





# Mehrphasenströmung von Gas-Wasser Gemischen und instationäre Vorgänge bei Kavitation in Seitenkanalpumpen

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

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**Dissertation**

von

Herrn

Dipl.-Ing. Sebastian Fleder

geb. in Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 15.05.2017  
Dekan: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig  
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael Günthner  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle  
Prof. Dr.-Ing. Martin Gabi



SAM-Fortschrittsberichte

Band 11

**Sebastian Fleder**

**Mehrphasenströmung von Gas-Wasser Gemischen  
und instationäre Vorgänge bei Kavitation  
in Seitenkanalpumpen**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5378-4

ISSN 2191-8031

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle, als Betreuer meiner Arbeit. Ebenfalls danken möchte ich Herr Prof. Dr.-Ing. Martin Gabi für die Arbeit als Berichterstatter in der Promotionskommission, sowie Herr Prof. Dr.-Ing. Michael Günthner für den Vorsitz in der Promotionskommission.

Herzlich danken möchte ich auch Herr Dr.-Ing. Thomas Reviol, der mich als Hiwi stets gefördert hat und auf dessen Unterstützung hin ich meine Tätigkeit am Lehrstuhl SAM aufgenommen habe.

Vielen Dank auch allen Mitarbeitern am Lehrstuhl für die schöne Zusammenarbeit und viele sowohl produktive als auch lustige gemeinsame Stunden.

Meinen Eltern, Barbara Reutel-Schulz und Dr. Rüdiger Schulz danke ich für die immerwährende Unterstützung, sowohl vor, während und nach meinem Studium. Nur durch ihre Unterstützung war es mir möglich mein Studium an der TU Kaiserslautern aufzunehmen und zu beenden und damit den Weg einzuschlagen der mich bis hierher geführt hat.

Auch meinem Bruder Dr. Frederick Schulz und meinem Schwager Thomas Fleder danke ich für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Größter Dank gilt auch meiner Ehefrau Dr.-Ing. Annika Fleder, die mich fachlich in diversen Diskussionen und Gesprächen unterstützt und mir weitergeholfen hat, die mir privat und beruflich immer eine Stütze ist und mir stets den Rücken freigehalten hat und ohne deren Zuspruch und Unterstützung diese Arbeit nie entstanden wäre.

Sebastian Fleder, im Juni 2017

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>X</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Übersicht über bisher durchgeführte Arbeiten mit Seitenkanalmaschinen . . . . .	2
1.3 Zielsetzungen der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Theorie und Wirkungsweise</b>	<b>6</b>
2.1 Seitenkanalpumpen . . . . .	6
2.1.1 Geschichte und Hauptanwendungen . . . . .	6
2.1.2 Klassifizierung von Seitenkanalpumpen . . . . .	6
2.1.3 Zusammenbau und Arbeitsweise . . . . .	9
2.1.4 Selbstansaugung und Mehrphasenförderung . . . . .	12
2.2 Kavitation . . . . .	16
2.2.1 Theorie und Kennzahlen bei Kavitation . . . . .	16
2.2.2 Kennzahlen zur Kavitationsbewertung . . . . .	19
2.2.3 Modellierung von Kavitation in den numerischen Untersuchungen . . . . .	22
2.3 Dimensionslose Kennzahlen zur Bewertung der Performance . . . . .	24

