

---

## Wave Dragon MW

Projektlaufzeit:	1991 - 1994 / 1999 -2003
Projektleiter:	Dr.-Ing. W. Knapp
Projektbearbeiter:	Dipl.- Ing. C. Schneider, Dipl.- Ing. V. Pastushenko, T. Siewert, D. Dier

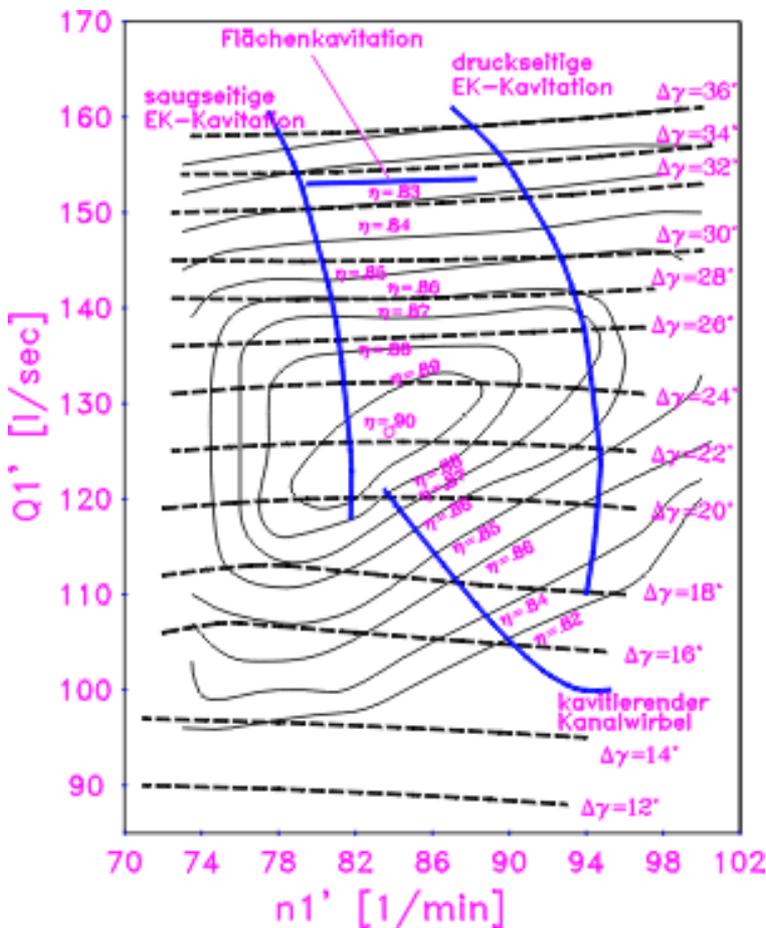
---

### Problemstellung:

Unter Kavitation versteht man die Bildung von Dampfblasen im kalten Fluid infolge Unterschreitung des Dampfdruckes mit anschließender Stoßkondensation. Hierbei entstehen lokale Druckspitzen von bis zu 1000 bar. Tritt dieser Effekt in einer Strömungsmaschine in der Nähe von Bauteiloberflächen auf, so führt dies zur sog. Kavitationserosion: Es kommt zu einer Ermüdung der Materialoberfläche, die schließlich zum Ausbröckeln von Material und schwammartigen Zerfressungen führt.



Erosion durch Flächenkavitation an der Laufschaufel einer kleinen Kaplan-Turbine



Kennfeld einer Francis-Turbine mit eingezeichneten Kavitationsgrenzen

Beim Einbau einer Wasserturbine kann der Kavitationsbeiwert  $\sigma_{Anlage}$  mit Rücksicht auf die Baukosten meist nicht so groß gewählt werden, dass das Auftreten von Kavitation völlig ausgeschlossen wird. Zur Vermeidung von Kavitationsschäden wird der Betriebsbereich der Maschine normalerweise auf den kavitationsfreien Bereich begrenzt, wobei die im Modellversuch unter der Bedingung  $\sigma = \sigma_{Anlage}$  bestimmten Kavitationsgrenzen direkt auf die Großausführung übertragen werden. Die wirklichen Kavitationsgrenzen des Prototyps weichen jedoch mitunter erheblich hiervon ab; dies ist sowohl durch die Vernachlässigung veränderlicher Kavitationsparameter wie Unterwasserpegel, Umgebungsdruck, Wasserqualität und -temperatur als auch oftmals durch Abweichungen von der geometrischen Ähnlichkeit bedingt. Begegnet man diesen Abweichungen mit der Einführung großzügig bemessener Sicherheitsgrenzen in der Regelungseinrichtung der Maschine, so

