

Temperatur-Zeit-Verläufe beim Bohren und Schneiden mit dem Excimerlaser (308 nm) im umgebenden Gewebe

M. Dressel¹, R. Jahn², H.U. Langendorff², W. Neu³ und K.H. Jungbluth²

¹ University of British Columbia, Department of Physics, 6224 Agricultural Road, Vancouver, B.C. Canada V6T 2A6

² Abteilung für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (Direktor: Prof. Dr. K.H. Jungbluth), Universitäts-Krankenhaus Eppendorf, Martinistraße 52, D-W- 2000 Hamburg 20

³ Laser-Laboratorium Göttingen e.V., Im Hassel 21, D-W-3400 Göttingen

Einleitung

Gewebetrennung aufgrund von Hitzeeinwirkungen sind durch verschiedene Techniken in der Weichgewebeschirurgie bereits bekannt: Schneiden mit dem Elektrokauter oder auch mit einem thermischen Laser. Neu ist die sog. „Kaltschnitt-Technik“ mit Hilfe des Excimerlasers. Mit diesem hochenergetischen, kurzgepulsten Laser wird der Energiebereich der Gewebsverbrennung (Karbonisierung) und auch der der Verdampfung (Vaporisation) überschritten. Es treten nichtlineare Effekte auf, bei denen es zum Aufbrechen von Molekülbindungen kommt. Die Abtragung des Materials erfolgt explosionsartig, so daß aufgrund der Schnelligkeit des Vorganges kaum eine Wärmeausbreitung in das umgebende Gewebe erfolgt. Der Prozeß (Photoablation) verläuft relativ athermisch und wurde erstmalig von Srinivasan (1982) unter Anwendung des Excimerlasers auf harten Kunststoffen beschrieben. Der Laserstrahl kann durch Glasfasern geleitet werden.

Da diese Gerätekombination möglicherweise in der Hartgewebeschirurgie, damit auch in der Unfallchirurgie neue Anwendungsmöglichkeiten erschließt, wurden die photothermischen Effekte des Excimerlasers an Meniskus- und Knochengewebe überprüft.

Material und Methode

Laser: XeCl-Excimerlaser (Lambda Physik) LPX 605iCC, Wellenlänge 308 nm, Pulsdauer 60 ns

Fasern: Taperfasern (Heraeus Quarzglas), Länge 200 cm, Kerndurchmesser 600 µm und 1000 µm

Material: Knochen und Meniskus von frischen Schlachttieren (Schwein)

Medium: Luft, Wasser

Meßelement: Kupfer-Constantan Thermoelement (Fa. Omega Stanford USA) und Wärmeleitpaste (Fa. Fischer Elektronik)

Zielstellung: Untersuchung von Temperaturanstieg und -ausbreitung beim Bohren und Schneiden mit dem Excimerlaserstrahl im Knochen- und Meniskusgewebe.

Die Messungen erfolgten zunächst an Luft. Es kam zu regelmäßigen Verkohlungen im Knochengewebe. Wurde als umgebendes Medium jedoch Wasser verwendet, erhielt man die an Kunststoffen bereits beschriebene verkohlungs-freie Gewebsabtragung, so daß alle weiteren Untersuchungen nur noch im wäßrigen Medium durchgeführt wurden.

An Knochen und Meniskus variierten zunächst die Parameter Expositionszeit von 2–140 s und der Abstand von 1–3 mm; Applikationsenergie und Repetitionsrate blieben dabei konstant (20 MJ, 30 Hz).

Danach wurde in einem konstanten Abstand von 1 mm die Temperaturerhöhung im Meniskus bei steigender Applikationsenergie (30–50 MJ) und Erhöhung der Repetitionsrate (20–50 Hz) gemessen.

Ergebnisse

Jeder Versuch, Knochen an Luft mit Applikationsenergien ab 20 MJ (effektive Ablation) und Repetitionsraten über 20 Hz zu bohren, bedingte starke thermische Reaktionen. Die Bohrlöcher waren von dicken Karbonisationsringen umgeben, Lochtiefen und Ablationsraten blieben gering.

Die Messungen bei Laserapplikation im wäßrigen Mileu am Knochen bei 20 MJ, 30 Hz ergaben einen Temperaturanstieg um 35° C im Abstand von 1 mm nach einer Expositionszeit von 100 s. Auch bei Verlängerung der Exposition wurden keine weiteren Temperaturerhöhungen verzeichnet. Mit Zunahme des Abstandes vom Bohrloch sank die Temperatur. In einem Abstand von 2 mm betrug die Temperaturerhöhung lediglich noch 12° C. 10 s nach Expositionsende wurden nur noch 9° C, nach 40 s nur noch 4° C im Abstand von 2 mm gemessen.

