

Maßstabsgesetze bei Kavitation

Dr. rer. nat. A. Keller, Dipl.-Ing. R. Huber

Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität München

Einführung

Kavitation ist eine äußerst unerwünschte Erscheinung in schnell strömenden Flüssigkeiten bzw. an mit hoher Geschwindigkeit in Flüssigkeiten bewegten Teilen. An Orten hoher Umströmungsgeschwindigkeit werden durch lokale Druckabsenkung mit Dampf gefüllte Hohlräume gebildet, die in Gebieten wieder ansteigenden Druckes in sich zusammenfallen. Die dabei auftretenden hohen örtlichen Drücke und Strömungsgeschwindigkeiten können eine Zerstörung des Werkstoffes der Strömungsberandung zur Folge haben. So werden die jährlich allein in Europa durch Kavitationserosion an Strömungsmaschinen hervorgerufenen Schäden auf weit über 100 Mio. DM geschätzt.

Die Vorhersage - oder besser die Vermeidung - von Kavitation ist das Ziel beim Entwurf von hydraulischen Maschinen wie Turbinen, Pumpen, Propellern und wasserbaulichen Anlagen. Kavitation entzieht sich jedoch noch immer exakter theoretischer Vorhersage, deshalb sind Modellversuche notwendig.

Die Problematik der klassischen Kavitationszahl

Zur Abschätzung der Kavitationsgefährdung werden der Beginn und die Ausprägung von Kavitationserscheinungen experimentell ermittelt. Dabei werden die umströmten Bauteile im Original oder als Modell in einem Versuchskreislauf untersucht und anhand von Ähnlichkeitsbeziehungen, wie z.B. der Thomazahl, hinsichtlich ihres Kavitationsverhaltens beurteilt. Der Parameter, welcher üblicherweise zur Charakterisierung der Kavitation benutzt wird, ist die dimensionslose Kavitationszahl

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_d}{1/2 \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2}$$

wobei P_{∞} und V_{∞} den Druck und die Geschwindigkeit in der ungestörten Strömung vor dem Körper, ρ und P_d die Dichte und den Dampfdruck des Wassers darstellen.

Die klassische Kavitationstheorie geht davon aus, dass die Kavitationserscheinungen an Modell und Prototyp für geometrisch ähnliche Körper bei gleichem σ identisch sind, unabhängig von Änderungen in den physikalischen Parametern wie Körpergröße, Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur, Art der Flüssigkeit, usw.

Aus systematischen Untersuchungen und Erfahrungen in der Praxis ist jedoch bekannt, dass diese klassische Kavitationsbeziehung keine ausreichend genaue Übertragung der Modellergebnisse auf die Ausführung erlaubt. So zeigt sich z.B. an einem umströmten Bauteil der Großausführung schon voll ausgebildete Kavitation, während an seinem

kleineren Modell bei identischer Kavitationszahl σ noch keine oder gerade beginnende Kavitation zu beobachten ist. Die Unterschiede zwischen den Kavitationserscheinungen an Modell und Ausführung werden mit dem Begriff „Maßstabseffekte“ zusammengefasst.

In mehreren aufeinander aufbauenden Forschungsvorhaben wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau in Oberrach folgende Gesamtbeziehung für Maßstabseffekte bei Kavitation entwickelt:

$$\sigma = K_0 \cdot L^{1/2} \cdot \frac{\nu}{\nu_0^{-1/4}} \cdot \left[1 + \left(\frac{V_\infty}{V_0} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \frac{K_0}{4} \cdot S \right]$$

σ	Kavitationszahl
K_0	Charakteristische Kenngröße für Kavitation
L	Charakteristische Körpergröße
ν	Kinematische Viskosität
ν_0	Kinematische Viskosität von Wasser bei 20°C
V_∞	Geschwindigkeit der ungestörten Strömung
V_0	Basisgeschwindigkeit (12,7 m/s)
S	Standardabweichung der turbulenten Strömung

Die Problematik der Wasserqualität

Alle Maßstabseffekte können von sog. „Wasserqualitätseffekten“ überlagert sein. Grundannahme bei Kavitationsuntersuchungen ist ja, dass das Aufreißen der Flüssigkeit bei Erreichen des Dampfdruckes P_d einsetzt. Dass diese Annahme nur in Ausnahmefällen zutrifft, ergibt sich aus der Tatsache, dass Kavitationsuntersuchungen sogar an ein und demselben Testkörper in verschiedenen Versuchseinrichtungen zu u.U. total unterschiedlichen Ergebnissen führen, was in erster Linie auf unterschiedliche Zerreißfestigkeit der Testflüssigkeit, also auf unterschiedliche „Wasserqualität“ hinsichtlich seiner Kavitationsanfälligkeit zurückzuführen ist. Deshalb wurde ein Messverfahren zur Bestimmung der Zerreißfestigkeit des Testwassers entwickelt und in den umfangreichen Testreihen zur Ermittlung der wahren Maßstabseffekte eingesetzt.



Zerreißfestigkeit
des Testwassers > 0



Zerreißfestigkeit
des Testwassers = 0



Zerreißfestigkeit
des Testwassers < 0

Größenmaßstabseffekt

am Beispiel eines halbkugeligen Körpers (σ und V_∞ entsprechend Kavitationsbeginn bei der kleinsten Körpergröße $D = 15 \text{ mm}$)



Körpergröße 15 mm
(Kavitationsbeginn)



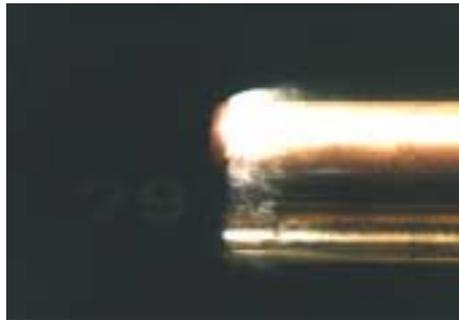
Körpergröße 60 mm
(fortgeschrittene Kavitation)

Geschwindigkeitsmaßstabseffekt

am Beispiel eines 1/8-Kaliber-Körpers (bei konstanter Kavitationszahl, $D = 30 \text{ mm}$)



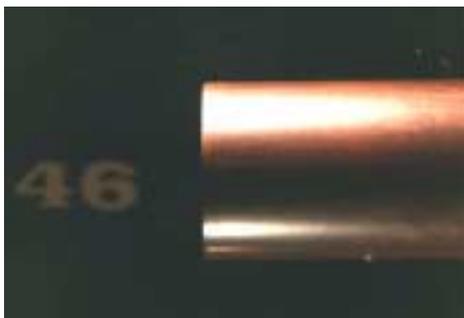
$V_\infty = 6,02 \text{ m/s}$



$V_\infty = 10,12 \text{ m/s}$

Turbulenzmaßstabseffekt

am Beispiel eines stumpfen Körpers (σ und V_∞ entsprechend Kavitationsbeginn bei natürlicher Turbulenz der Versuchseinrichtung)



Turbulenzgrad $\approx 1,5\%$



Turbulenzgrad $\approx 11\%$