

# Vermeidung von Kavitationsschäden

Grundlagen, Prüfmethode, Anwendungen, Erfahrungen

Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Tillner

Dipl.-Ing. Horst Fritsch

Dipl.-Ing. Rudolf Kruft

Dr.-Ing. Wilfried Lehmann

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Louis

Dipl.-Ing. Günther Masendorf

Mit 192 Bildern



Kontakt & Studium  
Band 193

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Wilfried J. Bartz  
Technische Akademie Esslingen  
Weiterbildungszentrum  
Dipl.-Ing. FH Elmar Wippler, expert verlag

**expert**  **verlag**

The logo for expert verlag features the word 'expert' in a lowercase, sans-serif font, followed by a stylized icon of an open book with three pages visible, and then the word 'verlag' in a similar lowercase, sans-serif font.

# Inhaltsverzeichnis

---

Herausgeber-Vorwort

Autoren-Vorwort

<b>1</b>	<b>Grundlegende physikalische Vorgänge bei Kavitation</b>	<b>1</b>
	W. Tillner	
1.1	Einleitung	3
1.2	Phasengleichgewicht und Dampfdruck	4
1.3	Keime und Keimbildung	9
1.4	Blasendynamik	22
1.5	Die Gas-Flüssigkeits-Gemischströmung	29
1.6	Besondere Kavitationsvorgänge bei der Umströmung von Körpern und Profilen	36
1.7	Zusammenfassung und Anhang	44
<b>2</b>	<b>Kavitation in Kreiselpumpen – Der NPSH-Wert der Kreiselpumpen und ihrer Anlage –</b>	<b>51</b>
	G. Masendorf	
2.1	Einleitung	53
2.2	Kavitation in Kreiselpumpen	57
2.3	Der erforderliche NPSH-Wert der Kreiselpumpe – NPSH R	59
2.4	Der vorhandene NPSH-Wert der Anlage – NPSH A	60
2.5	Beispiele	62
2.5.1	Beispiel 1: Saugen aus einem geschlossenen Behälter	62
2.5.2	Beispiel 2: Saugen aus einem offenen Behälter	64
2.5.3	Beispiel 3: Zulauf aus einem geschlossenen Behälter	66
2.5.4	Beispiel 4: Zulauf aus einem geschlossenen Behälter, in dem der Dampfdruck der Förderflüssigkeit herrscht	67
2.5.5	Beispiel 5: Zulauf aus einem offenen Behälter	68
2.5.6	Beispiel 6: Vertikale Rohrgehäusepumpe in einer Pumpenkammer	69
2.5.7	Beispiel 7: Vertikale Rohrgehäusepumpe in einer Pumpenkammer	71

<b>3</b>	<b>Kennlinien bei Kavitationsbetrieb und Kavitationskriterien bei Kreiselpumpen</b>	<b>75</b>
	W. Lehmann	
3.1	Kavitation in Kreiselpumpen	76
3.1.1	NPSH-Wert der Pumpe	76
3.1.2	Kavitations-Prüfstände	77
3.1.3	Ermittlung der NPSH-Werte	78
3.1.4	NPSH-Kennlinie	81
3.1.5	NPSH-Kennfeld	84
3.1.6	Blasenfelder und Schalldruckpegel	86
3.2	Abhängigkeit des NPSH-Wertes von der Drehzahl	87
3.3	NPSH-Korrektur	89
3.4	Vermeidung von Kavitationsschäden	91
3.4.1	Kavitationsschäden in Kreiselpumpen	91
3.4.2	NPSH-Wert der Anlage	92
3.5	Maßnahmen zur Verbesserung der Betriebssicherheit	95
3.6	Kavitations-Regelung	99
<b>4</b>	<b>Messungen des NPSH-Wertes und Verhalten der Kreiselpumpe in ihrer Anlage</b>	<b>101</b>
	G. Masendorf	
4.1	Einleitung	103
4.2	NPSH-Messungen auf dem Prüfstand und Festlegung des erforderlichen NPSH-Wertes der Pumpe	104
4.3	Kavitationskennzahlen	113
4.4	Der Einfluß der NPSH-Charakteristik der Pumpe auf den zulässigen Betriebsbereich – „Off-Design“-Betrieb und NPSH-Empfehlungen	114
4.5	Abschätzung des kritischen Förderstromes, bei dessen Unterschreitung mit Teillastwirbel/Laufradrückströmung zu rechnen ist	121
<b>5</b>	<b>Kreiselpumpen für besondere Sauganforderungen</b>	<b>124</b>
	W. Lehmann	
5.1	Seitenkanalpumpen	124
5.1.1	Aufbau und Wirkungsweise	124
5.1.2	Bauart und Betriebsverhalten	127
5.1.3	Seitenkanalpumpen mit NPSH-Vorstufe	130
5.2	Zentrifugalpumpen	132
5.2.1	Zentrifugalpumpen mit Sauglaufrad	132

