.36: Messaufbau zur Untersuchung der Signalübertragungscharakteristik

Basiselemente wie Sender, Empfänger und die zwei Messverstärker. Die gesuchte Übertragungscharakteristik  $G$  der Kontaktstelle ergibt sich daher durch Subtraktion der Übertragungscharakteristik der Basiselemente  $G_{Basis}$ :

$$G = G_{Brutto} - G_{Basis} \quad (2.2)$$

Neben einer möglichst schwachen Schalldämpfung im Frequenzbereich  $350kHz - 1MHz$  wurden für die Auswahl des Kontaktmittels folgende Kriterien angesetzt:

- für Modelluntersuchungen: gute Repositionierbarkeit,
- für Prototypmessungen: Stabilität der Schallübertragung für mehr als fünf Jahre.

Untersucht wurden drei Kontaktmittel:

- Fett LGMT3/1 von Fa. SKF, Belgien,
- Ultraschallgel Fitosonic von Fa. Phyto Performance, Italien,
- Silikonkleber RTV162 von Fa. GE Silicones, Italien, der zu Metallen chemisch neutral ist.

Das Fett und das Ultraschallgel wurden gewählt, weil sie in früheren am FLM durchgeführten Untersuchungen gute Ergebnisse gezeigt haben, siehe auch SCHNEIDER ET. AL. [88]. Der Silikonkleber wurde vom Sensorhersteller Fa. Physical Acoustics empfohlen.

Als Vergleichsbasis wurde ein trockener Kontakt ohne Kontaktmittel verwendet.

Abb. 2.37 und 2.38 zeigen die Übertragungscharakteristiken der drei untersuchten Kontaktmittel sowie eines trockenen Kontakts. Die Übertragungscharakteristiken

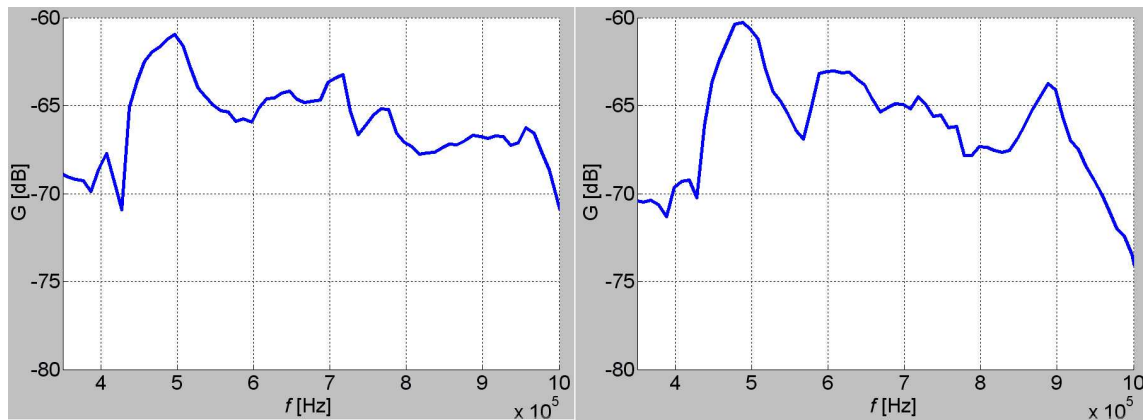


Abbildung 2.37: Übertragungscharakteristik des Ultraschallgell links und des Fettes rechts im Frequenzbereich  $350\text{kHz} - 1\text{MHz}$

des Ultraschallgell und des Fettes unterscheiden sich im Frequenzbereich  $350\text{kHz} - 700\text{kHz}$ , wo das Kavitationssignal hauptsächlich auftritt, nur geringfügig.<sup>22</sup>

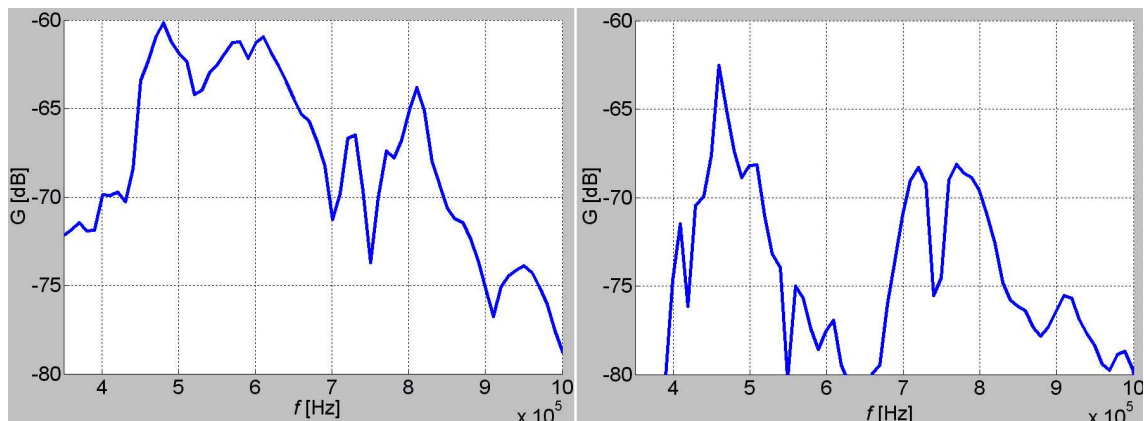


Abbildung 2.38: Übertragungscharakteristik des Silikonklebers links und des trockenen Kontakts rechts im Frequenzbereich  $350\text{kHz} - 1\text{MHz}$

Die Übertragungscharakteristik des Silikonklebers, siehe Abb. 2.38 links, ist im gleichen Frequenzbereich  $350\text{kHz} - 700\text{kHz}$  stärker verzerrt als die von Ultraschallgell oder Fett und liegt im Mittelwert um ca.  $2\text{dB}$  tiefer. Dieser Wert ist jedoch um ca.  $10\text{dB}$  besser als der des trockenen Kontakts.

Während den anschließenden mittelfristigen Messungen der Signalstabilität haben das Fett und der Silikonkleber gute Ergebnisse gezeigt. Auch nach Tagen waren keine

<sup>22</sup>Vgl. spektrale Verteilung eines typischen Kavitationssignals in Abb. 2.10, S. 28.



Unterschiede in der Übertragungscharakteristik feststellbar. Die Übertragungscharakteristik des Ultraschallgell, das zum Teil aus Wasser besteht, hat sich dagegen in der gleichen Zeit deutlich verschlechtert.

Langfristige Untersuchungen der zeitlichen Stabilität der Kontaktmittel wurden im Labor nicht durchgeführt.

## 2.6.2 Erfahrung aus den Prototypmessungen

Während der Anlagenmessungen wurden in den Jahren 2000 – 2003 zwei verschiedene Kontaktmittel verwendet. In Ryburg-Schwörstadt war es das Fett LGMT3/1 und in Roßhaupten und Neuötting der Silikonkleber RTV162.

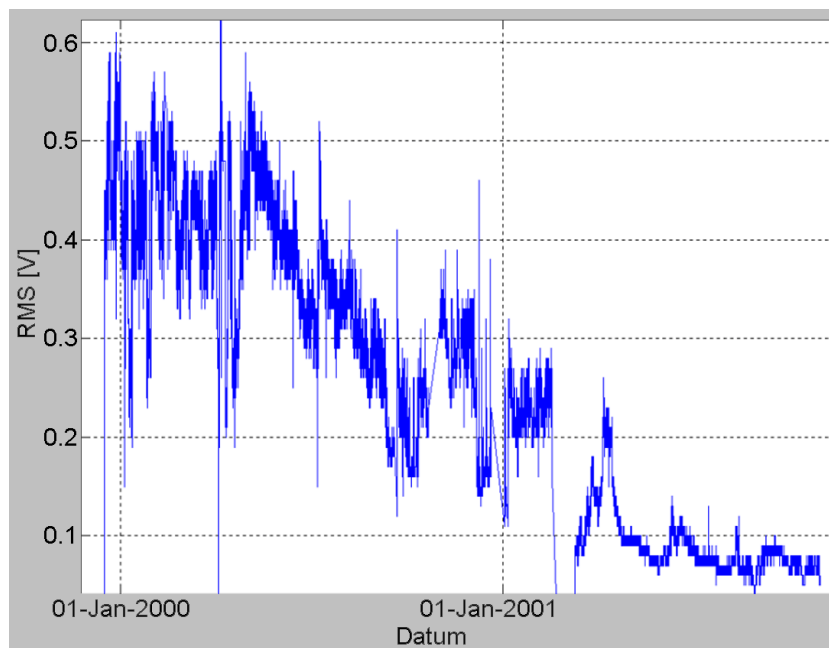


Abbildung 2.39: Signalabschwächung von Dezember 1999 bis November 2001 in Ryburg-Schwörstadt

Bereits vier Monate nach der Installation zeigte sich jedoch ein abfallender Trend der Signalintensität in der Anlage, in der Fett eingesetzt wurde, siehe Abb. 2.39.

Nachdem sich das Problem nicht auf eine zeitliche Veränderung der Betriebsweise der Turbine zurückführen ließ, wurde der Sensor Ende 2001 neu positioniert. Bei der Neupositionierung wurde festgestellt, dass sich das Fett bereits von dem größten Teil der Kontaktfläche abgelöst hatte.

Nach der Neupositionierung mit dem Silikonkleber *RTV162* stieg die Signalintensität auf das ursprüngliche Niveau und blieb 2002 – 2003 stabil.

In den Anlagen Roßhaupten und Neuötting, wo der Silikonkleber bereits 1999 verwendet wurde, wurde in den Jahren 1999 – 2003 keine Signalbeeinträchtigung festgestellt, siehe Abb. 2.40.

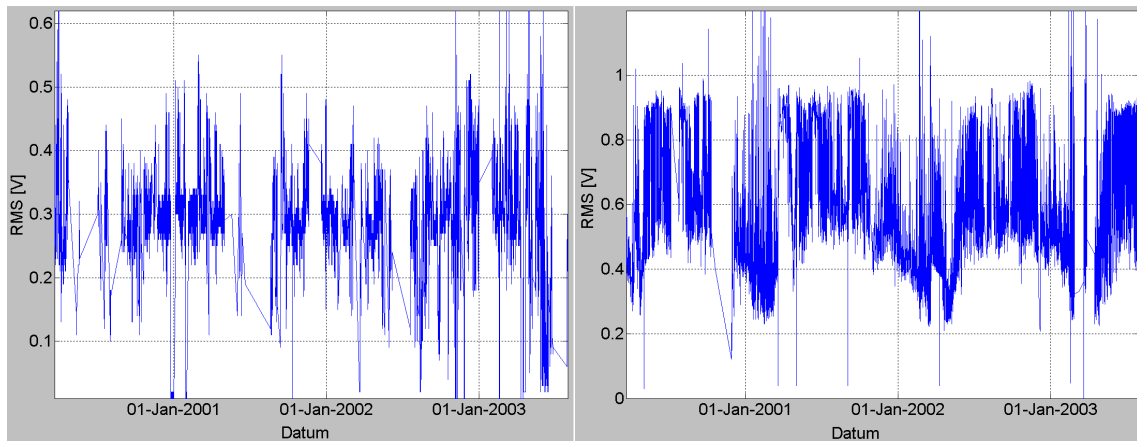


Abbildung 2.40: Signalintensität von 04.2000 bis 11.2003 in Neuötting und Roßhaupten

Daraus konnte der Rückschluss gezogen werden, dass das Kontaktmittel Fett im Unterschied zum Silikonkleber *RTV162* für langfristige Messungen ungeeignet ist.

### 2.6.3 Verfahren zur Prüfung der Kontaktqualität vor Ort

Zur Sicherung der Aussagekraft des AEM soll die Kontaktqualität zwischen dem Körperschallaufnehmer und der Turbinenoberfläche in den Turbinenanlagen vor Ort regelmäßig geprüft werden.

Dafür kann der in diesem Kapitel dargestellte Messaufbau verwendet werden, siehe S. 57. Der Sender wird auf der Turbinenoberfläche der Anlage neben dem Sensor platziert.

### 2.6.4 Schlussfolgerungen zum Kapitel Kontaktqualität

Anhand der Laboruntersuchungen und der AEM-Daten läßt sich folgendes festlegen:

- Bei Modelluntersuchungen sollte Ultraschallgell oder Fett verwendet werden, weil diese gute Übertragungscharakteristika vorweisen und eine häufige Repositionierung des Sensors erlauben.
- Bei Prototypmessungen sollte Silikonkleber verwendet werden. Dieser gewährt langfristig die Stabilität der Schallübertragung auf qualitativ hohem Niveau.
- Die Kontaktqualität zwischen dem Körperschallaufnehmer und der Turbinenoberfläche soll regelmäßig geprüft werden. Dafür soll der in diesem Kapitel verwendete Messaufbau in AEM integriert werden.

## Kapitel 3

# Entwicklung neuer Methoden der Kavitationsdiagnostik

Der im Kap. 2 beschriebene Acoustic Emission Monitor verwendet als Maß der Kavitationsstärke die Intensität des an der Turbinenoberfläche erfassten Körperschalls im Frequenzbereich  $300\text{kHz} - 1\text{MHz}$ .

In diesem Kapitel wird die Entwicklung neuer Techniken beschrieben, mit Hilfe derer sich aus dem an der Turbinenoberfläche erfassten Kavitationsgeräusch zusätzliche Informationen ermitteln lassen.

Auf Grund der Literaturrecherche, siehe Kap. 1.2, und angesichts der Ergebnisse der am FLM durchgeführten Modell- und Anlagenmessungen, erschien es aussichtsreich, die folgenden drei Messverfahren zu untersuchen:

- Winkelauflösung der Schallemissionen: Korrelation der Schallemission mit dem Drehwinkel der Laufradwelle,
- Bewertung der Drehwinkel-Modulation der Schallemission,
- Differenzierung der Eintrittskantenkavitation von den anderen Kavitationsformen durch Vergleich der Signalintensität
  - in zwei Frequenzbereichen,
  - an zwei verschiedenen Stellen der Turbine.

Die ersten beiden Verfahren sollen es ermöglichen, Schallemissionen, die von Kavitationsereignissen direkt an Laufschaufeln ausgehen, von solchen zu unterscheiden, die durch laufradferne Kavitation, wie z.B. in dem kavitierenden Wirbelzopf, entstehen. Es wird somit eine bessere Bewertung wirklich erosionsrelevanter Kavitation erwartet.

Nachfolgend wird die Aussagekraft der o.g. Messverfahren anhand von Modell- und Anlagenmessungen untersucht.

## 3.1 Winkelauflösung der Schallemission

Das Verfahren basiert auf der Korrelation der am Turbinengehäuse registrierten Schallereignisse mit dem Drehwinkel der Laufradwelle. Es gestattet somit die Visualisierung der Kavitationsverteilung über die Laufschaufeln einer Turbine. Neben der oben beschriebenen Differenzierung laufradnaher und laufradferner Kavitation kann es auch während der Installation des AEM in den Anlagen eine Aussage liefern:

- ob die Kavitation in der untersuchten Anlage auf alle Laufschaufeln gleichmäßig verteilt ist,
- über die Eignung verschiedener Sensorpositionen in der Anlage; das Kriterium der Sensorpositionsauswahl ist die bessere Abbildung der am Laufrad anhaftenden Kavitation im Signal.

In diesem Kapitel werden die hierzu entwickelte Versuchstechnik sowie die erzielten Ergebnisse der Modell- und Anlagenmessungen dargestellt.

### 3.1.1 Versuchsanordnung

Am FLM wurde ein Messsystem aufgebaut, das folgende Funktionen hat:

- Visualisierung der Verteilung des Kavitationssignals über dem Laufrad-Drehwinkel im Polardiagramm. Abb. 3.1 auf S. 63 zeigt eine Aufnahme für eine Modellturbine mit fünf Laufschaufeln,
- Analyse anhand spektraler Charakteristiken, ob und wie stark das Kavitationssignal mit der Turbinendrehfrequenz und Schaufelpassierfrequenz (Drehklang) korreliert.<sup>1</sup>

Der Meßaufbau besteht aus folgenden Einheiten:

- zwei Körperschallaufnehmer mit Vorverstärkern,
- Transientenrecorder, mit dem Signale von bis zu vier Körperschallaufnehmern eingelesen werden können,
- AD-Wandler für Anlagendaten,
- Drehwinkelgeber,

---

<sup>1</sup>Die Schaufelpassierfrequenz = Turbinendrehfrequenz x Schaufelzahl. Z.B. erreichte im Betriebspunkt  $n_1' = 100 \text{min}^{-1}$ ,  $H = 7m$  die Turbinendrehfrequenz den Wert  $14.7 \text{Hz}$ . Der Drehklang lag daher bei  $14.7 \times 5 = 73.6 \text{Hz}$ .

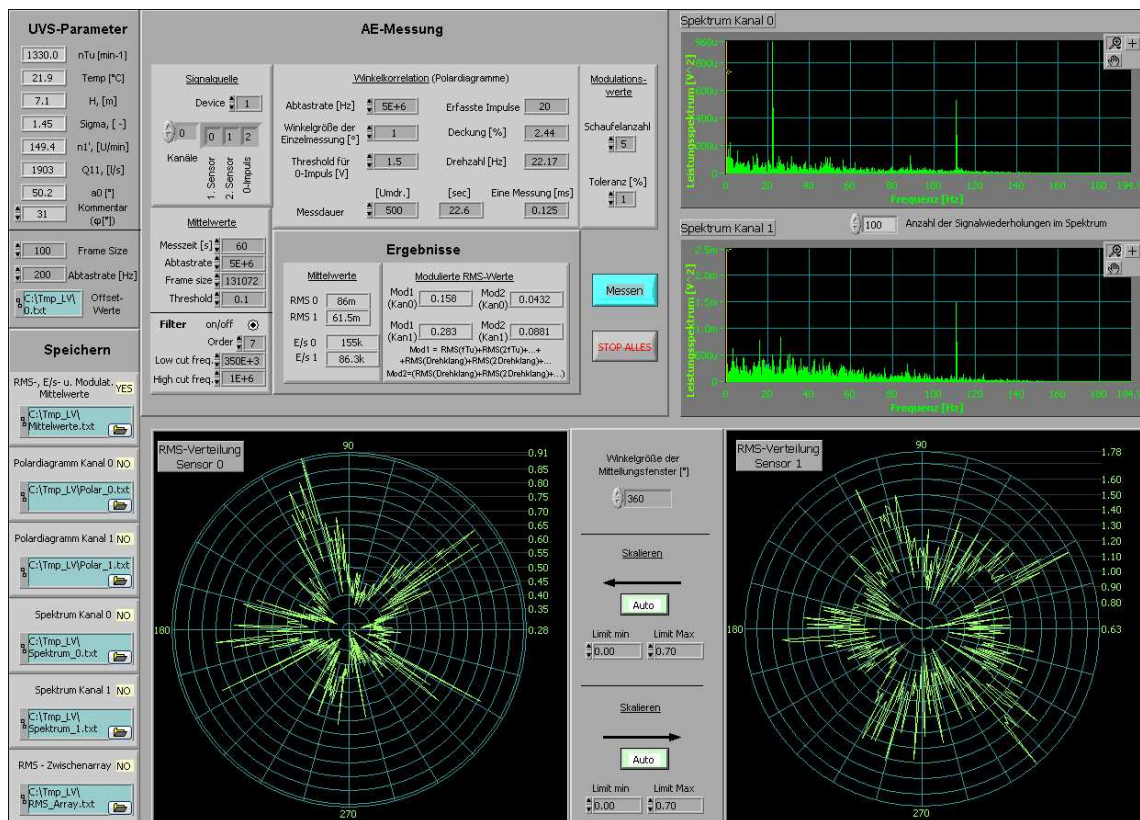


Abbildung 3.1: Arbeitsoberfläche des Messprogramms

- Messrechner, in dem alle Daten gespeichert, ausgewertet und dargestellt werden.

Dieser Aufbau diente sowohl den Modell- als auch den Prototypmessungen. Der Unterschied lag darin, daß als Drehwinkelgeber bei den Modellmessungen eine Lichtschranke und bei den Prototypmessungen ein Reedkontakt verwendet wurde.

Die Datenaufnahme und -auswertung erfolgten in einem LabView-Modul, dessen Arbeitsoberfläche in Abb. 3.1 dargestellt ist.

Während einer Messung wird das Kavitationssignal nicht kontinuierlich, sondern in diskreten Zeitschritten erfasst. Deren Länge ist so festgelegt, dass sie einer Drehung des Laufrads von einem Grad entspricht, nachfolgend 1°-Messung genannt. Nach jeder 1°-Messung werden folgende Werte ausgerechnet und gespeichert:

- der RMS-Mittelwert des von den zwei Körperschallaufnehmern aufgenommenen Signals;  
gespeichert wird nicht der während der 1°-Messung erfasste Körperschall, sondern nur dessen durchschnittliche Intensität, der RMS-Wert, der 1°-Winkel entspricht. Die Aufzeichnung des gesamten Körperschallsignals ist mit dem vorhandenen Messaufbau nicht möglich,

- der Zeitpunkt der Messung in ms,
- Zeiger auf die Laufradnullstellung: in der Datenliste wird jeweils der Zeitpunkt markiert, zu dem das Laufrad die Nullstellung passiert.

Während der Zeit, die der Messrechner für die Bearbeitung und Speicherung von diesen vier Werten braucht, entstehen Pausen in der Messung.

Da die untersuchten Anlagen verschiedene Drehfrequenzen haben, war die tote Zone der Messung auch unterschiedlich lang: für die Schnell-Laufende Modellturbine entsprach diese einem Drehwinkel von  $35^\circ$ , für die Anlage Roßhaupten ca.  $10^\circ$  und für die Anlage Neuötting ca.  $5^\circ$ .

Um stochastische Schwankungen des Signals zu unterdrücken und für jede Winkelposition möglichst viele momentane RMS-Werte zu sammeln, wurde jede Messung während mehr als 100 Laufradumdrehungen durchgeführt.

Die Datenauswertung und -darstellung erfolgt nach der Datenaufnahme. In den Polardiagrammen wird der Verlauf des momentanen RMS-Wertes über dem Drehwinkel im Sinne eines Ensemble-Mittelwerts abgebildet, d.h. innerhalb jedes  $1^\circ$ -Fensters wird der Mittelwert aller während der Messdauer in dieser Winkelstellung erfassten RMS-Werte gebildet und aufgetragen. Gleichzeitig werden auf der Arbeitsoberfläche die spektrale Charakteristik des Signals, das durchschnittliche RMS-Niveau bei dieser Messung und die Betriebspunkt-Daten dargestellt.

