

Reihe 7

Strömungstechnik

Stephan Uhkötter, M. Sc.,  
Berlin

Nr. 504

## Untersuchung der Strömungs- und Vermischungsphänomene in schnelllaufenden hydrodynamischen Turbinengleitlagern



# **Untersuchung der Strömungs- und Vermischungsphänomene in schnelllaufenden hydrodynamischen Turbinengleitlagern**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
genehmigte

**DISSERTATION**

vorgelegt von

Stephan Uhkötter M.Sc.

aus Münster

Hamburg 2016

Tag der mündlichen Prüfung: 29. April 2016

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Franz Joos

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan aus der Wiesche

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 7

Strömungstechnik

Stephan Uhkötter, M. Sc.,  
Berlin

Nr. 504

Untersuchung der  
Strömungs- und  
Vermischungsphänomene  
in schnelllaufenden  
hydrodynamischen  
Turbinengleitlagern

VDI verlag

Uhkötter, Stephan

## **Untersuchung der Strömungs- und Vermischungsphänomene in schnelllaufenden hydrodynamischen Turbinengleitlagern**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 7 Nr. 504. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

172 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen.

ISBN 978-3-18-350407-7, ISSN 0178-9538,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

**Für die Dokumentation:** Turbinengleitlager – Radialgleitlager – Gleitlagertaschen – Strömungs- und Vermischungsphänomene – CFD-LES-Kavitation-Temperaturverhalten

Die vorliegende Arbeit zeigt eine detaillierte Untersuchung der Strömungs- und Vermischungsphänomene in Turbinengleitlagern. Der Fokus dieser Untersuchung liegt dabei auf den Gleitlagertaschen. Stand der bisherigen Forschung und Technik stellt die Schmierfilmtheorie mit empirischen Korrelationen dar. Diese Vereinfachungen der Schmierfilmtheorie werden in dieser Arbeit durch die Verwendung einer CFD-Berechnung vermieden. Es wird so ein höherer Detaillierungsgrad erreicht.

Fragestellungen im Gleitlager, wie nach dem Maximaltemperaturverhalten in Abhängigkeit vom Vermischungsverhalten in den vorgelagerten Ölversorgungstaschen, lassen sich somit numerisch beantworten. Die Anwendung der Methodik auf ein Turbinengleitlager und ein beispielhaftes Ergebnis werden detailliert gezeigt.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9538

ISBN 978-3-18-350407-7

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratorium für Wärme-, Energie- und Motorentechnik der Fachhochschule Münster.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Franz Joos und Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan aus der Wiesche, die diese Arbeit durch ihre exzellente Betreuung und umfassende Unterstützung, sowie durch ihr persönliches Engagement erst ermöglicht haben.

Danken möchte ich auch Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac und Prof. Dr.-Ing. Heinz Herwig für die Begleitung auf meinem Weg. Bedanken möchte ich mich zudem bei der Siemens AG für die Förderung dieser Arbeit und die gute Zusammenarbeit, insbesondere Dipl.-Ing. Michael Kursch, Dr.-Ing. Stefan Janssen und Dr.-Ing. Christian Beck.

Mein Dank gilt auch dem Lehrstuhl für Produktentwicklung der Ruhr-Universität Bochum und Dipl.-Ing. Sebastian Kukla für die Bereitstellung der Messdaten, sowie den Mitarbeitern des Laboratoriums für Strömungsmaschinen der Helmut-Schmidt-Universität für ihren Einsatz.

Ein großes Dankeschön an Christian Helcig, Reiner Schönfeld, Karsten Hasselmann, Felix Reinker, Marek Kapitz, Holger Czajka, Thorsten Kroner, Thomas Gensrich, Jürgen Lux und Prof. Dr.-Ing. Hans-Arno Jantzen für die zahlreichen inspirierenden Diskussionen und die Unterstützung während der Messungen.

Ich danke dem Stipendien-Programm der Fachhochschule Münster für die finanzielle Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht hätte begonnen werden können, sowie dem DAAD für die zweimalige Bewilligung eines Stipendiums.

Ganz besonders Danke ich meiner Familie für ihre Unterstützung und meiner Frau Christina für ihre Geduld einen großen Teil unserer Zeit dieser Arbeit zu widmen.

