

Wieviel Schallenergie übertragen Ultraschallchirurgiegeräte mit metallischer Klinge in das Gewebe?

Christian Koch¹, Volker Wilkens¹, Susanne Kaskel-Paul², Helmut Höh²,

1: *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig; Email: ultrasonics@ptb.de*

2: *Klinik für Augenheilkunde, Dietrich Bonhoeffer Klinikum Neubrandenburg; Email: aug@dbk-nb.de*

Einleitung

Ultraschallchirurgiegeräte mit metallischen Klingen werden heute in einem sehr breiten Bereich angewandt. Bei der Kataraktchirurgie ist der Einsatz des Ultraschalls zur Standardmethode geworden. Auch in der allgemeinen chirurgischen Praxis haben Ultraschall-dissektoren ein breites Feld erobert, wobei vor allem endoskopische Anwendungen im Vordergrund stehen.

Immer wieder wird jedoch auch über Schädigungen an unbeteiligtem Gewebe während der Anwendung von Ultraschallchirurgiegeräten^[1] berichtet. Am Auge ist das Endothel, die Hornhautschicht auf der Innenseite der vorderen Augenkammer besonders betroffen^[2,3]. Die Ursachen für solche Schäden liegen in den auftretenden hohen Temperaturen^[4] und möglicherweise Kavitationseffekten^[5] begründet. Wegen der vielen miteinander verknüpften komplexen Vorgänge ist eine vollständige quantitative Analyse nur schwierig möglich. In diesem Beitrag wird der Frage nachgegangen, wieviel Energie lokal deponiert wird - als Voraussetzung für eine Temperaturerhöhung - und in wie weit Schallenergie dabei eine Rolle spielt. Dazu werden Messungen der in zwei verschiedene Medien eingekoppelten akustischen Leistung gezeigt und Modellrechnungen, die auf einfachen physikalischen Prinzipien beruhen, erläutert.

Messung der eingekoppelten akustischen Leistung

Während des Schneidens bzw. des Gewebeabtrags kommt die Klinge des chirurgischen Gerätes in engen Kontakt mit dem Gewebe. Dabei werden Ultraschallwellen eingekoppelt und Schallenergie in das Gewebe übertragen. Um die Schalleistung zu bestimmen, die die Klinge dabei abgibt, wurde eine Hydrophonmessung in einem Tank durchgeführt, der mit Absorbieren ausgekleidet war^[6]. Die Klinge wurde um ein Viertel der Wellenlänge in die Tankflüssigkeit eingetaucht und der Schalldruck bestimmt, aus dem mit Hilfe eines Modells die abgegebene Schalleistung bestimmt wurde. Als Tankflüssigkeiten wurden entgastes Wasser und Methocel[®] 2% eingesetzt. Methocel[®] 2% (Novartis Pharma) ist eine durchsichtige, hochviskose Flüssigkeit, die während der Phakoemulsifikation zum Schutz des Endothels eingesetzt wird, da sie wegen ihrer hohen "Zähigkeit" den Abstand zur Nadel vergrößert. Gleichzeitig hofft man, auf Grund der hohen Viskosität die Kavitationsaktivität zu vermindern.

Zur akustischen Anregung wurde ein Phakoemulsifikationsgerät (D.O.R.C. Phaco System II) mit einer hohlen Titanklinge (\varnothing innen 0,98 mm) verwendet. Das Gerät ermöglichte eine Variation der Schwingungsamplitude, wobei die Einstellung 40% im Dietrich Bonhoeffer Klinikum für Augenoperationen am häufigsten genutzt wird. Als Spülflüssigkeit wurde isotone Kochsalzlösung verwendet. Einzelheiten der Schalldetektion und der Bestimmung der akustischen Leistung sind in Zitat 6 ausführlich beschrieben.

Tabelle 1 listet Ergebnisse für die Einstellung 40% auf, die unter verschiedenen Bedingungen erhalten wurden, wobei stets mehr

oder weniger starke Kavitation auftrat. Zunächst kam entgastes Wasser zum Einsatz, das reproduzierbare Ergebnisse ermöglichte. Die Leistung verringerte sich auf etwa die Hälfte bei Einschalten der Spülung. Dabei erhöhte sich auch die Streubreite der Einzelmessungen. Dies lässt auf stärkere Kavitationsaktivität schließen, da durch die nicht entgaste Spülflüssigkeit zusätzliche Kavitationskeime zugeführt wurden.

Messbedingung	P / mW
in entgastem Wasser	5,0
in Wasser mit Spülung	2,6
in Methocel [®] 2%, sofort	1,8
in Methocel [®] 2%, nach 1,5 h	4,3
in Methocel [®] 2%, entgast	3,8
Maximal	14,3

Tabelle 1: Einkoppelte akustische Leistung für verschiedene Medien bzw. Situationen bei Geräteeinstellung 40%, die Messunsicherheit beträgt $\pm 21\%$ ($k=2$).

