



Doctoral Thesis

Unsteady flow fields in a high specific speed centrifugal pump

Author(s):

Kaupert, Kevin A.

Publication Date:

1997

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001809455> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH ex. B

Dissertation ETH Nr. 12068

**Unsteady Flow Fields
in a
High Specific Speed Centrifugal Pump**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels
Doktor der Technischen Wissenschaften

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
Kevin A. Kaupert
(M.A.Sc., B.A.Sc.)
University of Toronto

geboren im Jahr 1968
aus London, Kanada

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. G. Gyarmathy, Referent
Dr. T. Staubli, Korreferent
Dr. U. Bolleter, Korreferent

Zürich 1997



CaE

Abstract

The unsteady flow fields within a non-cavitating high specific speed centrifugal pump ($\omega_s=1.7$) were the object of an experimental, numerical, and theoretical investigation in which new signal analysis techniques for unsteady phenomena analysis were implemented. Three particular aspects were subject to detailed concentration, all known to be problematic in the pump industry,

- part load behavior and impeller flow recirculation,
- unsteady impeller blade loading,
- acoustic generation.

Part Load Behavior and Impeller Flow Recirculation

The measured characteristics for the high specific speed centrifugal pump revealed distinct discontinuities in part load operation and were shown to coincide with abrupt unsteady flow field changes in the pump. These discontinuities occurred at different threshold volume fluxes when increasing or decreasing the pump discharge and make up a hysteresis loop. Discrepancies in the magnitude of the pressure discontinuities and shaft power discontinuities indicated, shown theoretically to be plausible, the commencement/cessation of dissipater mechanisms within the flow as the recirculation commences/ceases.

Transient behavior of the hysteresis in the pump pressure discharge characteristic was evaluated as a function of changing volume flux rate experimentally and accordingly theoretically. Quasi steady behavior was found for $|\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t| < 0.005\mathrm{s}^{-1}$. A 2nd order nonlinear dependence on the changing volume flux rate was determined for the change in useful hydraulic power during the commencement/cessation of the impeller recirculation.

The *pump impeller* pressure discharge characteristic was evaluated experimentally and numerically by taking the difference between the integrated impeller outlet and impeller inlet total pressure. The experimental and numerical characteristics agree well including the volume flux location and magnitude of the pressure discontinuities in the hysteresis loop. Experimental and numerical comparisons are made at the impeller inlet/outlet with emphasis on the changing flow field in the hysteresis loop flow regime and its coupling to the onset of recirculation flow zones. This combined application of numerical and experimental tools provided insight for the hysteresis flow field of a pump impeller and for abrupt changes in the associated unsteady flow field.

Unsteady Impeller Blade Loading

For investigating unsteady impeller blade loading twenty five piezoresistive pressure transducers were mounted within a single blade passage and sampled in the rotating impeller frame with a telemetry system. The influence of varying volume flux on the pressure transducers was evaluated in terms of pressure fluctuation magnitudes and phase differences. The magnitude information reveals pressure fluctuations from the impeller-volute interaction grow as the volume flux became further removed from the best efficiency point and as the trailing edge of the impeller blade was approached. These fluctuations reached 35% of the pump head in deep part load. The upstream influence of the volute steady pressure field dominates the unsteady pressure field within the impeller at all off design load points. Acquired signal phase information permitted identification of the pressure field unsteadiness within the impeller passage as fundamentally synchronized simultaneously with tongue passing frequency. Special emphasis was placed on the volume flux regime where the pump and impeller characteristics undergo hysteresis as impeller recirculation commence and cease.

A synthesis of the rotating blade transducers was performed to obtain unsteady blade loading parameters. The value of the unsteady blade lift coefficient varies to near 200% the steady lift coefficient at 55% best efficiency point volume flux, an abrupt fluctuation occurring as the fore running blade suction side passes a volute tongue. The unsteady moment coefficient and center of pressure are also shown to vary significantly during the impeller-volute tongue interaction. The unsteady moment coefficient was shown to be directly related to the unsteady torsional vibrations on the pump shaft providing a link between hydrodynamics and rotordynamics.