Berlin, Juni 2016

Stephan Uhkötter



# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund . . . . .	2
1.2 Gegenstand der vorliegenden Untersuchung . . . . .	4
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>8</b>
2.1 Wirkungsweise eines Turbinengleitlagers . . . . .	8
2.1.1 Tribologie . . . . .	12
2.1.2 Fluidmechanik . . . . .	13
2.1.3 Ölzuführung zur Schmierung und Kühlung . . . . .	15
2.1.4 Kavitation . . . . .	17
2.2 Experimenteller Aufbau eines Turbinengleitlagerprüfstands . . . . .	19
<b>3 Modellbildung und numerische Simulation der Gleitlagerströmung</b>	<b>22</b>
3.1 Modellbildung turbulenter Strömung . . . . .	23
3.1.1 REYNOLDS-averaged NAVIER-STOKES Simulation (RANS) . . . . .	25
3.1.2 Large Eddy Simulation (LES) . . . . .	32
3.2 Mehrphasige Strömung und Kavitation . . . . .	38
3.3 Energiegleichung und Temperaturabhängigkeiten . . . . .	40
<b>4 Gesamtgleitlagerbetrachtung</b>	<b>41</b>
4.1 Numerische Ergebnisse . . . . .	43
4.1.1 Thermische Bilanzierung . . . . .	48
4.1.2 Druckverteilung . . . . .	49
4.1.3 Füllungsgradfeld . . . . .	50
4.1.4 Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	53
4.2 Validierung durch experimentelle Daten . . . . .	54

<b>5</b>	<b>Lagertaschenbetrachtung</b>	<b>59</b>
5.1	Konfusor mit einseitig bewegter Berandung . . . . .	61
5.1.1	CFD-Simulation . . . . .	64
5.1.2	Experimenteller Versuchsaufbau und Messdaten . . . . .	68
5.1.3	Validierung der CFD-Ergebnisse . . . . .	72
5.2	Lagertaschenmodell ohne Frischölauführung . . . . .	75
5.2.1	Analytische Betrachtung . . . . .	76
5.2.2	CFD-Simulation . . . . .	78
5.2.3	Experimenteller Versuchsaufbau und Messdaten . . . . .	83
5.2.4	Validierung und Diskussion der Ergebnisse . . . . .	90
5.3	Lagertaschenmodell mit Frischölauführung . . . . .	98
5.3.1	CFD-Simulation . . . . .	98
5.3.2	Experimenteller Versuchsaufbau . . . . .	106
5.3.3	Validierung und Diskussion der Ergebnisse . . . . .	107
5.3.4	Vermischung . . . . .	110
<b>6</b>	<b>Anwendung der Erkenntnisse auf Turbinengleitlager in Schwerbauweise</b>	<b>113</b>
6.1	Strömungsphänomene . . . . .	114
6.1.1	CFD-Simulation . . . . .	114
6.1.2	Grundlegende Strömungsform der Gleitlagertasche . . . . .	116
6.1.3	Zuführungsabhängige Strömungsform der Gleitlagertasche . . . . .	117
6.2	Vermischungsverhalten . . . . .	121
6.3	Temperaturverteilung . . . . .	124
<b>7</b>	<b>Resultate und Diskussion</b>	<b>131</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>134</b>
	<b>Literatur</b>	<b>136</b>

# Nomenklatur

## Lateinische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Abschnitt
$a$	$\text{m}^2/\text{s}$	Temperaturleitfähigkeit	3.3
$a_1$	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$A_0$	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$A_S$	-	turbulenter Modellparameter	3.1
$A_\mu$	-	stoffabhängige Konstante	3.3, 4.1
$b_1$	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$B$	mm	Lagerbreite	2.1, 2.2, 4.2
$B_K$	mm	Kanalbreite	5.0–5.3
$B_\mu$	-	stoffabhängige Konstante	3.3, 4.1
$c_p$	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	3.3
$c_{p\text{Öl}}$	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität des Öls	2.2
$c_1$	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$C$	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$d_h$	mm	hydraulischer Durchmesser	5.3
$D$	mm	Lagerdurchmesser	2.1
$D_W$	mm	Wellendurchmesser	2.2, 4.0
$e$	mm	Exzentrizität	2.1
$f$	-	turbulenter Modellparameter	3.1
$F$	N	Kraft	2.1
$F$	-	turbulenter Modellparameter	3.1
$F_L$	N	Lagerbelastung	2.1, 2.2

