

Messungen zur Suche nach kavitationsinduzierter Neutronenemission

Reinhard Geisler¹, Wolf-Dieter Schmidt-Ott², Thomas Kurz¹ und Werner Lauterborn¹

(1) *Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen*

(2) *Zweites Physikalisches Institut, Universität Göttingen*

E-mail: rgeisle@dpi.physik.uni-goettingen.de

Einleitung

Beim Kollaps von Kavitationsblasen können im Blaseninneren hohe Drücke und Temperaturen entstehen. Diese Bedingungen führen u.a. zur Emission kurzer Lichtblitze im Augenblick des Kollapses (Sonolumineszenz oder Kavitationslumineszenz). Diese Tatsache hat seit Jahren zu Spekulationen um die Möglichkeit einer kavitationsinduzierten Kernfusion („Sonofusion“) in deuterierten Flüssigkeiten geführt. Die Hoffnung ist dabei, dass die extremen Verhältnisse im Kollaps die Tunnelwahrscheinlichkeit für eine d-d Fusion soweit erhöhen können, dass eine solche in nachweisbarem Umfang stattfindet.

Eine von Taleyarkhan et al. [1] veröffentlichte Messung einer Neutronenemission und Tritiumbildung in kavitierendem deuteriertem Aceton, die korreliert mit dem Auftreten von Sonolumineszenz sei, wurde kontrovers aufgenommen und konnte bisher nicht reproduziert werden [2]. Das dabei eingesetzte Experiment bestand aus einer schallangeregten Küvette, in der der Schalldruck unterhalb der Kavitationsschwelle blieb. Die Kavitation wurde dann durch injizierte Neutronen aus einer gepulsten Quelle ausgelöst.

Im vorliegenden Beitrag werden Untersuchungen an transienten Einzelblasen vorgestellt, die durch optischen Durchbruch im Fokus eines Puls lasers erzeugt wurden. Sie beschränken sich auf die Suche nach 2.5 MeV-Neutronen, die bei einer Fusion von zwei Deuteronen zu Helium-3 entstehen. Im Gegensatz zu dem oben angeführten Experiment existiert hier jeweils nur exakt eine Kavitationsblase, die einen Lumineszenzblitz emittiert. Damit kann eine eindeutige zeitliche Korrelation zwischen der Lichtemission und einer eventuellen Strahlungsdetektion bestimmt werden. Zudem entfällt mit dem Neutronengenerator eine weitere Fehlerquelle. So wird eine deutlich verbesserte Trennung von der Hintergrundstrahlung erreicht.

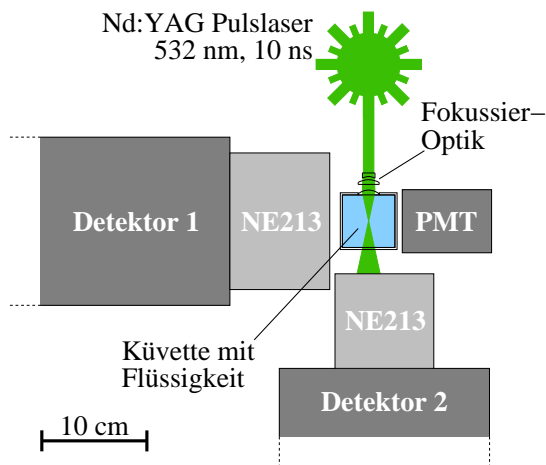


Abb. 1: Schema eines typischen Aufbaus. Ein fokussierter Laserpuls erzeugt in der Flüssigkeit eine Kavitationsblase. Die Kavitationslumineszenz wird mit einem Photomultiplier, Kernstrahlung mit NE213-Flüssigkeitsszintillatoren registriert.

