

Beitrag zur virtuellen Abreinigungsbeurteilung hygienegerechter, mehrstufiger Kreiselpumpen mittels der RANS-Turbulenzmethode

vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Heiko Kipp

aus Wiesbaden

Tag der mündlichen Prüfung:

Dekan:

Vorsitzender:

Berichterstatter:

03.12.2010

Prof. Dr.-Ing. S. Ripperger

Prof. Dr.-Ing. M. Böhle

Prof. Dr.-Ing. D.-H. Hellmann

Prof. Dr.-Ing. S. Ripperger

Prof. Dr.-Ing. E. Schlücker

SAM-Fortschrittsberichte

Band 4

Heiko Kipp

**Beitrag zur virtuellen Abreinigungsbeurteilung
hygienegerechter, mehrstufiger Kreislumpen
mittels der RANS-Turbulenzmethode**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9875-3

ISSN 2191-8031

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt vor allem Herrn Prof.-Ing. Dr. D.-H. Hellmann, der mir nicht nur durch sein außerordentliches fachliches Engagement, sondern auch durch seinen individuellen Führungsstil stets ein Vorbild sein wird. Ich möchte mich daher bei Herrn Prof. Dr.-Ing. D.-H. Hellmann außerordentlich für das in seine Mitarbeiter gesetzte Vertrauen und seine Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit danken. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Böhle, als neuer Leiter des Lehrstuhls, der mir durch die fachlichen Diskussionen und den daraus entstandenen neuen Denkansätzen entscheidend weitergeholfen hat. Des Weiteren möchte ich mich bei der Berdelle-Hilge Stiftung und dessen Stiftungsbeirat für die Unterstützung bedanken. Meinem besonderen Dank möchte ich Frau Hannelore Berdelle-Hilge dafür aussprechen, dass sie durch ihr großes persönliches Engagement jungen Menschen unterstützt, indem sie in deren Zukunft investiert. Ferner bedanke ich mich bei den Herren Prof. Dr.-Ing. J. Schlücker und Prof. Dr.-Ing. S. Ripperger für die Übernahme der Koreferate der Prüfungskommission. Allen Kollegen und Mitarbeiter des Lehrstuhls für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen möchte ich meinen Dank für die kollegiale und hilfsbereite, tatkräftige Unterstützung. Meinen besonderen Dank gilt dabei den Herren Dr.-Ing. Harald Roclawski und Dipl.-Ing. Peter Kugel, die mir immer zu fachlichen Diskussionen zur Seite standen.

Ich danke allen meinen wissenschaftlichen Hilfskräften, Studien- und Diplomarbeitern, durch deren personelle Unterstützung und Beiträge erst dieser Rahmen der Arbeit ermöglicht wurde. Außerdem danke ich meinen Eltern, meinen Geschwistern und nicht zuletzt meiner Lebensgefährtin Stefanie Welz, die mich immer auf meinen Weg unterstützt und motiviert haben.

Wiesbaden, im Februar 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	5
2	Theoretische Grundlagen.....	9
2.1	Grundlage des Hygienic Designs.....	9
2.1.1	Hygienegerechte Bauteilgestaltung.....	11
2.1.2	CIP-Reinigung in der Lebensmittelindustrie	12
2.1.3	Hygienic Design Testmethodiken	14
2.1.3.1	Prinzip der EHEDG-Testmethode	15
2.1.4	Verschmutzung, Adhäsions- und Abreinigungsbeschreibung	18
2.1.5	Strömungsmechanische Reinigungsbeschreibung	22
2.1.6	Numerische Abreinigungsbeurteilung.....	29
2.2	Grundlagen der Kreispumpen	34
2.2.1	Allgemeine Kennzahlen.....	34
2.2.2	Energieübertragung im Laufrad.....	36
2.2.3	Kennlinienverläufe.....	38
2.2.4	Ähnlichkeitsgesetzte, Affinität und Wirkungsgradumrechnung	44
2.3	Theoretische Grundlagen der CFD	49
2.3.1	Grundgleichungen	50
2.3.2	Turbulente Strömung.....	52
2.3.3	Statistische Turbulenzmodellierung.....	55
2.3.4	Das k- ω -SST-Modell.....	63
2.3.5	Wandbehandlung des k- ω -SST-Modells	66
2.3.6	Numerische Diskretisierung	71
2.3.7	Numerische Modellierung der Laufradinteraktion	75
2.3.8	Numerische Fehlerarten	77
3	Die Versuchspumpe	83
4	Aufbau des CFD-Modells und Modellvalidierung.....	89
4.1	Diskretisierung der Pumpengeometrie	90
4.2	Randbedingungen und Solvereinstellungen	93
4.3	Modellvalidierung durch stationäre Kennlinienverläufe	95
5	Numerisch qualitative EHEDG-Beurteilung	107