### 3.1.2 Modellmessungen zur Winkelauflösung

Die Modellmessungen zur Winkelauflösung wurden an dem am FLM vorhandenen Universalversuchsstand durchgeführt. Die Modellturbine hat fünf Laufradschaufeln.

Der erste Körperschallaufnehmer wurde stromaufwärts vom Laufrad am Turbinendeckel und der zweite stromabwärts am Auslaufkonus platziert, siehe Abb. 3.2 auf S. 65.

Die Messungen wurden für drei verschiedene Kavitationsformen durchgeführt:<sup>2</sup>

- Eintrittskantenkavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 100 \text{min}^{-1}$
- Volllastkavitation, Form 1: eine Mischform aus Eintrittskanten-, Außenspalt-, Hohlkehl- und Flächenkavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$
- Volllastkavitation, Form 2: eine Mischform aus Außenspalt-, Hohlkehl- und Flächenkavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$

---

<sup>2</sup>Die Lage der untersuchten Betriebspunkte im Turbinenkennfeld siehe in der Abb. 2.11 S. 30.

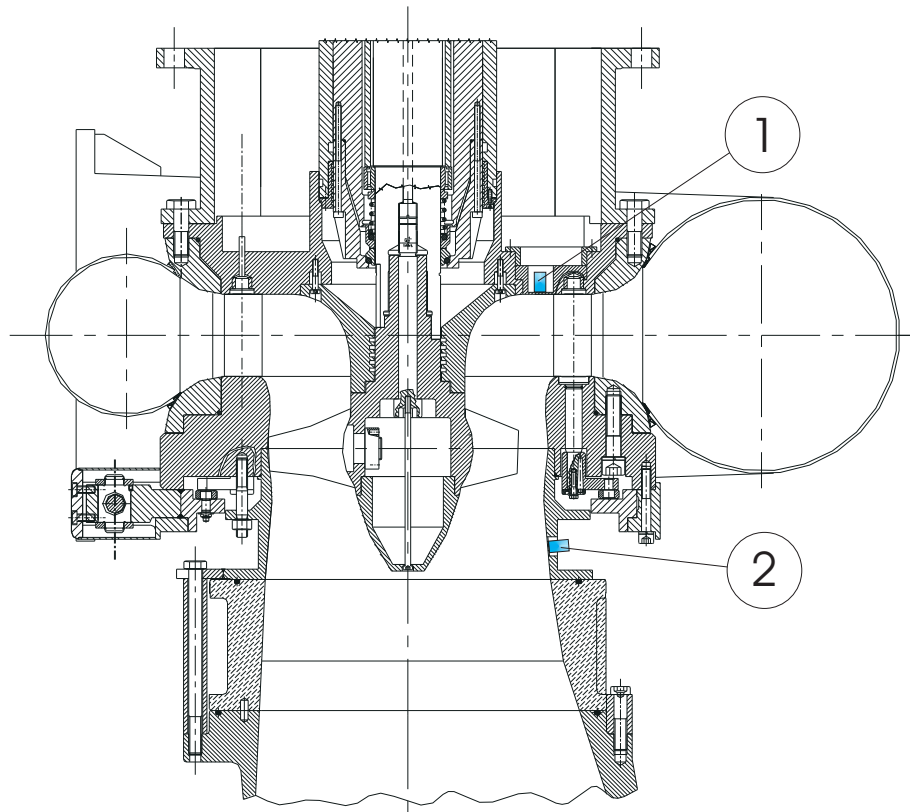


Abbildung 3.2: Sensorpositionen, an denen Untersuchungen zur Winkelauflösung durchgeführt wurden

Für jede Kavitationsform wurden vier bis fünf  $\sigma$ -Werte eingestellt, von dem kleinsten bis zum größten erreichbaren.<sup>3</sup>

Die Messergebnisse werden im folgenden dargestellt. Diese beinhalten:

- Polardiagramme,
- Signalspektren,
- Kavitationsskizzen.

---

<sup>3</sup>Alle Modellmessungen wurden bei einer konstanten Fallhöhe  $7m$  und einem optimalen  $a_0 - \varphi$  - Zusammenhang durchgeführt.

### Verteilung der Eintrittskantenkavitation

Im Betriebspunkt  $n_1' = 100 \text{min}^{-1}$   $\varphi = 31^\circ$  tritt bei allen  $\sigma$ -Werten nur saugseitige Eintrittskantenkavitation auf.

Es wurden vier  $\sigma$ -Werte eingestellt:

- $\sigma=0.52$ : Stark entwickelte Kavitation überdeckt mehr als 25% der Schaufelfläche, starke Ablösungen,<sup>4</sup>
- $\sigma=0.92$ : Stark entwickelte Kavitation überdeckt 15% der Schaufelfläche, Ablösungen,
- $\sigma=1.25$ : Kavitation überdeckt 7% der Schaufelfläche, kleine Ablösungen,
- $\sigma=1.75$ : Schwache Kavitation auf weniger als 2% der Schaufelfläche.<sup>5</sup>

In den Polardiagrammen in Abbildungen 3.3 bis 3.6 auf S. 67 – 68 sind deutlich die von den fünf Laufschaufeln ausgehenden Signale zu erkennen. Die Kavitation ist an allen fünf Schaufeln etwa gleich stark. Dies ist sowohl aus den Polardiagrammen ersichtlich als auch aus den Frequenzspektren: Hier tritt nur der Schaufeldrehklang in Erscheinung, während bei ungleich verteilter Kavitationsintensität auch die Drehfrequenz und ihre Vielfachen auftreten.

Dies gilt für alle  $\sigma$ -Werte, bei denen die Kavitation deutlich entwickelt war. Nur bei  $\sigma = 1.75$ , bei gerade entwickelten Kavitation, scheint Kavitation hauptsächlich an zwei Schaufeln aufzutreten. Entsprechend treten die einfache und die doppelte Drehfrequenz im Spektrum auf, siehe Abb. 3.6. Diese leichte Asymmetrie ist auf Einstell- Ungenauigkeiten des Schaufelwinkels zurückzuführen.

---

<sup>4</sup>Der minimale  $\sigma$ -Wert, der in diesem Betriebspunkt erreicht werden konnte.

<sup>5</sup>Die Eintrittskantenkavitation hängt verhältnismäßig wenig vom  $\sigma$ -Wert ab. Auch bei diesem maximal einstellbarem  $\sigma$ -Wert war eine schwache Kavitation vorhanden.



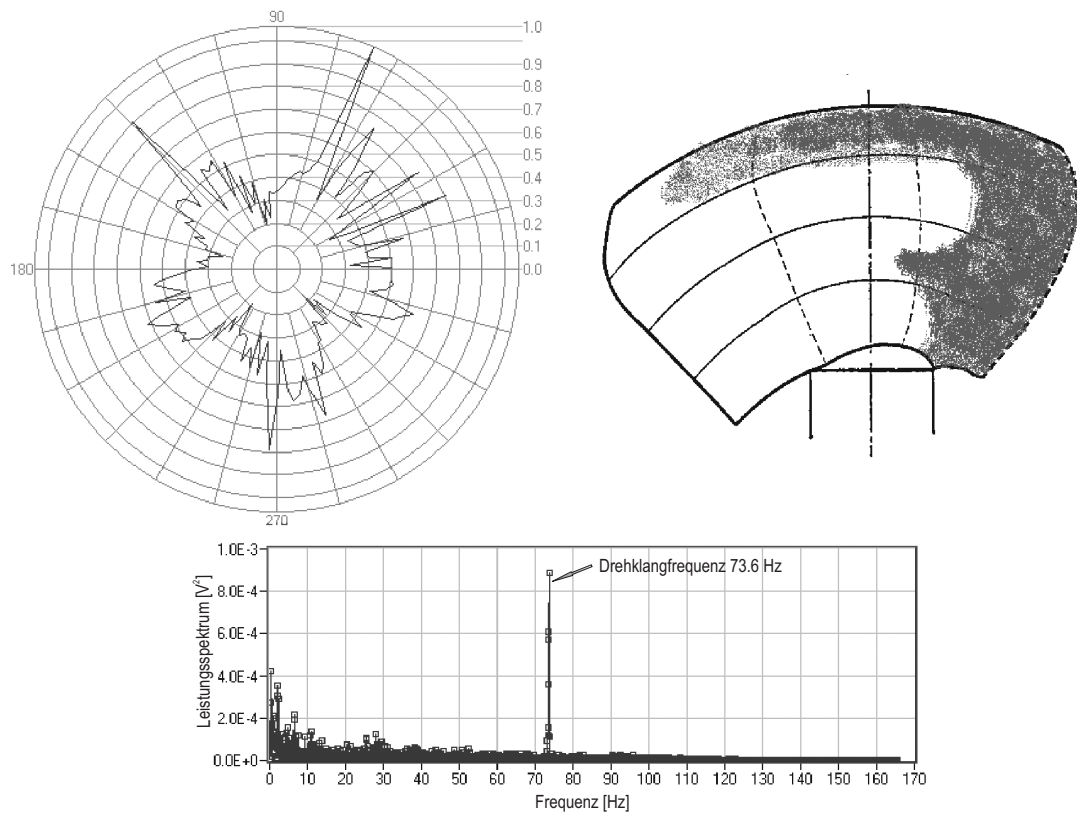


Abbildung 3.3: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 100 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 0.52$

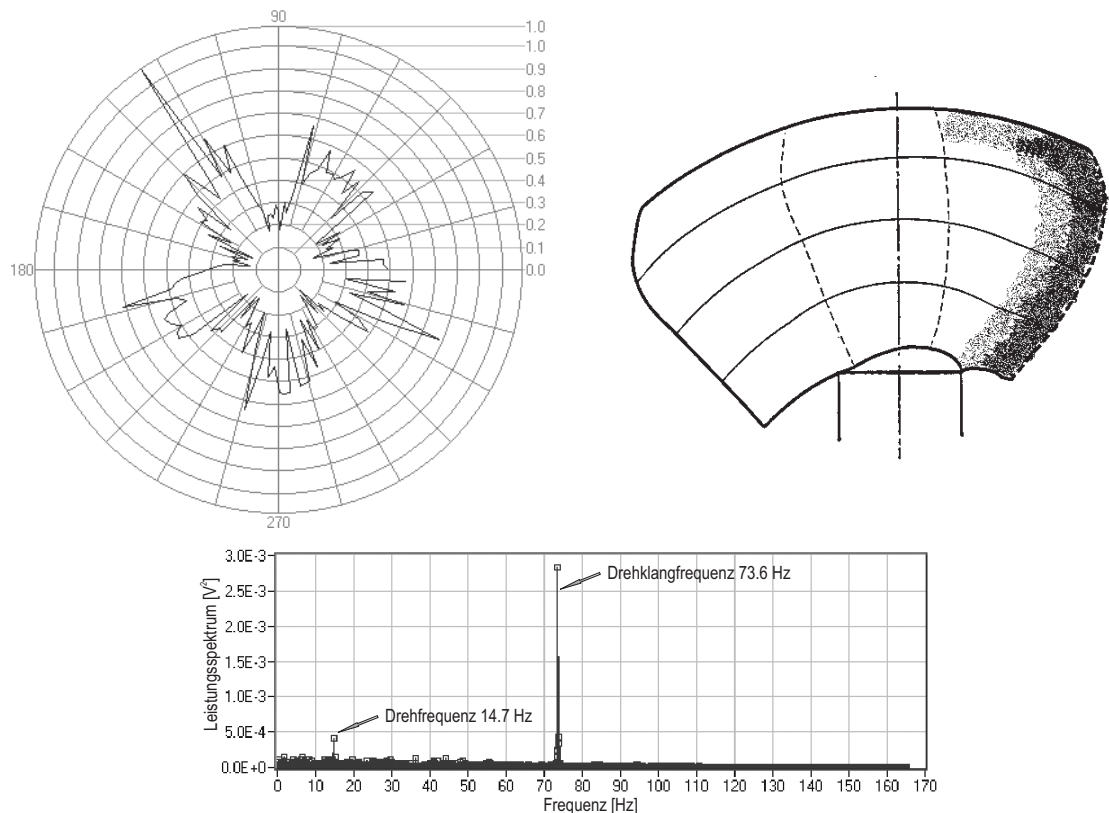


Abbildung 3.4: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 100 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 0.92$

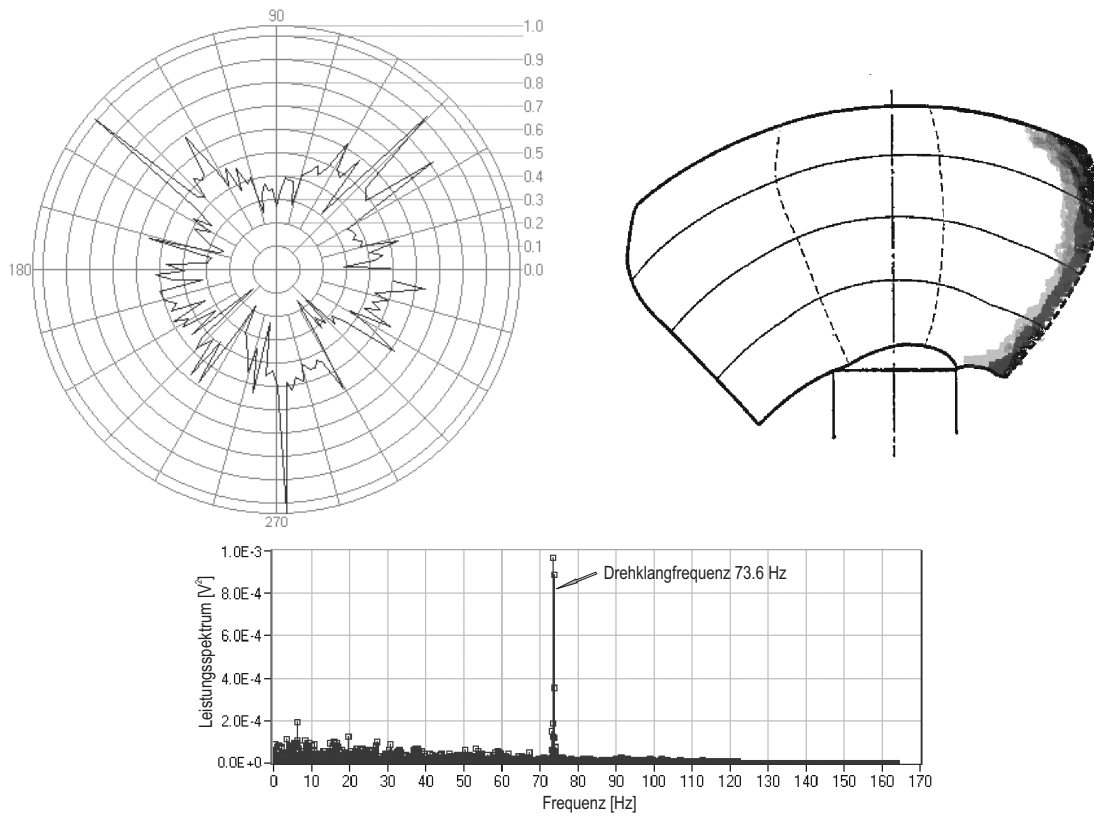


Abbildung 3.5: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 100 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 1.25$

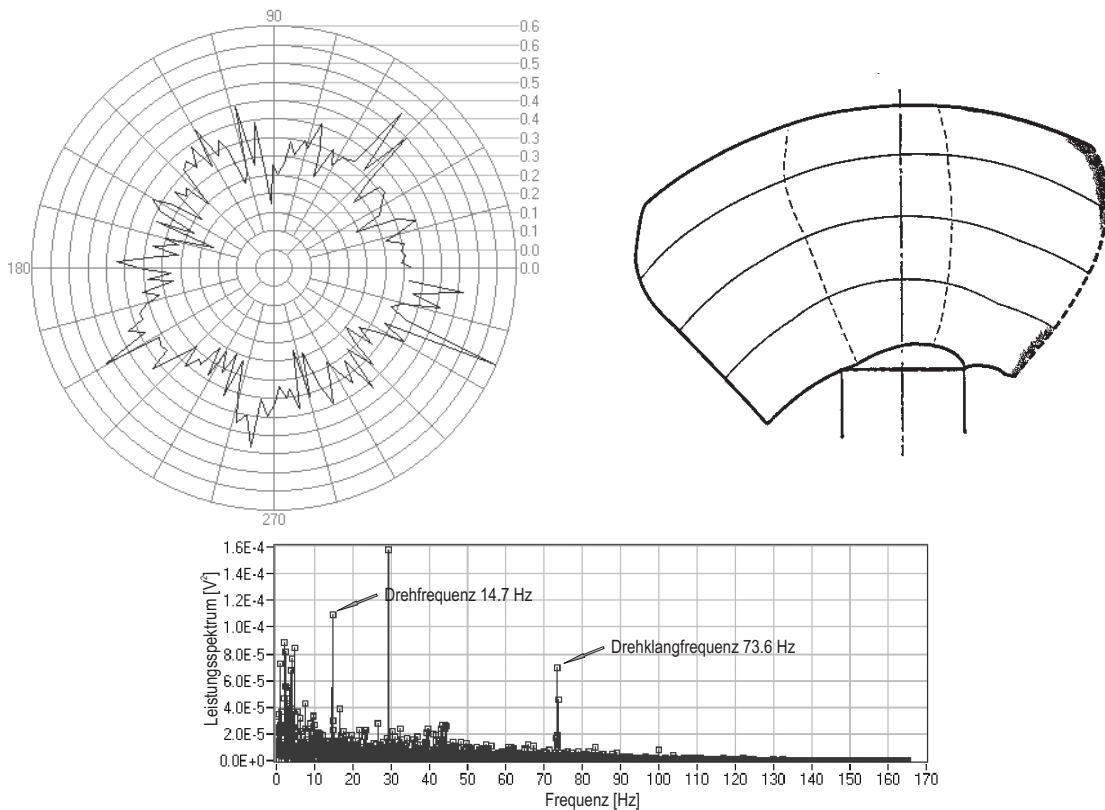


Abbildung 3.6: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 100 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 1.75$

### Verteilung der Kavitation bei Volllast, Kavitationsform 1

Im Betriebspunkt  $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$  und  $\varphi = 31^\circ$  liegt eine gemischte Kavitationsform vor, die sich aus Flächen-, Hohlkehl-, Außenspalt- und Eintrittskantenkavitation zusammensetzt, siehe Abb. 3.7. Die Präsenz der jeweiligen Kavitationsform und deren relative Stärke hängen stark vom  $\sigma$ -Wert ab.

Es wurden vier  $\sigma$ -Werte eingestellt:

- $\sigma=0.5$ : Stark entwickelte Außenspalt-, und Hohlkehl- und Flächenkavitation und schwache Eintrittskantenkavitation; die Kavitation bedeckt ca. 30% der Schaufelfläche, starke Ablösungen,
- $\sigma=0.70$ : Starke Außenspalt-, und Hohlkehlkavitation bedeckt ca. 10% der Schaufelfläche, Ablösungen,
- $\sigma=0.85$ : Schwache Außenspaltkavitation auf ca. 2% der Schaufelfläche,
- $\sigma=1.2$ : Keine sichtbare Kavitation.

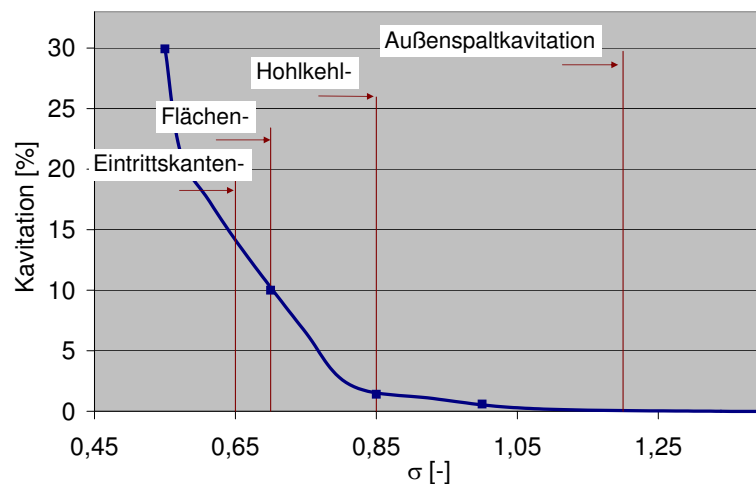


Abbildung 3.7: Kavitationsfläche als Funktion von  $\sigma$  im Betriebspunkt  $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$

In diesem Betriebspunkt kommen gleichzeitig verschiedene Kavitationsformen vor, die über den größten Teil der Schaufellänge verteilt sind.

Daher kann in den Polardiagrammen keine klare Zuordnung einzelner Signalmaxima zu den Kavitationstaschen erfolgen. In den Signalspektren können dennoch für alle  $\sigma$ -Werte deutliche Signalspitzen an der Drehfrequenz und ihren Harmonischen beobachtet werden.

Eine deutliche Modulation des Signals durch die Drehfrequenz und durch deren Harmonische konnte sogar bei  $\sigma = 1.20$  beobachtet werden, obwohl bei diesem  $\sigma$ -Wert keine Kavitationsereignisse mehr visuell registriert werden konnten.

