

SM1– Laborversuch 2

Kavitationsverhalten einer dreistufigen Radialkreiselpumpe

Mess- und Rechenwerte:

Ungedrosselter Saugseitenschieber

Messwerte:

Nr.	n	p _{D'}	p _{S'}	V	t
	[1/min]	[bar]	[bar]	[m ³]	[s]
1	1400	3,95	-0,20	0	0,0
2	1400	3,95	-0,20	0,1	45,2
3	1400	3,7	-0,20	0,3	66,5
4	1400	3,65	-0,20	0,4	65,0
5	1400	3,5	-0,26	0,5	62,0
6	1400	3,5	-0,26	0,7	68,9
7	1400	3,15	-0,30	0,8	67,9
8	1400	2,75	-0,34	0,9	64,5
9	1400	2,3	-0,38	1	62,8
10	1400	1,75	-0,42	1,1	61,2
11	1400	1,2	-0,46	1,3	66,0

Rechenwerte:

q _v	Q	c _S	c _D	p _D	p _S	Y	H	NPSH _{vorh.}
[m ³ /s]	[m ³ /h]	[m/s]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[m ² /s ²]	[m]	[m]
0,00000	0,0	0,000	0,000	500075,7	79490,7	422,2	43,0	7,83
0,00221	8,0	0,282	0,440	500075,7	79490,7	422,2	43,0	7,84
0,00451	16,2	0,574	0,897	475075,7	79490,7	397,4	40,5	7,85
0,00615	22,2	0,784	1,224	470075,7	79490,7	392,6	40,0	7,87
0,00806	29,0	1,027	1,604	465075,7	75490,4	391,9	40,0	7,48
0,01016	36,6	1,294	2,021	455075,7	73490,2	384,4	39,2	7,31
0,01178	42,4	1,500	2,344	420075,7	69489,9	353,8	36,1	6,93
0,01395	50,2	1,777	2,776	380075,7	65489,5	318,4	32,5	6,57
0,01592	57,3	2,027	3,168	335075,7	61489,2	278,1	28,4	6,21
0,01797	64,7	2,289	3,576	280075,7	57488,9	227,9	23,2	5,86
0,01970	70,9	2,508	3,919	225075,7	53488,5	177,7	18,1	5,50

SM1– Laborversuch 2

Kavitationsverhalten einer dreistufigen Radialkreislpumpe

Saugschieber 5 Umdrehungen geöffnet

Messwerte:

Nr.	n	p_D'	p_S'	V	t
	[1/min]	[bar]	[bar]	[m ³]	[s]
1	1400	4	-0,19	0	0,0
2	1400	3,85	-0,24	0,2	97,5
3	1400	3,6	-0,34	0,2	47,7
4	1400	3,4	-0,50	0,4	64,1
5	1400	3,14	-0,70	0,5	61,4
6	1400	2,75	-0,88	0,6	62,1
7	1400	2,5	-0,88	0,6	62,3
8	1400	2,25	-0,88	0,6	62,7
9	1400	2	-0,88	0,6	62,0
10	1400	1,75	-0,90	0,6	61,2
11	1400	1,5	-0,90	0,6	59,7

Rechenwerte:

q_v	Q	c_s	c_D	p_D	p_S	Y	H	NPSH _{vorh.}
[m ³ /s]	[m ³ /h]	[m/s]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[m ² /s ²]	[m]	[m]
0,00000	0,0	0,000	0,000	505075,7	80490,8	426,2	43,4	7,94
0,00205	7,4	0,261	0,408	490075,7	75490,4	416,2	42,4	7,43
0,00419	15,1	0,534	0,834	465075,7	65489,5	401,4	40,9	6,42
0,00624	22,5	0,795	1,241	445075,7	49488,2	397,6	40,5	4,81
0,00814	29,3	1,037	1,620	419075,7	29486,5	391,9	40,0	2,79
0,00966	34,8	1,230	1,922	380075,7	11485,0	371,3	37,8	0,98
0,00963	34,7	1,226	1,916	355075,7	11485,0	346,2	35,3	0,98
0,00957	34,4	1,218	1,904	330075,7	11485,0	321,2	32,7	0,98
0,00968	34,8	1,232	1,925	305075,7	11485,0	296,3	30,2	0,98
0,00980	35,3	1,248	1,950	280075,7	9484,8	273,3	27,9	0,78
0,01005	36,2	1,280	1,999	255075,7	9484,8	248,3	25,3	0,78