5.2.2	Zentrifugalpumpen mit Inducer	134
5.3	Gasmitförderung und Selbstansaugefähigkeit	140
<b>6</b>	<b>Die oszillierende Verdrängerpumpe in ihrer Anlage – Druckpulsationen als Kavitationsursache – Pulsationsdämpfung –</b>	<b>143</b>
	H. Fritsch	
6.1	Einleitung	144
6.2	Die Fördercharakteristik oszillierender Verdrängerpumpen	152
6.3	Einbindung der oszillierenden Verdrängerpumpen in die Gesamtanlage	154
6.4	Berechnung der Druckpulsation bei unterkritischer Betriebsweise	160
6.4.1	Druckpulsation durch Strömungsverluste	160
6.4.2	Druckpulsation durch Massenbeschleunigung	162
6.4.3	Druckstöße	162
6.4.4	Überlagerung der Druckschwingungen in den Rohrleitungen	163
6.4.5	Innere Druckverluste in der Pumpe	167
6.5	Überprüfung der Betriebskriterien oszillierender Verdrängerpumpen	168
6.5.1	Vermeidung schädlicher Kavitation	172
6.5.2	Auslegung von Pulsationsdämpfern	173
6.5.3	Geeignete Pulsationsdämpfer-Bauarten	175
<b>7</b>	<b>Der NPSH-Wert bei oszillierenden Verdrängerpumpen</b>	<b>176</b>
	H. Fritsch	
7.1	Kavitationskriterien und NPSH-Werte im Vergleich zur Kreiselpumpe	176
7.2	Prinzipielle Unterschiede der NPSH-Werte zwischen stationärer und instationärer Strömung	179
7.3	Berechnungsverfahren für die NPSH-Werte	180
7.3.1	NPSHR	180
7.3.2	NPSHA	180
7.3.2.1	Turbulente Rohrströmung ohne Pulsationsdämpfung	182
7.3.2.2	Turbulente Rohrströmung mit Pulsationsdämpfung	183
7.3.2.3	Laminare Rohrströmung ohne Pulsationsdämpfung	184
7.3.2.4	Laminare Rohrströmung mit Pulsationsdämpfung	185
7.4	Darstellung des NPSH-Verlaufes als Pumpen- und Anlagen-Kennlinie	185
7.5	Zusammenfassung	185

<b>8</b>	<b>Vermeidung von Kavitationsschäden an rotierenden Verdrängerpumpen</b>	<b>187</b>
	R. Kruft	
8.1	Wirkungsweise und Bauarten von Pumpen mit umlaufenden Verdrängern – Auswahl	187
8.1.1	Zahnpumpen	187
8.1.2	Exzentrerschneckenpumpen	189
8.1.3	Kreiskolbenpumpen	191
8.2	Saugfähigkeit – Kavitation – NPSHR	191
8.3	Maßnahmen zur Vermeidung von Kavitation	195
<b>9</b>	<b>Methoden zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens bei Kavitationsbelastung</b>	<b>198</b>
	H. Louis	
9.1	Versuchseinrichtungen	198
9.1.1	Betriebsähnliche Versuche	199
9.1.2	Versuche mit Modellsystemen	200
9.1.3	Beanspruchungsähnliche Versuche mit Prüfkörpern	200
9.2	Werkstückbeanspruchung durch Kavitation	204
9.3	Schädigungsablauf	207
9.4	Kenngößen zur Beschreibung des Materialverhaltens bei Kavitationsbelastung	214
9.4.1	Betriebspezifische Kenngößen	214
9.4.2	Medienspezifische Kenngößen	216
9.4.3	Werkstückspezifische Kenngößen	216
9.5	Zusammenfassung	227
<b>10</b>	<b>Werkstoffeinsatz bei Kavitation, Schädigungsfrüherkennung und Schadensbegrenzung</b>	<b>228</b>
	H. Louis	
10.1	Korrelation von Werkstoffeigenschaften und Kavitationsverhalten	229
10.1.1	Korrelation des Kavitationsverhaltens mit metallphysikalischen Eigenschaften	230
10.1.2	Korrelation des Kavitationsverhaltens mit mechanischen Eigenschaften	230
10.2	Werkstoffverhalten bei Kavitationsbelastung	233
10.2.1	Testergebnisse verschiedener Werkstoffe	233

10.2.2	Werkstoffe für kavitationsgefährdete Bauteile	241
10.3	Maßnahmen zur Sanierung von Kavitationsschäden	243
10.4	Methoden der Schädigungsfrüherkennung	244
10.4.1	Indirekte Methoden	245
10.4.2	Direkte Methoden	247
10.5	Schutzmaßnahmen	257
10.5.1	Aktiver Schutz	258
10.5.2	Passiver Schutz	258

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>262</b>
-----------------------------	------------

<b>Sachregister</b>	<b>267</b>
---------------------	------------

<b>Autorenverzeichnis</b>	<b>269</b>
---------------------------	------------