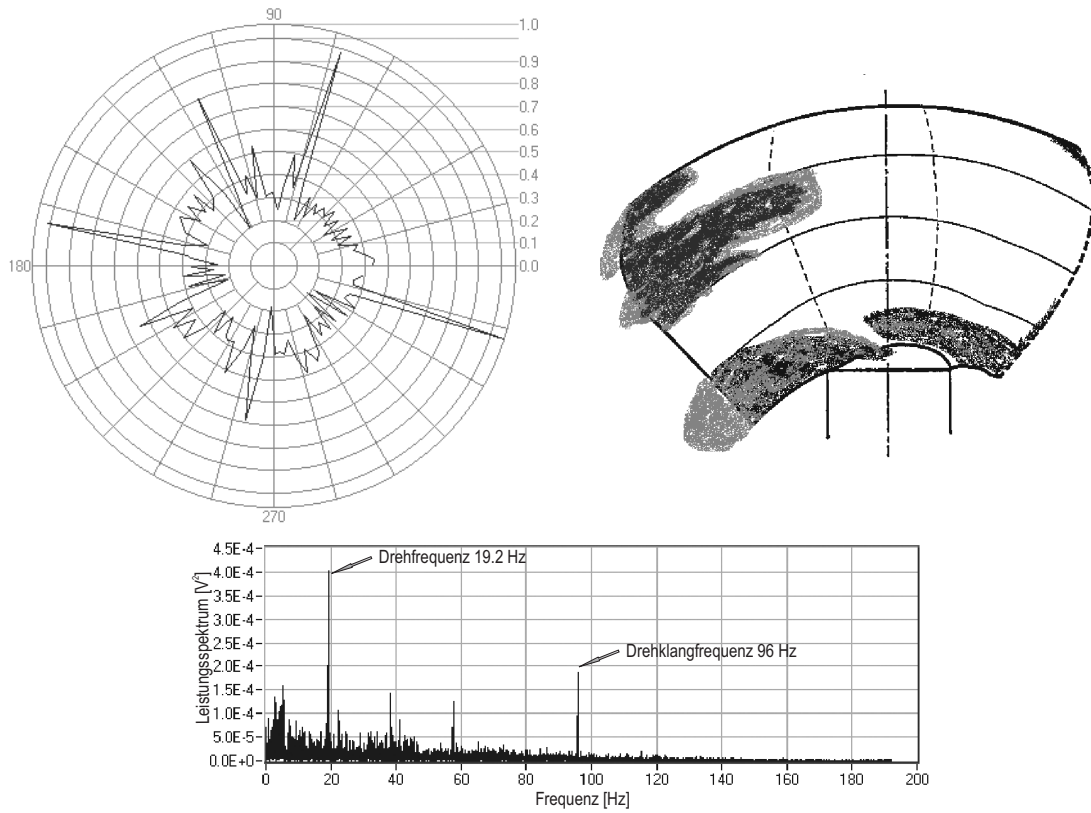


Abbildung 3.8: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 0.50$

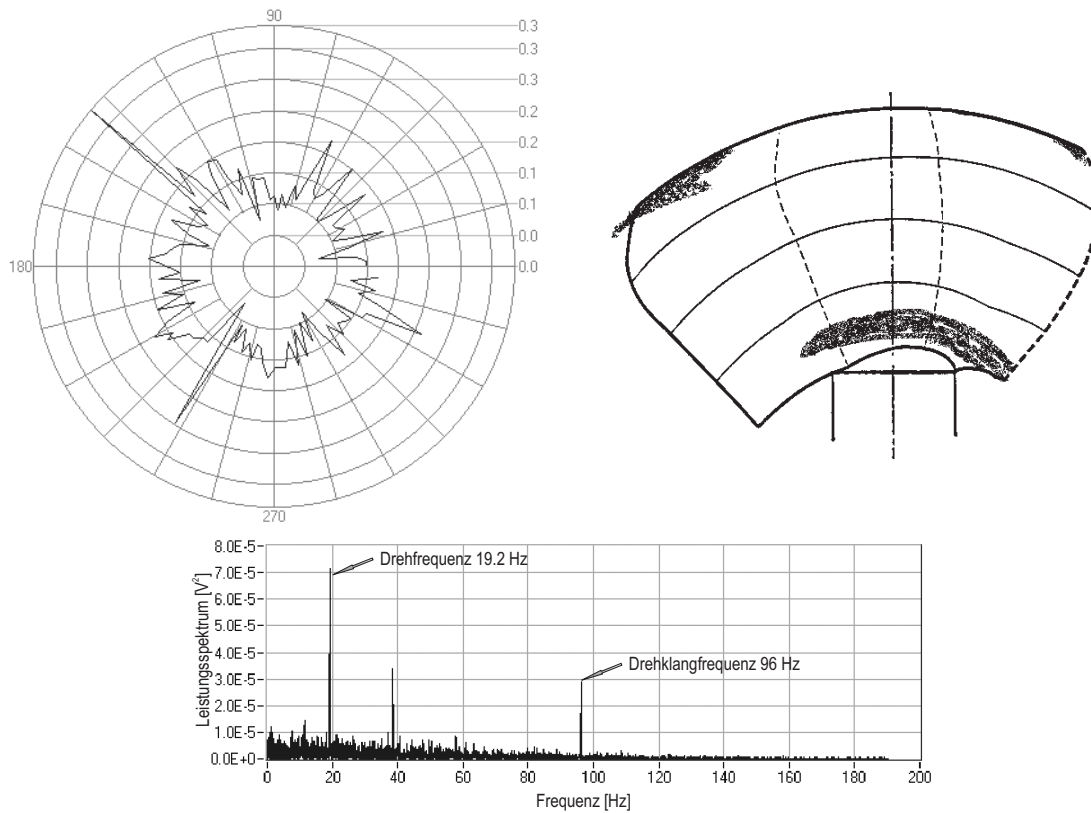


Abbildung 3.9: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 0.70$

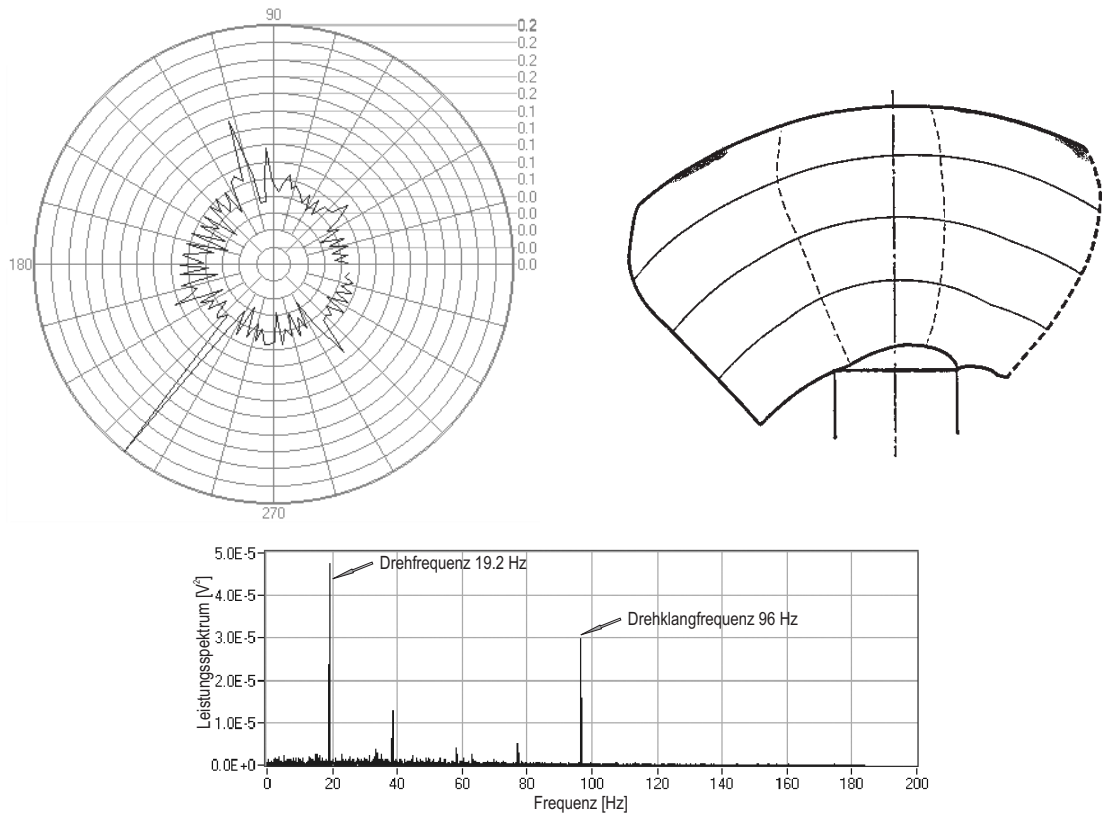


Abbildung 3.10: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 0.85$

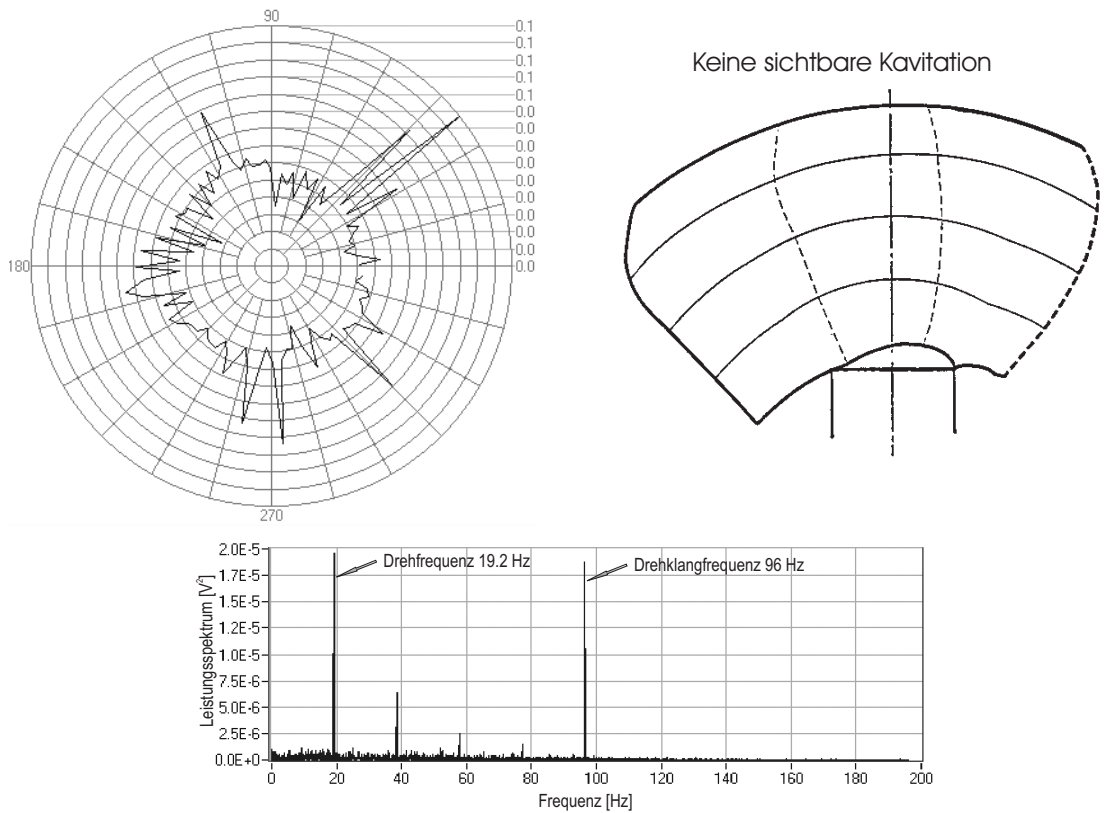


Abbildung 3.11: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 1.20$

## Verteilung der Kavitation bei Volllast, Kavitationsform 2

Auch im Betriebspunkt  $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$  und  $\varphi = 31^\circ$  liegt eine gemischte Kavitationsform vor, die sich hier aus Flächen-, Hohlkehl- und Außenspaltkavitation zusammensetzt, siehe Abb. 3.12.

Es wurden vier  $\sigma$ -Werte eingestellt:

- $\sigma=0.5$ : Stark entwickelte Außenspalt-, und Hohlkehl- und Flächenkavitation; die Kavitation bedeckt über 50% der Schauffläche, starke Ablösungen,
- $\sigma=0.75$ : Starke Außenspalt- und Hohlkehlkavitation und Flächenkavitation bedeckt fast 20% der Schauffläche, Ablösungen,
- $\sigma=1.2$ : Schwache Außenspaltkavitation auf ca. 1% der Schauffläche,
- $\sigma=1.5$ : Keine sichtbare Kavitation.

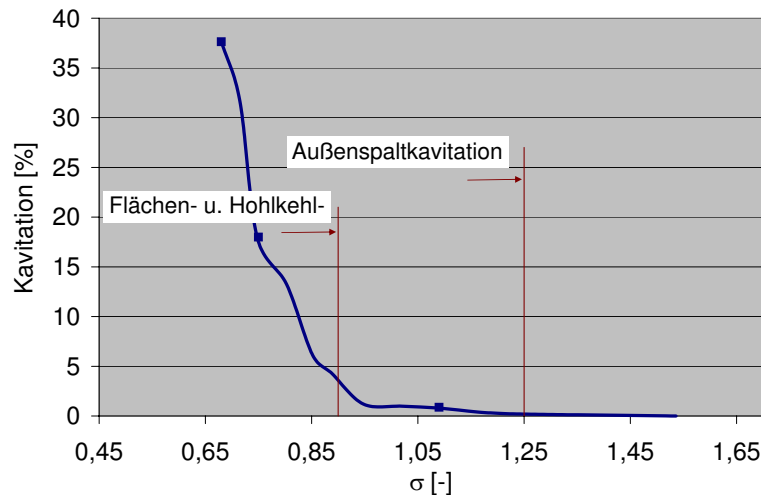
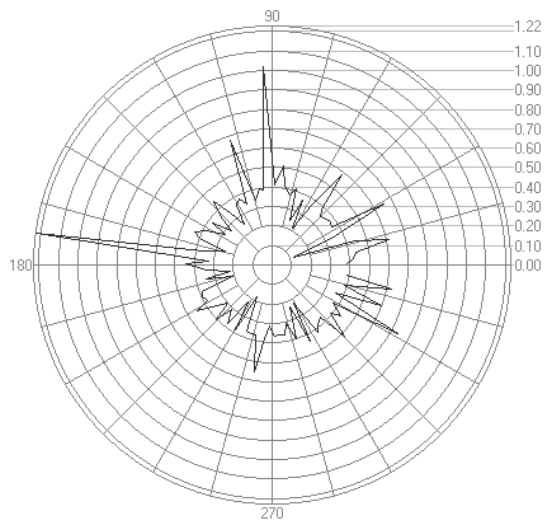


Abbildung 3.12: Kavitationsfläche als Funktion von  $\sigma$  im Betriebspunkt  $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$

Analog zum Betriebspunkt  $n_1' = 130 \text{min}^{-1}$  kommen auch hier Kavitationsformen an verschiedenen Stellen des Turbinenlaufrades gleichzeitig vor. Daher konnte die kavitationsbedingte Signalmodulation vor allem aus den Signalspektren abgeleitet werden.

Erwartungsgemäß war die Signalmodulation bei einer *beginnenden* und einer *mittelstark entwickelten* Kavitation deutlich stärker als bei einer stark entwickelten. Dennoch konnte auch bei der stark entwickelten Kavitation, wo sich die einzelnen Kavitationstaschen örtlich überlappen, immer noch eine deutliche Signalmodulation im Signalspektrum erkannt werden.



Stark entwickelte Kavitation. Das Kavitationsbild konnte nicht aufgenommen werden, da viele Gasblasen die Sicht erschwerten.

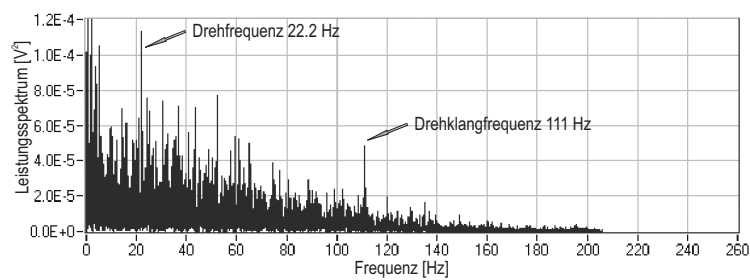


Abbildung 3.13: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 0.50$

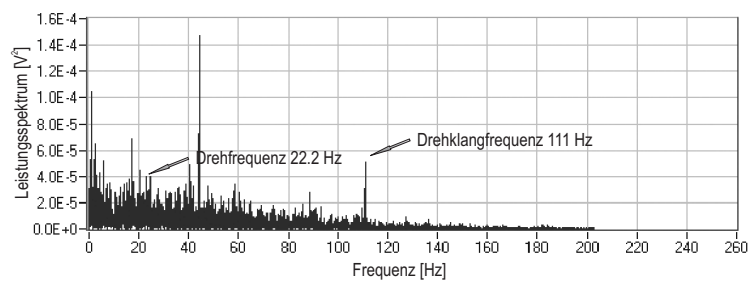
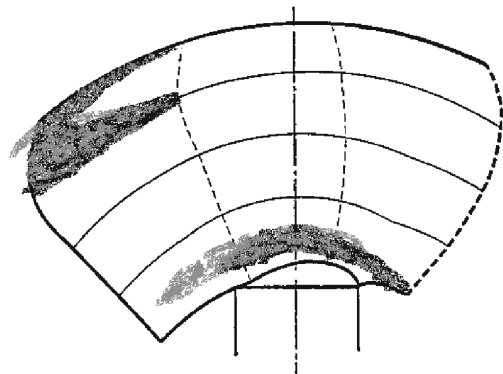
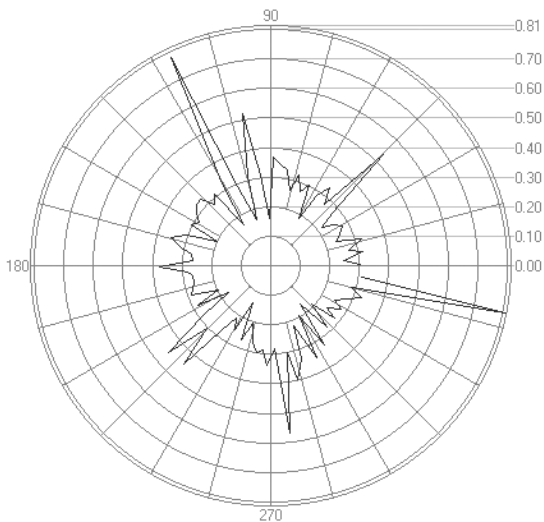


Abbildung 3.14: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 150 \text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 0.75$

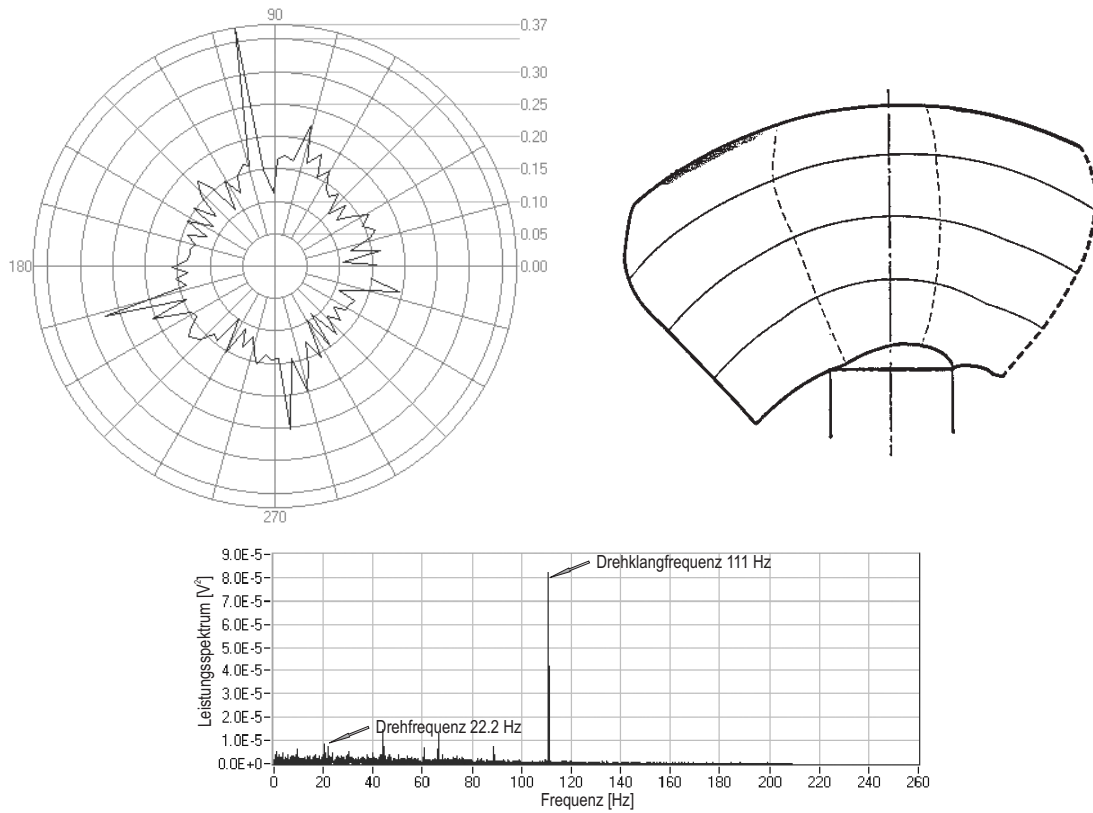


Abbildung 3.15: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 150 \text{ min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 1.20$

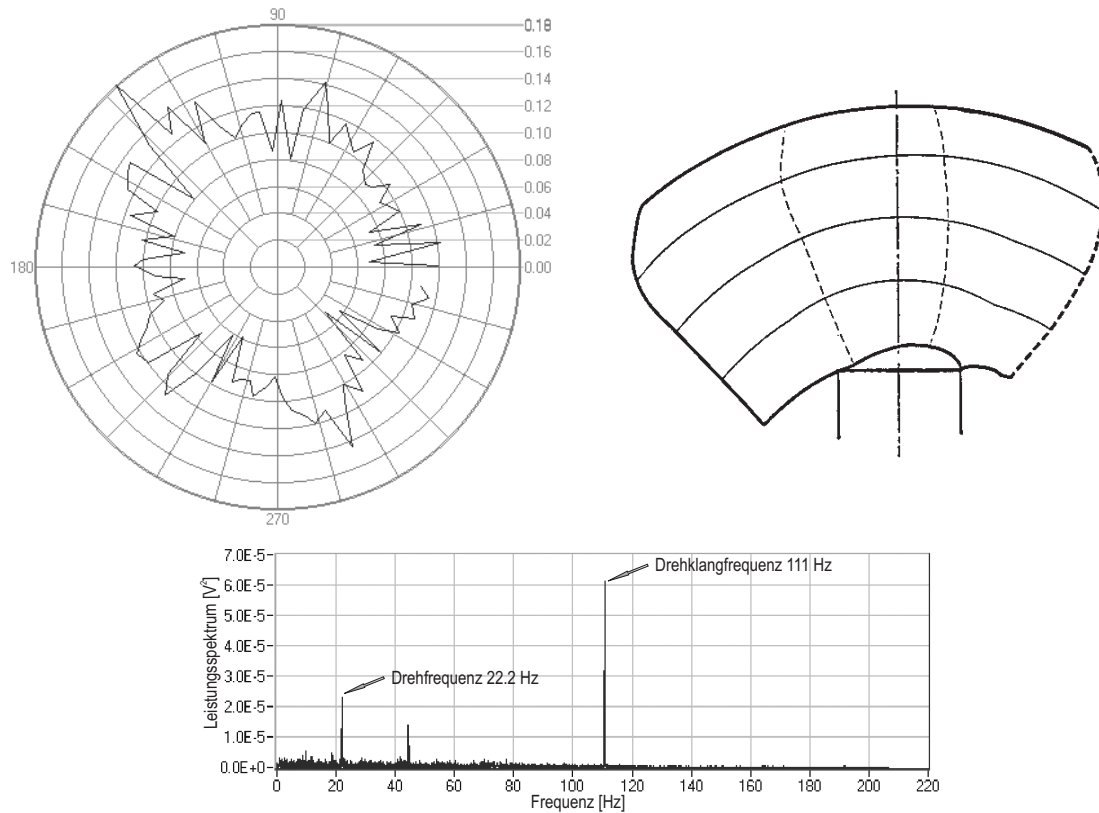


Abbildung 3.16: Polardiagramm, Spektrum und Skizze der Kavitation im Betriebspunkt  $n_1' = 150 \text{ min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$  bei  $\sigma = 1.50$



**Schlussfolgerungen zu den Modellmessungen bzgl. der Winkelauflösung**

Die durchgeführten Modellmessungen haben bestätigt, dass die Winkelauflösung eine Aussage über die Verteilung der Kavitationsstärke auf die einzelnen Laufschaufeln liefert.