SM1– Laborversuch 2

Kavitationsverhalten einer dreistufigen Radialkreislpumpe

Saugschieber 7 Umdrehungen geöffnet

Messwerte:

Nr.	n	p _D '	p _S '	V	t
	[1/min]	[bar]	[bar]	[m ³]	[s]
1	1400	4	-0,19	0	0,0
2	1400	3,9	-0,22	0,1	47,4
3	1400	3,7	-0,22	0,2	49,0
4	1400	3,65	-0,29	0,4	70,3
5	1400	3,55	-0,32	0,5	61,2
6	1400	3,2	-0,46	0,6	55,2
7	1400	2,9	-0,52	0,7	57,8
8	1400	2,5	-0,62	0,8	57,3
9	1400	2,25	-0,65	0,9	61,5
10	1400	2	-0,70	1	64,2
11	1400	1,5	-0,79	1	59,0

Rechenwerte:

q _v	Q	c _s	c _D	p _D	p _s	Y	H	NPSH _{vorh.}
[m ³ /s]	[m ³ /h]	[m/s]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[m ² /s ²]	[m]	[m]
0,00000	0,0	0,000	0,000	505075,7	80490,8	426,2	43,4	7,94
0,00211	7,6	0,269	0,420	495075,7	77490,6	419,2	42,7	7,63
0,00408	14,7	0,520	0,812	475075,7	77490,6	399,3	40,7	7,64
0,00569	20,5	0,724	1,132	470075,7	70490,0	401,5	40,9	6,94
0,00817	29,4	1,040	1,625	460075,7	67489,7	394,9	40,3	6,67
0,01087	39,1	1,384	2,162	425075,7	53488,5	374,5	38,2	5,28
0,01211	43,6	1,542	2,409	395075,7	47488,0	350,9	35,8	4,69
0,01396	50,3	1,778	2,778	355075,7	37487,2	321,4	32,8	3,71
0,01463	52,7	1,863	2,911	330075,7	34486,9	299,7	30,5	3,42
0,01558	56,1	1,983	3,099	305075,7	29486,5	280,0	28,5	2,94
0,01695	61,0	2,158	3,372	255075,7	20485,7	239,5	24,4	2,06

Musterrechnung für einen Betriebspunkt Saugstüber voll geöffnet, Messpunkt Nr. 5

1.) Versuchsparameter

Luftdruck p_L :	99484 Pa
Höhenunterschiede a' :	0,57 m
a'' :	0,73 m
Dampfdruck des Wassers:	2062 Pa
Umgebungstemperatur:	22°C

2.) Förderstrom

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{0,5m^3}{62,0s} = 0,00806m^3/s$$

3.) mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Druckleitung

$$c_D = \frac{\dot{V}}{A_{q,D}} = \frac{0,00806m^3/s}{\pi \cdot \frac{(0,08m)^2}{4}} = 1,604m/s$$

4.) mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Saugleitung

$$c_S = \frac{\dot{V}}{A_{q,S}} = \frac{0,00806m^3/s}{\pi \cdot \frac{(0,1m)^2}{4}} = 1,027m/s$$

5.) absoluter statischer Druck am Druckstutzen

$$p_D = p_L + p_D' + \rho_w \cdot g \cdot a' = 99484Pa + 3,6 \cdot 10^5 Pa + 1000kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2 \cdot 0,57m$$

$$p_D = 465075,7 Pa$$

6.) absoluter statischer Druck am Saugstutzen

$$p_S = p_L + p_S' + \rho_{L,S} \cdot g \cdot a'' = 99484Pa + (-0,24) \cdot 10^5 Pa + 0,903 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,73m$$

$$p_S = 75490,4Pa$$

$$\rho_{L,S} = \frac{p_L + p_S'}{R_i \cdot T} = \frac{99484Pa + (-24000Pa)}{287 \frac{J}{kgK} \cdot 291,15K} = 0,903 \frac{kg}{m^3}$$