<b>3</b>	<b>Experimenteller Aufbau und Untersuchungen zu Wasserförderung</b>	<b>28</b>
3.1	Prüfstand . . . . .	28
3.2	Sensorik, Aktorik und Aufnahmetechnik . . . . .	29
3.3	Pumpenmodelle . . . . .	31
3.4	Charakteristische Kennlinien für Einphasenströmung . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Numerisches Setup und Voruntersuchungen</b>	<b>37</b>
4.1	Vernetzung und Numerisches Setup . . . . .	37
4.2	Turbulenzmodell- und Zeitschrittstudie . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Gasmitförderung</b>	<b>45</b>
5.1	Experimentelle Untersuchungen zur Gasmitförderung . . . . .	45
5.1.1	Maximal möglicher Gasgehalt für verschiedene Modifikationen . . . . .	45
5.1.2	Einfluss von Gas auf die Kennlinie und das Betriebsverhalten . . . . .	49
5.1.3	Verbesserung des Gasmitförderverhaltens nach dem D-Prinzip durch Modifikation der Eintritts- und Austrittsgeometrie . . . . .	52
5.1.4	Überprüfung der Eigenschaften bei Gasmitförderung des A-Prinzips mit zusätzlicher Gasauslassbohrung . . . . .	61
5.2	Identifizierung von Strömungsgebieten . . . . .	66
5.3	Überprüfung der bisher angenommenen Analogien zur Gasmitförderung . . . . .	69
5.4	Numerische Untersuchungen zur Gasmitförderung . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Kavitation</b>	<b>75</b>
6.1	Experimentelle Untersuchungen zu Kavitation . . . . .	75
6.1.1	Abreißkennlinien . . . . .	75
6.1.2	Vergleich der NPSH3% und Abreißkennlinien . . . . .	80
6.1.3	Visualisierung der Kavitationsgebiete . . . . .	84
6.1.4	Identifikation von Kavitationskriterien auf der Abreißkennlinie . . . . .	88
6.1.5	Störeinflüsse bei Kavitationsmessungen . . . . .	91
6.2	Numerische Untersuchungen zu Kavitation . . . . .	92
6.2.1	Kavitation am Modell SK35 . . . . .	93
6.2.2	Kavitation am Modell SK40 . . . . .	94
6.3	Einfluss von Kavitation auf die Druckpulsationen . . . . .	100

<b>7</b>	<b>Visueller Vergleich von numerischen und experimentelle Ergebnissen</b>	<b>102</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>105</b>
8.1	Gasmitförderung . . . . .	105
8.2	Kavitation in Seitenkanalpumpen . . . . .	106
8.3	Ausblick . . . . .	108
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>117</b>
9.1	Betreute studentische Arbeiten . . . . .	118
9.2	Strömungsbilder . . . . .	120
9.2.1	SK35 . . . . .	120
9.2.2	SK40 . . . . .	123
9.2.3	SK24 . . . . .	126
9.2.4	Kavitation am Modell SK24 . . . . .	130

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Maximal erreichbarer Wirkungsgrad für Pumpen verschiedener Bauart [Fle15] . . . . .	8
2.2	Cordier-Diagramm mit Seitenkanalpumpen [Fle15] . . . . .	8
2.3	Schematischer Aufbau einer Seitenkanalpumpe, [SER16] . . . . .	9
2.4	Schematischer Aufbau einer Seitenkanalstufe, [SER16] . . . . .	10
2.5	Arbeitsweise einer Seitenkanalpumpe Teil 1 [SER16] . . . . .	11
2.6	Arbeitsweise einer Seitenkanalpumpe Teil 2 [SER16] . . . . .	11
2.7	Arbeitsweise einer Seitenkanalpumpe Teil 3 [SER16] . . . . .	12
2.8	Ansaugvermögen einer Seitenkanalpumpe [Leh83] . . . . .	13
2.9	Funktionsprinzip Seitenkanalpumpe im A-Prinzip . . . . .	14
2.10	Einfluss von Gas auf die Performance von Radialen Kreiselpumpen und Seitenkanalpumpen [Leh83] . . . . .	15
2.11	Phasendiagramm von Wasser [Bae02] . . . . .	17
2.12	Blasenimplosion [Gül99] . . . . .	18
2.13	Filmaufnahme einer Blasenimplosion [Gül99] . . . . .	18
2.14	Durch Kavitation zerstörtes Laufrad . . . . .	18
2.15	Größenmaßstabeffekt [KRSS99] . . . . .	20
2.16	Geschwindigkeitsmaßstabeffekt [KRSS99] . . . . .	21
2.17	Turbulenzmaßstabeffekt [KRSS99] . . . . .	21
2.18	Vergleich mit und ohne Gemischwerte . . . . .	26
3.1	Hydraulikplan des Prüfstandes . . . . .	28
3.2	LED und Highspeed-Kamera . . . . .	31
3.3	Geometrieparameter einer SKP . . . . .	32
3.4	Zusammenbauschema . . . . .	33
3.5	Kennlinien für die untersuchten Seitenkanalvarianten . . . . .	34
3.6	Dimensionslose Kennlinien für die untersuchten Seitenkanalvarianten . . . . .	35
3.7	Leistungskennlinien für die untersuchten Seitenkanalvarianten . . . . .	36
3.8	Wirkungsgradkennlinien für die untersuchten Seitenkanalvarianten . . . . .	36