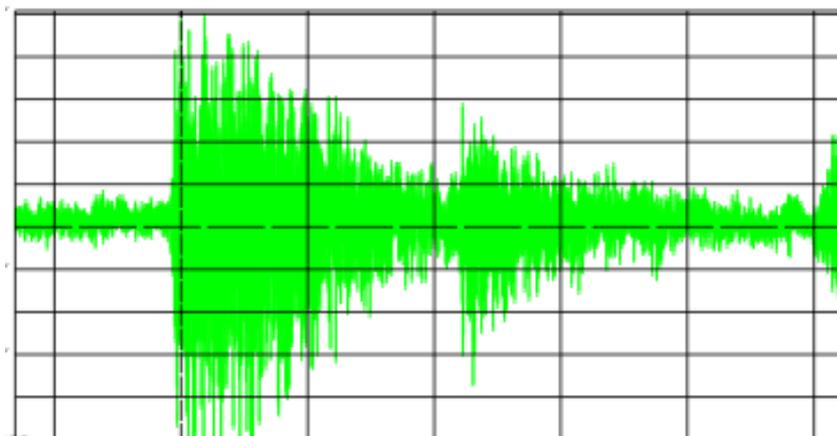
führt dies zu einer unnötigen Beschränkung des zugelassenen Betriebsbereiches und somit zu einer Verringerung der erreichbaren Jahresarbeit.

Eine ständige Kavitationsüberwachung an Hand eines Monitorsignales, das die momentane tatsächliche Kavitationsintensität abbildet, gestattet hingegen den Betrieb der Maschine bis an die wirklichen Kavitationsgrenzen. Darüber hinaus kann bei genauer Kenntnis der aktuellen Kavitationsintensität der Betriebsbereich noch weiter ausgedehnt werden, wenn man ein zulässiges Kavitationsniveau definiert, bei dem noch keine Erosionsschäden erwartet werden.

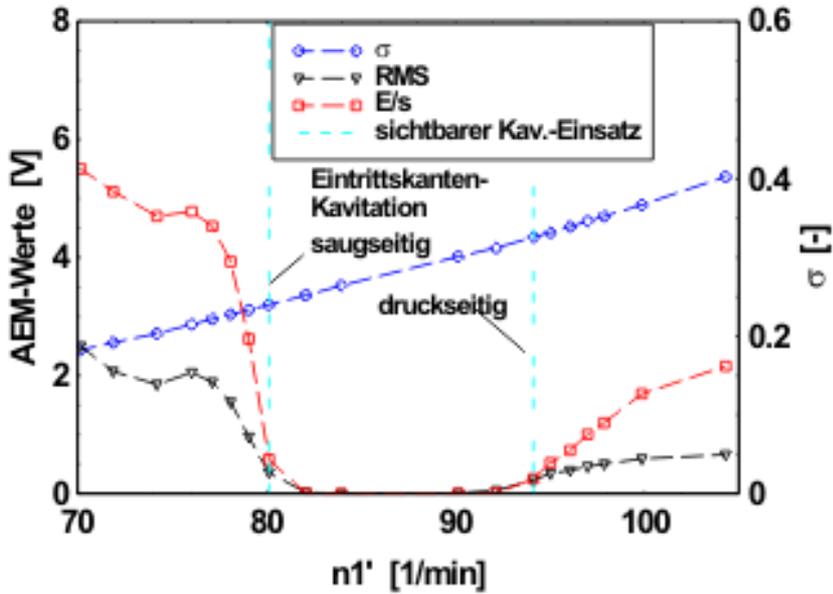
Zur Entwicklung eines solchen Monitor-Systems wurde ein Forschungsprojekt zwischen dem Lehrstuhl für Hydraulische Maschinen und Anlagen der TU München und der Fa. Voith GmbH, Heidenheim vereinbart.