Experiment

Zur Erzeugung der Kavitationsblasen kam ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit 10 ns Pulsdauer und 10 mm Strahldurchmesser zum Einsatz (Abb. 1). Um zu vermeiden, dass Reste einer alten Blase die neue beeinflussen, wurde seine Repetitionsrate auf 0.5 Hz beschränkt. Die 3-linsige Fokussierungsoptik wurde optimiert auf mi-

nimale sphärische Aberration und maximalen Fokuswinkel. So wird die zum optischen Durchbruch notwendige Pulsenergie wie auch die Größe des entstehenden Plasmas minimiert. Für die aus dem Plasma hervorgehende Kavitationsblase bedeutet dies, dass ihre Form nur wenig von dem angestrebten Ideal einer Kugel abweicht. Die Optik fokussierte ohne weitere Grenzflächen direkt in die Flüssigkeit. Zwei Küvetten kamen zum Einsatz: Eine offene aus Glas (Wandstärke 2.5 mm, Innenmaß 50 mm zum Kubus) und eine geschlossene aus Stahl (Wandstärke 5 mm, Innenmaß 60 mm × 60 mm × 70 mm) mit aufgesetzten Quarzfenstern. In letzterer konnte die Flüssigkeit unter einen statischen Druck von bis zu 10 bar gesetzt werden.

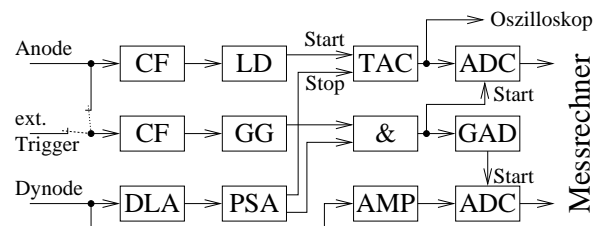


Abb. 2: Meßelektronik eines Strahlungsdetektors zur Pulsformanalyse. Aus Anoden- und Dynodensignal werden Signale zur Analyse von Pulsform (TAC-Spannung, oberer ADC) und Energie (unterer ADC) abgeleitet. Details zur Funktion sind in [3] zu finden. Abkürzungen: Constant-Fraction Diskriminator (CF), Logic Delay (LD), Gate Generator (GG), Delay-Line Amplifier Ortec 460 (DLA), Pulse-Shape Analyser Ortec 552 (PSA), Time-to-Amplitude Converter (TAC), Delay-Amplifier (AMP), Gate and Delay (GAD), Analog-Digital Converter (ADC).

Die Dynamik der erzeugten Blasen wurde mit einer schnellen CCD-Kamera (LaVision Imager 3, 100 ns Belichtungszeit) kontrolliert. Wegen der Reproduzierbarkeit lasererzeugter Blasen konnte die Dynamik durch ein stroboskopisches Verfahren mit Einzelaufnahmen von aufeinanderfolgenden Blasen abgetastet werden.

Die im Blasenkollaps emittierte Lumineszenz wurde mit einem Photomultiplier registriert. Mit einem schnellen Oszilloskop wurde die Kavitationslumineszenz zeitlich von dem Leuchten des Laserplasmas abgetrennt und bei jedem detektierten Lumineszenzblitz ein Triggersignal erzeugt.

Der Nachweis von Strahlung erfolgte mit zwei Flüssigkeitsszintillatoren (1 l und 0.5 l NE213 = BC501A), wobei der kleinere lediglich Kontrollfunktion hatte (Abb. 1). Durch Impulsformanalyse können damit Neutronen von anderen Ereignissen (μ -Mesonen, Gammas) unterschieden werden (Schaltschema Abb. 2). Es wurde ein Energiefenster von 170 keV bis 950 keV Elektronenenergie gesetzt, was einer Protonenenergie von 0.8 MeV bis 2.8 MeV entspricht. Die Kalibrierung der Energieskala erfolgte durch die Comptonkanten der Gammastrahlungen von ^{22}Na und ^{137}Cs . Die Neutronen-Gamma-Diskriminierung wurde mit einer Am/Be-Neutronenquelle überprüft (Abb. 3). Nur 0.1% der Gammaereignisse fallen in den TAC-Spektralbereich der Neutronen.

Zur Kalibrierung wurde die Apparatur freilaufend (anodengetriggert) betrieben. Für die Suche nach Fusionsneutronen wurde sie auf Koinzidenzbetrieb (lumineszenzgetriggert; Abb. 2, ext. Trigger) umgestellt. In dieser Betriebsart wurden nur Ereignisse registriert, die in zeitlicher Nähe (ca. 100 ns vor bis 450 ns nach) der Lumineszenz lagen.