Für die Messungen in Methocel[®] 2% wurde eine kleine Menge der Flüssigkeit in einem ca. 3 cm langen Fingerling mit \varnothing 2 cm in den mit Wasser gefüllten Tank gebracht und die Klinge eingetaucht. Auf diese Weise konnten akustische Freifeldbedingungen gesichert werden, ohne den Tank mit der viskosen Flüssigkeit zu füllen. Die Ergebnisse zeigen deutliche Variationen. Wurde die Messung direkt nach dem Einfüllen durchgeführt, zeigte sich eine verstärkte Kavitationsaktivität auf Grund von Blasen, die beim Füllen entstehen. Nach 1,5 h Warten oder 20 min Lagerung unter Vakuum wurden höhere Leistungen gemessen. Erwähnt werden sollte auch, dass bei längerer Einwirkzeit die Zahl der Luftblasen so groß wurde, dass Schaum entstand.

Die letzte Zeile in Tabelle 1 enthält die Leistung, die aus der in einem unabhängigen Experiment in Luft gemessenen Auslenkung der Spitze errechnet wurde. Diese Elongation - und damit die Leistung - ist als Maximalwert anzusehen, denn beim Einbringen in das Medium wird die Amplitude allenfalls kleiner, bzw. bleibt gleich, wenn, wie im vorliegenden Fall, das Gerät über eine Regelung verfügt, die auch im Medium die Amplitude konstant hält. Der Vergleich zu den im Medium gemessenen Werten zeigt, dass ein großer Teil der Schallenergie von der Kavitationswolke gestreut und absorbiert wird. Insgesamt ist jedoch auch diese maximale akustische Leistung vergleichsweise gering: sie würde 1 cm³ Gewebe bei idealer thermischer Isolation nur um etwa 0,15 K/min erwärmen. Im folgenden Kapitel wird gezeigt, dass Reibungsprozesse weit höhere Energiemengen deponieren können.

Modell für die Reibung zwischen Klinge und viskoser Flüssigkeit

In dem im folgenden beschriebenen einfachen Modell wird das Gewebe als eine viskose Flüssigkeit beschrieben. Die Klinge sei ein hohles Rohr, das sich mit der Geschwindigkeit v in der Flüssigkeit bewegt, wobei v die Schallschnelle ist, die sich mit $v = \omega \zeta$ aus Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ und Elongation ζ ermitteln lässt.

Reibung an der Außenseite der Klinge

Es lässt sich zunächst zeigen, dass in guter Näherung laminare Strömungsverhältnisse angenommen werden können. Dann ist die Reibungskraft, die von der Klinge überwunden werden muss

$$F_R = \eta A \frac{dv}{dr}, \quad \text{eq. 1}$$

wobei η die Viskosität, A die Reibungsfläche und r die radiale Koordinate bedeuten. Die Ableitung dv/dr lässt sich abschätzen, indem die Dicke der strömenden Schicht D zwischen Rohrwand und ruhender Flüssigkeit aus

$$D = \sqrt{\frac{6\eta l}{\rho v}} \quad \text{eq. 2}$$

mit l als Länge des Rohrs bestimmt^[7] und $dv \approx v$ und $dr \approx D$ gesetzt wird. Die von der Klinge aufzubringende Leistung ist

$$P_{RA} = F_R v = A \sqrt{\frac{\rho \eta v^3}{6l}} v. \quad \text{eq. 3}$$

Unter Annahme harmonischer Anregung und Integration über eine Periode erhält man die mittlere Leistung

$$\langle P_{RA} \rangle = 0.458 A \sqrt{\frac{\rho \eta v_A^5}{6l}} \quad \text{eq. 4}$$

mit v_A als Amplitude. Setzt man für Wasser $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ und $\eta = 0,001 \text{ Pa s}$ erhält man $P_{RA} = 19 \text{ mW}$, für Methocel® 2% ($\rho = 1,04 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 3,5 \text{ Pa s}$) ermittelt man $P_{RA} = 1,1 \text{ W}$.

Reibung in der Phakoklinge

Auch für die Flüssigkeit im Inneren der Phakoklinge lässt sich mit Hilfe der laminaren Strömung eine einfache Beschreibung finden. Es wird angenommen, dass die Spülung nur eine (geringe) gleichbleibende Geschwindigkeit erzeugt, deren Wirkung vernachlässigt werden kann. Die Reibungskraft versucht während der Bewegung der Klinge die Flüssigkeit zu beschleunigen und dabei gleichzeitig den Staudruck am Ende des Rohres zu überwinden:

$$F_R = F_a + F_v \Rightarrow 2l\eta \frac{dv}{dr} = \rho r l \frac{dv}{dt} + \frac{\rho}{2} r v^2. \quad \text{eq. 5}$$