5.1	Kennlinienverläufe des Simulationsmodells	108
5.2	Ergebnisse der qualitativen Abreinigungsvorhersage	111
5.2.1	Globale Geschwindigkeitsverteilung	111
5.2.2	Wellenmutterbereich	114
5.2.3	Laufradbereich	115
5.2.4	Leitgehäusebereich	119
5.2.5	Druckgehäusebereich mit Gleitringdichtung	122
5.3	Zusammenfassung und Diskussion	125
6	Geschwindigkeitsvergleiche im Luftversuch	129
6.1	Prüfstand und Messeinrichtung	131
6.1.1	Aufbau der Versuchspumpe und Messpositionen	136
6.1.2	Hitzdrahtmesstechnik	138
6.2	Das numerische Modell der Versuchspumpe	142
6.2.1	Ähnlichkeitsüberprüfung des Luftversuchs	144
6.3	Ergebnisse der Geschwindigkeitsvergleiche	151
6.3.1	Vergleich der Radseitenraumströmungen der Stufen 1 und 3	154
6.3.2	Vergleich des Abströmungsverhaltens der Stufe 1	166
6.3.3	Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung der Stufe 4	167
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	169
6.5	Auswirkungen auf den numerischen EHEDG-Test	171
7	Wandschubspannungsvergleiche im Wasserversuch	175
7.1	Prüfstand und Messeinrichtung	177
7.1.1	Aufbau der Versuchspumpe und Messpositionen	180
7.1.2	Das numerische Modell der Versuchspumpe	182
7.2	Numerischer und experimenteller Kennlinienvergleich	183
7.3	Ergebnisse der Wandschubspannungsvergleiche	186
7.3.1	Experimentelle Ergebnisse	186
7.3.2	Numerische Ergebnisse	189
7.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	192
7.5	Auswirkungen auf den numerischen EHEDG-Test	194
8	Zusammenfassung und Ausblick	199
	Lateinische Formelzeichen	219
	Griechische Formelzeichen	222
	Anhang A.1 Theorie Radiale Strömungskammer	227

Anhang A.2 Grundlage Heißfilmmesstechnik.....	231
Anhang A.3 Versuchsaufbau Kalibrierprüfstand	239
Anhang A.4 Prüfstandsteuerung und Signalverarbeitung	243
Anhang A.5 Kalibrierverfahren der Heißfilmsonden	246
Anhang A.6 Signalkorrelation.....	247
Anhang A.7 Validierung des Kalibrierverfahrens.....	251
Anhang A.8: Ergebnisse	254
Anhang A.9 Fehlereinfluss	263
Anhang A.10 Zusammenfassung	266
Anhang B.1 Messgenauigkeit Luftversuch	271
Messgenauigkeit der Förderstrommessung	271
Messgenauigkeit der Förderhöhenmessung	273
Messgenauigkeit der mechanischen Leistungsmessung	274
Messgenauigkeit der Wirkungsgradbestimmung	275
Anhang B.2 Messgenauigkeit Sondenkalibrierung.....	275
Anhang B.3 Messgenauigkeit Wandschubspannungskalibrierung.....	277
Messgenauigkeit turbulente Wandschubspannung.....	277
Messgenauigkeit laminare Wandschubspannung	278
Messgenauigkeit Anemometerspannung	279
Anhang B.4: Messgenauigkeit Wasserversuch	279
Gesamtgeschwindigkeitskomponenten der Stufe 1 und 3	280
Axialgeschwindigkeitskomponenten der Stufe 1 und 3	285
Radialgeschwindigkeitskomponenten der Stufe 1 und 3.....	290
Tangentialgeschwindigkeitskomponenten der Stufe 1 und 3	295
Gesamtgeschwindigkeitskomponenten am Stufenaustritt 1.....	300
Geschwindigkeitskomponenten der Stufe 4	301
Experimentelle Wandschubspannungsverläufe Radius A.....	309
Experimentelle Wandschubspannungsverläufe Radius B.....	312
Experimentelle Wandschubspannungsverläufe Radius C.....	315
Experimentelle Wandschubspannungsverläufe Radius D.....	318
Numerische Wandschubspannungsverläufe	320

