

2. Material und Methoden

2.1. Entwicklung eines Trommelfellmodells zur Laserparazentese

2.1.1. Modellanforderungen/ Modellvorstellung

Der Mangel an verfügbaren nativen, humanen Trommelfellen erforderte die Suche eines Gewebemodells, an welchem sich Laserwirkungen analysieren lassen. Geeignete Modellgewebe sollten dem humanen Trommelfell vergleichbare histo-morphologische Eigenschaften aufweisen, die ein ähnliches Wirkungsverhalten, d.h. eine ähnliche Abhängigkeit des Abtragungsverhaltens (Perforationsdurchmesser) des Lasers von der applizierten Laserenergie erwarten lassen. Darüber hinaus soll sich das Modell durch eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und einen geringen präparatorischen Aufwand auszeichnen. Folgende Gewebe wurden als Modell getestet:

1. Pferdetrommelfell
2. Schweinetrommelfell
3. Meerschweinchentrommelfell
4. Schafdura
5. Hühnerschalenmembran.

Alle Gewebe wurden hinsichtlich nachgenannter Kriterien charakterisiert:

1. histologischer Aufbau
2. Wassergehalt
3. Schichtdicke
4. Abhängigkeit Gewebeabtrag (Perforationswirkung)-Laserenergie.

Alle o.g. Gewebe wurden am Erbium:YAG-Laser analysiert und mit dem nativen humanen Trommelfell als Referenzgewebe verglichen, geeignete Modellgewebe wurden mit dem CO₂-Laser nachuntersucht (siehe Kapitel 2.3.1.). An dem als Trommelfellmodell geeigneten Modellgewebe wurden danach für beide Laser verschiedene Applikations- und Scannersysteme für die Laserparazentese (siehe Kapitel 2.3.2.) getestet.

2.1.2. Literaturvergleich zur Morphologie und Histologie der Gewebe

Das menschliche Trommelfell ist eine kreisförmige Membran mit einem Durchmesser von ca. 8 mm bis 10 mm und einer Dicke von 100 μm . Seine Bindegewebsplatte (*Lamina propria*) trägt auf der Außenfläche ein mehrschichtiges, mäßig verhorntes Plattenepithel (*Stratum cutaneum*) und auf der Innenfläche das einschichtige, kubische Epithel der Paukenhöhlenschleimhaut (*Stratum mucosum*) [Leonhardt 1990]. Die *Lamina propria* (*Stratum fibrosum*) des Trommelfells besteht vornehmlich aus Faserzügen kollagener Fasern und teilweise aus elastischen Fasern. Im Bereich der *Pars tensa* bilden die Kollagenfaserzüge charakteristischerweise eine äußere radiäre sowie eine innere zirkuläre Schicht. Die Radiärfaserschicht ist in der Peripherie am kräftigsten und wird zur Trommelfellmitte hin dünner. Elastische Fasern finden sich vornehmlich in der Trommelfellperipherie und des Hammers und verlaufen dort ringförmig. Die *Pars flaccida* enthält unregelmäßige Netze elastischer Fasern, die *Lamina propria* ist hier durch lockeres Bindegewebe ersetzt [Fawcett 1994, Lim 1970]. Das Trommelfell ist reich mit Blutgefäßen und Nervenfasern versorgt [Bucher 1989, Williams/Warwick 1989].

Das Pferdetrommelfell hat eine ovale Form mit einer Fläche von 75 mm^2 [Nickel 1992]. Es zeigt einen dreischichtigen Aufbau aus einem *Stratum cutaneum*, einer *Lamina propria* und einem *Stratum mucosum*. Während das *Stratum cutaneum* und das *Stratum mucosum* als Fortsetzung der Gehörgangshaut (abgeflachtes Plattenepithel) und der Schleimhaut des Mittelohres (einschichtiges Plattenepithel) gelten, stellt sich die *Lamina propria* als eine bindegewebige, kollagenelastische Radiär- und Zirkulärfaserschicht dar [Liebich 1990, Smollich 1992]. Nach NICKEL (1992) besitzt das Pferdetrommelfell eine Schichtdicke von 200 μm .