**Laborversuche:**

Aufbauend auf Vorarbeiten, die bei Voith Hydro, York durchgeführt worden waren, wurde ein Monitorsystem konzipiert, das auf der Erfassung hochfrequenter Körperschallemissionen an der Oberfläche des Turbinengehäuses basiert. Der AEM (Acoustic Emission Monitor) filtert aus dem mit einem Körperschallsensor aufgenommenen Kavitationsgeräusch die kavitationsrelevanten Anteile aus und leitet hieraus Parameter ab, die mit der Kavitationsintensität korreliert sind. Die unten stehende Abbildung zeigt ein typisches Kavitations-Schallsignal sowie den Verlauf der AEM-Anzeigewerte RMS und E/s bei Variation der Einheitsdrehzahl. Die hellblauen senkrechten Linien markieren den visuell beobachteten Einsatz der saug- und druckseitigen Eintrittskantenkavitation. Die AEM-Werte bilden sowohl den Kavitationseinsatz als auch die Zunahme der Intensität bei entwickelter Kavitation deutlich ab.



**Zeitschrieb eines Kavitationsschallsignals, Zeitbasis 500µS/div**



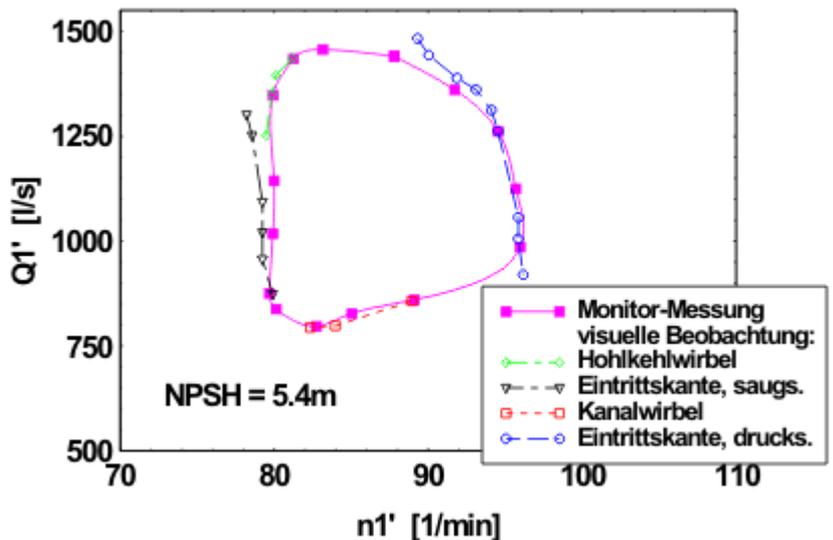
Verlauf der AEM-Anzeigewerte bei Variation der Einheitsdrehzahl

Im Zuge dieser Entwicklung wurde ein Demonstrationsversuch im Labor der Fa. Voith vorgenommen. Dort waren die Kavitationsgrenzen einer Modell- Francisturbine eingehend mit herkömmlichen visuell-akustischen Methoden bestimmt worden. Zum Vergleich wurden die Kavitationsgrenzen ohne weiteren Zugang zum Turbinenmodell mit Hilfe des AEM sozusagen blind bestimmt. Die nebenstehende Abbildung zeigt den mit dem AEM gemessenen Grenzkurvenzug im Vergleich mit den visuell ermittelten Kavitationsgrenzen für die verschiedenen Kavitationsformen.

Bemerkenswert ist hierbei, dass die visuelle Bestimmung der Kavitationsgrenzen ungefähr eine Woche in Anspruch nahm, wohingegen die AEM-Messung in wenigen Stunden durchgeführt werden konnte.