In jedem der drei untersuchten Betriebspunkte konnten bei einer beginnenden und schwach entwickelten Kavitation die Signale von einzelnen Kavitationstaschen sowohl in den Polardiagrammen als auch in den Signalspektren deutlich erkannt werden. Auch bei einer stark entwickelten Kavitation konnte eine Signalmodulation im Signalspektrum erkannt werden, obwohl sich die einzelnen Kavitationstaschen räumlich überlappten.

### 3.1.3 Anlagenmessungen zur Winkelauflösung

Nachdem die Modellmessungen gezeigt haben, dass sich die Verteilung der Kavitation auf einzelnen Laufschaufeln mit Hilfe der Winkelauflösung gut darstellen lässt, wurden Anlagenmessungen in zwei Kraftwerken Roßhaupten und Neuötting durchgeführt.

#### Winkelauflösung in Roßhaupten

Die Messungen in Roßhaupten wurden bei zwei verschiedenen  $n_1'$ -Werten jeweils für eine Reihe von  $\varphi$ -Werten durchgeführt:  $n_1' = 146.2$  und  $113.6 \text{ min}^{-1}$ . Die Turbine besitzt sieben Laufschaufeln und läuft mit einer Drehzahl von  $200 \text{ min}^{-1}$ ; die Laufraddrehfrequenz und die Frequenz des Schaufeldrehklangs liegen demnach bei  $3.3 \text{ Hz}$  und  $23.3 \text{ Hz}$ .

Die Maschinenöffnung konnte betriebsbedingt nur bei  $n_1' = 113.6 \text{ min}^{-1}$  ausreichend variiert werden. Abb. 3.17 zeigt die Lage der Messpunkte im Kennfeld.

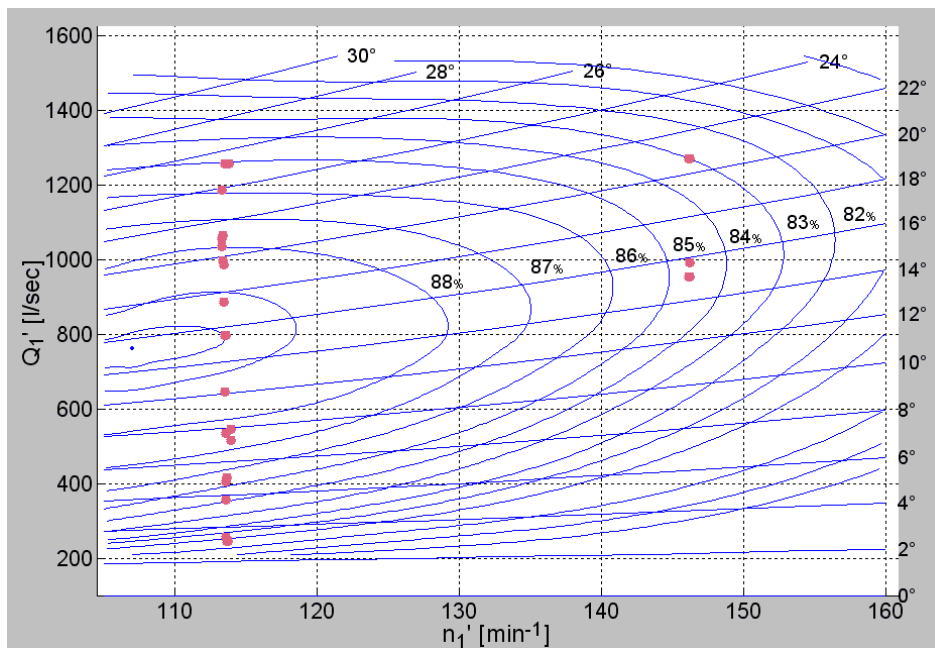


Abbildung 3.17: In Roßhaupten untersuchte Betriebspunkte

Das Kavitationssignal wurde an zwei Positionen an der Innenwand des Wasserführungsschildes erfasst, siehe Turbinenskizze in Abb. 3.18 auf S. 77. Diese lagen auf demselben Radius, aber an unterschiedlichen Umfangspositionen.

Da eine zusätzliche Lackbeschädigung vermieden werden musste, wurde der bereits in der Position A installierte Sensor verwendet. In der Position B wurde ein weiterer Sensor auf dem Lack positioniert. Die Aufnahmen ohne Lack waren erwartungsgemäß besser. Daher werden nur diese weiter dargestellt.

In den meisten Betriebspunkten wurden Daten bei zwei verschiedenen Filtereinstellungen aufgenommen:  $100\text{kHz} - 1.2\text{MHz}$  und  $400\text{kHz} - 1.2\text{MHz}$ . Die beiden Filtereinstellungen waren im Bezug auf die Stärke der Signalmodulation nahezu gleichwertig. In diesem Kapitel werden nur Aufnahmen im Frequenzbereich  $100\text{kHz} - 1.2\text{MHz}$  dargestellt.

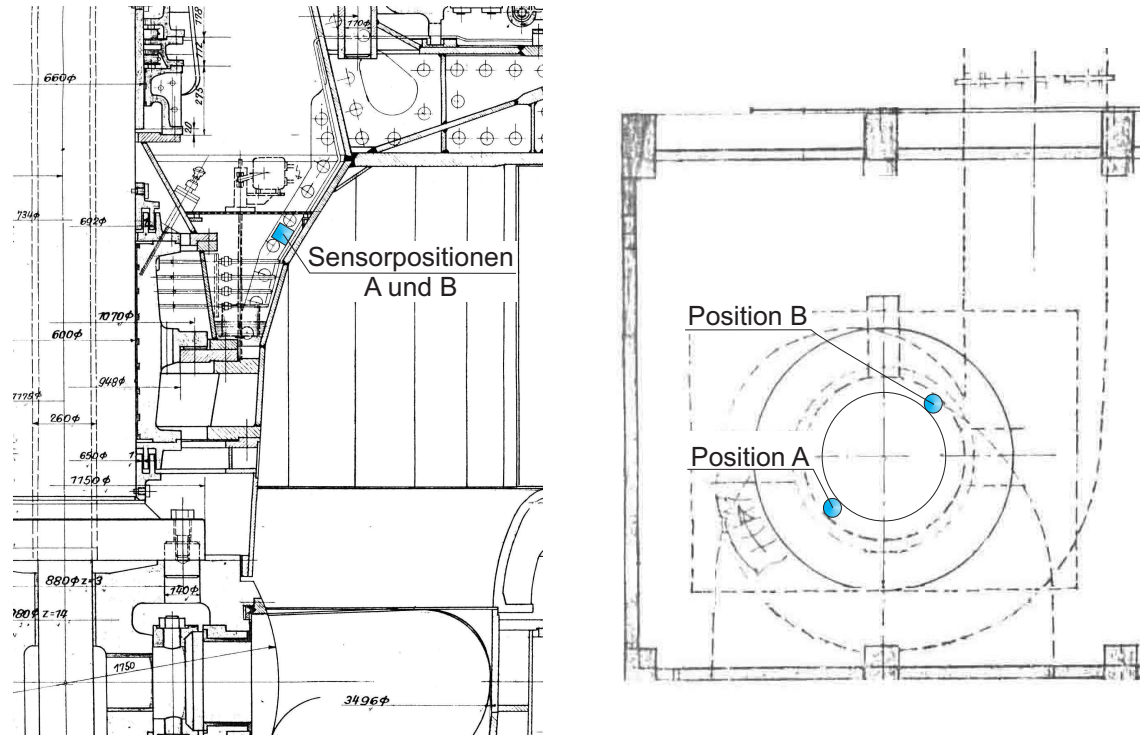


Abbildung 3.18: Sensorpositionen in Roßhaupten

Das *Kavitationsverhalten der Turbine* wurde aus Kavitations-Modellmessungen des Turbinenherstellers abgeleitet. Aus Abb. 3.19 auf S. 78 kann entnommen werden, welche Kavitationsformen wie stark in den einzelnen Betriebspunkten auftreten, siehe Tab. 3.1.

In den Betriebspunkten bei  $n_1' = 114\text{min}^{-1}$  ändert sich mit steigendem  $Q_1'$  die Art und die Stärke der Kavitation deutlich:<sup>6</sup>

- Bei dem mittleren  $Q_1'$  tritt im Messpunkt 9 eine schwache Außenspalt- und Hohlkehlkavitation auf,
- Bei steigendem  $Q_1'$  kommt eine ausgeprägte Eintrittskantenkavitation hinzu, die im Punkt 6 mit 15% der Schaufelfläche dominiert,

<sup>6</sup>Für kleine  $Q_1'$ -Werte liegen in den Messpunkten 11 und 14 keine Erkenntnisse über das Kavitationsverhalten der Turbine vor.

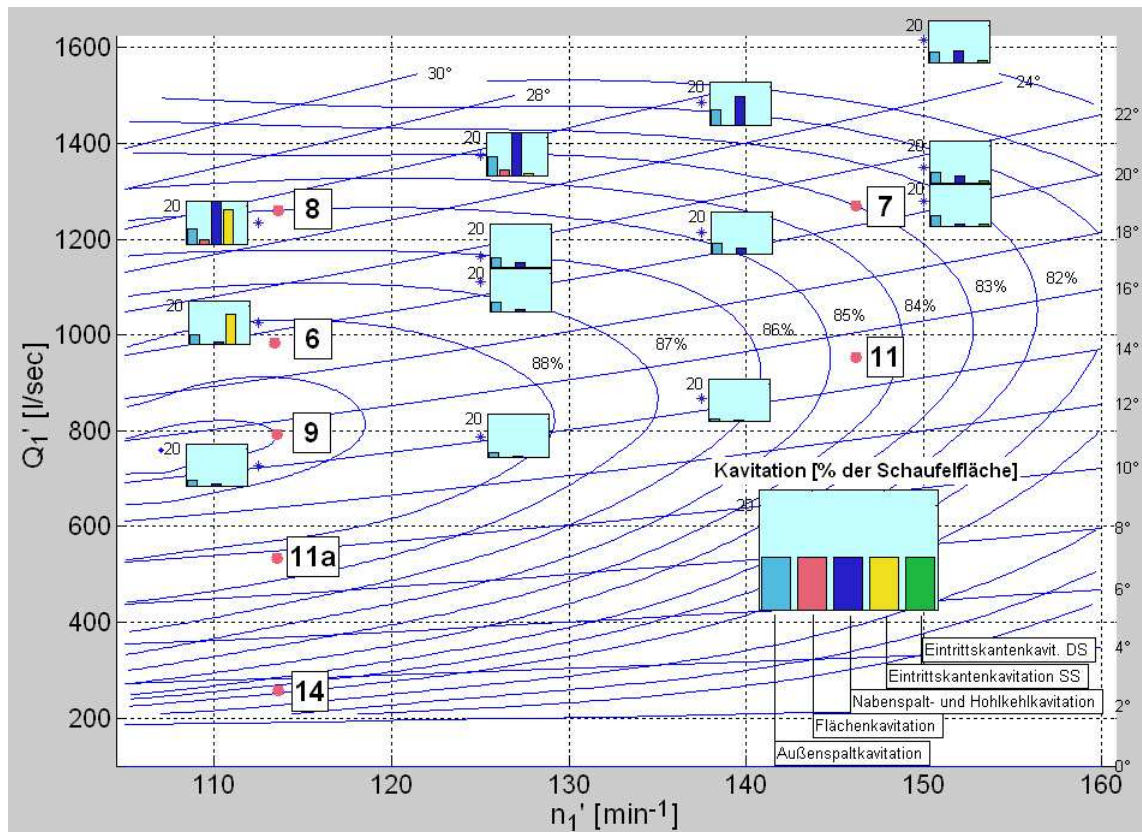


Abbildung 3.19: In Roßhaupten zur Messung bzgl. der Winkelauflösung eingestellte Betriebspunkte und Verteilung einzelner Kavitationsformen über dem Kennfeld

- Bei großen  $Q_1'$ -Werten im Messpunkt 8 tritt eine stark entwickelte Kavitation auf, die aus Nabenspalt-, Eintrittskanten-, Außenspalt- und Flächenkavitation besteht und mehr als 50% der Schaufelfläche überdeckt.

Im Messpunkt 7 bei  $n_1' = 146 \text{ min}^{-1}$  treten Außenspalt-, Nabenspaltkavitation und eine schwache druckseitige Eintrittskantenkavitation auf. Für den Betriebspunkt 11 kann aus der in Abb. 3.19 dargestellten Kavitationsverteilung extrapoliert werden, dass dort eine schwache Außenspalt-, Nabenspalt- und Hohlkehlkavitation auftritt.

Die *Ergebnisse der Anlagenmessung* sind in den Polardiagrammen und Signalspektren in den Abb. 3.20 – 3.23 auf S. 80 – 81 dargestellt. Für die Betriebspunkte, in welchen das Kavitationsverhalten bekannt ist, sind zusätzlich Kavitationssskizzen beigelegt.

Bei einer schwachen bis mittelstarken Kavitation, siehe Betriebspunkte 14, 11a, 9, 11 und 7, konnte die Modulation des Kavitationssignals über dem Wellenwinkel sowohl in den Polardiagrammen als auch in den Signalspektren deutlich erkannt werden.

Bei einer starken Kavitation überlappen sich in Betriebspunkten 6 und 8 die einzelnen Kavitationstaschen örtlich, daher ist die Signalmodulation über dem Drehwinkel

Tabelle 3.1: Kavitationsverhalten in Roßhaupten in ausgewählten Betriebspunkten

Meßpunkt	$n_1'$ [ $min^{-1}$ ]	$Q_1'$ [ $l/s$ ]	Kavitationsformen					$\Sigma_{Kav.}$
			AK	FK	NSK+HK	EK SS	EK DS	
								[% der Schauffelfläche]
Messung August 2003								
14	113.6	256	**	**	**	**	**	**
11a		533	**	**	**	**	**	**
9		793	2.7	–	0.9	–	–	3.6
6		982	4.5	–	0.8	15.4	–	20.7
8		1260	7.8	2.2	22.7	18.4	–	51.1
Messung März 2003								
11	146.2	954	**	**	**	**	**	**
7		1270	5.3	–	1.3	–	1.0	7.6

AK - Außenspaltkavitation

NSK - Nabenspaltkavitation

SS - Saugseite

FK - Flächenkavitation

EK - Eintrittskantenkavitation

DS - Druckseite

HK-Hohlkehlkavitation

\*\* keine Angaben. Es liegen keine Erkenntnisse über die Art und Stärke der Kavitation vor.

wesentlich undeutlicher ausgeprägt.

Die Signalverteilungen über dem Drehwinkel sind in allen untersuchten Betriebspunkten durch eine starke Asymmetrie gekennzeichnet, die auf eine ungleiche Kavitationsbelastung der Schaufeln hinweist. In den Signalspektren führt dies zur Dominanz der Drehfrequenz anstatt des Drehklangs.

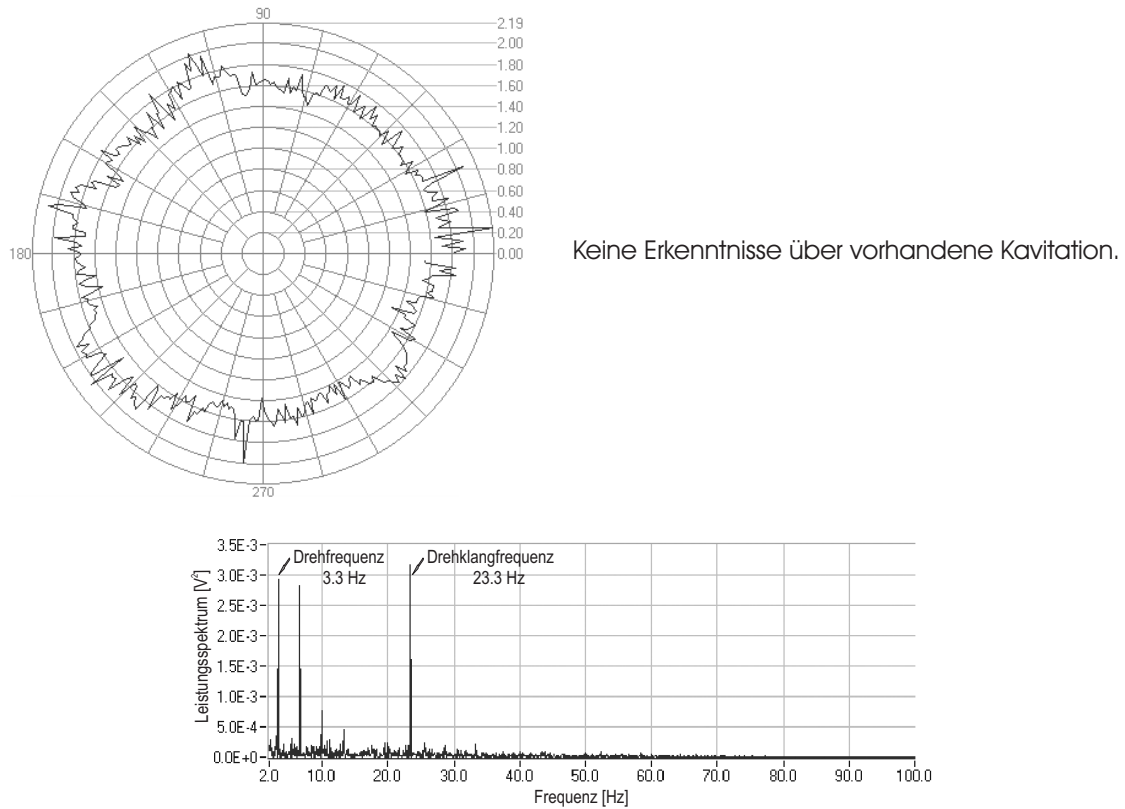


Abbildung 3.20: Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 14 in Roßhaupten

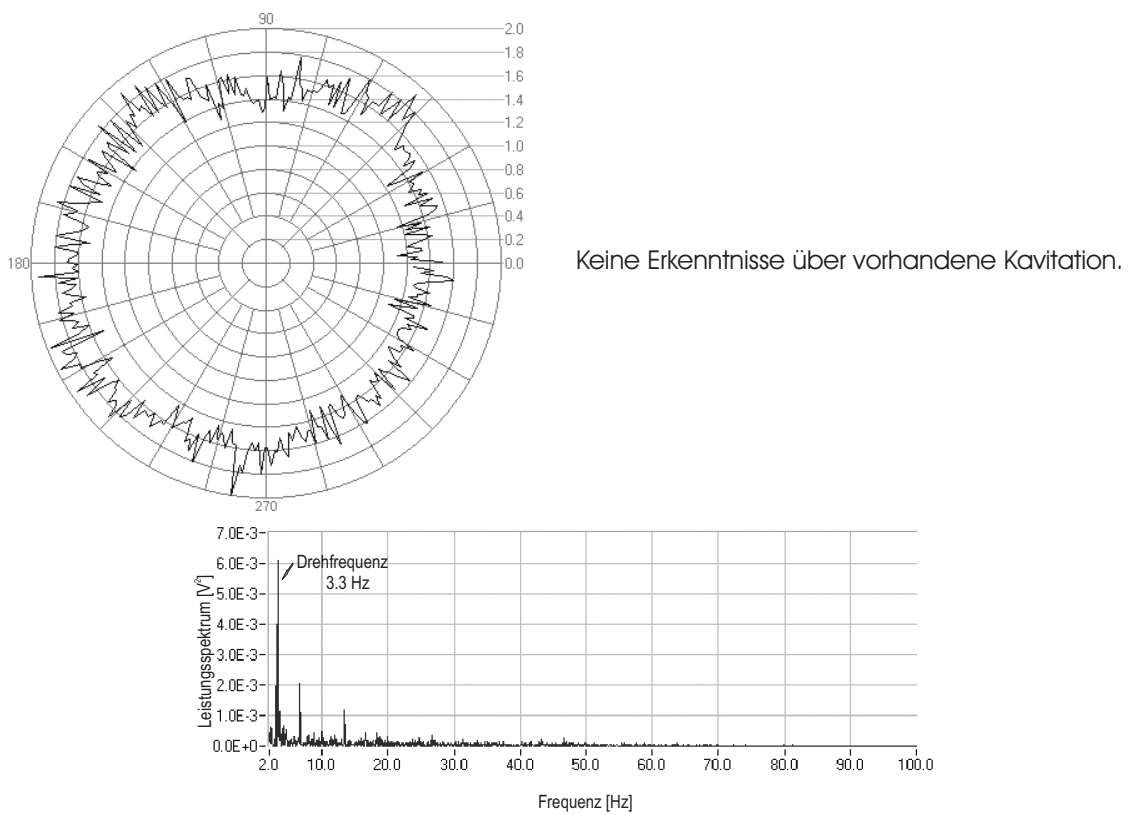


Abbildung 3.21: Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 11a in Roßhaupten