Das Schweinetrommelfell hat ebenfalls eine ovale Form und den gleichen histologischen Aufbau wie das Pferdetrommelfell, der Flächeninhalt wird mit 45 mm^2 angegeben [Koch 1993]. Angaben zur Schichtdicke des Schweinetrommelfell finden sich in der Literatur nicht. Das Trommelfell des Meerschweinchen ist von nahezu runder Form mit einem Durchmesser von ca. 8 mm. Die *Pars tensa* hat den vom humanen Trommelfell bekannten dreischichtigen Aufbau, die *Pars flaccida* ist in ihrer Größe vernachlässigbar [Igarashi 1993]. In der *Lamina propria* findet sich eine Anordnung der Fasern in einer äußeren radiären und eine innere

zirkuläre Schicht. Die radiären Fasern sind deutlich dicker und dichter gepackt als die Fasern der zirkulären Schicht und bilden das Faserskelet des Meerschweinchentrommelfells [Uno 1990, Uno 2000]. Die Dicke des Meerschweinchentrommelfell wird mit 10 μm bis 38 μm angegeben [Funnel 1982, Igarashi 1993].

Die Dura mater des Schafes ist eine unelastische Membran aus straffem Bindegewebe. Sie besteht aus einer inneren meningealen und einer äußeren periostalen Schicht, die fest miteinander verschmolzen sind [Koch 1993]. Die Dura entsendet fibröse Fortsätze und Blutgefäße in den Schädel, die beim Ablösen der Dura zerreißen und der äußeren Oberfläche ein rauhes, fadiges Aussehen geben [Liebich 1990]. Die straffen Faserbündel der Dura mater bestehen aus parallel angeordneten kollagenen Fasern, zwischen den Faserbündeln liegen Fibroblasten, Fibrozyten und elastische Fasernetze [Mosiman 1990]. Die Faserbündel schließen sich bei paralleler Anordnung zu Faszikeln zusammen. Durch Kreuzung der Faszikel zueinander in unterschiedlichen Winkeln entsteht die für straffes Bindegewebe typische gitternetzartige Struktur der Dura [Smollich 1992]. Die subdurale Seite der meningealen Schicht ist spiegelnd glatt, die Fibroblasten bilden hier das subdurale Neurothel [Liebich 1990]. Angaben zur Schichtdicke der Schafdura finden sich in der Literatur nicht.

Als Schalenmembran wird die zwischen Kalkschale und Eiweiß liegende Schicht der Hühnerschale bezeichnet. Auf der einen Seite steht sie in fester Verbindung mit den Mamillen (Eiosphäriten) der Kalkschale und auf der anderen mit der äußeren, dünnflüssigen Eiweißschicht [Salomon 1993]. Die Schalenmembran setzt sich aus zwei fest haftenden Schichten zusammen, die sich nur am stumpfen Eipol trennen. Die Schalenmembran besteht aus einem ungeordneten Netzwerk von Fasern unterschiedlicher Dichte [Weidling 1972]. Die 1 μm dicken Fasern bestehen aus einem Keratinkern, der von einem 0,5 μm starken Mukopolysaccharidmantel umgeben ist. Die innere Schicht der Schalenmembran schließt sich unmittelbar an die äußere an. An der Grenze zum Eiweiß schließt eine Grenzlamelle die Schalenmembran ab. Sie besteht aus sehr feinen, dicht gedrängt liegenden Fasern, die mit den Fasern der inneren Schicht verschmelzen. Die Gesamtdicke der Hühnerschalenmembran wird mit 60 μm bis 125 μm angegeben [Salomon 1993, Weidling 1972].

2.1.3. Gewebeaufbereitung und Gewebepräparation

Von allen Spezies wurden native, innerhalb von 24 Stunden post mortem entnommene Präparate verwendet. Die Felsenbeine wurden bis zur Präparation der Trommelfelle bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gelagert. Zur Präparation der Trommelfelle wurden die Felsenbeine in einem speziellen Felsenbeinfixateur (Eigenfabrikation: Technische Werkstätten, UKBF) befestigt. In den Versuchsreihen wurden die Präparate in physiologischer Kochsalzlösung bei Raumtemperatur von $20 - 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufbewahrt, um ein schnelles Austrocknen und eine Volumenreduktion zu verhindern. Für die histologische Aufbereitung wurde mittels Feinpräparation das Trommelfell in toto aus dem Sulcus tympanicus ausgelöst und der Hammer im Hammer-Amboß- Gelenk abgesetzt.

An den **humanen Felsenbeinen** wurde der knorpeligen Anteile des äußeren Gehörganges sowie restliche Anteile des Kiefergelenkes mit dem Skalpell entfernt und die vordere Gehörgangswand bis zur Trommelfellebene mit einem Bohrer unter Saugspül drainage abgeschliffen. Knöcherne Anteile der hinteren Gehörgangswand wurden soweit abgetragen, dass das Trommelfell in seiner gesamten Größe einsehbar war.