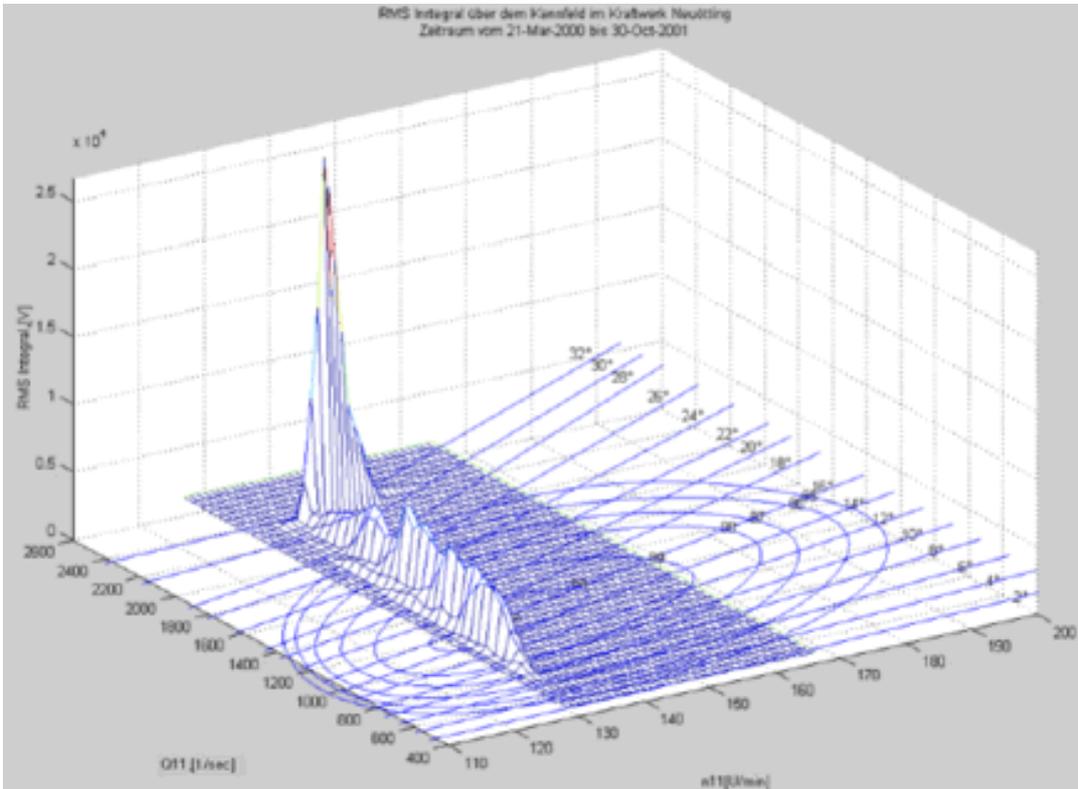
**Anlagenversuche:**

In einem Folgeprojekt wurden drei Wasserkraftanlagen mit Kaplan Halb- und Vollspiralturbinen mit dem entwickelten Monitorssystem und einer PC-gestützten Da-



Grenzkurvenzug im Vergleich mit den visuell ermittelten Kavitationsgrenzen

tenerfassung instrumentiert. Ziel der Untersuchung war, langfristig Daten zu sammeln und hieraus eine Korrelation zwischen der aus den AEM-Werten bestimmten akkumulierten Kavitationsbelastung und dem bei der Turbinenrevision festgestellten Schadensbild zu ermitteln.



Integrierte Kavitationsbelastung über dem Kennfeld, Kraftwerk Neuötting



Erosion durch Flächen- und Außenspaltkavitation

Das Ergebnis der 3-jährigen Anlagenmessungen kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

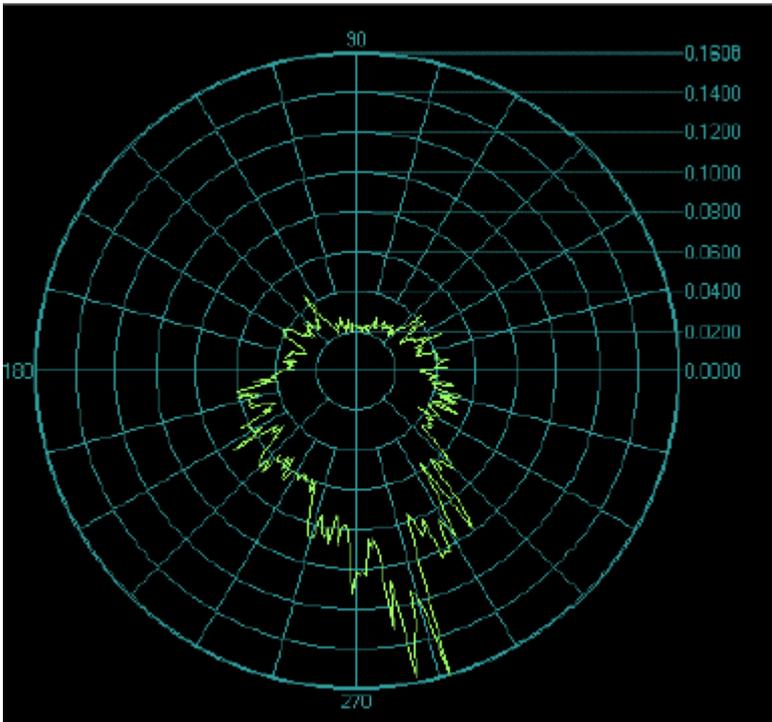
- Das Kavitationsgeschehen in den beobachteten Anlagen konnte an Hand der AEM-Signale gut nachvollzogen werden
- Die Erosionsschäden standen in guter Übereinstimmung mit den akkumulierten Kavitationsbelastungen

Es war jedoch festzustellen, dass die beobachteten Turbinen in keinem der dort üblicherweise gefahrenen Betriebsbereiche völlig kavitationsfrei lief. Aus der Analyse der entsprechenden Modellversuche ergab sich, dass z.B. im Bereich Vollast bei größeren Fallhöhen Außenspalt-, Flächen- und Hohlkehlkavitation gleichzeitig und mit fast gleicher Intensität auftreten. Eine genaue quantitative Vorhersage der Erosion würde demnach eine Sensorik erfordern, die diese Kavitationsformen getrennt zu bewerten vermag.