Acoustic Generation

Focused on was the quantification of acoustic generation mechanisms within the pump on the fundamental level. These consisted of unsteady flow blockage at the impeller outlet by the volute tongue, unsteady flow forces on the volute tongue, and the classic rotor (Gutin) noise. Of special interest were the unsteady flow forces on the volute tongue which generated an acoustic field. The analytic manipulations performed here incorporate Powell's theory of vortex sound being equivalent to that of Curle and Lighthill for acoustic generation but providing more physical insight into the concept of vortex formation and interaction found within hydraulic turbomachinery. Measurements taken from nineteen pressure transducers on the volute tongue were used to determine the unsteady force from the impeller outlet flow

impingement. These were applied as boundary conditions for the vortex induced sound.

The acoustic generation from unsteady mass flow due to volute tongue blockage is known to be the main source of acoustic generation. However, unsteady forces on the volute tongue were *not* insignificant comprising near 40% of the total acoustic generation. The quantification of the unsteady mass flow acoustic generation was approximated here to permit comparison to the unsteady tongue forces acoustic generation. Further the rotor (Gutin) noise was also included in the comparison and found to have a minimal contribution. The results were interpreted using measured acoustic pressure fluctuations at the pump outlet.

Zusammenfassung

Die Strömungsfluktuationen einer schnellläufigen radialen Pumpe ($\omega_s=1.7$) in kavitationsfreiem Betrieb sind experimentell, numerisch, und theoretisch untersucht worden. Dabei sind neue Methoden zur Signalanalyse von transienten Vorgängen angewendet worden. Schwerpunkte dieser Untersuchung liegen bei drei bekannten Problemen der Pumpenindustrie:

- Teillastverhalten und Laufradrezirkulation
- Zeitlich veränderliche Schaufelbelastung im Laufrad
- Akustische Druckschwankungen und Lärmquelle.

Teillastverhalten und Laufradrezirkulation

Die gemessene Kennlinien der schnellläufigen radialen Pumpe zeigen zwei “Knicke”, die mit der schlagartigen Veränderungen des zeitlich veränderlichen Strömungsfeldes in der Pumpe übereinstimmen. Die Knicke befanden sich bei zwei verschiedenen Volumenströmen in Abhängigkeit von grösser oder kleiner werdendem Volumenstrom. Zusammen formen die zwei Knicke eine Hystereseschleife. Diskrepanzen in der Sprunghöhe der Druck- und Leistungsziffer bei den beiden Knicken lassen sich durch Beginn und Ende eines Dissipationsmechanismus erklären. Dieser Mechanismus koinzidiert mit Beginn und Ende der Laufradrezirkulation. Die Plausibilität dieser Erklärung wird theoretisch aufgezeigt.

Das transiente Verhalten der Druckhysterese ist in Abhängigkeit vom zeitlich veränderlichen Volumenstrom experimentell und theoretisch untersucht worden. Für eine Drosselgeschwindigkeit von $|\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t| < 0.005 \mathrm{s}^{-1}$ ist das quasi stationäre Verhalten der Druckzifferhysterese dokumentiert worden. Eine nicht lineare Abhängigkeit zweiter Ordnung vom veränderlichen Volumenstrom ist in der abgegebenen hydraulischen Leistung während des Beginns und Endes der Laufradrezirkulation festgestellt worden.

Die Druckkennlinie des Laufrades ist experimentell mit Fünflochdrucksonden am Laufradein- und austritt bestimmt worden. Ein Vergleich mit der numerisch berechneten Druckkennlinie zeigt Übereinstimmung auch betreffend der Hystereseschleife. Weitere numerische und experimentelle Vergleiche zwischen dem Strömungsfeld am Laufradein- und austritt sind mit Schwerpunkt im Hysteresebereich durchgeführt worden. Durch den kombinierten Einsatz von experimentellen und numerischen Methoden konnten neue Einblicke in das komplexe Strömungsverhalten der Hystereseschleife gewonnen werden, die für die schlagartige Veränderung des zeitlich veränderlichen Strömungsfeldes verantwortlich sind.