4.1	Netz Seitenkanal und Laufrad SK24 . . . . .	38
4.2	Netz Seitenkanal und Laufrad SK35 . . . . .	38
4.3	Netz Seitenkanal und Laufrad SK40 . . . . .	39
4.4	Turbulenzmodellvariation SK35 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	41
4.5	Zeitschrittvariation SK35 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	41
4.6	Vergleich des zeitlichen Ablaufs der Kavitationsgebiete bei unterschiedlicher Zeitschrittweite . . . . .	43
4.7	Vergleich der Kavitationsgebiete für sinkenden NPSHV-Wert bei unterschiedlicher Zeitschrittweite . . . . .	44
5.1	Betriebspunktvergleich Basiskonfiguration SK40 . . . . .	46
5.2	Einfluss des Seitenkanaldurchmessers, $Q_{opt} 100$ . . . . .	47
5.3	Einfluss Drehzahl SK40 $Q_{opt} 100$ . . . . .	47
5.4	Einfluss Drehzahl SK35 $Q_{opt} 100$ . . . . .	48
5.5	Einfluss Schaufelzahl SK40 $Q_{opt} 100$ . . . . .	49
5.6	Betriebspunktvergleich SK40 n1500 z24 . . . . .	50
5.7	Drehzahlvergleich SK40 $Q_{opt} 100$ z24 . . . . .	50
5.8	Gaskennlinien SK40 z24 . . . . .	51
5.9	Gaseinfluss auf Wirkungsgrad, SK40 z24 . . . . .	51
5.10	Einsätze für das D-Prinzip, Links: Eckige Einlassgeometrie, Mitte: Ovale Einlassgeometrie, Rechts: Ovale Eintrittsöffnung . . . . .	52
5.11	Eckige Eintrittsgeometrie (links) und ovale Eintrittsgeometrie (rechts) . . . . .	53
5.12	Kennlinien für verschiedene Ein- und Austrittsgeometrien . . . . .	54
5.13	Wirkungsgradkennlinien D-Prinzip . . . . .	54
5.14	Gasmitförderung D-Prinzip, 100% $Q_{opt}$ . . . . .	55
5.15	Anwendung der Affinitätsgesetze bei eckiger Eintrittsgeometrie . . . . .	56
5.16	Anwendung der Affinitätsgesetze bei ovaler Eintrittsgeometrie . . . . .	56
5.17	Betriebspunkteinfluss OO . . . . .	57
5.18	Betriebspunkteinfluss EO . . . . .	58
5.19	Betriebspunkteinfluss EE . . . . .	58
5.20	Betriebspunkteinfluss OE . . . . .	59
5.21	Einfluss von Gas in der Strömung auf Liefer- und Druckzahl . . . . .	59
5.22	Einfluss von Gas in der Strömung auf den Wirkungsgrad . . . . .	60
5.23	Einsätze für das A-Prinzip: von oben links nach unten rechts: Bohrung im Innenbereich (nahe der Nabe), Bohrung im Außenbereich (mittlerer Radius), Luftverdrängerkanal kurz, Luftverdrängerkanal lang . . . . .	61