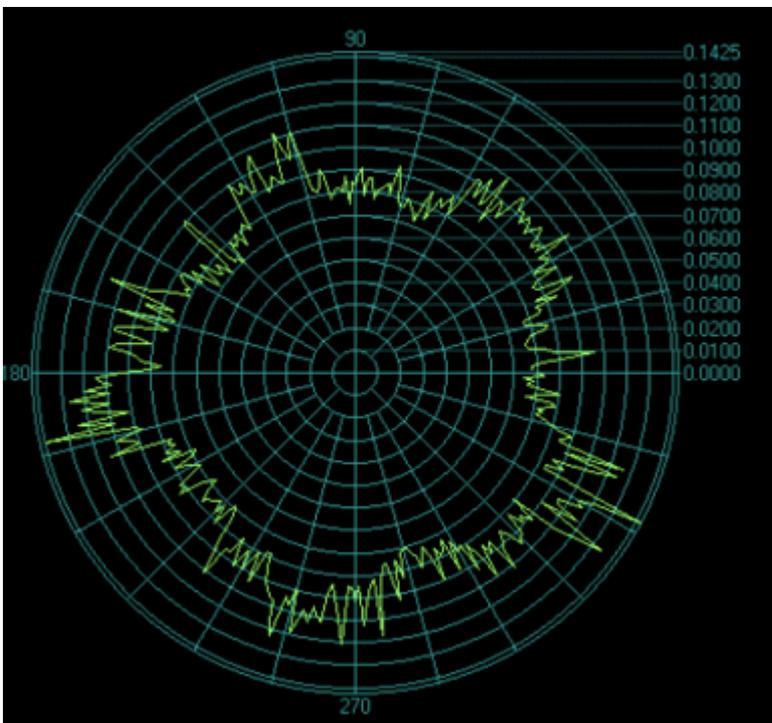
Im Hinblick auf eine solche Verbesserung des Informationsgehalts erscheinen folgende Weiterentwicklungen des Systems sinnvoll:

- winkelaufgelöste Signalmessung zur Beurteilung der Kavitationsintensität an einzelnen Schaufeln
- Räumlich auflösende Messtechnik zur Differenzierung verschiedener Kavitationsformen
- Entwicklung eines Verfahrens zur in-situ-Kalibrierung der Übertragungskette zur Gewinnung quantitativ verlässlicher Aussagen.

Ein Verfahren zur winkelaufgelösten Signalmessung wurde in Laborversuchen entwickelt und in Anlagenversuchen erprobt. Die folgenden Abbildungen sind winkelaufgelöste Kavitationsschall-Signale einer 5-flügeligen Kaplan-Modellturbinen in Polarkoordinaten dargestellt. Das linke Bild zeigt einen Kavitationszustand, in dem nur an einer der 5 Schaufeln Kavitation entsteht - hier wurde eine einzelne Schaufel im Winkel so angestellt, dass Eintrittskantenkavitation auftrat. Das zweite Bild zeigt einen Zustand, in dem an allen 5 Schaufeln Flächenkavitation auftritt. Die Modulation des Signales über dem Umfang ist hier naturgemäß nicht mehr so stark ausgeprägt, jedoch sind auch hier die 5 den jeweiligen Schaufeln zugeordneten Signalmaxima zu erkennen.