Alle registrierten Ereignisse wurden auf einem Messrechner in TAC- und Energiespektrum gespeichert. Dabei ging die Information über den Zeitpunkt der Ereignisse verloren. Parallel wurden auf einem zweiten Messrechner für jeden Lumineszenzblitz die mit dem Oszilloskop gemessenen Signale von Photomultiplier, Detektoranode und TAC abgespeichert.

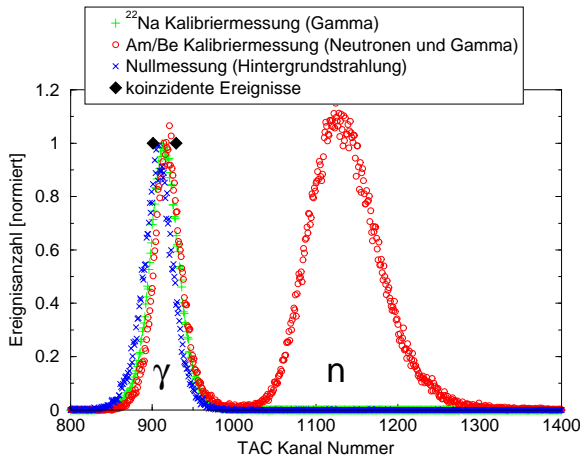


Abb. 3: Neutronen-Gamma-Diskriminierung gemessener Detektorereignisse. Dargestellt sind zwei Ereignisse, die innerhalb einer Messreihe von 8400 Kavitationslumineszenzblitzen zu diesen koinzident nachgewiesen wurden. Ihre Lage im TAC-Spektrum weist sie im Vergleich zu den Referenzmessungen als Hintergrundstrahlung aus.

Ergebnisse

Die Messungen wurden in einzelnen Messreihen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Variiert wurden statischer Druck, Laserpulsenergie, Temperatur, Gasgehalt. Optimierungskriterium waren dabei die Reproduzierbarkeit und die Intensität der Lumineszenz.

- Temperatur: Bei niedrigen Temperaturen verstärkt sich die Kavitationslumineszenz. Für D₂O lagen die Versuche daher vorwiegend bei Temperaturen zwischen 10°C und dem Gefrierpunkt (4°C), für Aceton bei bis zu -8°C.
- Gasgehalt: Es bestätigte sich, dass der Gasgehalt — im Gegensatz zur Sonolumineszenz — bei laserinduzierter Kavitationslumineszenz eine untergeordnete Rolle spielt. Luftgehalte von der Sättigung bis unter 5% sowie Lösungen von Argon und Deuterium wurden untersucht.
- Statischer Druck: Für den statischen Druck ergab sich ein von der vorgegebenen Laserpulsenergie abhängiges Optimum. Die meisten Versuche wurden bei Atmosphärendruck oder im Bereich um 5 bar durchgeführt.
- Laserpulsenergie: Umgekehrt hing die optimale Pulsenergie von einem vorgegebenen statischen Druck ab. Die meisten Versuche wurden bei Energien um 6 mJ durchgeführt (Blasenradius 1.5 mm bei 1 bar).

Insgesamt wurden rund 58000 Laserschüsse abgegeben, die einen hinreichenden Kavitationslumineszenzblitz in D₂O erzeugten. Mit der Torzeit der Elektronik ergibt dies eine Gesamtmessdauer von 32 ms. In dieser Zeit wurden 6 (Elektronik) bzw. 5 (Oszilloskop) Detektorereignisse aufgezeichnet. Diese Werte sind konsistent mit dem Nulleffekt. *Kein Ereignis lag in dem Neutronenbereich des TAC-Spektrums* (vgl. Abb. 3,4).

Messungen mit Aceton und deuteriertem Aceton (C₃D₆O) ergaben bei rund 10000 Kavitationsblasen keine Lumineszenz. Die Erklärung dafür lieferten die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen: Kavitäten in

diesen Flüssigkeiten bildeten verstärkt Oberflächeninstabilitäten aus und fragmentierten. Auch blieben nach dem Kollaps größere Restvolumen erhalten als bei vergleichbaren Blasen in Wasser.