5.24	Kennlinienvergleich ohne Gas . . . . .	62
5.25	Maximal möglicher Gasgehalt bei verschiedenen Kombinationen des A-Prinzips . . . . .	63
5.26	Maximal möglicher Gasgehalt bei verschiedenen Kombinationen des A-Prinzips, Zoomansicht . . . . .	63
5.27	Kombinationsvergleich . . . . .	64
5.28	Kennlinie bei 15% Gas . . . . .	65
5.29	Kennlinie bei 30% Gas . . . . .	66
5.30	Strömungsgebiete bei verschiedenen Volumenströmen und minimaler Gasmenge . . . . .	67
5.31	Strömungsgebiete bei verschiedenen Gasmengen und Volumenstrom bei bestem Wirkungsgrad . . . . .	68
5.32	Strömungsgebiete bei hoher Gasmenge . . . . .	69
5.33	Gasverteilung SKP . . . . .	71
5.34	Legende zur Darstellung der folgenden Abbildungen . . . . .	72
5.35	Gasausbreitung in der Pumpe über 8 Schaufelumdrehungen bei 2 Volumenprozent Gas . . . . .	73
5.36	Gasausbreitung in der Pumpe über 8 Schaufelumdrehungen bei 10 Volumenprozent Gas . . . . .	74
6.1	Abreißkennlinien SK24 . . . . .	76
6.2	NPSH3% SK24 . . . . .	77
6.3	Abreißkennlinien SK35 . . . . .	77
6.4	NPSH3% SK35 . . . . .	78
6.5	Abreißkennlinien SK40 . . . . .	79
6.6	NPSH3% SK40 . . . . .	79
6.7	NPSH3% für alle Varianten . . . . .	80
6.8	NPSH3% SK40 . . . . .	81
6.9	Kavitationszahl . . . . .	82
6.10	Einsetzende Kavitation (Inception) . . . . .	83
6.11	Area of Interest für die Kavitationsuntersuchungen . . . . .	84
6.12	$8 \text{ m}^3/\text{h}$ SK35 Schaufeldurchgang bei 9m NPSH = NPSH3% . . . . .	85
6.13	$8 \text{ m}^3/\text{h}$ SK35 NPSHV-Vergleich . . . . .	86
6.14	$10 \text{ m}^3/\text{h}$ SK40 Schaufeldurchgang bei 11 m NPSHV = NPSH3% . . . . .	87
6.15	$10 \text{ m}^3/\text{h}$ SK40 NPSHV-Vergleich . . . . .	88
6.16	Strömungsbilder NPSHi SK35 . . . . .	89
6.17	Strömungsbilder NPSH3% SK35 . . . . .	90
6.18	Maximal mögliche gelöste Gasmenge in Wasser . . . . .	91

6.19	Abreißkurven SK35 . . . . .	93
6.20	Abreißkurve und Kavitationsgebiete SK35 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	94
6.21	Abreißkurve und Kavitationsgebiete SK35 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	95
6.22	Abreißkurve und Kavitationsgebiete SK35 $11,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	95
6.23	Abreißkurven SK40 . . . . .	96
6.24	Abreißkurve und Kavitationsgebiete SK40 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	97
6.25	Abreißkurve und Kavitationsgebiete SK40 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	98
6.26	Abreißkurve und Kavitationsgebiete SK40 $12 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	99
6.27	Abreißkurve und Kavitationsgebiete SK40 $14 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	99
6.28	Pulsation SK40 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , numerische Ergebnisse . . . . .	101
7.1	Visueller Vergleich der Kavitationengebiete . . . . .	102
8.1	Abwicklung einer SKP mit Kavitationsgebieten . . . . .	106
8.2	Ablauf der Kavitationsentstehung und -ausbreitung . . . . .	107
9.1	Betreute studentische Arbeiten . . . . .	120
9.2	Abreißkurven SK24 . . . . .	130
9.3	Abreißkurve und Kavitationsgebiete SK24 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	131
9.4	Abreißkurve und Kavitationsgebiete SK24 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ . . . . .	131