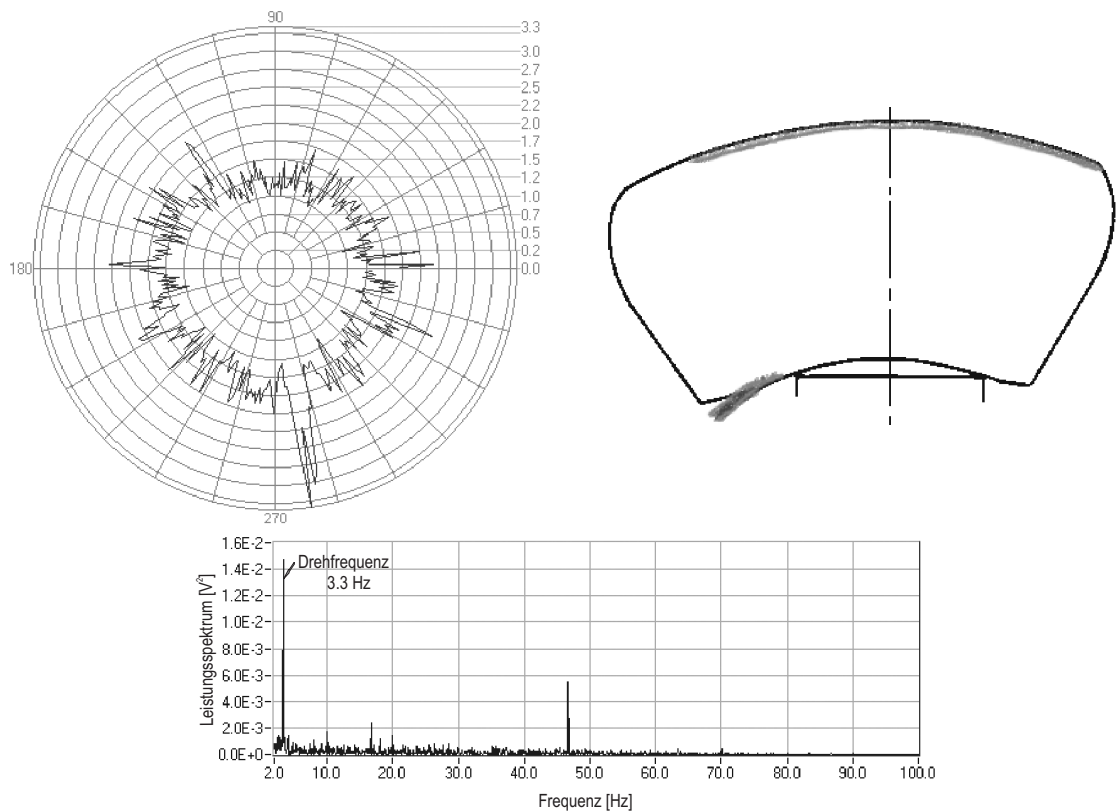


Abbildung 3.22: Polardiagramm, Signalspektrum und Skizze der Kavitation im Messpunkt 9 in Roßhaupten

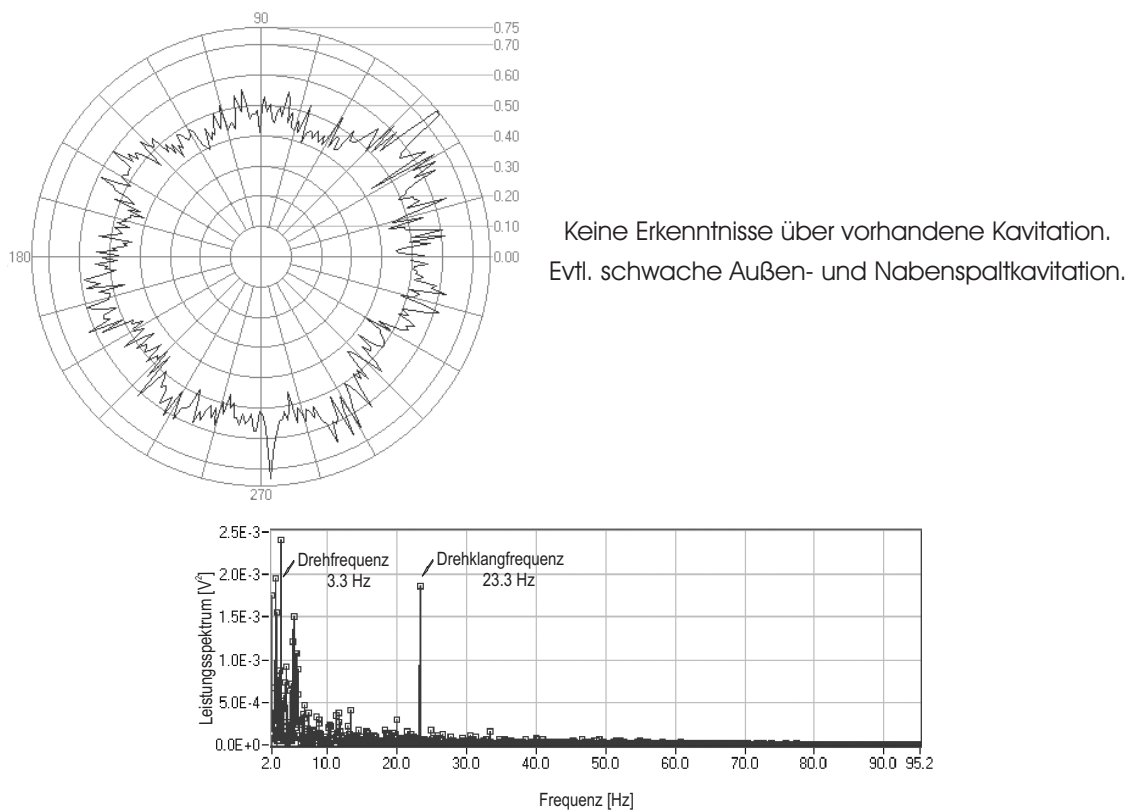


Abbildung 3.23: Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 11 in Roßhaupten

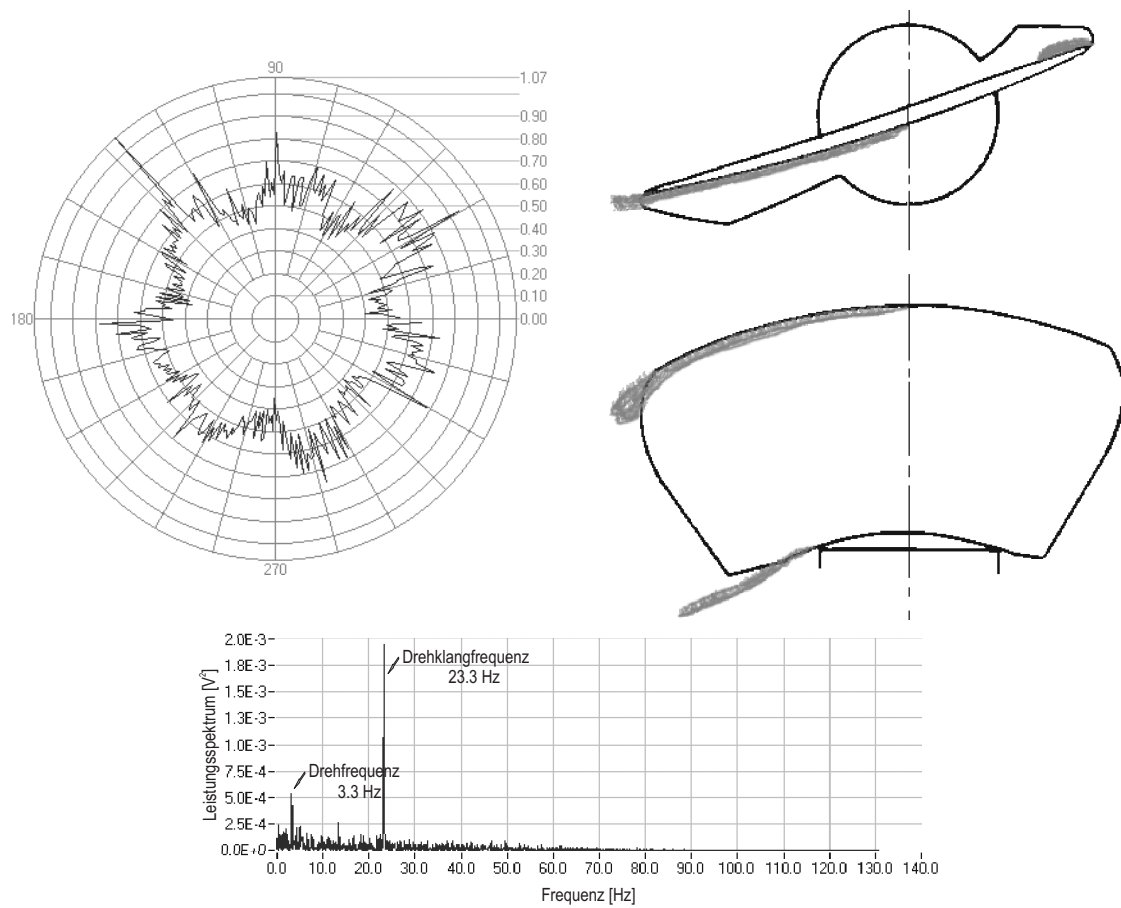


Abbildung 3.24: Polardiagramm, Signalspektrum und Skizze der Kavitation im Messpunkt 7 in Roßhaupten

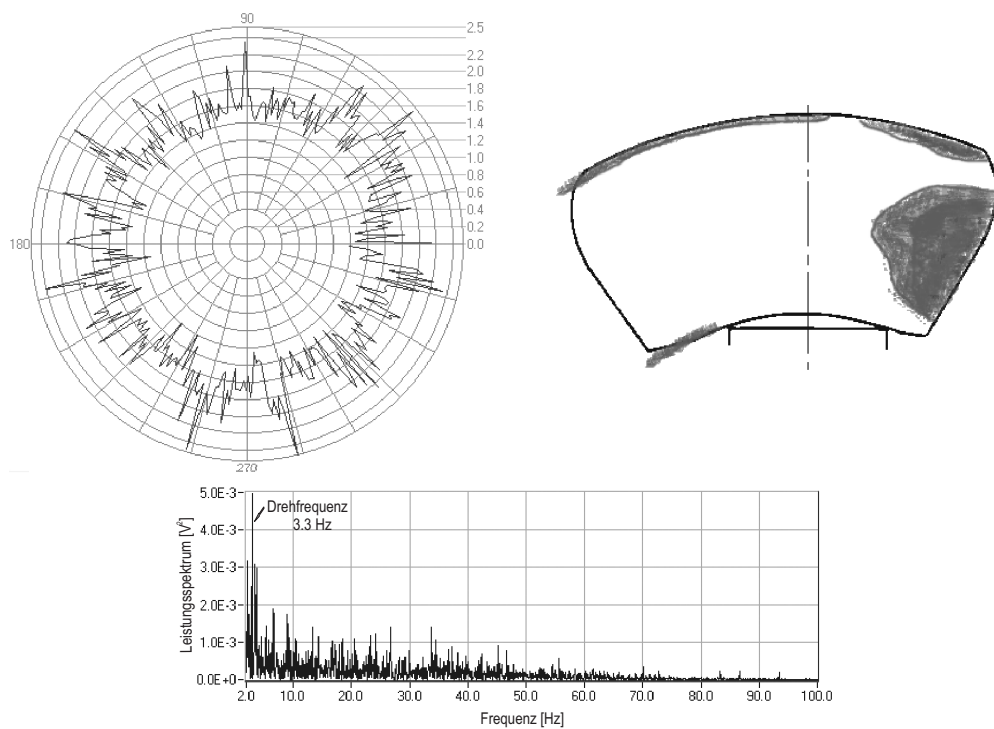


Abbildung 3.25: Polardiagramm, Signalspektrum und Skizze der Kavitation im Messpunkt 6 in Roßhaupten



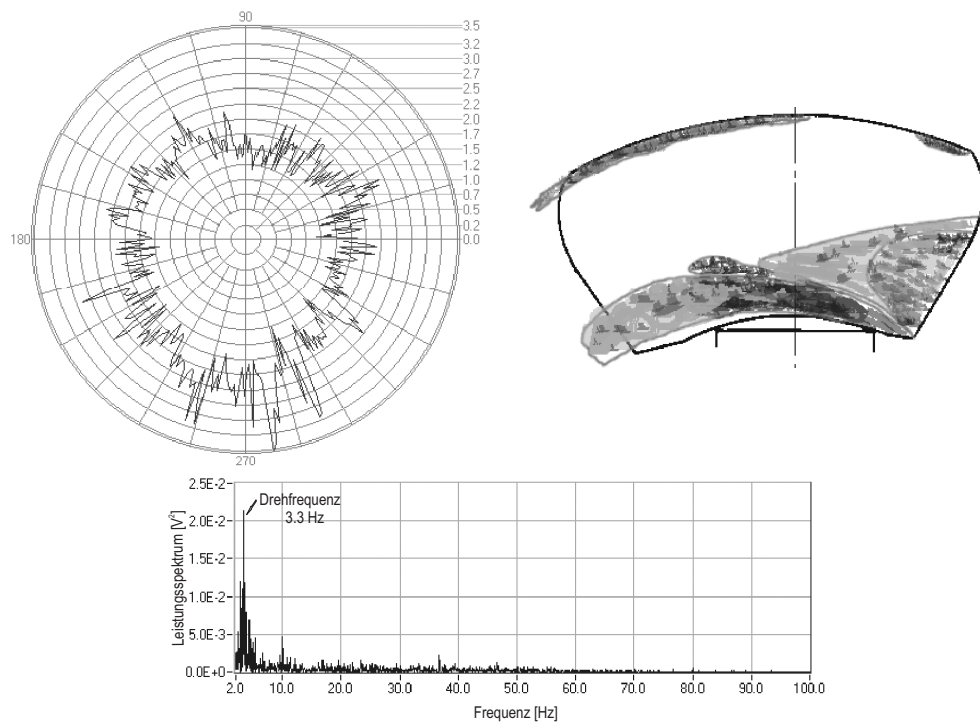


Abbildung 3.26: Polardiagramm, Signalspektrum und Skizze der Kavitation im Messpunkt 8 in Roßhaupten

### Winkelauflösung in Neuötting

Die Messungen bzgl. der Winkelauflösung wurden in Neuötting bei  $n_1' = 133 \dots 135 \text{ min}^{-1}$  für verschiedene Laufradöffnungen  $\varphi$  durchgeführt, siehe Turbinenkennfeld in Abb. 3.27. Die Turbine besitzt vier Laufschaufeln und läuft mit einer Drehzahl von  $68.3 \text{ min}^{-1}$ ; die Laufraddrehfrequenz und die Frequenz des Schau-feldrehklangs liegen demnach bei  $1.14 \text{ Hz}$  und  $4.55 \text{ Hz}$ .

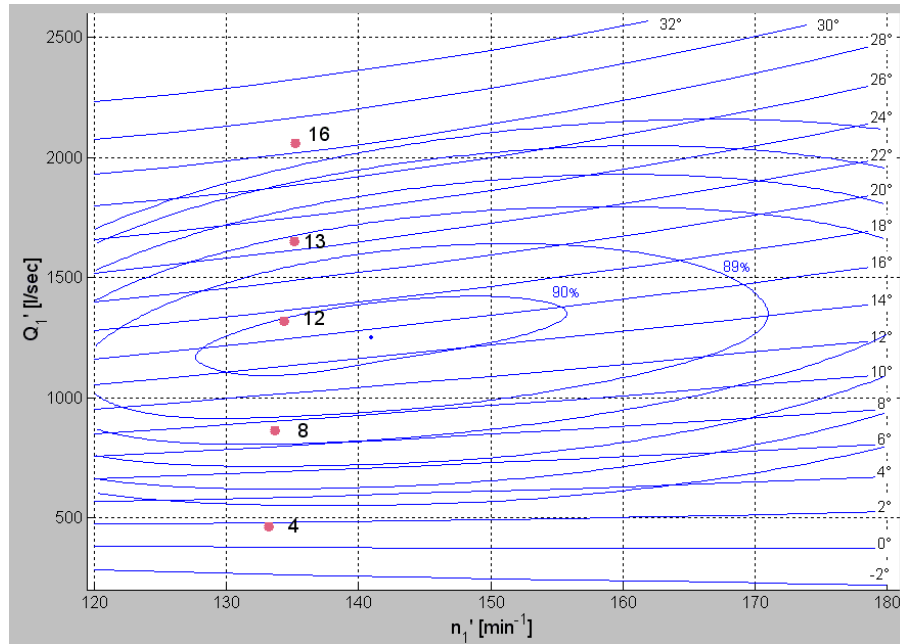


Abbildung 3.27: In Neuötting untersuchte Betriebspunkte

Das Kavitationssignal wurde an zwei Positionen B und D an der Innenwand des Wasserführungsschildes erfasst, siehe Turbinenskizze in Abb. 3.28 auf S. 85. Die beiden Positionen lagen auf dem selben Radius, aber an unterschiedlichen Umfangspositionen um  $180^\circ$  zueinander versetzt.

Analog zu Roßhaupten wurden hier die Filtereinstellungen  $100 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$  und  $400 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$  verglichen.

Sowohl die Filtereinstellungen als auch die beiden Sensorpositionen haben sich als nahezu gleichwertig erwiesen. Daher werden nachfolgend nur die Messungen in der Position D und im Frequenzbereich  $400 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$  dargestellt.

In Abb. 3.29 – 3.33 auf S. 85 – 87 sind die Messergebnisse in den Polardiagrammen und Spektren dargestellt. Für dieses Kraftwerk liegen keine Modellversuche bezüglich des Kavitationsverhaltens vor.

Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass in diesem Kraftwerk die Auflösung einzelner Kavitationstaschen in den Polardiagrammen sowie in den Signalspektren wesentlich deutlicher beobachtet war als in Roßhaupten. Diese Turbine hat nur vier

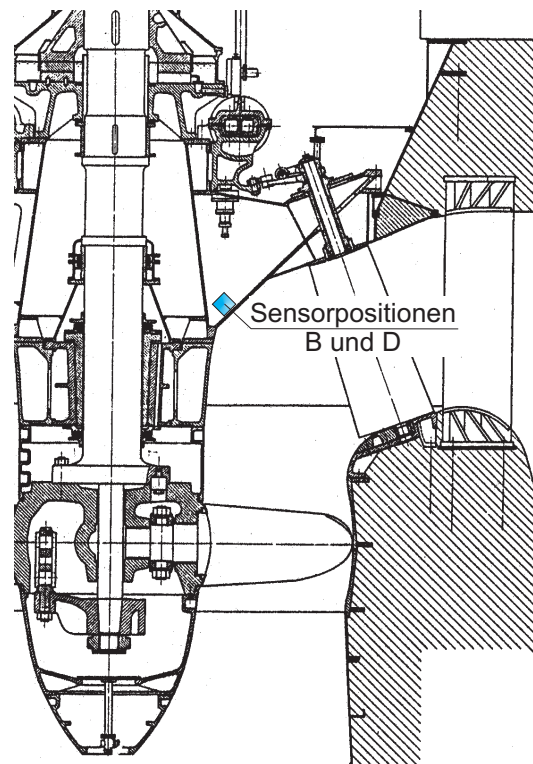


Abbildung 3.28: Sensorpositionen in Neuötting

Laufschaukeln. Die Signalmodulation war bei kleinen bis mittelgroßen  $Q'_1$ -Werten in den Messpunkten 4, 8, 12 und 13 am deutlichsten ausgeprägt.

So ist z.B. im Betriebspunkt 8, wo nur eine mäßig ausgeprägte Kavitation vorliegt, der Durchgang der vier Kavitationstaschen im Polardiagramm völlig klar zu erkennen. In allen Frequenzspektren stellt der Drehklang den dominierenden Frequenzanteil.