Zeitlich veränderliche Laufradschaufelbelastung

Für die Untersuchung der zeitlich veränderlichen Laufradschaufelbelastung wurden 25 piezoresistive Druckgeber in einen Schaufelkanal montiert und im rotierenden System mittels eines Telemetriesystems abgetastet. Die Volumenstromabhängigkeit der Druckschwankungen wurde bezüglich gemessenem Betrag und Phase beurteilt. Der Betrag der Druckschwankungen zeigt Fluktuationen die von der Interaktion Laufrad Spirale stammen. Diese nehmen zu je mehr der Betriebspunkt vom Wirkungsgrad-Bestpunkt abweicht und je weiter man sich der Schaufelhinterkante nähert. Diese Fluktuationen erreichen bei Teillast bis zu 35% der Pumpen-Förderhöhe. Das zeitlich gemittelte Druckfeld der Spirale hat, abgesehen vom Bestpunkt, dominanten Einfluss auf das zeitlich veränderliche Druckfeld im Laufrad. Die Signalphase erlaubt die Identifikation des zeitlich veränderlichen Laufraddruckfeldes als grundsätzlich synchronisiert mit der Spordrehklangfrequenz.

Durch eine Synthese der Messergebnisse der rotierenden Druckgeber konnte der zeitlich veränderliche Laufradschaufelbelastungsparameter bestimmt werden. Der zeitlich veränderliche Auftriebskoeffizienten variiert um bis zu 200% des zeitlich gemittelten Auftriebskoeffizient bei 55% des Bestpunktvolumenstrom. Eine schlagartige Fluktuation des Auftriebskoeffizienten der Schaufel ergibt sich wenn die vorlaufende Schaufel an einem Sporn vorbeizieht. Das zeitlich veränderliche Drehmoment und die Lage des Druckschwerpunktes variierten auch signifikant während der Interaktion von Laufschaufel und Sporn. Das zeitlich veränderliche Schaufeldrehmoment ist weiter direkt gekoppelt mit den zeitlich veränderlichen Torsionschwingungen an der Pumpenwelle. Dies verknüpft Hydrodynamik und Rotordynamik.

Akustische Druckschwankungen und Lärmquelle

Schwerpunkt der akustischen Druckschwankungen war das Verständnis der physikalische Ursache der Lärmerzeugung und die Quantifizierung der Quellen. Die Lärmgenerierung ergab sich aus der zeitlich veränderlichen Versperrung am Laufrad-Austritt durch die Sporninteraktion, aus den zeitlich veränderlichen Kräften am Sporn und aus dem klassischen Rotor (Gutin) Schall. Die analytisch unternommen Berechnungen basieren auf der Powell'schen Theorie des Wirbel induzierten Schalls. Zum gleichen Ergebnis kommen auch die klassischen Arbeiten von Curle und Lighthill. Der Powell'sche Ansatz ist aber besser geeignet für die Wirbel- Formation und die Interaktionen, die typisch für hydraulische Strömungsmaschinen sind. Messungen von neunzehn auf dem Sporn

montierten Druckgebern dienten als Basis für die Auswertung der zeitlich veränderlichen Kräfte auf den Sporn die durch die Laufradaustrittsströmung hervorgerufen werden. Diese Kräfte dienten als Randbedingung für die wirbelinduzierten Akustikberechnungen.

Hauptquelle der akustischen Generation ist der fluktuierende Massenstrom, verursacht durch die zeitlich veränderliche Laufradkanalversperrung des Sporns. Die akustische Erzeugung der zeitlich veränderlichen Kräfte auf den Sporn ist nicht zu vernachlässigen und ergibt etwa einen 30% Anteil an der gesamten akustischen Generation. Der Einfluss des zeitlich veränderlichen Massenstroms als akustischer Generator wurde nur abgeschätzt, um einem Vergleich mit dem zeitlich veränderlichen Kraftanteil der akustische Generation zu ermöglichen. Der Rotor (Gutin) Schall hat im Vergleich zu den anderen zwei Quellen einen vernachlässigbaren Anteil an der gesamten Lärmerzeugung. Die Resultate der Analyse wurden auch mit gemessenen akustischen Druckschwankungen am Austritt der Pumpe verglichen.