Eine neue Art von Kavitationskeimen

Wolfgang Eisenmenger und Rainer Pecha
1. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart

Grundlagen

Die theoretische Zerreißspannung von reinem Wasser liegt bei Werten über 100 MPa [1]. Das Auftreten von Kavitation bei niedrigeren Spannungen (negative Drücke) ist durch heterogene Keime bedingt. Bisher werden neben der Einwirkung radioaktiver Strahlung [2] nano- bis mikroskopische, hydrophobe Schwebe-Partikel als Keime diskutiert, die durch Oberflächenspalte oder Rauhigkeiten Gastaschen stabilisieren können [3]. Darüberhinaus sind künstliche Ultraschallkontrastmittel in Form stabilisierter Mikroblasen [4] sehr effiziente Kavitationskeime. Auch werden ambiphile Mizellen [1] als stabile Mikroblasen diskutiert.

Bei Ultraschall- und Stoßwellenexperimenten wird jedoch auch in reinem Wasser intensive Kavitation beobachtet, ohne daß Hinweise auf die genannten heterogenen Kavitationskeime vorhanden sind. Stattdessen sind bei den außerordentlich hohen Reinheits-anforderungen des Trinkwassers und entsprechenden Analysen nur noch Restschwebeteilchen im 100 nm-Bereich von mineralischer Natur wie z. B Calciten durch Gletscherabrieb (Bodenseewasser in Stuttgart) zu vermuten [5]. Da sich diese mineralischen Partikel nicht hydrophob sondern hydrophil verhalten, können diese nur durch einen neuen Mechanismus als Kavitationskeime wirken. Dieser wurde bereits im Zusammenhang mit dem Rißwachstum bei der Konkrementzertrümerung durch Stoßwellen diskutiert [6]. In Konkrementen wie Nierensteine, polykristallinen Mineralien oder sogar Gläsern finden sich im Volumen oder an der Oberfläche Strukturfehler in Form von sogenannten Mikro- oder Griffith-Rissen [7]. Unter dem Einfluß von Zugspannungen können sich diese Risse öffnen und bei wiederholter Belastung zusammenwachsen, bis schließlich ein Ermüdungsbruch auftritt. Bei porösen hydrophilen Materialien wie Nierensteinen, Kunststeinen, Gips, Kalksteinen und auch Schwebeteilchen wie Calciten sind die Mikrorisse in wässriger Umgebung bis zur Spitze des Risses mit Wasser gefüllt (Abb. 1a)). Bei plötzlichem Anlegen einer Zugspannung (z. B. Durch Unterdruckanteile einer Stoßwelle) öffnet sich der Riß ausgehend von der Spitze und es entsteht ein Dampfraum, da das Wasser nicht schnell genug nachströmen kann (Abb. 1 b)). Das Öffnen bzw. Wachstum des Risses (welcher an seiner Spitze atomarer Ausdehnung besitzt) wird durch Hebelwirkung des Unterdrucks auf die ganze Länge des Risses bewirkt. An der Rißspitze treten mechanische Spannungserhöhungen von mehreren Größenordnungen auf. So ergibt sich z. B. bei einer angenommenen Rißlänge von 1 µm und einer Rißspitzen-ausdehnung von 1 nm ein Faktor 10^3. Der im Riß entstandene Dampfraum kann nun im äußeren Unterdruck weiter wachsen. Bei einer Risslänge von 1 µm und einem grob geschätzten Blasenradius von 0.1 µm (entsprechend der entstandenen Rißöffnung) genügt ein Unterdruck von -1.5 MPa der Blake-Bedingung für das weitere Wachstum einer Kavitationsblase.

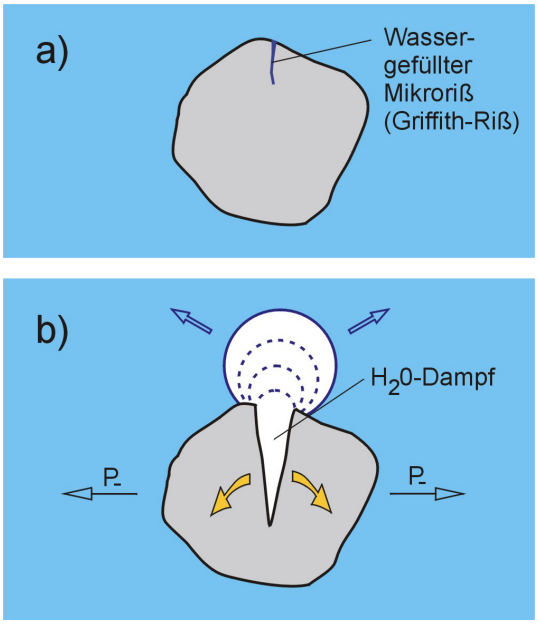

Abbildung 1: a) Hydrophiler Kavitationskeim mit wasser-gefülltem Mikroriß. b) Im Unterdruck wächst der Riß durch Hebelwirkung an. Der im Riß enstehende Dampfraum wird im äußeren Unterdruck zur Kavitationsblase aufgezogen.