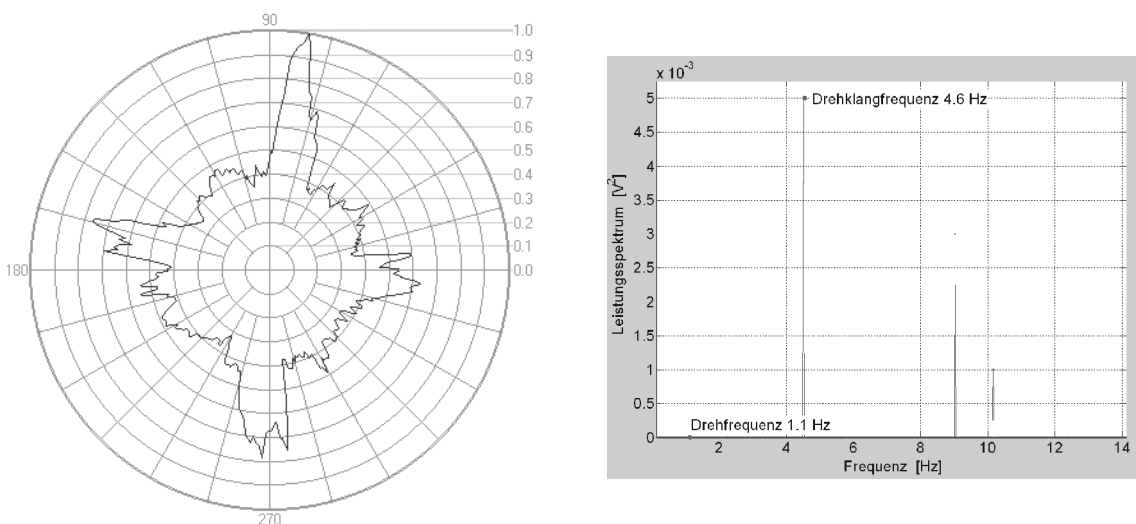


Abbildung 3.29: Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 4 in Neuötting

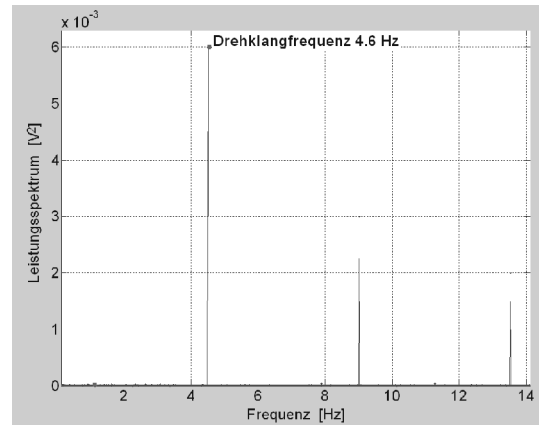
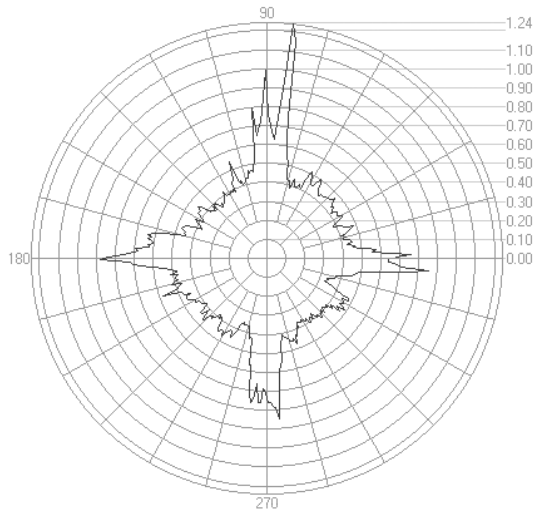


Abbildung 3.30: Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 8 in Neuötting

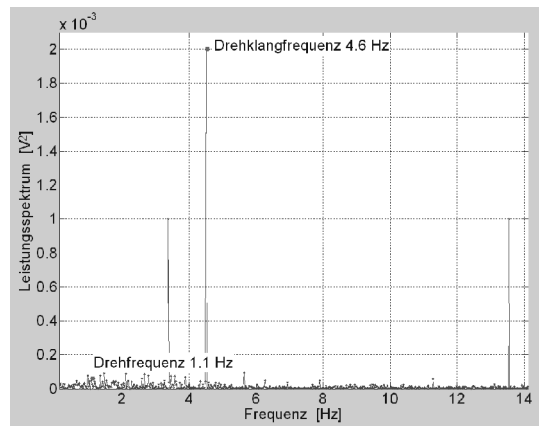
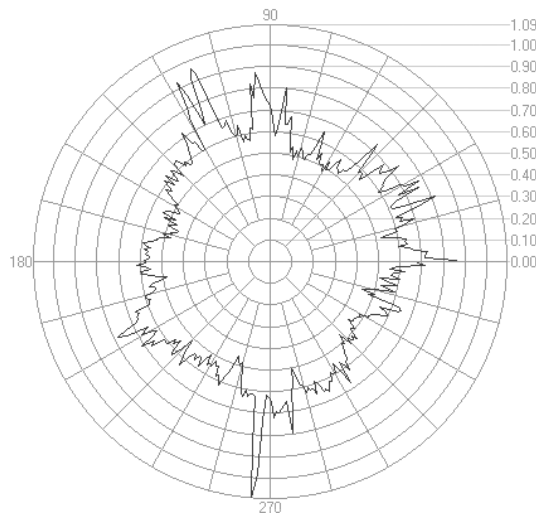


Abbildung 3.31: Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 12 in Neuötting

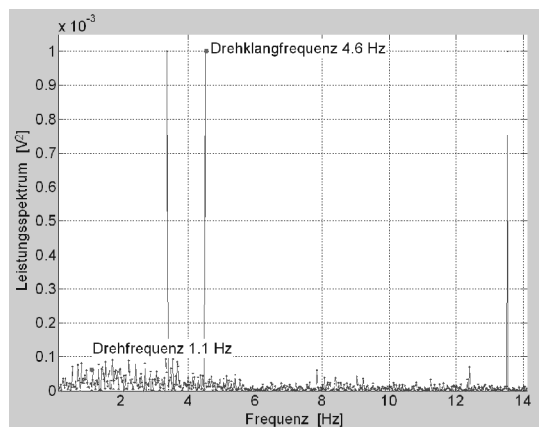
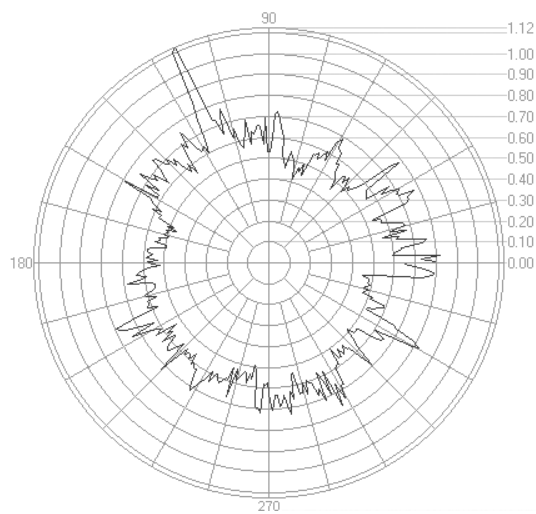


Abbildung 3.32: Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 13 in Neuötting

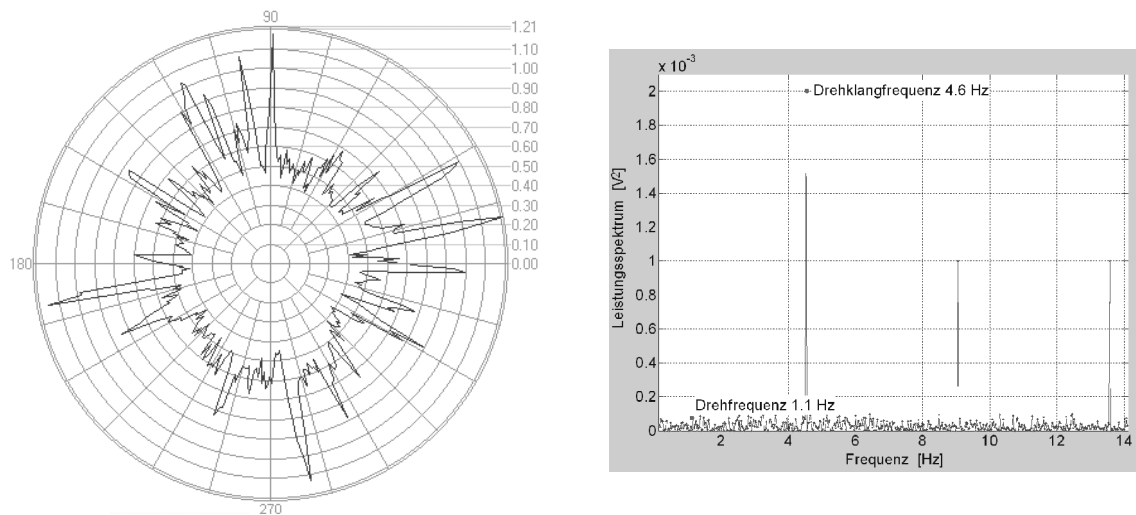


Abbildung 3.33: Polardiagramm und Signalspektrum im Messpunkt 16 in Neuötting

### 3.1.4 Schlussfolgerungen zur Winkelauflösung

Das Verfahren der Visualisierung der Kavitationsverteilung hat sich sowohl im Modell- als auch in den Anlagen gut bewerteter. Es liefert eine Aussage über die Intensität des Kavitationsschalls, der von den umlaufenden Laufschaufeln ausgeht.

Somit ermöglicht es eine Differenzierung der an den Laufschaufeln anhaftenden Kavitation von anderen Kavitationsereignissen wie z.B. kavitierenden Wirbelzöpfen. Das Verfahren sollte deshalb bereits bei der Wahl der Sensorposition in der Anlage eingesetzt werden, um eine optimale Sensorposition zu bestimmen.

Fernerhin kann es zur Erkennung einer ungleichmäßig auf die Laufschaufeln verteilten Kavitation eingesetzt werden.

### 3.2 Modulierter RMS-Wert als Maß der an Laufschaufeln anhaftenden Kavitation

Die im Kap. 3.1 beschriebenen Messungen zur Visualisierung der Korrelation des momentanen RMS-Wertes mit dem Turbinendrehwinkel haben gezeigt, dass diese Messtechnik geeignet ist, mit dem Laufrad umlaufende und an den Laufschaufeln anhaftende Kavitationstaschen zu detektieren. Diese können in der spektralen Signalcharakteristik in Form von Signalspitzen an der Turbinendrehfrequenz, an deren Harmonischen und an der Schaufelpassierfrequenz erkannt werden.

In diesem Kapitel wird erörtert, ob die Intensität des durch die Turbinendrehfrequenz bzw. durch deren Harmonischen modulierten RMS-Wertes als Maß der Kavitationsintensität verwendet werden sollte, weil dieser die Intensität der an Laufschaufeln anhaftenden Kavitation widerspiegelt, oder ob es besser ist, den gegenwärtig im AEM verwendeten *RMS*-Wert des Körperschalls  $> 350kHz$  zu verwenden.

Für diese Untersuchungen wurden zwei modulierte RMS-Werte definiert. Der Wert  $RMS_{Mod1}$  setzt sich aus den durch *die Turbinendrehfrequenz und durch deren Harmonischen* modulierten RMS-Werten zusammen und reicht bis zum vierten Vielfachen der Schaufelpassierfrequenz ein:

$$RMS_{Mod1} = \sum_{i=1}^{Z-1} RMS_{i \cdot f_{Tu}} + \sum_{j=1}^4 RMS_{j \cdot Z \cdot f_{Tu}}. \quad (3.1)$$

Dabei bedeuten:

$f_{Tu}$  : Turbinendrehfrequenz,

$i \cdot f_{Tu}$  :  $i$ -te Harmonische der Turbinendrehfrequenz,

$Z$  : Schaufelzahl,

$Z \cdot f_{Tu}$  : Schaufelpassierfrequenz.

Der Wert  $RMS_{Mod2}$  setzt sich aus den durch *die Schaufelpassierfrequenz und durch deren Harmonischen* modulierten RMS-Werten zusammen:<sup>7</sup>

$$RMS_{Mod2} = \sum_{j=1}^4 RMS_{j \cdot Z \cdot f_{Tu}} \quad (3.2)$$

Der Messumfang war aus zeitlichen Gründen auf Anlagenmessungen beschränkt.

---

<sup>7</sup>Der Unterschied zwischen den zwei modulierten Werten liegt darin, dass  $RMS_{Mod2}$  die Signalintensität der Turbinendrehfrequenz und deren Harmonischen, die kleiner als Schaufelpassierfrequenz sind, nicht berücksichtigt.

## Anlagenmessungen

Die Anlagenmessungen wurden in den Anlagen Roßhaupten und Neuötting durchgeführt. Entsprechend den Definitionen (3.1) und (3.2) waren  $RMS_{Mod1}$   $RMS_{Mod2}$  hier wie folgt definiert:

- Roßhaupten:<sup>8</sup>

$$RMS_{Mod1} = RMS_{f_{Tu}} + RMS_{2f_{Tu}} + RMS_{3f_{Tu}} + RMS_{4f_{Tu}} + RMS_{5f_{Tu}} + RMS_{7f_{Tu}} + RMS_{14f_{Tu}} + RMS_{21f_{Tu}} + RMS_{28f_{Tu}} \quad (3.3)$$

$$RMS_{Mod2} = RMS_{7f_{Tu}} + RMS_{14f_{Tu}} + RMS_{21f_{Tu}} + RMS_{28f_{Tu}} \quad (3.4)$$

- Neuötting:<sup>9</sup>

$$RMS_{Mod1} = RMS_{f_{Tu}} + RMS_{2f_{Tu}} + RMS_{3f_{Tu}} + RMS_{4f_{Tu}} + RMS_{8f_{Tu}} + RMS_{16f_{Tu}} + RMS_{24f_{Tu}} \quad (3.5)$$

$$RMS_{Mod2} = RMS_{4f_{Tu}} + RMS_{8f_{Tu}} + RMS_{12f_{Tu}} + RMS_{16f_{Tu}} \quad (3.6)$$

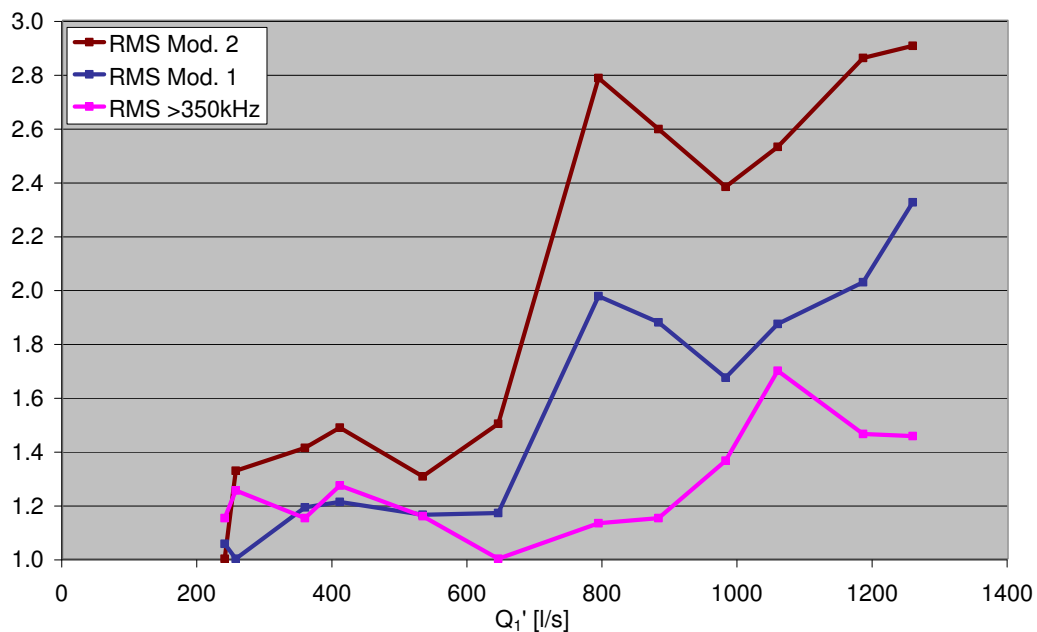


Abbildung 3.34: Verlauf des modulierten RMS-Wertes und des  $RMS_{>350kHz}$  über  $Q_1'$  im Kraftwerk Roßhaupten

In Abb. 3.34 und 3.35 ist der Verlauf des  $RMS_{Mod1}$ -,  $RMS_{Mod2}$ - und des  $RMS_{>350kHz}$ -Wertes über  $Q_1'$  bei  $n_1' = 114 \text{ min}^{-1}$  dargestellt. Um einen direkten

<sup>8</sup>Die Turbine hat sieben Laufschaufeln.

<sup>9</sup>Die Turbine hat vier Laufschaufeln.

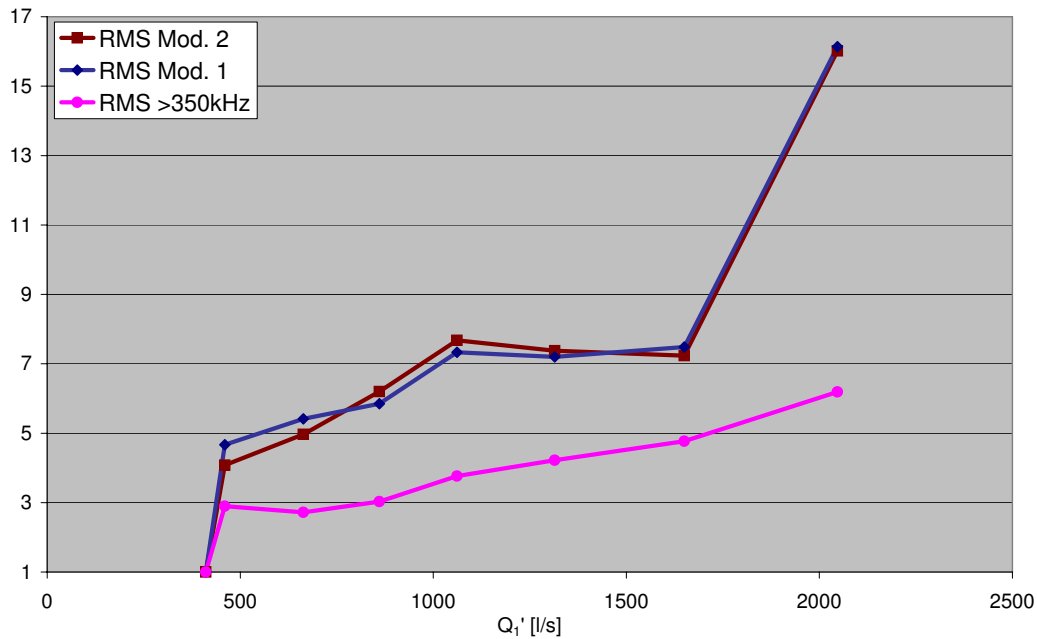


Abbildung 3.35: Verlauf des modulierten RMS-Wertes und des  $RMS_{>350kHz}$  über  $Q_1'$  im Kraftwerk Neuötting

Vergleich der Werte zu ermöglichen, wurden diese auf deren jeweiligen minimalen Wert normiert.

In den beiden Kraftwerken konnte beobachtet werden, dass sowohl  $RMS_{Mod1}$  als auch  $RMS_{Mod2}$  deutlich empfindlicher auf eine Veränderung von  $Q_1'$  und somit auf die Veränderung der Kavitationsintensität reagieren als der Wert  $RMS_{>350kHz}$ .

### Schlussfolgerungen zur Verwendung des modulierten RMS-Wertes als Maß der Kavitationsintensität

Der durch die Turbinendrehfrequenz- bzw. durch deren Harmonischen modulierte RMS-Wert zeigte sich generell für das Kavitationsmonitoring geeignet. In den Anlagenmessungen ließ sich ein deutlicher Vorteil gegenüber der Verwendung der Körperschallintensität im Frequenzbereich  $350kHz - 1MHz$  nachweisen.

Der Messumfang beinhaltet jedoch aus zeitlichen Gründen keine Modellmessungen. Diese Ergebnisse sollten daher im Modell zusätzlich verifiziert werden.

Gleichzeitig wird es vorgeschlagen, im AEM-Nachfolgemodell die derzeit verwendete Körperschallintensität im Frequenzbereich  $> 350kHz - 1MHz$  durch den modulierten RMS-Wert zu ergänzen. Die Aussagekraft des  $RMS_{Mod}$  soll in Prototypanlagen über längere Zeit geprüft werden.



### 3.3 Differenzierung einzelner Kavitationsformen anhand des an der Turbinenoberfläche erfassten Körperschalls

#### 3.3.1 Differenzierung von Kavitationsformen anhand der spektralen Zusammensetzung des Kavitationssignals

Bei den am FLM durchgeführten Untersuchungen der spektralen Zusammensetzung des Kavitationssignals wurde festgestellt, dass das Intensitätsverhältnis hoch- und niederfrequenter Anteile im Kavitationssignal im Zusammenhang mit der Kavitationsform steht.

#### Modellmessungen

Dieses Phänomen wurde in weiteren Modellmessungen genauer untersucht. Verglichen wurde die Körperschallintensität in zwei Frequenzbereichen für zwei Kavitationsformen in zwei verschiedenen Sensorpositionen bei allen einstellbaren  $\sigma$ -Werten:

- Frequenzbereiche:  $150\text{kHz} - 350\text{kHz}$  und  $350\text{kHz} - 1.2\text{MHz}$ ,
- Kavitationsformen:
  - Eintrittskantenkavitation im Betriebspunkt  $n'_1 = 100\text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ ,
  - Volllastkavitation im Betriebspunkt  $n'_1 = 130\text{min}^{-1}$ ,  $\varphi = 31^\circ$ ,
- Sensorpositionen: stromaufwärts am Deckel und stromabwärts am Turbinenkonus.

Aus messtechnischen Gründen wurde nicht unmittelbar das Verhältnis  $RMS_{150-350\text{kHz}}/RMS_{>350\text{kHz}}$ , sondern das Verhältnis

$$\Pi = \frac{RMS_{>150\text{kHz}}}{RMS_{>350\text{kHz}}} \quad (3.7)$$

ermittelt. Diese unterscheiden sich jedoch nur um eine Konstante mit dem Wert von Eins.

$$\Pi = \frac{RMS_{>150\text{kHz}}}{RMS_{>350\text{kHz}}} = \frac{RMS_{150-350\text{kHz}} + RMS_{>350\text{kHz}}}{RMS_{>350\text{kHz}}} = \frac{RMS_{150-350\text{kHz}}}{RMS_{>350\text{kHz}}} + 1 \quad (3.8)$$

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abb. 3.36 und 3.37 auf S. 92 dargestellt.

Daraus ist ersichtlich, dass in den beiden Sensorpositionen das Verhältnis  $\Pi$  für die Eintrittskantenkavitation stets unter dem Wert 2 liegt. Dies bestätigt, dass die

Intensität des von der Eintrittskantenkavitation hervorgerufenen Schalls im Frequenzbereich  $350\text{kHz} - 1\text{MHz}$  stärker vertreten ist als im Bereich  $150\text{kHz} - 350\text{kHz}$ .

Für die Volllastkavitation ist dieses Verhältnis deutlich größer als zwei: Hier ist der Kavitationsschall im unteren Frequenzbereich  $150\text{kHz} - 350\text{kHz}$  stärker als im Bereich  $350\text{kHz} - 1\text{MHz}$ .