$g$	-	turbulenter Modellparameter	3.1
$G$	-	Filterkern	3.1
$G_k$	kg/(m s <sup>3</sup> )	turbulenter Produktionsterm	3.1
$h$	µm	Spalthöhe	2.1, 2.2, 4.0, 4.2, 5.1
$H_K$	mm	Kanalhöhe	5.0–5.3
$k$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	kinetische Turbulenzenergie	3.1, 4.1
$l$	m	Abstand zur nächstgelegenen Oberfläche	3.1
$l_m$	m	PRANDTL'Scher Mischungsweg	3.1
$L_K$	mm	Kanallänge	5.0–5.3
$\dot{m}$	kg/s	Massenquellterm	3.2
$M$	N m	Reibungsmoment	2.1
$n$	-	Stichprobe	3.1
$n_W$	min <sup>-1</sup>	Antriebsdrehzahl	2.2
$N$	-	Gitterzellenanzahl	4.1, 5.1, 5.2, 6.1
$N$	-	Stichprobenumfang	3.1, 5.2
$n_0$	m <sup>-3</sup>	Keimdichte	3.2
$p$	Pa	Druck	1.2, 2.1, 3.0–3.2, 4.1, 5.1, 5.2
$p^+$	%	normierter Druck	4.1, 4.2, 5.1
$\bar{p}$	%	mittlerer Lagerdruck	2.1
$\check{P}$	kg/(m s <sup>3</sup> )	turbulenter Modellparameter (Quellterm der turbulenten kinetischen Energie)	3.1
$P_{Wmax}$	W	maximale Wellenleistung	2.2
$q$	1/s	Geschwindigkeitsskala	3.1
$r_W$	mm	Wellenradius	2.1
$r$	-	turbulenter Modellparameter	3.1
$R$	m	Blasenradius	3.2
$RMS_{u'_K}$	m/s	Root-Mean-Square-Wert (quadratisches Mittel) der Geschwindigkeitsschwankungen $u'_K$	5.2
$RMS_{v'_K}$	m/s	Root-Mean-Square-Wert (quadratisches Mittel) der Geschwindigkeitsschwankungen $v'_K$	5.2
$S_{ij}$	1/s	Deformationsgeschwindigkeitstensor	3.1
$t$	s	Zeit	0, 2.1, 3.0–3.3, 5.2
$\Delta t$	s	Zeitintervall	3.1, 5.3

$T$	K	Temperatur	1.2, 3.3, 4.1, 6.1
$T_{mix}$	K	Mischungstemperatur	6.1, 6.3
$Tu$	%	Turbulenzgrad	5.2
$T^+$	%	normierte Temperatur	4.1, 4.2
$T_{in}$	°C	Ölzuführtemperatur	2.2
$u$	m/s	Geschwindigkeitskomponente in Hauptrichtung	3.1, 5.1, 5.2
$u'$	m/s	Geschwindigkeitsschwankung in Hauptrichtung	5.2
$u_K$	m/s	Geschwindigkeit in Kanallängenrichtung	5.1, 5.2
$u'_K$	m/s	Geschwindigkeitsschwankung in Kanallängenrichtung	5.2
$u_W$	m/s	Wandgeschwindigkeit	5.1
$u^+$	-	normierte Geschwindigkeit	5.1, 5.2, 6.1
$u_i$	m/s	Geschwindigkeitsvektor in Indexnotation	2.1, 3.0–3.2
$u_j$	m/s	Geschwindigkeitsvektor in Indexnotation	2.1, 3.0, 3.1
$U$	m/s	Geschwindigkeitsbetrag	0, 1.2, 5.3, 6.1
$U_S$	m/s	Geschwindigkeit der Lagerschale	2.1
$U_W$	m/s	Geschwindigkeit der Welle	2.1
$U^*$	1/s	turbulenter Modellparameter	3.1
$u_\tau$	m/s	Schubspannungsgeschwindigkeit	5.2
$v$	m/s	Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Hauptrichtung	5.2
$v'$	m/s	Geschwindigkeitsschwankung senkrecht zur Hauptrichtung	5.2
$v_K$	m/s	Geschwindigkeit in Kanalhöhenrichtung	5.2
$v'_K$	m/s	Geschwindigkeitsschwankung in Kanalhöhenrichtung	5.2
$\mathbf{v}$	m/s	Geschwindigkeitsvektor	3.3, 4.0, 4.1, 5.1, 5.2
$w$	m/s	Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptrichtung	5.2
$w'$	m/s	Geschwindigkeitsschwankung quer zur Hauptrichtung	5.2
$w_K$	m/s	Geschwindigkeit in Kanalbreitenrichtung	5.2
$f_i$	J/kg	spezifische äußere potentielle Energie, Massenkraftpotential, Schwerkraftpotential	2.1, 3.0