Experimentelles Vorgehen

Zur Prüfung der Hypothese, daß Kavitation in Trinkwasser durch Rißwachstum in mineralischen Schwebeteilchen wie z. B. Calciten ausgelöst werden kann, untersuchten wir die Veränderung der Kavitation unter verschiedenen Einflüssen (wie Essigzugabe, etc.) aber gleichen akustisch Bedingungen.

Als Pulsquelle wurde ein selbstfokussierender elektromagnetischer Stoßwellengenerator (wie z. B. in [6] beschrieben) eingesetzt. Als Meß- und Beobachtungsküvette diente ein 40 cm x 40 cm x 40 cm großer Messtank mit zwei gegenüberliegenden Glaswänden zur Beobachtung und dem seitlich angeflanschten Stoßwellengenerator. Das mit einem faseroptischen Hydrophon (FOPH 300) gemessene Stoßwellensignal des Generators im Fokus (Abb. 2) zeigt nach dem Überdruckpuls von P_{max} = 32 MPa mit 0.8 µs Dauer einen Unterdruckpuls von – 6.2 MPa und 2.2 µs Pulsdauer (-6 dB). Bei -6.2 MPa beträgt der Blakeradius etwa 50 nm. Ab dieser Rißöffnung können Schwebeteilchen bis zu ca. 10 µm nach dem beschriebenen Mechanismus zur Kavitation beitragen. Größere

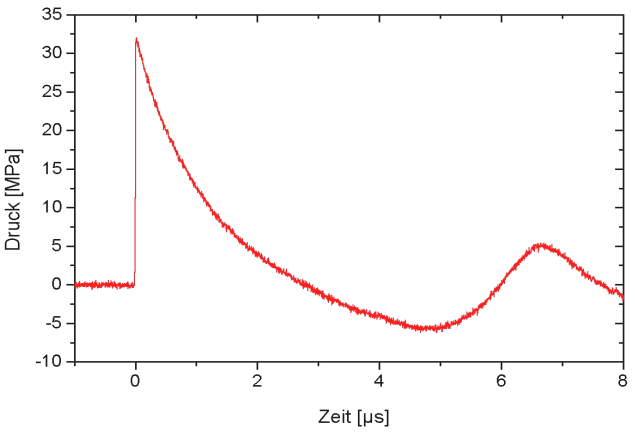

Abbildung 2: Stoßwelle im Fokus des elektromagnetischen Stoßwellengenerators, gemessen mit einem faseroptischen Sondenhydrophon FOPH 300.

Schwebeteilchen sinken ab, da die Brownsche Bewegung nicht mehr zur Stabilisierung ausreicht. Das Messbecken war mit entgastem (4 mg O_2/l) Leitungswasser gefüllt, die Wassertemperatur betrug 25° C. Die zu untersuchenden Proben befanden sich in handelsüblichen Getränkeflaschen aus dünnwandigem (0.2 mm), klar durchsichtigem Kunststoff (Polyethylenterephthalat (PET), Durchmesser: 8.5 cm), wobei der Stoßwellenfokus in der Flasche lag. Nach jedem einzelnen Druckpuls erfolgte der Beleuchtungs-Fotoblitz mit einer Verzögerung von 300 µs. Zur Bildregistrierung wurde ein digitaler Videocamcorder eingesetzt.

Experimentelle Ergebnisse

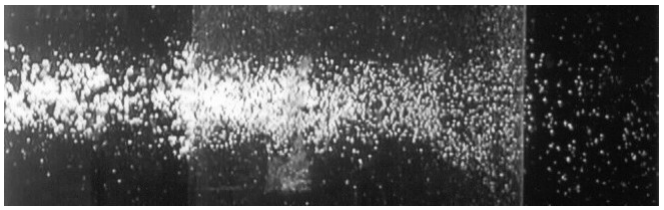

Abbildung 3: Versuchstank und Kunststoffflasche mit entgastem Leitungswasser gefüllt. Innerhalb und außerhalb der Flasche tritt heftig Kavitation auf

Abb. 3 zeigt, daß die Kavitation im unbehandelten Leitungswasser außerhalb und innerhalb der Probe kaum signifikante Unterschiede aufweist. Allerdings führen offensichtliche Inhomogenitäten der Keimdichteverteilung zu deutlichen räumlichen Unterschieden der Blasendichte.

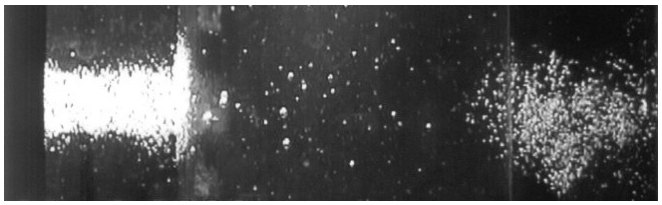

Abbildung 4: Flascheninhalt mit Eisessig versetzt (Endkonzentration: 2 % vol.), nach einer Wartezeit von 24 h. Die Kavitation im Flascheninneren ist deutlich reduziert.