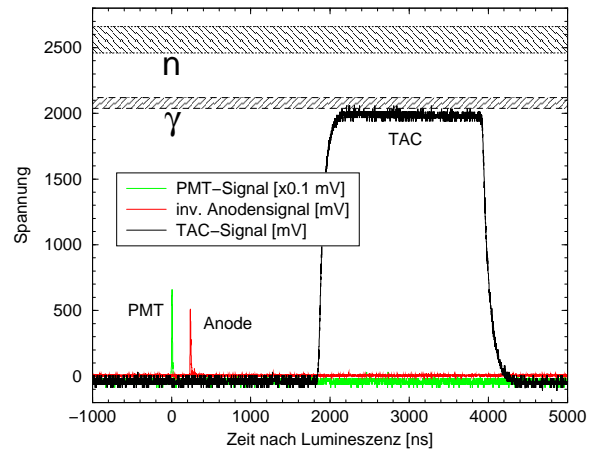


Abb. 4: Oszilloskopsignal eines zum Lumineszenzblitz koinzidenten Detektorereignisses. Aufgezeichnet werden das Photomultiplier-Signal (PMT), das Anodensignal des Detektors sowie das TAC-Signal als Ergebnis der Pulsformanalyse. Die schraffierten Bereiche markieren für die TAC-Spitzenspannung die Halbwertsbreite der Spektren von Neutronen (oben) und Gammas (unten) und entsprechen den Halbwertsbreiten der Maxima aus Abb. 3. Ein detektiertes Neutron würde sich durch eine erhöhte TAC-Spannung sowie einen geringeren zeitlichen Abstand zwischen PMT- und Anodensignal auszeichnen.

Diskussion

Der Detektor (1 Liter NE213) erreichte unter Berücksichtigung der Geometrie, der mittleren freien Weglänge von 2.5 MeV-Neutronen in NE213, sowie der gesetzten Energiefenster eine Neutronenansprache von 4% (siehe auch [3]). Die Verluste durch Streuung in den Glasfenstern und in der Flüssigkeit (Weglänge 25 mm bis 35 mm) konnten dabei vernachlässigt werden. Um eine grobe Abschätzung der oberen Schranke emittierter Neutronen zu gelangen, wird angenommen, dass die gemessenen 0 Neutronen in der ein-Sigma-Umgebung einer Normalverteilung um 1 liegen. Weiter wird angenommen, dass lediglich die Hälfte der 58000 Ereignisse hohe Lumineszenzintensitäten erreichten. Als obere Schranke ergibt sich dann, dass im Mittel pro Lumineszenzblitz maximal 10^{-3} Neutronen emittiert wurden.

Aus den Hochgeschwindigkeitsfotos erhält man nach Abklingen der Schwingungen den Ruheradius der Blase und daraus das Restvolumen. Zusammen mit Kompressionsfaktor und Dampfdruck kann die Deuteronendichte im Kollapsvolumen bestimmt werden. Mit der Lumineszenzdauer und dem Reaktionsparameter $\langle\sigma v\rangle$ aus [4] berechnet sich die d-d Fusionsausbeute nach [5] zu $\langle\sigma v\rangle * 2 * 10^{23} \text{s/cm}^3$. Dies entspricht bei der beobachteten Maximalrate einer Plasmatemperatur von maximal 250 eV. Berücksichtigt man im Sinne einer konservativen Betrachtung die Fehler in den Abschätzungen mit einem Faktor 100 in $\langle\sigma v\rangle$, so kann gefolgert werden, dass die mittlere Temperatur im Lumineszenzplasma nicht über 420 eV lag, da andernfalls Neutronen detektiert worden wären.

- [1] R. P. Taleyarkhan et al., Science, 295: 1868–1873, 2002.
- [2] D. Shapira and M. Saltmarsh., Phys. Rev. Lett., 89(10): 104302, 2002.
- [3] V. Kunze et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 361: 263, 1995.
- [4] P. Marmier, Kernphysik II, ETH Zürich 1965.
- [5] T. Ditmire et al., Nature, 398: 489–492, 1999.