$x$	m	kartesische Koordinate (Haupttrichtung)	0, 2.1, 3.1, 5.0–5.3, 6.0, 6.1
$x_i$	m	kartesische Koordinate in Indexnotation	2.1, 3.0, 3.1
$x_j$	m	kartesische Koordinate in Indexnotation	2.1, 3.0, 3.1
$y$	m	kartesische Koordinate (senkrecht zur Haupttrichtung)	5.0–5.3, 6.0, 6.1
$y^+$	-	normierter Wandabstand	5.1, 5.2
$z$	m	kartesische Koordinate (quer zur Haupttrichtung)	2.1, 5.0–5.3, 6.0, 6.1

## Griechische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Abschnitt
$\alpha$	%	Füllungsgrad	1.2, 3.2, 4.1, 4.2
$\beta$	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$\beta^*$	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$\gamma$	°	Exzentrizitätswinkel	2.1
$\gamma$	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$\dot{\gamma}$	1/s	Schergeschwindigkeit	2.1
$\delta_{ij}$	-	KRONECKER-Delta	3.1
$\Delta$	m	Filterweite	3.1
$\Delta\vartheta^+$	-	normierte Temperaturänderung	6.1–6.3
$\varepsilon$	m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	turbulente Dissipation	3.1, 4.1
$\zeta$	-	turbulenter Modellparameter	3.1
$\eta$	m	KOLMOGOROV-Länge	3.1
$\iota$	-	Hilfsvariable zur Ermittlung turbulenter Modellkonstanten	3.1
$\kappa_t$	-	turbulente Modellkonstante (von-Kármán-Konstante)	3.1
$\lambda_{\tilde{O}l}$	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Öls	2.2

$\mu$	Pa s	dynamische Viskosität	2.1, 3.1–3.3, 4.1, 5.2
$\mu$	-	Reibungskoeffizient	2.1
$\mu_t$	Pa s	turbulente dynamische Viskosität	3.1
$\mu_{\dot{\omega}_l}$	Pa s	dynamische Ölviskosität	2.2
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität	2.1, 3.0, 3.1, 3.3, 4.0, 5.2, 5.3
$\nu_t$	m <sup>2</sup> /s	turbulente kinematische Viskosität	3.1
$\check{\nu}$	m <sup>2</sup> /s	Wirbelviskosität	3.1
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte	0, 2.1, 3.0–3.2, 5.2, 5.3
$\rho_{\dot{\omega}_l}$	kg/m <sup>3</sup>	Öldichte	2.2
$\sigma$	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$\tau_W$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Wandschubspannung	5.2
$\tau_\eta$	s	KOLMOGOROV-Zeit	3.1
$\tau_t$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	turbulente Schubspannung	3.1, 5.2
$\tau_{ij}$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	viskoser Spannungstensor	3.0
$\tau_{ij}^{SGS}$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Kleinskalen-REYNOLDS-Spannung	3.1
$\varphi$	°	Umfangswinkel	2.1, 2.2, 3.2, 4.0– 4.2, 6.3
$\phi$	-	beliebige Variable	3.1
$\chi$	-	turbulenter Modellparameter	3.1
$\psi$	-	relatives Lagerspiel	2.1
$\omega$	rad/s	Umfangsgeschwindigkeit	2.1, 3.1, 6.0–6.3
$\omega$	1/s	charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel	3.1
$\Omega_{ij}$	1/s	mittlere Rotation	3.1

## Mathematische Symbole

Symbol	Bezeichnung
$\bar{x}$	Term, konventionell gemittelt
$\hat{x}$	LES gefilterter Term über die Filterweite $\Delta$
$\tilde{x}$	LES gefilterter Term über ein Vielfaches der Filterweite $\Delta$