# Tabellenverzeichnis

3.1	Verbaute Sensorik und Aktorik [Fle15] . . . . .	30
3.2	Pumpenmodelle aus dem Baukasten [Fle15] . . . . .	32
6.1	Typische NPSH-Verhältnisse . . . . .	83
9.2	2 m <sup>3</sup> /h NPSHV-Vergleich . . . . .	120
9.3	4 m <sup>3</sup> /h NPSHV-Vergleich . . . . .	121
9.4	6 m <sup>3</sup> /h NPSHV-Vergleich . . . . .	121
9.5	10 m <sup>3</sup> /h NPSHV-Vergleich . . . . .	122
9.6	11,5 m <sup>3</sup> /h NPSHV-Vergleich . . . . .	123
9.7	4 m <sup>3</sup> /h SK40 NPSHV-Vergleich . . . . .	123
9.8	6 m <sup>3</sup> /h SK40 NPSHV-Vergleich . . . . .	124
9.9	8 m <sup>3</sup> /h SK40 NPSHV-Vergleich . . . . .	124
9.10	12 m <sup>3</sup> /h SK40 NPSHV-Vergleich . . . . .	125
9.11	14 m <sup>3</sup> /h SK40 NPSHV-Vergleich . . . . .	125
9.12	2 m <sup>3</sup> /h SK24 NPSHV-Vergleich . . . . .	126
9.13	3 m <sup>3</sup> /h SK24 NPSHV-Vergleich . . . . .	126
9.14	4 m <sup>3</sup> /h SK24 NPSHV-Vergleich . . . . .	127
9.15	5 m <sup>3</sup> /h SK24 NPSHV-Vergleich . . . . .	127
9.16	6 m <sup>3</sup> /h SK24 NPSHV-Vergleich . . . . .	128
9.17	6,5 m <sup>3</sup> /h SK24 NPSHV-Vergleich . . . . .	129

# Nomenklatur

## Abkürzungen

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
<i>BEP</i>	Best Efficiency Point / Punkt besten Wirkungsgrades
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>DS</i>	Druckseite
<i>IDM</i>	Induktives Durchflussmessgerät
<i>LR</i>	Laufrad
<i>NPSH</i>	Net Positive Suction Head / Haltedruckhöhe
<i>NPSH3%</i>	Haltedruckhöhe bei 3% Förderhöhenabfall
<i>NPSHA</i>	Available Net Positive Suction Head
<i>NPSH<sub>i</sub></i>	NPSH inception / Haltedruckhöhe bei Kavitationsbeginn
<i>NPSHV</i>	Vorhandene Haltedruckhöhe
<i>Q<sub>optXXX</sub></i>	X% des Volumenstroms bei Punkt besten wirkungsgrades
<i>RPM</i>	Revolutions per Minute / Umdrehungen pro Minute
<i>SCP</i>	Side Channel Pump / Seitenkanalpumpe
<i>SKG</i>	Seitenkanalgehäuse
<i>SKP</i>	Seitenkanalpumpe
<i>SK</i>	Seitenkanal
<i>SS</i>	Saugseite
<i>SST</i>	Shear Stress Transport

## Formelzeichen

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
<i>A</i>	Fläche	$m^2$
<i>A<sub>SK</sub></i>	Fläche des Seitenkanals	$m^2$
<i>c</i>	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
<i>c<sub>k</sub></i>	Geschwindigkeit im Seitenkanal	$\frac{m}{s}$
<i>X</i>		