7.) Spezifische Förderarbeit

$$Y = \frac{p_D - p_S}{\rho_w} + \frac{c_D^2 - c_S^2}{2} + a \cdot g = \frac{465075,7Pa - 75490,4Pa}{1000kg/m^3} + \frac{(1,604\frac{m}{s})^2 - (1,027\frac{m}{s})^2}{2} + 0,16m \cdot 9,81\frac{m}{s^2}$$

$$Y = 391,9Nm/kg$$

8.) Förderhöhe

$$H = \frac{Y}{g} = \frac{391,9Nm/kg}{9,81m/s^2} = 40m$$

9.) NPSH_{erf}

$$NPSH_{erf} = \frac{p_S - p_{Da}}{\rho_w \cdot g} + \frac{c_S^2}{2 \cdot g} = \frac{75492,4Pa - 2062Pa}{1000kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} + \frac{(1,027m/s)^2}{2 \cdot 9,81m/s^2} = 7,5m$$

11.) Erforderliche spezifische Förderarbeit

$$Y_{erf} = NPSH_{erf} \cdot g = 7,5m \cdot 9,81m/s^2 = 73,6m^2/s^2$$

12.) Saugkennzahl

$$S_q = \frac{n \cdot \sqrt{\dot{V}}}{Y_{erf}^{\frac{3}{4}}} = \frac{1400.1/min \cdot \sqrt{0,00806m^3/s}}{(73,6\frac{m^2}{s^2})^{\frac{3}{4}} \cdot 60s/min} = 0,01$$

Überprüfung einer gegebenen Anlage auf Kavitation bei Betrieb mit der untersuchten Pumpe

Von der Anlage sind bekannt:

Massenstrom:	12 kg/s
Wassertemperatur:	8 ... 22°C
Verdampfungsdruck des Wassers:	1073 ... 2643 Pa
Umgebungsluftdruck:	921 hPa ± 5 %
Durchmesser Druckleitung:	80 mm
Durchmesser Saugleitung:	100 mm
Widerstandsbeiwert Saugleitung:	9
Saughöhe (netto):	6,2 ... 6,7 m

1.) Volumenstrom

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_w} = \frac{12 \text{ kg/s}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,012 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.) Vorhandene Energiehöhe der Anlage

$$NPSH_{\text{vorh}} = \frac{p_L - p_{Da}}{\rho_w \cdot g} + \frac{c_E^2}{2 \cdot g} - h_s - \sum H_{V,S}$$

2.1) Mittlere Zuströmgeschwindigkeit im Saugbehälter

$$c_E = 0$$

2.2) mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Saugleitung

$$c_s = \frac{q_v}{A_q} = \frac{0,012 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot \frac{(0,1 \text{ m})^2}{4}} = 1,53 \text{ m/s}$$

2.3) Gesamtverlusthöhe der Saugleitung

$$\sum H_{V,S} = \zeta_s \cdot \frac{c_s^2}{2 \cdot g} = 9 \cdot \frac{(1,53 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 1,074 \text{ m}$$

SM1– Laborversuch 2

Kavitationsverhalten einer dreistufigen Radialkreislpumpe

$$NPSH_{\text{vorh}} = \frac{92100Pa \pm 4.605Pa - 1073...2643Pa}{999,9...997,8kg/m^3 \cdot 9,81m/s^2} - 6,2...6,7m - 1,074m$$

$$NPSH_{\text{vorh}} = 8,65...9,77m - 6,2...6,7m - 1,074m = 0,876...2,496m$$

Aus dem Diagramm 2 ist ersichtlich, daß ein kavitationsfreier Betrieb dieser Anlage mit dieser Pumpe nicht sichergestellt ist. Der Hersteller schreibt vor, daß es mindestens ein NPSH Wert von $\approx 1,8m$ bei dem hier vorgegebenen Volumenstrom von $43,2 \frac{m^3}{h}$ vorhanden sein muß. Es besteht aber die Gefahr, dass die Anlage unter einen Meter gelangt, nämlich bis auf $0,85$ Meter. Es droht Kavitation.