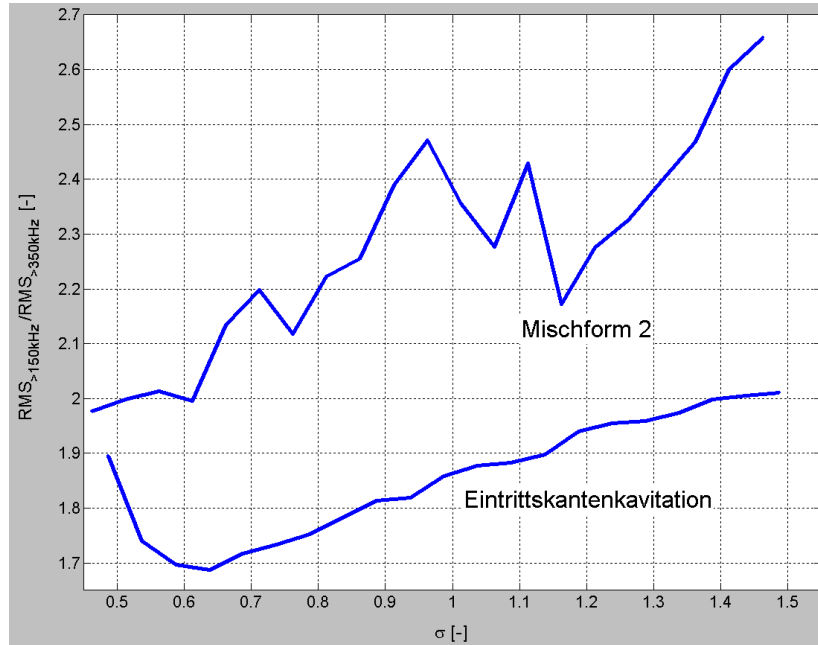


Abbildung 3.36:  $\Pi(\sigma)$  für Eintrittskantenkavitation und Mischform 2 der Volllastkavitation, Aufnahmen am Deckel

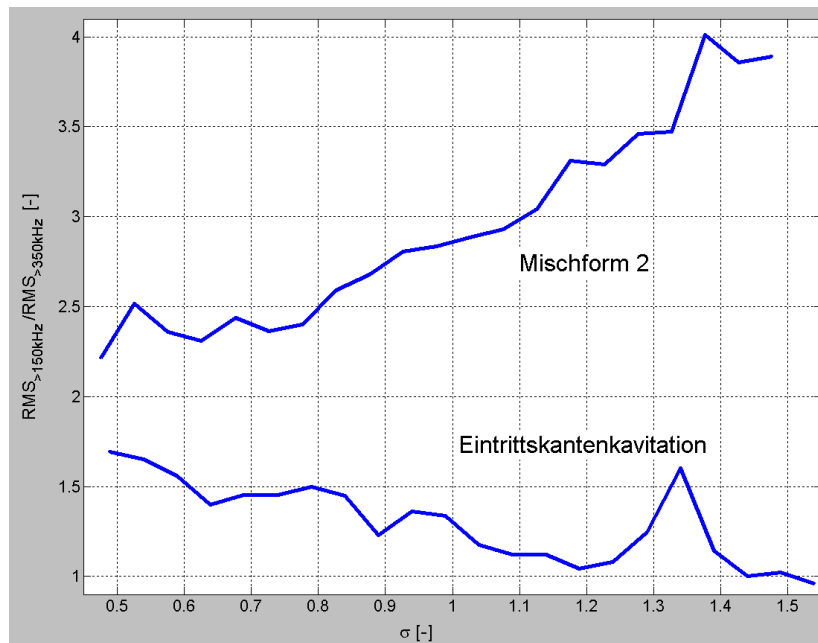


Abbildung 3.37:  $\Pi(\sigma)$  für Eintrittskantenkavitation und Mischform 2 der Volllastkavitation, Aufnahmen am Konus

## Anlagenmessung

Anschließend an die Modellmessung wurde eine Messung in der Anlage Roßhaupten durchgeführt.

Diese Anlage wurde gewählt, weil hier die Verteilung der Kavitationsformen über dem Kennfeld bekannt ist, siehe Abb. 3.38.

Alle untersuchten Betriebspunkte lagen bei  $n_1' = 114 \text{ min}^{-1}$  und sind im Kennfeld dargestellt, siehe Abb. 3.38.

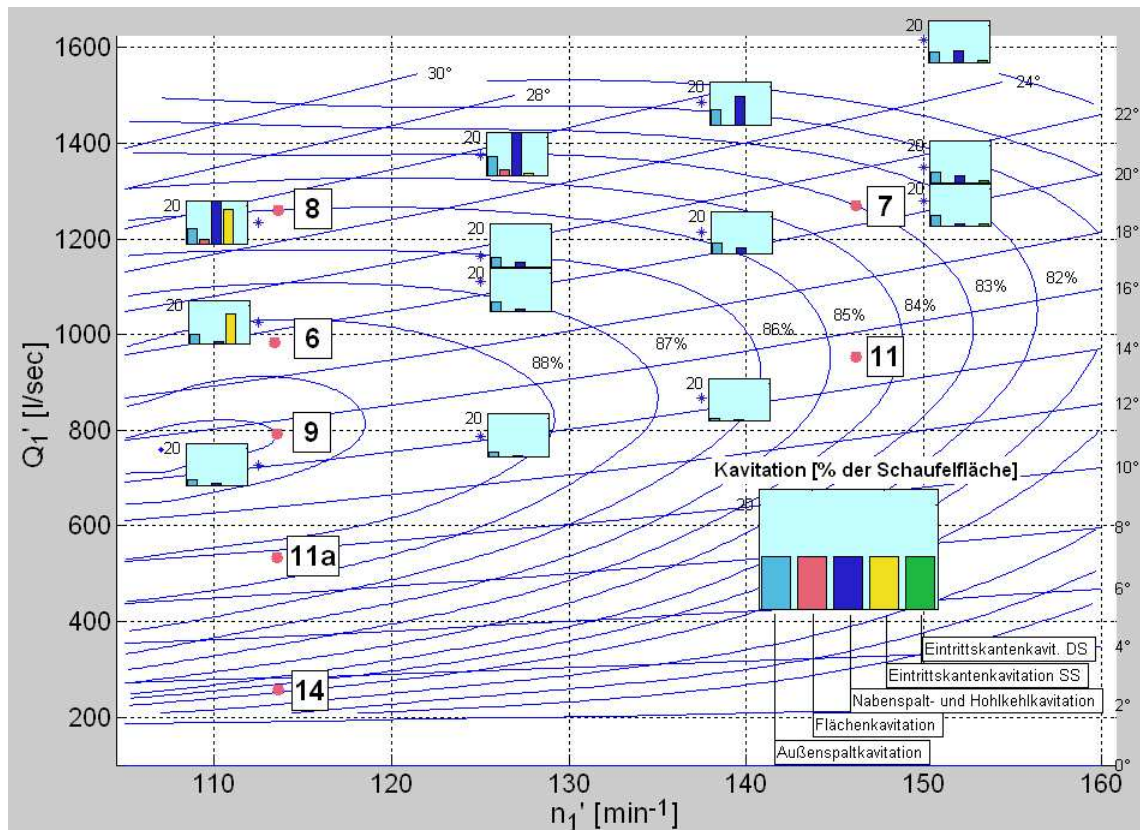


Abbildung 3.38: In Roßhaupten zur Messung bzgl. der Winkelauflösung eingestellte Betriebspunkte und Verteilung einzelner Kavitationsformen über dem Kennfeld

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Eintrittskantenkavitation erst bei  $Q_1' = 1000 \text{ l/s}$  auftritt und bei diesem Wert auch dominiert. Bei weiterer Steigerung von  $Q_1'$  treten jedoch Nabenspalt- und Hohlkehlkavitation in den Vordergrund.

In Abb. 3.39 auf S. 94 ist das Verhältnis  $RMS_{>150\text{kHz}}/RMS_{>350\text{kHz}}$  über  $Q_1'$  in den untersuchten Betriebspunkten dargestellt. Die zweite Linie zeigt den prozentualen Anteil der Eintrittskantenkavitation in der gesamten Kavitation.

Aus Abb. 3.39 ist ersichtlich, dass in dem Bereich, wo die Eintrittskantenkavitation den Hauptanteil an der Kavitationsbelastung bewirkt, das Verhältnis

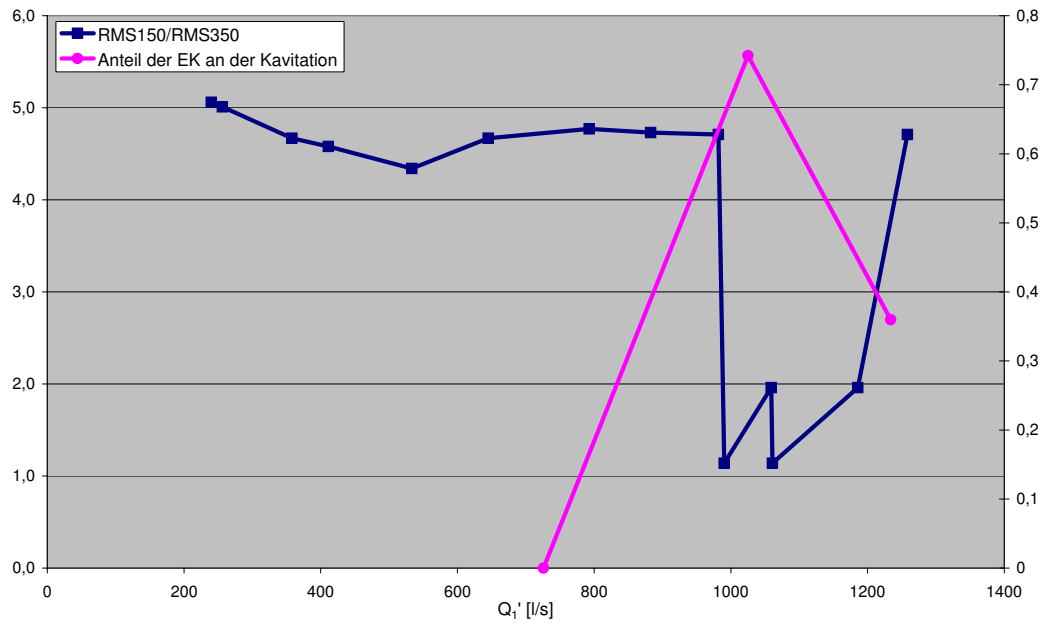


Abbildung 3.39: Verlauf des  $RMS_{>150kHz}/RMS_{>350kHz}$  und des Anteils der Eintrittskantenkavitation in Gesamtkavitation über  $Q_1'$  in Roßhaupten; linke Skala:  $RMS_{>150kHz}/RMS_{>350kHz}$ , rechte Skala: Anteils der Eintrittskantenkavitation

$RMS_{>150kHz}/RMS_{350kHz}$  unter 2 fällt, was in völligem Einklang mit dem Ergebnis der Modellversuche steht.

Es ist also festzuhalten, dass die Eintrittskantenkavitation von anderen Kavitationsformen anhand der spektralen Zusammensetzung des Kavitationssignals in Modellversuch und Anlage unterschieden werden konnte.

### 3.3.2 Differenzierung von Kavitationsformen durch Vergleich des an verschiedenen Positionen erfassten Körperschalls

Bei den Untersuchungen bzgl. der Sensorposition wurde festgestellt, dass das Intensitätsverhältnis der an verschiedenen Sensorpositionen erfassten Signale ebenfalls von der Kavitationsform abhängt.

In Modellmessungen sollte daher untersucht werden, ob dieser Phänomen einen Rückschluss auf die Art der Kavitation ermöglicht.

Die Messungen wurden an zwei Sensorpositionen für zwei Kavitationsformen und in einem Frequenzbereich durchgeführt:

- Stromaufwärts am Deckel und stromabwärts am Turbinenkonus,
- Eintrittskantenkavitation und eine Volllastkavitation, bei der Spalt-, Hohlkehl- und Flächenkavitation zusammen auftreten,
- Frequenzbereich:  $150\text{kHz} - 350\text{kHz}$ .

In Abb. 3.40 und 3.41 auf S. 95 – 96 sind die RMS-Verhältnisse zwischen den Sensorpositionen *Turbinendeckel/Auslaufkonus* und *Auslaufkonus/Spirale* dargestellt.

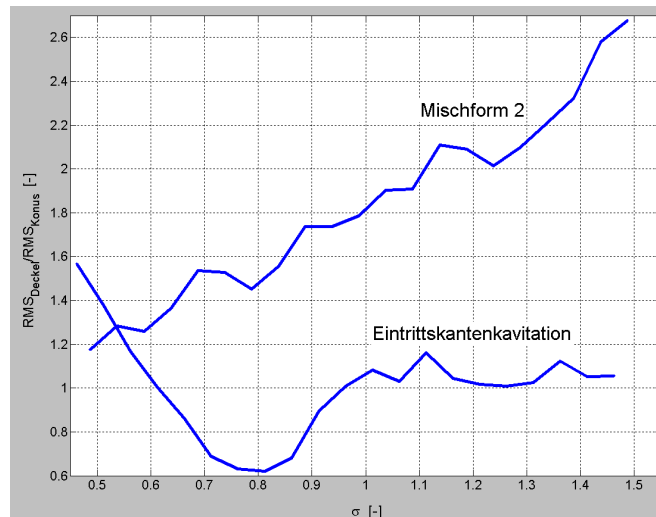


Abbildung 3.40: Verlauf des  $RMS_{Deckel}/RMS_{Konus}$  über  $\sigma$  für Mischform 2 und Eintrittskantenkavitation

Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass das Verhältnis zwischen den an den beiden Sensorpositionen ermittelten  $RMS$ -Werten eindeutig mit der Kavitationsform korreliert. In allen Abbildungen kann zumindest für den Bereich der nicht stark entwickelten Kavitation  $\sigma > \sigma_{Standard}$  ein  $RMS_1/RMS_2$ -Wert festgelegt werden, der

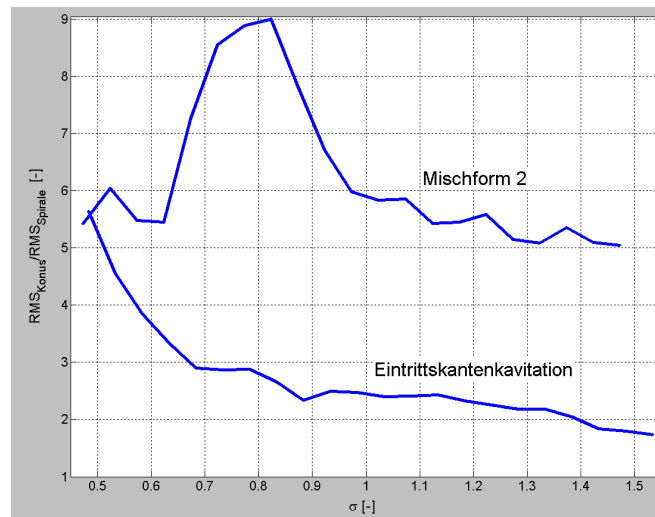


Abbildung 3.41: Verlauf des  $RMS_{Konus}/RMS_{Spirale}$  über  $\sigma$  für Mischform 2 und Eintrittskantenkavitation

für jeden  $\sigma$ -Wert zwischen den Kurven liegt. Der Wert beträgt z. B. 1.3 für das Intensitätsverhältnis  $RMS_{Deckel}/RMS_{Konus}$  und 5 für  $RMS_{Konus}/RMS_{Spirale}$ .

Dieser Befund ermöglicht eine Abgrenzung der Eintrittskantenkavitation von anderen Kavitationsformen durch Vergleich der Signalintensität an verschiedenen Sensorpositionen.

In den Kraftwerkanlagen kann meistens nur das  $RMS$ -Verhältnis stromauf und stromabwärts vom Laufrad ermittelt werden.

$$\Lambda = \frac{RMS_{stromauf}}{RMS_{stromab}}. \quad (3.9)$$

Ein Vergleich der Schallintensität am Konus und am Saugrohr ist in den Kaplananlagen meistens nicht möglich, weil das Saugrohr einbetoniert ist.

Dieser Effekt wurde nur an einer Modellturbine untersucht. Eine Prototypmessung konnte nicht durchgeführt werden, da an den in Frage kommenden Prototypen nur Sensorpositionen stromaufwärts am Wasserführungsschild zur Verfügung stehen.

## Kapitel 4

# Konzept eines Nachfolge- Kavitationsdiagnosesystems

Für den am FLM in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelte Acoustic Emission Monitor soll unter der Anwendung der Ergebnisse aus Kap. 3 ein Nachfolgemodell aufgebaut werden.

Der AEM-2 soll neben langfristigen Anlagenmessungen auch kurzfristige Messungen unterstützen, die zur AEM-Installation und zur Kalibrierung des Meßsystems notwendig sind.

Folgende Parameter sollen vom AEM-2 *permanent* erfasst werden:

- $RMS_{>150kHz}$  und  $RMS_{>350kHz}$ : Körperschallintensität in den Frequenzbereichen  $150kHz - 1MHz$  und  $350kHz - 1MHz$ ,
- $RMS_{Mod}$ : der durch die Turbinendrehfrequenz bzw. durch deren Vielfaches modulierte RMS-Wert<sup>1</sup>,
- E/s-Wert (Events/second): Anzahl der Signalspitzen, die einen festgelegten Schwellenwert in einer Sekunde überschreiten,<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Definition des  $RMS_{Mod}$  siehe auf S. 88.

<sup>2</sup>In der vorliegenden Arbeit wurde der E/s-Wert nicht untersucht.

Die Aussagekraft dieses Messwertes hängt stark von dem eingestelltem Threshold-Niveau ab. Dieses kann jedoch in einer Kaplan-Turbine, die in der Regel fast in allen Betriebspunkten kavitiert, nur relativ willkürlich gewählt werden.

Hier spiegelt sich ein allgemeines Problem des derzeitigen Diagnosesystems wider, dass die Eigenschaften der zwischen dem Ort der Kavitation und dem AE-Sensor liegenden Medien bzgl. der Schallübertragung, die sich vom Kraftwerk zum Kraftwerk stark unterscheiden, in der gegenwärtigen AEM-Variante nicht berücksichtigt werden.

Es wird daher vorgeschlagen, im AEM-2 den E/s-Wert langfristig beizubehalten. Die Einstellung des Threshold-Wertes soll anhand der Ergebnisse der in-situ Kalibrierung erfolgen. Bis zur Entwicklung dieser Technik wird der Threshold-Wert so eingestellt, dass er in den Betriebspunkten nahe Optimum nur von wenigen Signalspitzen erreicht wird.

- Turbinenparameter zur Feststellung des momentanen Betriebspunktes und des  $\sigma$ -Wertes.

Alle erfassten Messwerte sollen zusammen mit dem momentanen Betriebspunkt vor Ort auf dem Bildschirm dargestellt und zur weiteren Bearbeitung gespeichert werden. Die gespeicherten Datensätze werden per Modem an einen Zentralrechner übertragen, wo sie bis zur Auswertung gesammelt werden.

Außerdem soll AEM-2 folgende *kurzfristige Messungen* unterstützen:<sup>3</sup>

- während der AEM-Installation
  - Analyse kavitationstypischer Signalmuster im Körperschall:  
Körperschallerfassung mit einer hohen Abtastrate, Signaldarstellung über der Zeit und Ableitung dessen spektraler Charakteristik,
  - Beurteilung, inwieweit der aufgenommene Körperschall von der erosionsrelevanten am Laufrad anhaftenden Kavitation stammt:  
Darstellung der Verteilung des momentanen RMS-Wertes über dem Turbinendrehwinkel und dessen spektraler Charakteristik.
- Stichprobenuntersuchung der Kontaktqualität zwischen dem Körperschallaufnehmer und der Turbinenoberfläche

---

<sup>3</sup>Ergänzend soll in den AEM-2 ein Modul für In-Situ-Kalibrierung eingebaut werden, das noch zu entwickeln ist.



## Kapitel 5

# Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Techniken der Kavitationsdiagnose in Wasserturbinen untersucht und ein Gerät für Online-Kavitationsmonitoring konzipiert.

Als Basis dafür diente der in den 90er Jahren 20. Jahrhunderts am Lehrstuhl für Fluidmechanik der Technischen Universität München entwickelte Acoustic Emission Monitor (AEM).

Der AEM verwendet als Maß der Kavitationsintensität zwei Messwerte:

- *RMS*: Intensität des an der Turbinenoberfläche erfassten Körperschalls im Frequenzbereich  $300kHz - 1MHz$ ,
- *E/s*-Wert: Anzahl der Körperschallspitzen, die einen bestimmten Schwellenwert in der Zeiteinheit überschreiten.

In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde zuerst die Aussagekraft der beiden Messwerte sowohl im Modell als auch in Anlage untersucht.

Die *Modellmessungen* bestätigten, dass die beiden Messwerte zur Diagnose einer schwachen oder mittelstark entwickelten Kavitation gut geeignet sind. Bei stark entwickelter Kavitation führt jedoch der große Gasanteil im Fluid zu einer starken Dämpfung des Schallsignals. Die beiden Messwerte *RMS* und *E/s* spiegeln in dieser Situation das Kavitationsgeschehen nicht mehr ausreichend gut wider.

Im Gegensatz zu den Modellmessungen wurde in den *Anlagenmessungen* 2000 – 2003 beobachtet, dass sowohl *RMS* als auch *E/s*-Wert über dem Kennfeld aller drei Kraftwerke relativ schwache Gradienten aufweist. Auch nahe und unter dem Optimum ging die Signalintensität nicht auf Null, wie dies in einem kavitationsfreien Zustand zu erwarten wäre.

Analog zu Modellmessungen zeigte sich hier auch eine starke Schalldämpfung bei entwickelter Kavitation.

Die beobachteten schwachen Signalgradienten über dem Anlagenkennfeld legten die Vermutung nahe, dass die Turbine in keinem Betriebspunkt völlig kavitationsfrei läuft. Da das Kavitationsgeschehen in den Anlagen während der Messungen nicht beobachtet werden konnte, sollte dies im Modell geprüft werden. Für die Punkte oberhalb Betriebsoptimums konnten Modellversuche des Turbinenherstellers Fa. Voith GmbH, Heidenheim, verwendet werden. Für die Punkte unterhalb des Optimums wurden Messungen am FLM durchgeführt. Die Modellmessungen haben bestätigt, dass die Anlagen in keinem in den Jahren 2000 – 2003 eingestellten Betriebspunkt völlig kavitationsfrei laufen.