$c_{krit}$	kritische Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$c_p$	statischer Druckbeiwert	
$d_a$	Aussendurchmesser	$mm$
$d_{a,SK}$	äusserer Seitenkanaldurchmesser	$mm$
$d_i$	Innendurchmesser	$mm$
$d_{i,SK}$	innerer Seitenkanaldurchmesser	$mm$
$ETA_{BEP}$	Wirkungsgrad im Punkt besten Wirkungsgrades	
$F$	Faktor zur Beschreibung der Kondensations- / Verdampfungsgeschwindigkeit	
$h$	Seitenkanaldurchmesser	$mm$
$H$	Förderhöhe	$m$
$H_{BEP}$	Förderhöhe im Punkt besten Wirkungsgrades	$m$
$l$	Schaufellänge	$mm$
$p_d$	Dampfdruck	$\frac{N}{m^2} = Pa$
$p_{ges}$	Totaldruck	$\frac{N}{m^2} = Pa$
$p_i$	Druck bei Kavitationsbeginn / -inception	$\frac{N}{m^2} = Pa$
$p_{stat}$	statischer Druck	$\frac{N}{m^2} = Pa$
$p_v$	Dampfdruck	$\frac{N}{m^2} = Pa$
$m_B$	Masse einer Gasblase	$kg$
$n$	Drehzahl	$min^{-1}$
$N_B$	Blasenanzahl pro Volumeneinheit	
$n_q$	spezifische Drehzahl, berechnet im metrischen System	
$n_s$	spezifische Drehzahl, berechnet mit US Customary Units	
$P_{BEP}$	Leistung im Punkt besten Wirkungsgrades	$W$
$Q$	Volumenstrom	$\frac{m^3}{h}$
$Q_{BEP}$	Volumenstrom im Punkt besten Wirkungsgrades	$\frac{m^3}{h}$
$R_B$	Radius einer Gasblase	$m$
$r_m$	mittlerer Radius	$m$
$r_{nuc}$	Volumenanteil eines Nucleus	
$R_{nuc}$	Radius eines Nucleus	$m$
$Re$	Reynoldszahl	
$s$	Spaltweite	$mm$
$t$	Zeit	$s$
$t$	Seitenkanaltiefe	$mm$
$T$	Temperatur	$^{\circ}C$
$U$	Umfangsgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$U_m$	Umfangsgeschwindigkeit am mittleren Durchmesser	$\frac{m}{s}$
$V_B$	Blasenvolumen	$m^3$

$V_{Gas}$	Gasvolumenstrom	$\frac{m^3}{h}$
$V_{Fl}$	Flüssigkeitsvolumenstrom	$\frac{m^3}{h}$
$V_{Gemisch}$	Volumen des Gemisches	$m^3$
$w$	Schaufelbreite	$mm$
$Y$	spezifische Stutzenarbeit	$\frac{m^2}{s^2}$
$z$	Schaufelzahl	

## Griechische Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit
$\delta$	Durchmesserzahl	
$\Delta$	Unterschied	
$\eta$	Wirkungsgrad	
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$\rho_{Fl}$	Flüssigkeitsdichte	
$\rho_{Gas}$	Gasdichte	
$\rho_{Gemisch}$	Gemischdichte	
$\sigma$	Schnelllaufzahl	
$\sigma$	Koeffizient der Oberflächenspannung	
$\sigma$	Kavitationszahl	
$\sigma_i$	Inception-Kavitationszahl	
$\sigma_{th}$	Thoma-Kavitationszahl	
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	$s^{-1}$

# Abstract

Side-Channel pumps are a niche product, able to deliver relatively high heads at low flow rates, which results in a low specific speed. They are closing the gap between classical radial centrifugal pumps and positive displacement pumps, combining the advantages of both without having all the negative effects. The hydraulic efficiency of SCP seems low at first sight, but taking into account that centrifugal pumps are often working under part load conditions at this volume flow and specific speed range, centrifugal pumps are not able to perform at their BEP as well, reducing the efficiency.