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema der verlässlichen Anwendungsmöglichkeit der CFD-Methode (Computational Fluid Dynamics) zur Beurteilung des Abreinigungsverhaltens hygienegerechter, mehrstufiger Kreispumpen. Das Ziel dieser Untersuchungen ist die Verwendung der CFD als ein virtuelles Werkzeug zur Überprüfung der hygienischen Ausführungen in Übereinstimmung mit den CIP (Clean In Place)-Abreinigungsuntersuchungen der EHEDG-Gruppe.

Die Optimierung und Verbesserung hygienegerechter Ausführungen von Anlagenkomponenten und insbesondere Kreispumpen spielen eine entscheidende Rolle in der Lebensmittel- und pharmazeutischen Industrie. Durch die Ratifizierung der europäischen Maschinenrichtlinien 98/37/EG und der Maschinenleitlinie 2006/42/EG sind Hersteller hygienischer Anlagenkomponenten in der Pflicht, die Einhaltung der Hygienic Design Standards selbstständig zu kontrollieren und zu garantieren. Aus diesem Grund sind freiwillige, praktische Zertifizierungstests unter Verwendung standardisierter, mikrobiologischer Verschmutzungen unabdingbar. Der am weitest verbreitetste Zertifizierungstest in diesem Bereich stellt die EHEDG-Zertifizierung dar. Zum Erreichen der Bauteilzertifizierung wird zunächst die Einhaltung der hygienerelevanten Gesetze und Richtlinien kontrolliert. Anschließend wird in mehrmaligen mikrobiologischen Abreinigungsversuchen die praktische Einhaltung der hygienegerechten Ausführung mit Hilfe von sogenannten CIP (Clean In Place)-Reinigungstests untersucht und zertifiziert. Dieser umfassende Zertifizierungsprozess des Bauteils gerade bei Neukonstruktionen mit mehreren Auslegungsalternativen zu einem sehr hohen Kosten- und Zeitaufwand. Aus diesem Grund soll die erweiterte Verwendung der numerischen CFD-Methode in der frühen Konstruktionsphase -neben der herkömmlichen Hydrauliküberprüfung- eine frühzeitige Validierung des Hygienic Designs aller produktberührenden Baugruppen und eine gezielte strömungstechnische Optimierung ermöglichen.

In der Strömungssimulation wird der virtuelle Reinigungserfolg dabei einzig durch das strömungsmechanische Kriterium der hygienerelevanten Wandschubspannung der Verschmutzung, gemäß Untersuchungen von Jensen [Jen