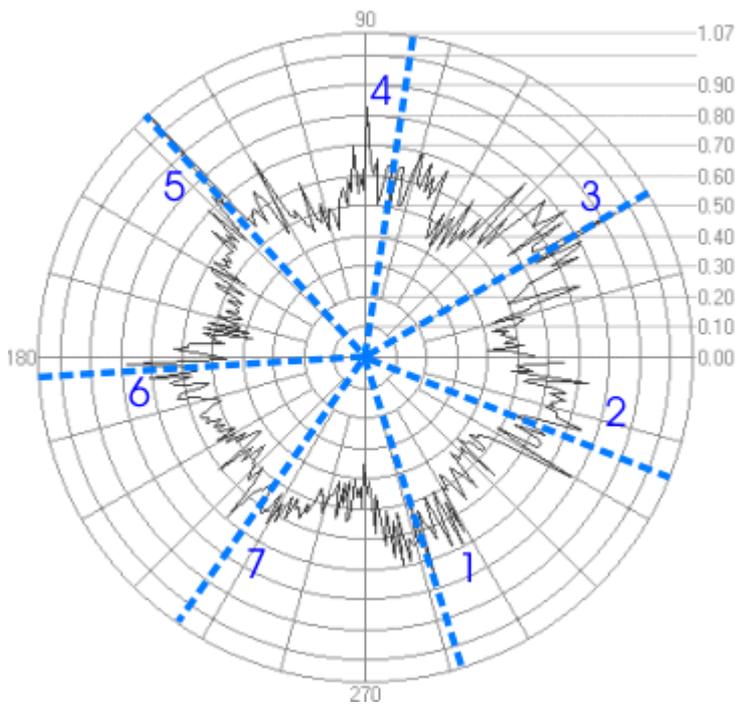


Winkelaufgelöste Messung: Kavitation nur an einer Schaufel

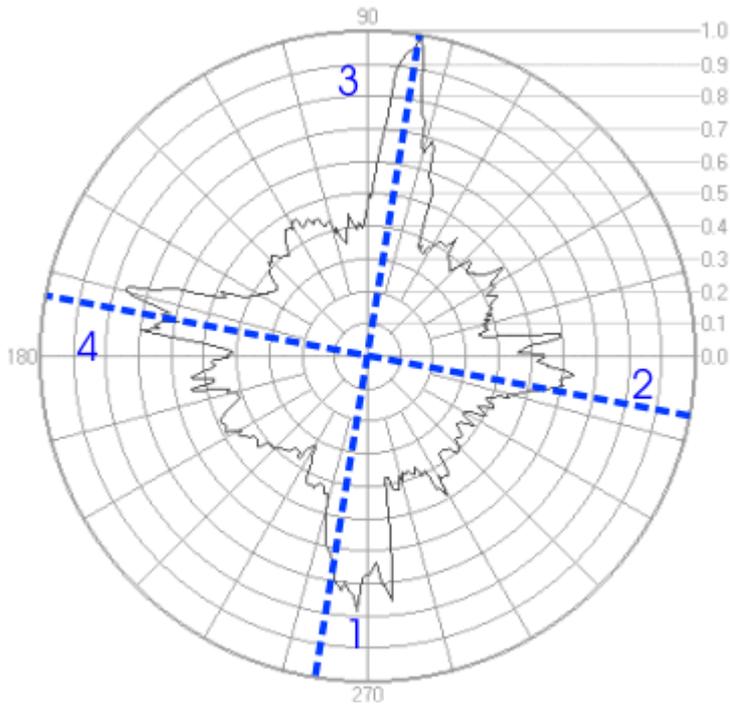


Winkelaufgelöste Messung: Kavitation an allen fünf Schaufeln

Diese Technik wurde auch in ausgeführten Turbinen in Wasserkraftanlagen mit Erfolg eingesetzt. So konnte z.B. an einer hoch belasteten 7-flügeligen Kaplanmaschine des Kraftwerks Roßhaupten an Hand des winkelaufgelösten Signales nachgewiesen werden, dass an den einzelnen Laufschaufeln infolge geometrischer Abweichungen ein verschiedener Kavitationszustand herrscht (vgl. erste Abbildung). Dies wird durch die Revisionsbefunde bestätigt: An den Schaufeln 1 und 2 wurden starke, an Schaufel 3 nur mäßige und an den übrigen 4 Schaufeln fast gar keine Erosionsschäden festgestellt. Ein ähnlicher Befund ergab sich in der Anlage Neuötting, die mit 4-flügeligen Kaplanmaschinen ausgestattet ist (vgl. zweite Abbildung).



Kraftwerk Roßhaupten: 7-flügelige Kaplan-Vollspiralturbine



**Kraftwerk Neuötting: 4-flügelige Kaplan-Halbspiralturbine**

Das entwickelte System wurde mittlerweile als Bestandteil in das Voith-Turbinen-Leitsystems VTLS integriert. Die Entwicklung eines räumlich vollständig auflösenden Verfahrens und einer Methode zur in-situ-Kalibrierung sollen in einem zukünftigen Projektschritt erfolgen.