Although the patent on SCP is older than 90 years, there is still little knowledge on how they perform in multiphase conditions and how cavitation occurs. Especially numerical investigations of multiphase flow are unknown in current literature.

Most classical applications of Side channel pumps are food-industry, oil and gas applications as well as petrochemical industry. The requirements are, that the pump can handle fluids close to the boiling point or fluids at low pressures and high temperatures. Other applications have special requirements on hygiene. In all of these points, the SCP has major advantages over classical centrifugal or positive displacement pumps. SCP are able to handle large amounts of entrained gas in the working fluid. Most displacement pumps don't allow gas in the medium at all. For centrifugal pumps, a barrier of 7-8% of gas has been discovered as limit. SCP are able to handle up to 50% of gas in the working fluid.

The present work elaborates the influence of the main geometrical parameters needed to design a side channel pump, such as blade number, side channel diameter, form and position of suction and pressure opening, on the performance when working with gas-liquid mixtures. The most well known approaches to improve mixture-flow performance, the A- and the D-principle, are examined in test pumps. These principles are based on the assumption that mixture flow handling and self priming share the same working principle and introduce an analogy to water ring pumps, the predecessors to the side channel pump, where a phase separation between liquid and gaseous phase

is achieved inside the pump.

The A-principle tries to handle the mixture and delivers the mixture to one pressure opening, located near the shaft. The D-principle needs a specific subchannel to separate the phases and delivers gas and liquid to two different pressure openings. High-speed recordings of the pump are performed and analyzed for different flow rates and different amounts of gas, to identify flow structures in the pump during multi-phase handling and reasons for breakdown of the flow.

A second advantage of SCP is the low NPSH-value when equipped with an NPSH-runner, which allows usage at low suction pressure applications or light boiling high temperature fluids. Therefore, in a second part, the transient behavior of side channel pumps under cavitating conditions is presented. Videos and pictures captured with a high-speed camera are compared to numerical investigation, focusing on the questions of where and how cavitation appears.

Cavitation occurs first at the inlet opening of the pump at the passage between inlet piping and impeller casing. With decreasing inlet pressure, the cavitation bubbles increase in size and are transported inside the pump, collapsing some blade passages away. This influences the pressure rise in radial and circumferential direction inside the pump. The head drop is measured and simulated in drop-down curves using CFD methods and the present flow conditions are compared to each other.

# Kurzfassung

Seitenkanalpumpen (SKP) sind in der Lage geringe Fördermengen auf ein hohes Druckniveau zu bringen, was einer niedrigen spezifischen Drehzahl entspricht. Sie schließen die Lücke zwischen klassischen radialen Kreiselpumpen und Verdrängerpumpen und vereinen dabei deren Vorteile, ohne alle Nachteile zu besitzen. Der Wirkungsgrad von Seitenkanalpumpen ist auf den ersten Blick recht gering. Dies relativiert sich aber, wenn man in Betracht zieht, dass Kreiselpumpen in diesem Volumenstrombereich und spezifischen Drehzahlbereich häufig in Teillastbetrieb arbeiten und somit nicht ihr komplettes Wirkungsgradpotential abrufen können. Obwohl die Seitenkanalpumpe bereits vor über 90 Jahren patentiert wurde, ist ihre Wirkungsweise vor allem bei Mehrphasenströmungen und Kavitationsvorgängen noch immer in Teilen gar nicht untersucht und verstanden worden. Vor allem numerische Untersuchungen zur Analyse der Strömungsvorgänge bei Mehrphasenströmungen sind in der Literatur noch nicht bekannt.