03] beurteilt. Für eine realitätsnahe, numerische Abreinigungsbeurteilung spielt die Berücksichtigung aller geometrischen Details eine entscheidende Rolle. So wurde eine dreistufige Pumpengeometrie der Aufgabe entsprechend aufgelöst, wobei alle geometriespezifischen Besonderheiten im Simulationsmodell aus strömungsmechanischer Sicht berücksichtigt wurden. Alle Strömungsberechnungen der mehrstufigen Pumpen erfolgten mit dem $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell des kommerziellen CFD-Programms Ansys Fluent 6.3. Für die Wandmodellierung wurde die auf das Modell angepasste, erweiterte Wandbehandlung mit Grenzsichtauflösung eingesetzt. Die Kopplung zwischen den Laufrädern und den stationären Leitgehäusen, sowie zum Druckgehäuse hin wurde bei stationärer Berechnung mittels der Frozen-Rotor-Methode und bei transienter Simulation durch die Sliding-Mesh-Methode modelliert. Aufgrund numerischer Instabilitäten wurde einzig das First-Order-Interpolationsverfahren verwendet. Durch numerische Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass netzunabhängige numerische Lösungen für halboffene, mehrstufige Pumpengattungen nicht realisierbar sind. Hierfür wurden die stationär berechneten Kennlinienverläufe des dreistufigen Pumpenmodells verschiedener Netzauflösungen unter Verwendung des First-Order- und Second-Order-Interpolationsverfahrens verglichen. Deshalb wurde ein speziell auf den EHEDG-Teillastpunkt abgestimmtes, mehrstufiges Simulationsmodell verwendet. Das Modell wurde in Hinblick auf die Netzfeinheit, des benötigten Rechenaufwandes im transienten Fall sowie der minimal erreichbaren Abweichungen zum tatsächlichen Kennlinienverlauf ausgewählt. Im Anschluss daran wurde gemäß EHEDG-Randbedingungen die Abreinigbarkeit der bereits zertifizierten mehrstufigen Kreiselpumpe durch die strömungsmechanische Beschreibung des Reinigungsprozesses während der transienten Simulation untersucht. Abweichend von der tatsächlichen Reinigungstemperatur wurden jedoch im Rahmen dieser Arbeit alle Simulationen und Wasserversuche bei einer Fluidtemperatur von $T=20^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. So wurden qualitativ die Reinigungsmechanismen durch deren numerisch transienten Simulationsergebnisse der hygienekritischen Wandschubspannungsverteilungen an den produktberührenden Wänden dargestellt und beurteilt. Alle Reinigungseffekte innerhalb der Pumpe unterliegen dabei zeitabhängigen Reinigungsfrequenzen, die sich über mehrere Laufradumdrehungen hinweg geometrieabhängig erstrecken.

Zur Validierung der Ergebnisse wurde ein umfassender experimenteller Geschwindigkeits- und Wandschubspannungsvergleich an angepassten Versuchspumpen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Güte der Simulationsergebnisse zu beurteilen und Unterschiede zu detektieren. Hierfür wurden an ausgewählten Messpositionen innerhalb der Pumpenstufen die lokalen Strömungsgrößen für jeden Zeitschritt aufgezeichnet und mit den experimentellen Daten verglichen. Anhand der begleitenden Experimente an den Versuchspumpen wurde gezeigt, dass die netzabhängigen Simulationsergebnisse modellbedingten Ungenauigkeiten im Teillastbereich unterliegen, die einer quantitativen Abreinigungsvorhersage entgegenwirken. Trotzdem konnte gezeigt werden, dass die numerischen Strömungsgrößen durch die Berechnung mittel der RANS-Turbulenzmodellierung in einer guten qualitativen Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen sind. Als Ergebnis der Untersuchung wurde so bewiesen, dass eine virtuelle Abreinigungsuntersuchung an hochkomplexen Anlagenkomponenten qualitativ möglich ist.

Für die Wandschubspannungsmessaufgabe in Wasser wurde eigens ein neues Kalibrierverfahren für Heißfilmsonden in höher turbulenten Strömungen entwickelt und erfolgreich elektromechanische Sensoren in der Pumpe angewendet. Zum Erreichen der turbulenten Wandschubspannungsbereiche wurde dafür eine radiale Strömungskammer entwickelt und die zugrunde liegenden empirischen Gleichungen durch numerische und experimentelle Vergleiche validiert. Für den numerischen Vergleich wurden dafür die Ergebnisse der CFD-Programme Ansys Fluent 6.3 und Ansys CFX 11 verglichen.

Abstract

In order to estimate the potential of a reliable cleanability caused by fluid mechanical effects in closed processing equipments the applicability of Computational Fluid Dynamics (CFD) is examined and evaluated on a hygienic designed, multistage centrifugal pump in this work. The aim of these investigations is the use of CFD as a virtual tool to verify the hygienic design according to the relevant CIP (Clean In Place) cleanability tests of the EHEDG-group.