Diskussion

Aufnahme der ungedrosselten Pumpenkennlinie:

Die erste Messreihe wird mit konstanter Drehfrequenz und voll geöffnetem Saugschieber gefahren. Dabei wird auf der Druckseite der Leitungsquerschnitt stufenweise geöffnet, mittels eines Plattenschiebers. Der Volumenstrom wird dabei durch einen Wasserzähler und einer Stoppuhr ermittelt und die Werte aufgeschrieben. Ebenso werden bei jeder Schieberstellung die Drücke an der Saug- und Druckseite der Pumpe notiert.

Mit zunehmender Querschnittserweiterung auf der Druckseite der Pumpe fallen die absoluten Drücke, die Strömungsgeschwindigkeit und der Volumenstrom nehmen dabei zu.

Aus den ermittelten Messwerten werden die Förderhöhe H und der Volumenstrom ermittelt und in einem Diagramm aufgetragen. Dies ergibt die Pumpenkennlinie.

Messreihe 1:

Bei dieser Messung wird der Schieber auf der Saugseite der Pumpe zunächst ganz geschlossen und dann der 5 Umdrehungen weit geöffnet. Diese Öffnung bleibt nun für diese Messreihe konstant.

Alles weiter verläuft analog der Aufnahme der ungedrosselten Pumpenkennlinie, die Drehfrequenz bleibt unverändert.

Im Gegensatz jedoch zu der vorangegangenen Messreihe beginnt der Volumenstrom ab einer gewissen Stellung des druckseitigen Schiebers zu stagnieren. Die Werte ändern sich nur noch minimal. Das ist der Beginn der Kavitation.

Die ermittelte Kurve verläuft zunächst in etwa gleich der ungedrosselten Kennlinie. Ab dem Volumenstrom $q_v \approx 0,0096 \text{ m}^3/\text{s}$ beginnt die Kurve steil nach unten abzusacken, ebenso der Druck an der Druckseite. Dieser Druckverlust ist ebenfalls Indiz für beginnende Kavitation. Wäre der Saugseitenschieber noch weiter geschlossen, so könnte man die Kavitation auch durch das entstehende Geräusch erkennen, welches von implodierenden Gasbläschen im Fluid herrühren würde.

Diese Gasbläschen entstehen, wenn der Druck unter den Dampfdruck des Wassers fällt.

Messreihe 2:

Die zweite Messreihe wurde wieder analog den ersten beiden vorangegangenen ausgeführt. Bei dieser Messung beträgt die Saugseitenschieberstellung 7 Umdrehungen.

Die Kurve verläuft dabei sehr nahe bei der, der ungedrosselten Kennlinie.

Bei diesem Versuch ist das Einsetzen der Kavitation nicht so eindeutig ersichtlich, wie bei der Messung zuvor.

Bei der Auswertung wurde der Schnittpunkt der Messkurve mit der -5% Pumpenkennlinie als der Beginn der Kavitation festgelegt, wie es allgemein üblich ist.

Als Ursache für diesen schlechten Kurvenverlauf ist vermutlich die ungünstige Stufung der Messpunkte anzusehen. Die Abstufung hätte zu Beginn des Versuches zunächst grob, nach dem eingestellten Volumenstrom erfolgen sollen und gegen Ende nach der entstehenden Druckdifferenz auf der Saugseite. Dabei hätten noch mehr Messpunkte aufgenommen werden sollen, was aus Zeitgründen leider nicht mehr möglich war.

Die Saugzahl für Messreihe 1 liegt bei dem Kavitationspunkt bei 0,42 was auch innerhalb der angegebenen Richtwerte von 0,35 – 0,45 liegt.

Anders verhält es sich bei Messreihe 2. Da die Kavitationsgrenze vermutlich noch nicht erreicht war liegt die Saugzahl bei dem gewählten Schnittpunkt mit der -5% Kurve bei 0,23 was noch etwas zu niedrig ist. Dabei steigt sie jedoch bei dem letzten Messpunkt auf 0,32 und wäre vermutlich noch größer, wenn noch weitere Messungen durchgeführt worden wären.