Gleichzeitig mit den Anlagenmessungen wurde eine Reihe Untersuchungen zur Verbesserung der AEM-Aussagekraft geführt. Es wurden drei neue Messwerte konzipiert:

- $RMS_{Mod}$ : Intensität des durch die Turbinendrehfrequenz bzw. durch deren Harmonischen modulierten Kavitationssignals;  
Anlagenmessungen haben gezeigt, dass  $RMS_{Mod}$ -Wert deutlich empfindlicher auf Kavitationsintensität reagiert als der  $RMS_{>350kHz}$ -Wert.
- Der dimensionslose Wert  $\Pi = \frac{RMS_{>150kHz}}{RMS_{>350kHz}}$  zeigt, in welchem Frequenzbereich  $150 - 350kHz$  oder  $> 350kHz$  der Kavitationsgeräusch stärker ausgeprägt ist; sowohl Modell- als auch Anlagenmessungen haben gezeigt, dass sich Eintrittskantenkavitation dadurch unterscheiden lässt. Wenn  $\Pi < 2$  ist, überwiegt die Eintrittskantenkavitation, bei  $\Pi > 2$  andere Kavitationsformen.
- Der dimensionslose Wert  $\Lambda = \frac{RMS_{stromauf}}{RMS_{stromab}}$  zeigt, ob Kavitationssignal stromauf- oder stromabwärts vom Laufrad stärker ausgeprägt ist;  
Modellmessungen haben bestätigt, dass dadurch sich Eintrittskantenkavitation ebenfalls unterscheiden lässt.

Darüber hinaus wurden zwei neue Messverfahren entwickelt:

- Winkelauflösung:  
Korrelation der Schallemission mit dem Drehwinkel der Laufradwelle. Dies ermöglicht eine Differenzierung der an den Laufschaufeln anhaftenden Kavitation von anderen Kavitationsereignissen wie z.B. kavitierenden Wirbelzöpfen und gestatten somit
  - die Bestimmung der optimalen Sensorposition nach Kriterium der besseren Abbildung der am Laufrad anhaftenden Kavitation im Signal, sowie
  - die Erkennung einer ungleichmäßig auf die Laufschaufeln verteilten Kavitation.

- Verfahren zur Untersuchung der Kontaktqualität zwischen dem Körperschallnehmer und der Turbinenoberfläche in einem Wasserkraftwerk ohne Neupositionierung des Sensors.

Es ist zu erwarten, dass ein gemäß diesen Erkenntnissen konzipiertes Gerät deutlich mehr Information über das erosionsrelevante Kavitationsgeschehen in einer Prototyp-Wasserturbine liefern wird. Um dies zu prüfen, wäre es wünschenswert, ein solches Gerät aufzubauen und sowohl im Modellversuch als auch im längerfristigen Anlagenversuch zu erproben.

# Literaturverzeichnis

- [1] P.A. Abbot. Acoustic and vibration techniques for Cavitation Monitoring. Technical report, Atlantic applied Research Corporation, AP-5385, Research Project 2602-3, Clamar Cedex, September 1987.
- [2] P.A. Abbot. Cavitation detection measurement on Francis and Kaplan Hydro Turbines. In *International Symposium on cavitation noise and erosion in fluid systems*, volume FED-Vol.88, San Francisco, USA, December 1989. ISBN 0-7918-0423-2.
- [3] M.S. Adam, W.Q. Yang, and R. Watson. Capacitance tomographic system for the measurement of void fraction in Transient Cavitation. *Journal of Hydraulic Research/De Recherches Hydrauliques*, Vol. 36(Nr. 4):707–719, 1998.
- [4] V. Akulichev. Cavitation nuclei and threshold of acoustic cavitation in ocean water. In *IUTAM Symposium*, Birmingham, UK, September 1993. ISBN 0-7923-3008-0.
- [5] I. Awad, G. Ludwig, and B. Stoffel. Experimental investigations concerning the influence of liquid property and speed of rotation on the inception of Blade Cavitation in a Centrifugal Pump. In *Third International Symposium on Cavitation*, pages 329–334, Grenoble, France, April 1998.
- [6] B. Bachert, H. Lohrberg, and B. Stoffel. Cavitation monitoring in hydraulic machines with the aid of a Computer Aided Visualization Method. In *Second International Symposium on Quantification of Visualized Processes in Fluid Dynamics*, Bled, Slovenia, February 2002.
- [7] B. Bachert, G. Ludwig, B. Stoffel, B. Sirok, and M. Novak. Experimental investigations concerning erosive aggressiveness of cavitation in a radial test pump with the aid of adhesive copper films. In *Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan, November 2003.
- [8] R. Bachert, G. Ludwig, B. Stoffel, M. Frobenius, and R. Schilling. Three-Dimensional unsteady cavitation effects on a single hydrofoil and in a Radial Pump - Measurements and numerical simulations; Part One: Experiments. In *Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan, November 2003.

- [9] R. Bachert and B. Stoffel. Messung instationärer, dreidimensionaler Effekte kavitierender Strömungen an einem Einzelprofil mit Hilfe PIV/LIF-Meßtechnik. In *GALA-Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, Braunschweig, September 2003.
- [10] B. Bajic. Inflow Decomposition: A vibro-acoustical technique to reveal details of Hydroturbine Cavitation. In *Conference Hydropower into the next century*, pages 185–196, Portoroz, Slovenia, 1997. ISBN: 0-9522642-5-0.
- [11] B. Bajic. Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 41(No. 1):87–96, September 2003.
- [12] B. Bajic and A. Keller. Spectrum normalization method in vibro-acoustical diagnostic measurements of Hydroturbine Cavitation. *Journal of Fluids Engineering, ASME*, Vol. 118:1–6, September 1996.
- [13] L. Bellet, E. Laperrousaz, J.-M. Dorey, P. Bourdon, M. Farhat, R. Simoneau, F. Avellan, P. Dupont, and M. Couston. Cavitation erosion prediction on Francis turbines. *Hydropower and Dams*, Issue Three:56–62, 1997.
- [14] T.B. Benjamin and A.T. Ellis. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries. *Phil. Trans. Roy. Soc., London*, Ser. A:221–240, 1966.
- [15] G.M. Besold. *Kavitationserosionsversuche an dreieckigen Störkörpern*. Diplomarbeit. Technische Universität München, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, 1997.
- [16] R. Böhm. *Erfassung und hydrodynamische Beeinflussung fortgeschrittener Kavitationszustände und deren erosive Aggressivität*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1998.
- [17] R. Böhm, M. Hofmann, G. Ludwig, and B. Stoffel. Investigations on possibilities to control the erosive cavitation aggressiveness by hydrodynamic effects. In *Third International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, 1998.
- [18] R. Böhm, M. Hofmann, G. Ludwig, and B. Stoffel. Investigations on possibilities to control the erosive cavitation aggressiveness by hydrodynamic effects. In *Third International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, April 1998.
- [19] P. Bourdon, M. Farhart, R. Simoneau, F. Pereira, P. Dupont, F. Avellan, and J.-M. Dorey. Cavitation erosion prediction on Francis Turbines. Part 1. Measurement on the prototype. In *28. IAHR Symposium*, pages 534–543, Spain, September 1996. ISBN: 0-7923-4210-0.
- [20] P. Bourdon, R. Simoneau, and F. Avellan. Erosion vibratory fingerprint of leading edge cavitation of a NACA profile and of a Francis model and prototype hydro turbine. *Winter annual meeting of American Society of Mechanical Engineers, New Orleans, Louisiana, USA*, FED-Vol. 176:51–67, 1993. ISBN: 0-7918-1040-2.

- [21] P. Bourdon, R. Simoneau, and J.M. Dorey. Accelerometer and pit counting detection of cavitation erosion on a laboratory jet and a large Francis Turbine. Technical report, EDF-DER, Clamar Cedex, 1995. ISSN 1161-0611.
- [22] P. Bourdon, R. Simoneau, and P. Lavigne. A vibratory approach to the detection of erosive cavitation. In *International symposium on cavitation noise and erosion in fluid systems*, New York, 1989. ISBN 0-7918-0423-2.
- [23] Ch.E. Brennen. *Cavitation and bubble dynamics*. Oxford University Press, 1995. ISBN 0-19-509409-3.
- [24] Brüel&Kjær. *Product data sheet for Hydrophone 8103*. Nærum, Denmark, 07/2001. <http://www.bksv.com/>.
- [25] Brüel&Kjær. *Product data sheet for piezoelectric Accelerometer Uni-Gain 4371*. Nærum, Denmark, 07/2002. <http://www.bksv.com/>.
- [26] J.-F. Caron, M. Farhat, and F. Avellan. The influence of flow unsteadiness on erosive cavity dynamics. In *Third ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, San Francisco, CA, USA, July 1999.
- [27] G.L. Chahine and R. Duraiswami. Dynamical interactions in a bubble cloud. *ASME Journal Fluids Engineering*, Vol. 114:680–686, 1992.
- [28] G.L. Chahine, K.M. Kalumuck, J.Y. Cheng, and G. Frederick. Validation of Bubble Distribution Measurements of the Acoustic Bubble Spectrometer with High Speed Video Photography. In *Fourth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, CA, USA, 2001.
- [29] A. Chalov, V. Ilyin, and Y. Levkovsky. The influence of nuclei content on the inception of Bubble and Vortex Cavitation. In *Third International Symposium on Cavitation*, pages 149–153, Grenoble, France, April 1998.
- [30] Cities Service Oil and Gas Corporation, Tulsa, Okla. Corrosion probe and method for measuring corrosion rates, 1988. Patent US 4,840,719.
- [31] P. Couty, M. Farhat, and F. Avellan. Visualisation du collapse de cavités et sonoluminescence. In *Comptes rendus de Fluvisu 99*, Toulouse, France, 1999.
- [32] P. Couty, M. Farhat, and F. Avellan. Physical investigation of a cavitation vortex collapse. In *Fourth international Symposium on Cavitation*, Pasadena, CA, USA, June 2001.
- [33] Dechema, Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt, Deutschland. Mehrfachsensorik, 1989. Patentschrift DE 3900942 C2.
- [34] J.-M. Dorey, R. Simoneau, P. Bourdon, M. Farhat, and F. Avellan. Quantification of cavitation aggressiveness in tree different devices using Accelerometer, DECER and Pitting Measurement. In *Second International Symposium on Cavitation*, pages 215–220, Tokyo, Japan, April 1994.

- [35] A. Drei. *Untersuchung der Laufradkavitation einer Kreiselpumpe durch in-stationäre Druckmessungen im rotierenden System*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1997. ISSN 0945-4241, ISBN 3-929682-16-8.
- [36] G. Eickmann. *Maßstabeffekte bei der beginnenden Kavitation. Ihre gesetzmäßige Erfassung unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflußgrößen*. Dissertation, Technische Universität München, 1991.
- [37] X. Escaler, E. Egusquiza, T. Mebarki, F. Avellan, and M. Farhat. Field assessment of cavitation detection methods in hydropower plants. In *21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, pages 483–490, Lausanne, Switzerland, September 2002.
- [38] X. Escaler, M. Farhat, F. Avellan, and E. Egusquiza. Cavitation erosion tests on a 2D hydrofoil using surface-mounted obstacles. *WEAR: An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, Vol. 254:441–449, 2003.
- [39] M. Farhat. Contribution  l’étude de l’érosion de cavitation: mécanismes hydro-dynamiques et prdiction. *Thèse L’Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, No 1273:27, 1994.
- [40] M. Farhat and F. Avellan. On the detachment of a Leading Edge Cavitation. In *Fourth international Symposium on Cavitation*, Pasadena, CA, USA, June 2001.
- [41] M. Farhat, F. Avellan, and U. Seidel. Pressure fluctuation measurements in hydro turbine models. In *9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Honolulu, Hawaii, USA, February 2002.
- [42] M. Farhat and P. Bourdon. Extending repair intervals of hydro turbines by mitigating cavitation erosion. In *CEA Electricity 98 Conference and Exposition*, Toronto, April 1998.
- [43] M. Farhat, P. Bourdon, J.-L. Gagne, and L. Remillard. Improving hydro turbine profitability by monitoring cavitation aggressiveness. In *CEA Electricity ’99 Conference and Exposition*, Vancouver, March 1999.
- [44] M. Farhat, P. Bourdon, and P. Lavigne. Some Hydro Quebec experiences on the vibratory approach for cavitation monitoring. In *Conference Modelling, Testing and Monitoring for Power-Plants 2*, Lausanne, Switzerland, July 1996. ISBN: 0-9522642-3-4.
- [45] M. Farhat, P. Bourdon, P. Lavigne, and R. Simoneau. The hydrodynamic aggressiveness of cavitating flows in hydro turbines. In *ASME Engineering Division Summer Meeting*, Vancouver, Canada, June 1997.
- [46] M. Farhat, F. Guennoun, and F. Avellan. The Leading Edge Cavitation Dynamics. In *ASME European Fluids Engineering Summer Conference*, Montreal, Québec, Canada, June 2002.

- [47] M. Farhat, S. Natal, F. Avellan, F. Paquet, P.Y. Lowys, and M. Couston. On-board measurements of pressure and strain fluctuations in a model of low head Francis Turbine. Part 1: Instrumentation. In *21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, pages 865–872, Lausanne, Switzerland, September 2002.
- [48] B. Gindroz and M.L. Billet. Influence of the nuclei on the cavitation inception for different types of cavitation on ship propellers. *Journal of Fluids Engineering, ASME*, Vol. 120:171–178, March 1998.
- [49] F. Guennoun, M. Farhat, Y. Ait Bouziad, F. Avellan, and F. Pereira. Experimental investigation of a Particular Travelling Bubble Cavitation. In *Fifth International Symposium on Cavitation CAV2003*, Osaka, Japan, November 2003.
- [50] M. Hofmann, B. Stoffel, J. Friedrichs, and G. Kosyna. Similarities and Geometrical Effects on Rotating Cavitation in two scaled Centrifugal Pumps. In *Fourth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, CA USA, June 2001.
- [51] Hydro Quebec, Montreal, Canada; Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, France. Detection of cavitation erosion used material probes, 1986. Patent US 4,564,422.
- [52] R. Isermann. TU Darmstadt, Fachgebiet Regelungstechnik und Prozeßautomatisierung - Homepage. <http://w3.rt.e-technik.tu-darmstadt.de/forschung.pl>.
- [53] M. Kaye, P. Dupont, X. Escaler, and F. Avellan. Cavitation erosion monitoring of a prototype Francis turbine by vibration analysis. In *Third International Symposium on Cavitation*, pages 129–134, Grenoble, France, April 1998.
- [54] M. Kaye and M. Farhat. Classification of cavitation in hydraulic machines using vibration analysis. In *21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, pages 475–482, Lausanne, Switzerland, September 2002.
- [55] M. Kaye, A. Holenstein, P. Dupont, and J. Rettich. Acoustic method for monitoring mechanical seal condition and cavitation erosion in hydro machinery. In *Conference Modelling, Testing and Monitoring for Power-Plants 2*, pages 179–188, Lausanne, Switzerland, July 1996. ISBN: 0-9522642-3-4.
- [56] A.P. Keller. Cavitation investigations at one family of NACA-hydrofoils. Technical report, Bericht Nr. 59 des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, 1988.
- [57] A.P. Keller. Chinese-german comparative cavitation tests in different test facilities on models of interest for hydraulic civil engineering. Technical report, Bericht Nr. 66 des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, 1991.



- [58] A.P. Keller. Cavitation inception - new scaling law, developed by consideration of a parameter of influence generally blurring experimental results. In *Third ASME Conference on Cavitation*, pages 171–181, 1992.
- [59] A.P. Keller. Kavitationserscheinungen und deren zuverlässige Vorhersage durch Modellversuche. Technical report, Bericht Nr. 73 des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, 1992.
- [60] A.P. Keller. Eine neue Theorie zum Kavitationsproblem. In *Tagung von Verein Deutscher Ingenieure*, München, Oktober 1994.
- [61] A.P. Keller. New scaling laws for Hydrodynamic Cavitation inception. In *The Second International Symposium on Cavitation*, Tokyo, Japan, 1994.
- [62] A.P. Keller. Universal scaling law for Hydrodynamic Cavitation inception. In *Modelling, Testing & Monitoring for Hydro Power Plants*, Budapest, Hungary, 1994.
- [63] A.P. Keller. Eine neue Theorie zum Kavitationsproblem. In *Pumpentagung der Fachgemeinschaft Pumpen im VDMA*, Karlsruhe, September 1996. ISBN 3-924417-14-8.
- [64] A.P. Keller. Cavitation Scale Effects - empirically found relations and the correlation of Cavitation Number and Hydrodynamic Coefficients. In *Fourth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, CA USA, 2001.
- [65] W. Kinnebrock. *Neuronale Netze: Grundlagen, Anwendungen, Beispiele*. Oldenbourg Verlag München, Wien, 1992. ISBN 3-486-22103-5.
- [66] J. Klockgether. *Nachweis und Grundlagen für die Berechnung von Kavitationserscheinungen an Flüssigkeitspumpen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1979.
- [67] R. T. Knapp, J. W. Daily, and F. G. Hammitt. *Cavitation*. McGraw-Hill, New York, 1970.
- [68] Kulite Semiconductor Products. *Product data sheet for Pressure Transducer XTM-190*. Leonia, New Jersey USA. <http://www.kulite.com>.
- [69] W. Lauterborn, editor. *Cavitation and inhomogeneities in Underwater Acoustics. Proceedings of the First International Conference Göttingen*. Springer, Göttingen, Germany, July 1980.
- [70] H. Lohrberg, M. Hofmann, G. Ludwig, and B. Stoffel. Analysis of damaged surfaces. Part II: Pit Counting by 2D optical techniques. In *3rd ASME/JSME Joint Fluids Engng. Conference*, San Francisco, 1999.
- [71] H. Lohrberg, G. Ludwig, and B. Stoffel. Erfassung der 2D-Konturen von Kavitationsblasentaschen. In *6. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, pages 41.1–41.4, Essen, 1998.

- [72] H. Lohrberg and B. Stoffel. Measurement of cavitation erosive aggressiveness by means of structure born noise. In *Fourth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, CA USA, June 2001.
- [73] H. Lohrberg and B. Stoffel. Avoiding cavitation erosion. In *Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan, November 2003.
- [74] H. Lohrberg, B. Stoffel, R. Fortes-Patella, and J.L. Reboud. Numerical and experimental investigations on the cavitating flow in a cascade of hydrofoils. In *Fourth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, CA USA, June 2001.
- [75] P.Y. Lowys, F. Paquet, M. Couston, M. Farhat, S. Natal, and F. Avellan. Onboard measurements of pressure and strain fluctuations in a model of low head Francis Turbine. Part 2: Measurements and preliminary analysis results. In *21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, pages 873–880, Lausanne, Switzerland, September 2002.
- [76] G. Ludwig, H. Lohrberg, and B. Stoffel. Detection of 2-Dimensional contours of cavitation pockets on a single hydrofoil. In *Second International Symposium on Quantification of Visualized Processes in Fluid Dynamics*, Bled, Slovenia, February 2002.
- [77] N.V.Bekaert S.A., Zwevegem, Belgium. Method of testing for corrosion, 1989. Patent US 4,863,571.
- [78] J. Pauchet. An attempt to predict cavitation level in turbulent jets by a statistical approach. In *Third International Symposium on Cavitation*, pages 117–122, Grenoble, France, April 1998.
- [79] Physical Acoustics Corp. *Product data sheet for acoustic emission sensor WD*. Princeton Jct, NJ USA. <http://www.pacndt.com/>.
- [80] General Electric Nuovo Pignone. Wahrnehmungs- und Meßvorrichtung zum fortlaufenden Bestimmen der Hohlraumbildung in dynamischen Pumpen, 1990. Patentschrift DE 4005503 A1.
- [81] Prüftechnik Dieter Busch + Partner GmbH & Co. Einrichtung zum Überwachen von Pumpen auf Gefährdung durch Kavitation, 1987. Patentschrift DE 3725754 A1.
- [82] J. Raabe. *Hydraulische Maschinen und Anlagen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [83] D. Ross. *Mechanics of underwater noise*. Pergamon Press, USA, 1976. ISBN 0-08-021182-8.
- [84] J. Sauer. *Instationär kavitierende Strömungen - Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing (VoF) und Blasendynamik*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2000.

- [85] R. Schilling. *Grundlagen der Strömungsmaschinen*. Lehrstuhl für Hydraulische Maschinen und Anlagen, Technische Universität München, Vorlesungsskript, 2001.
- [86] R. Schilling. *Hydraulische Strömungsmaschinen und Anlagen*. Lehrstuhl für Hydraulische Maschinen und Anlagen, Technische Universität München, Vorlesungsskript, 2001.
- [87] R. Schilling. *Wasserkraftwerke*. Lehrstuhl für Hydraulische Maschinen und Anlagen, Technische Universität München, Vorlesungsskript, 2001.
- [88] Ch. Schneider and W. Knapp. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Kavitationsdiagnose. Technical report, Lehrstuhl für Hydraulische Maschinen und Anlagen, Technische Universität München, München, 1993.
- [89] W. Schuller. *Akustische Signale, lokale Druckimpulse als Maß für die hydrodynamische Intensität der Kavitation*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1995.
- [90] H. Sigloch. *Strömungsmaschinen*. Hanser Verlag, München, 1993.
- [91] M.M. Skinner and T.L. Wahl. Evolution of techniques for detection of cavitation on the runner of a model hydraulic turbine. Technical report, Research and laboratory services division hydraulics branch, Bureau of Reclamation Denver Office, 1991.
- [92] J. Staudenraus and W. Eisenmenger. Fibre-optic probe hydrophone for ultrasonic and shock-wave measurements in water. *Ultrasonic*, Vol. 31(No. 4):267 – 273, 1993.
- [93] B. Stoffel. TU Darmstadt, Fachgebiet Turbomaschinen und Fluidantriebstechnik - Homepage. <http://www.tfa.maschinenbau.tu-darmstadt.de/>.
- [94] R. Striedinger, I. Awad, G. Ludwig, and B. Stoffel. Experimental investigations concerning the influence of liquid property and speed of rotation on the inception of Blade Cavitation in pumps with different specific speeds. In *Third ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, San Francisco, 1999.
- [95] C. Vizmanos, E. Eguisquiza, and E. Jou. Cavitation detection in a Francis turbine. In *Conference Modelling, Testing and Monitoring for Power-Plants 2*, Lausanne, Switzerland, July 1996. ISBN: 0-9522642-3-4.
- [96] Voith Hydro GmbH & Co. KG, Heidenheim, Deutschland. Verfahren zum Betreiben einer hydraulischen Maschine, 1998. Patentschrift DE 19719406C1.
- [97] S. Wursthorn. *Numerische Untersuchung kavitierender Strömungen in einer Modellkreiselpumpe*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2001.