Hygienic design optimizations and improvements of processing equipments and especially centrifugal pumps play an immense role in food and pharmaceutical industries. Caused by the ratification of Machine Directive 98/37/EG and future machine guideline 2006/42/EG hygiene relevant equipment manufacturers are urged to control and guarantee the constructive implementations ensuring the hygienic design standards. Thereby, voluntary practical certification tests with micro-biological contamination are unavoidable. Within this field of activity, the most popular certification test is the EHEDG cleaning test in Europe. Hereby, the equipment design is checked in accordance with the national and international standards and guidelines for adherence of hygienic design standards. Practically subsequently, with repeated micro-biological cleaning tests the hygienic design of the equipment is tested and certified by so called CIP-tests (Clean In Place). Thereby, this extensive process of hygienic design certification causes higher expenditures of time and costs especially for new part designs with different alternative design features. Thus, the enhanced application of the numerical CFD-method is investigated as an additional verification and optimization tool for hygienic design issues during the early stage of development, besides the typical use for hydraulic dimensioning.

The simulated cleanability efforts are solely classified by the hydrodynamic criterion of the hygiene relevant wall shear stress range of the soil in accordance with examinations of Jensen [Jen 03] The consideration of all geometric details and specifications are important for a numerical cleanability prediction close to reality. Thus, a three-stage centrifugal pump design was discretized complying with the simulation task. For numerical hydrodynamic purposes, all geometric characteristics of this specific pumping type were included then in detail. All multistage pump simulations have been carried out using the RANS-turbulence

model $k-\omega$ -SST in the commercial CFD-software Ansys Fluent 6.3. The enhanced wall treatment adapted to the turbulence model with boundary layer resolution was used to model the near wall region. The coupling of the rotating frame of the impellers to the stationary frame of the guidance casing as well as to the discharge casing were modelled by using the Frozen-Rotor for steady-state simulation and Sliding-Mesh-Method for transient simulation purposes. Due to numerical instabilities the best prediction of the flow was obtained by the First-Order-Interpolation scheme. Previously to further numerical cleanliness investigations it was shown that grid independent numerical solutions cannot be realized for half-opened multistage centrifugal pump types. Therefore, the curve behaviour of steady-state simulated characteristic curves with different grid resolutions of the three-stage pump model were compared by the use of the First-Order and Second-Order interpolation schemes. As a consequence a specific adapted multistage pump model was used to simulate the EHEDG-partial load point. The model was chosen with regard to the grid resolution, the time requirement for transient computing as well as the minimal reachable deviation of the characteristic curves in dependency of the chosen turbulence model and interpolation scheme. In accordance with the EHEDG-boundary conditions the cleanliness of the already certified multistage pump was numerically investigated by the use of the hydrodynamic cleaning descriptions of transient simulations. As an exception to the EHEDG-certification test all simulations and experimental water-tests were arranged at a fluid temperature of $T=20^{\circ}\text{C}$. As a result, the hydrodynamic mechanisms for cleaning were qualitatively shown by the transient hygiene critical wall shear stress distributions at the parts touching the fluid. It was found out, that all cleaning effects inside the pump are subjects of time-dependant cleaning frequencies, spanning over several impeller revolutions in dependency of the geometrical position. For validation purposes, extensive experimental comparisons of local velocity profiles and wall shear stress distributions were arranged by the use of customized pump designs and identically adapted pump simulation models. The aim of these investigations was the estimation of the numerical quality and the detection of differences in the numerical predictions. Therefore, the local fluid variables were recorded for every time-step and compared to the experimental data. On the basis of these accomplished comparisons it was shown that the grid dependent numeric results

are affected by model-dependant inaccuracies in the partial load range, which work against a quantitative numeric cleanability prediction. Nevertheless, it could be demonstrated that the numeric flow parameters computed by the RANS-turbulence model are in a good qualitative accordance with the experimental results. As a result of these investigations it was approved that a virtual cleanability prediction of high-complex equipment components is qualitatively possible.

For the wall shear stress measuring task in water, a new hot-film calibration setup and procedure were specially developed for higher turbulent flow regimes and the calibrated probes were applied in the pump. A radial flow chamber was developed for reaching the necessary higher turbulent wall shear stresses and the underlying empirical equations were validated by numerical and experimental comparisons. For the numeric validation the results of the commercial CFD codes Ansys Fluent 6.3 and CFX 11 were compared.