## Subskripte

Symbol	Bezeichnung
<i>cav</i>	Kavitation
<i>in</i>	Zuführung bzw. Einlass
<i>i</i>	laufender Index der Vektorkomponenten, $i = 1, 2, 3$ (EINSTEINSche Summenkonvention)
<i>j</i>	laufender Index der Vektorkomponenten, $j = 1, 2, 3$
<i>ij</i>	laufender Index der Tensorkomponenten, $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$
<i>h</i>	hydraulisch
<i>K</i>	Kanal
<i>krit</i>	kritisch
<i>L</i>	Lager
<i>l</i>	flüssig (liquid)
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>mix</i>	Mischung
<i>Öl</i>	Öl
<i>out</i>	Auslass
<i>p</i>	Druck
<i>Rezi</i>	Rezirkulation

$S$	Lagerschale
$sat$	Sättigungszustand
$t$	turbulent
$W$	Welle
$W$	Wand
$v$	gasförmig (vapor)
$Zu$	Zuführung

## Superskripte

Symbol	Bezeichnung
$T$	Term, transponiert
$+$	Term, normiert
$'$	Schwankungsgröße

## Operatoren

Symbol	Bezeichnung	
$\nabla$	Gradient:	$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x_i}$
$\nabla \cdot$	Divergenz:	$\nabla \cdot \equiv \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i}$
$\Delta$	LAPLACE-Operator:	$\Delta = \nabla \cdot \nabla \equiv \sum_i \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$

## Dimensionslose Kennzahlen

Symbol	Bezeichnung	Definition	Abschnitt
$c$	COURANT-Zahl	$c = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x}$	4.1
$J$	Impulsverhältnis	$J = \frac{U_{zu}^2 \cdot \rho_{zu}}{U_k^2 \cdot \rho_k}$	5.3, 6.1–6.3, 7.0
$Pr_t$	turbulente PRANDTL-Zahl	$Pr_t = \frac{\nu_t}{a_t}$	5.2
$Re$	REYNOLDS-Zahl	$Re = \frac{v \cdot h}{\nu}$	3.1, 4.0, 5.0–5.3, 7.0
$ReR$	REYNOLDSZAHLENVERHÄLTNIS	$ReR = \frac{ReR_K}{ReR_{Zu}}$	5.3, 6.1–6.3, 7.0
$Sc_t$	turbulente SCHMIDT-Zahl	$Sc_t = \frac{\nu_t}{D_t}$	5.2
$So$	SOMMERFELD-Zahl	$So = \frac{\bar{p} \cdot \psi^2}{\mu \cdot \omega}$	2.1
$Ta$	TAYLOR-Zahl	$Ta = \frac{v^2 \cdot h^3}{1/2 \cdot D_W \cdot \nu^2}$	3.1, 4.0

## Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung	Abschnitt
ALP3T	Allgemeines Lagerprogramm mit dreidimensionalem Temperatureinfluss	2.1, 4.0–4.2
CAD	Computer-Aided Design	4.1
CFD	Computational Fluid Dynamics	1.2, 2.1, 2.2, 3.0– 3.2, 4.0–4.2, 5.0– 5.3, 6.1, 6.2, 7.0, 8.0

CHT	Conjugate Heat Transfer [gekoppelter Wärme-transport]	8.0
DDES	Delayed Detached-Eddy Simulation	3.1, 5.2
DNS	Direct Numerical Simulation [Direkte numerische Simulation]	3.1, 4.1, 5.2
DyRoBes-BePerf	Dynamics of Rotor Bearing Systems	2.1
FSI	Fluid-Structure Interaction [Fluid-Struktur-Kopplung]	8.0
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.	2.2
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie	5.1, 5.2
LES	Large Eddy Simulation [Grobstruktursimulation]	3.1, 4.1, 5.2, 5.3, 6.2, 7.0
LES-Smag	klassisches SMAGORINSKY Modell	5.2
LES-EG	Eingleichungs Modell	5.2
LDMMS	LAGRANGIAN Dynamic Mixed Model Simulation	3.1, 5.2, 5.3, 6.1
RANS	REYNOLDS-averaged NAVIER-STOKES [REYNOLDS-gemittelte NAVIER-STOKES]	3.1, 4.1, 5.2
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations	5.1
URANS	Unsteady REYNOLDS-averaged NAVIER-STOKES [Instationäre REYNOLDS-gemittelte NAVIER-STOKES]	3.1
VoF	Volume-of-Fluid	3.2, 4.1
VT-FAST	Virginia Tech - Front-end Automated Simulation of Turbomachinery	2.1