Bei Anhebung der Applikationsenergie und Repetitionsrate während der Laserbohrungen war ein kontinuierlicher Temperaturanstieg auch im Meniskusgewebe zu beobachten. Applikationsenergie 50 MJ und Repetitionsrate 50 Hz ergaben nach 120 s eine Temperaturdifferenz von 62,5° C.

Diskussion

Die genaue Untersuchung der durch hochenergetische Laserpulse (Excimerlaser 308 nm) induzierten Gewebseffekte führte zu dem Schluß, daß es sich bei der Photoablation um eine Kombination von athermischen und thermischen Vorgängen handelt. Diese „Kaltschnitt-Technik“ bedingt unter bestimmten Parameterkonstellationen durchaus Temperaturerhöhungen im umgebenden Gewebe. Sie sind keineswegs mehr vergleichbar mit denen, die bei Anwendung konventioneller Laser (1.500° C) in der Vergangenheit am Knochen auftraten. Bei Parameterkonstellationen von 50 MJ 50 Hz wurden am Knochen Temperaturen bis 100° C im angrenzenden Gewebe gemessen. Die Versuche zeigen eine deutliche Abhängigkeit der auftretenden Temperaturen von Repetitionsrate, Applikationsenergie und Arbeitsmedium auf. Grundsätzlich kann unter Anwendung effektiver ablatierender Energiegrößen (über 20 MJ) nicht

an Luft gearbeitet werden. Der Abtragungsprozeß verläuft dabei vorwiegend thermisch. Das Arbeiten im wäßrigen Milieu gewährt neben einem geringen Kühl- und Spüleffekt (Entfernung von Ablationsmaterial, welches die Strahlabsorption und damit die Gewebsabtragung verändert) auch den für die Photoablation notwendigen Trägheitsabschluß.

Je kürzer die Pausen zwischen den einzelnen Pulsen sind, die Repetitionsrate dementsprechend hoch, umso eher entsteht ein Wärmestau im Gewebe, der zu Temperaturerhöhungen führt. Eine niedrige Repetitionsrate gewährleistet Wärmeabfluß, demzufolge werden die auftretenden Temperaturen geringer sein.

Messungen im Abstand von 1 mm von der applizierten Strahlung zeigen einen Temperaturabfall von bereits 50 %, nach 2 mm werden nur noch 1/4 der ursprünglichen Temperaturdifferenz aufgezeichnet. Daraus erklären sich die in früheren Experimenten vorgefundenen histologischen Befunde, die einen Nekrosesaum von nur 20–40 µm am Schnitttrand (keine Karbonisierung) zeigten.

Die Ergebnisse führen dazu, daß die Bedeutung der einzelnen Laserparameter hinsichtlich ihrer Wechselwirkung mit dem biologischen (Hart-)Gewebe erkannt und eine gezielte Steuerung des Prozesses in mehr athermische oder thermische Richtung möglich wird. Kleinere Blutstillungen erscheinen damit nicht mehr ausgeschlossen zu sein.

Zusammenfassung

Die Entwicklung der Excimerlasertechnik, die ein Bearbeiten von Hartgewebe ohne wesentliche thermische Schädigung ermöglicht, stellt einen großen Fortschritt dar. Es eröffnen sich damit Wege, an Knorpel und Knochen mittels flexibler Faser in unzugänglichen Regionen zu operieren, in die man mit konventionellem Instrumentarium nur schwer oder gar nicht gelangt. Für einen praktischen Einsatz stellt sich die Frage nach der Blutstillung. Bisher erfolgte sie mechanisch (Ligatur, Umstechung), durch Koagulation oder zuverlässiger noch mit einem thermischen Laser (z.B. Nd: YAG- oder CO₂-Laser), der die Gefäßstümpfe durch ein Aneinanderschweißen der Gefäßwände verschließt. Mit einem streng athermisch arbeitenden Laser wäre dies ausgeschlossen.

Während einer umfangreichen Versuchsserie über das Ablationsverhalten des Excimerlasers (308 nm) an Knorpel und Knochen, waren Einflußfaktoren aufgefallen, die eine thermische Reaktion bis hin zur Karbonisation bedingen.

In einer anschließenden Versuchsreihe überprüften wir die Bedeutung spezieller Parameterkonstellationen des XeCl-Excimerlasers in Hinblick auf die Temperaturentwicklung beim Schneiden oder Bohren in organischem Gewebe. Die erhaltenen Temperatur-Zeit-Verlaufskurven stellen dar, daß die Pluripotenz dieses Lasers unter anderem auch in der wahlweise einzustellenden thermischen oder athermischen Wirkungsweise besteht.

Die Versuche wurden mit der freundlichen Unterstützung der Firmen Lambda Physik und Heraeus Quarzglas durchgeführt.