Aufgrund der Vermutung, dass Calcite wesentliche Keime sein könnten, wurde zu deren Auflösung die Probe in Abb. 3 mit Eisessig (30 ml) versetzt. Abb. 4 zeigt nach Eisessigzugabe und einer Wartezeit von 24 h (Endkonzentration: 2 % vol.) einen deutlichen Rückgang der Kavitation – bis auf wenige einzelne Keime, vermutlich Mineralien, die nicht in Essig lösbar sind. An

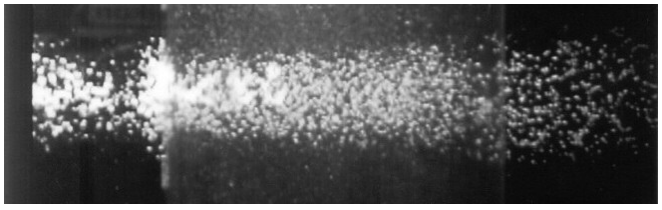

Abbildung 5: Die Probe aus Abb. 4 nach Zugabe von Gips (nicht in Essig lösbar) .

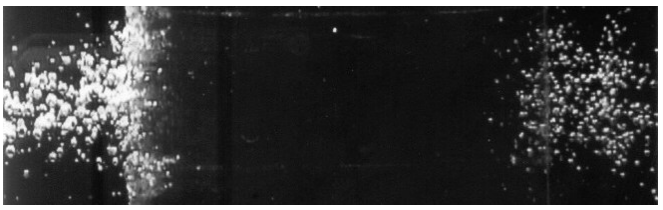

Abbildung 6: Kunststoffflasche mit Mineralwasser gefüllt. Im Flascheninneren ist keine Kavitation beobachtbar

der rechten Schallaustrittsstelle der Probe ist im Leitungswasser des Messbeckens wieder starke Kavitation zu beobachten. Nach Zugabe von ca. 1 mm^3 Gipspulver auf 1.5 Liter Flüssigkeitsmenge, sowie Schütteln und einer Wartezeit von 50 min. zeigt Abb. 5 wieder starke Kavitation im Probenvolumen. Dies deutet darauf hin, daß wieder mineralische, aber nicht lösbare hydrophile Keime in der 2% Essiglösung vorhanden sind. Nach diesen gut reproduzierbaren Experimenten entstand die Frage nach der Keimhäufigkeit in stark kohlensäurehaltigem Mineralwasser. Abb. 6 zeigt eine Mineralwasserprobe (Marke „Taqua“) nach ca. 24 h Entspannung mit offenem Verschluß. Obwohl noch ein hoher Anteil von gelöstem CO_2 vorhanden ist, wird keine Kavitation in der Probe beobachtet. Auch hier führt die Zugabe von 1 mm^3 Gipspulver und anschließendem Schütteln zwar erst zu heftiger CO_2-Abgabe, aber nach einer Wartezeit von ca. 30 sek. zu starker Kavitation (Abb. 7).

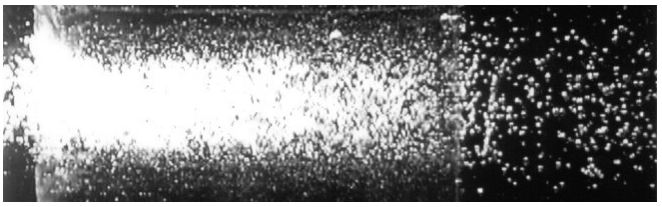

Abbildung 7: Die Probe aus Abb. 6 nach Zugabe von Gips.

Diskussion

Die experimentellen Ergebnisse unterstützen die Hypothese der mineralischen, hydrophilen Kavitationsentstehung durch Öffnen von Griffith-Rissen in der Unterdruckphase. Weitere Untersuchungen an verschiedenen, möglichst gezielt ausgesuchten Kavitationskeimen dieser Art erscheinen interessant, ebenso wie die Kaviationsabhängigkeit von der Unterdruckamplitude, einer statischen Überdruckbelastung und anderen Einflußgrößen.

[1] T. G. Leighton,, *The acoustic bubble*, Academic press limited, London (1994)

[2] R. T. Beyer, *Nonlinear acoustics*, Acoustical society of America (1997)

[3] H. B. Marschall et. al., CAV 2001, 4th Int. Symp. on Cavitation, Cal. Inst. of Tech.

[4] B. Wolfrum et. al., Appl. Phys Lett. **81**, 26 (2002)

[5] T. Bundschuh et. al., Acta hydrochim. Hydrobiol. **29** (2001)

[6] W. Eisenmenger, Ultrasound in Med. & Biol. **27**, 5 (2001)

[7] A. A. Griffith, Philo. Trans. Roy. Soc. A **221** (1920)