Die meisten Anwendungen von Seitenkanalpumpen finden sich im Lebensmittel-, im Öl- und Gassektor sowie in der Petrochemischen Industrie. Hier ist es oftmals nötig leicht siedende Medien oder Medien bei geringen Drücken und hohen Temperaturen zu fördern oder es werden hohe Anforderungen an die Hygiene gestellt. In all diesen Punkten hat die Seitenkanalpumpe wichtige Vorteile gegenüber anderen Pumpentypen. Die Seitenkanalpumpe ist in der Lage hohe Mengen an Gas mit dem Fördermedium mitzufördern. Die meisten Verdrängerpumpen lassen keine Gemischförderung zu und bei Kreiselpumpen hat sich ein Anteil von 7-8 Volumenprozent Gas im Fördermedium als Grenze herausgestellt. SKP sind in speziellen Konfigurationen dagegen in der Lage sogar große Gasmengen über 50% zu fördern ohne einen Förderabriss zu erleiden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich unter anderem mit den Einflüssen geometrischer Größen auf das Verhalten von Seitenkanalpumpen bei Mehrphasenförderung von Gas-Wasser-Gemischen. Die generellen Einflussgrößen der bei der Dimensionierung von Seitenkanalpumpen festzulegenden Größen wie Schaufelzahl, Seitenkanaldurchmesser, sowie Lage und Form der Eintritts-

und Austrittsöffnung werden gezielt variiert. Es wird auf einen Baukasten von Modellpumpen zurückgegriffen, die im Vergleich zu industrietypischen Pumpen gewisse Unterschiede aufweisen, eine Übertragung der Ergebnisse auf Industriepumpen ist aber problemlos möglich. Außerdem werden die in der Industrie am häufigsten verbreiteten Ansätze zur Verbesserung der maximal möglichen Gasmenge, das D-Prinzip und das A-Prinzip, in Modellpumpen untersucht. Diese Ansätze basieren auf der Annahme dass die Wirkprinzipien von Selbstansaugung und Gasmitförderung ähnlich sind und führen eine Analogie zur Wasserringpumpe, dem Vorgänger der Seitenkanalpumpe, herbei. Eine Phasenseparation zwischen flüssiger und gasförmiger Phase führt zu einer getrennten Drucköffnung für Flüssigkeit und Gas. Das A-Prinzip versucht durch eine Nabennahe Drucköffnung das Gemisch gemeinsam auszustößen und verzichtet auf eine gesonderte Gasaustrittsöffnung. Das D-Prinzip erfordert eine zusätzliche Bohrung mit kleinem Verdrängerkanal um das Gas auszustößen. Eine Identifizierung der vorliegenden Strömungsgebiete mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermöglicht zudem die Vorgänge in der Pumpe bei verschiedenen Gasgehalten und Volumenströmen zu analysieren und die Gründe für einen Förderabbruch zu identifizieren.

Als weiterer Vorteil der SKP ist der geringe NPSH-Wert bei Verwendung eines Vorläufers zu nennen, welcher Förderung bei niedrigen Zulaufdrücken oder leicht siedender Medien ermöglicht. Daher werden in einem zweiten Teil die transienten Vorgänge in Seitenkanalpumpen bei Kavitation numerisch und experimentell untersucht und mithilfe von Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera optisch verglichen. Ort und Art der Entstehung von Kavitation sowie die Ausbreitung der Kavitation in der Pumpe stehen dabei besonders im Fokus. Die Kavitation tritt als erstes am Eintritt der Pumpe am Übergang zwischen Saugrohr und Laufradgehäuse auf. Hier wird das Fluid stark umgelenkt und gleichzeitig beschleunigt. Der dabei entstehende Druckverlust führt zu Blasenbildung und bei weiter absinkendem Eintrittsdruck zu größeren Kavitationsgebieten, die in die Pumpe transportiert werden und erst später wieder kollabieren. Das beeinflusst den Druckaufbau in der Pumpe, der in radialer und Umfangsrichtung geschieht. Das Absinken der Förderhöhe wird in Abreißkurven gemessen und simuliert und die vorliegenden Strömungen miteinander verglichen.