Gleichung (eq. 5) lässt sich nicht ohne Weiteres mit einem einfachen Ansatz lösen und deshalb soll hier nur die stationäre Lösung $dv/dt = 0$ diskutiert werden. Sie nimmt an, dass die Phakoklinge sich gleichförmig mit v_0 bewegt und für eine Maximalabschätzung wird v_0 gleich der maximalen Schnelleamplitude gesetzt. Lösung der Gleichung (eq. 5) ergibt einen Ausdruck für $v(r)$ der in Gleichungen (eq. 1 und 3) eingesetzt werden kann und die Leistung liefert mit

$$\langle P_{RI} \rangle = 0.212 \pi R_i^2 \rho v_0^3 \quad \text{eq. 6}$$

mit R_i als Innenradius des Rohrs. Für $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ergibt sich $P_{RI} = 0,21 \text{ W}$. Wie Gleichung (eq. 6) zeigt, ist P_{RI} nicht von η abhängig. Die Ursache liegt im Charakter der laminaren Rohrströmung begründet: Je höher die Viskosität, um so höher die Reibungskraft, um so dicker ist jedoch auch die strömende Schicht, so dass der radiale Gradient der Geschwindigkeit sinkt.

Ein weiterer Beitrag zur Energiebilanz der Strömung ist der turbulente Anteil, der durch die glatt geschnittene Fläche der Klinge an der Stirnseite entsteht. Ohne Erläuterung sei mitgeteilt, dass sich auch hier ein von der Viskosität unabhängiger Wert ergibt, der für $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 75 mW beträgt. Weiterhin wurde die Leistung abgeschätzt, die innerhalb der Titanklinge absorbiert wird. Es ergab sich ein Wert von 10 mW.

Diskussion

Die Hydrophonmessungen im Tank zeigten, dass die in die Flüssigkeit eingekoppelte akustische Leistung bei dem verwendeten Phakoemulsifikationsgerät nur wenige mW betrug. Bei Einsatz einer hochviskosen Flüssigkeit verminderten sich die gemessenen Leistungen, was auf eine verstärkte Kavitationsaktivität zurückzuführen war. Die Untersuchung der Spektren, die sowohl Subharmonische als auch verstärkt höher Harmonische zeigten, bestätigte diese Vermutung. Die Verwendung einer hochviskosen Flüssigkeit ist also zur Unterdrückung der Kavitation nicht geeignet. Weiterhin muss bei der Verwendung in realen Operationen zumindest von einer Beibehaltung des Kavitationsrisikos ausgegangen werden. Gleiches gilt auch für den Einsatz der Spülung.

Die eingekoppelte akustische Leistung ist bis zu zwei Größenordnungen geringer als die durch Reibungsprozesse im Medium erzeugte Leistung. Auch die Schallabsorption in der Titanspitze und turbulente Strömungen spielen eine untergeordnete Rolle. Die Erwärmung sowohl an der Klingenspitze als auch am Cornealschnitt wird also im Wesentlichen durch Reibungsvorgänge hervorgerufen. Je höher die Viskosität, um so höher die eingebrachte Leistung und die Gefahr hoher Temperatur. Die Verwendung der Spülung ist demnach unter thermischen Gesichtspunkten von doppelter Bedeutung: zum einen kühlt sie die Klinge, zum anderen sichert sie eine niedrige Viskosität. Da diese Schlüsse aus einem allgemeinen theoretischen Modell folgern, ist jedoch eine experimentelle Absicherung notwendig. Eine kalorische Messung der eingebrachten Gesamtleistung würde z. B. weitere Erhitzungsquellen offenlegen.

¹ K. M. Kadesky, B. Schopf, J. F. Magee, G. K. Blair, Proximity injury by the ultrasonically activated scalpel during dissection – J. Ped. Surg. 32 (1997), 878-879.

² R. D. Beesley, J. F. Olson, S. E. Brady, The effects of prolonged phacoemulsification time on the corneal endothelium – Ann. Ophthalm. 18 (1986), 216-222.

³ K. Hayashi, H. Hayashi, F. Nakao, F. Hayashi, Risk factors for corneal endothelial injury during phacoemulsification – J. Cat. Refract. Surg. 22 (1996), 1079-1084.

⁴ Ch. Koch, T. Friedrich, F. Metternich, A. Tannapfel, H.-P. Reimann, U. Eichfeld, Determination of temperature elevation in tissue during the application of the Harmonic Scalpel – Ultras. Med. & Biol. 29 (2003), Nr. 2.

⁵ M. Topaz, M. Motiei, E. Assia, D. Meyerstein, N. Meyerstein, A. Gedanken, Acoustic cavitation in phacoemulsification: chemical effects, modes of action and cavitation index – Ultras. Med. & Biol. 28 (2002), 775-784.

⁶ C. Koch, M. Borys, T. Fedtke, U. Richter, B. Pöhl, Determination of the Acoustic Output of a Harmonic Scalpel - IEEE Trans. UFFC 49 (2002), 1522-1529.

⁷ Gerthsen, Kneser, Vogel, Physik, 15. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1986, Kap. 3.3.3