An **Pferdefelsenbeinen** war die Bulla tympanica als rundliche Vorwölbung an der Schädelbasis leicht zu identifizieren. Der Knochen war hier sehr dünn und mit einem Skalpell einfach zu durchbrechen. Nach Bullaeröffnung lag das Trommelfell tangential zur Blickrichtung in einer Knochenlamellen-Rosette aufgespannt. Die Felsenbeine wurden mit einem auf den inneren Gehörgang aufgesetzten und parallel zur Felsenbeinoberkante geführten Meißel frakturiert und das Tympanon von intrakraniell weiter eröffnet. Das Amboß-Steigbügelgelenk wurde gelöst und das Epitympanon unter Entfernung der Cochlea und der Bogengänge freipräpariert. Das Trommelfell lag nun im Sulcus tympanicus frei aufgespannt.

Die Präparation der **Schweinetrommelfelle** erfolgte analog der Präparation der Pferdefelsenbeine.

Beim **Meerschwein** erfolgte aufgrund der dünnen Knochenstruktur die Eröffnung der Bulla tympanica und die Präparation des Trommelfells mit einer Schere.

Von nativen Schafschädeln wurde die **Dura** unter stumpfer Präparation vom Schädelknochen gelöst und an der Schädelbasis sowie den Schädelnähten mit dem Skalpell scharf abgesetzt.

Vom Hühnerei wurden Eidotter und Eiweiß entfernt und die **Schalenmembran** von der Kalkschale abgezogen. Die Membranen der Eipole wurden nicht verwendet, da sich hier die beiden Blätter der Schalenmembran voneinander trennen.

2.1.4. Bestimmung Wassergehalt und Schichtdicke

Zur Bestimmung des Wassergehaltes wurden von allen Präparaten mehrere Proben (bei Trommelfellen ohne Knochenanteile) nach der Präparation in hydratisiertem Zustand bei Raumtemperatur von 20- 22 °C auf einer Mikrometerwaage (Fa. Sartorius, Analytic AC 210 S) gemessen. Diese Proben wurden danach in einem Granulatluftentfeuchter getrocknet und das Trockengewicht mit der Mikrometerwaage bestimmt. Zur Bestimmung der Schichtdicke wurden von allen Geweben größere Proben präpariert und in hydratisiertem Zustand bei Raumtemperatur von 20- 22 °C zwischen zwei Mikroskopobjektträger gelegt (Abb. 1). Es wurde der Abstand zwischen den Innenseiten der Objektträger mit einem Stereomikroskop (Fa. Leica, Deutschland, Messgenauigkeit: 25 µm) bestimmt.

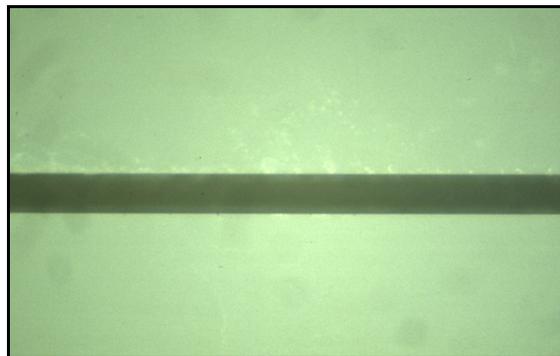


Abb. 1: Bestimmung der Schichtdicke: die Gewebeprobe (dunkel) liegt zwischen zwei Objektträgern (hell), an denen sie durch Adhäsion haftet

2.1.5. Lichtmikroskopische Untersuchungen

Die Präparate wurden nach Laserbehandlung zwei Tage in einem Gemisch aus Formalin (4 %) und Glutaraldehyd (1,25 %) vorbehandelt und dann in 70 % Ethanol fixiert. Die Entkalkung erfolgte mit EDTA-Lösung oder Ossa-Fixona, anschließend wurden die Präparate in Paraffin eingebettet. Die Mikrotomschnittdicke betrug 5 µm, die Schnittrichtung wurde koaxial zum Lasereinschuß gewählt. Anschließend erfolgte die Färbungen mit Hämatoxylin/ Eosin, Azan oder Trichrom-Masson/ Goldner.

2.1.6. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Die Gewebeproben wurden nach Laserbehandlung 48 Stunden in einer Lösung aus 3 % Glutaraldehyd und 0,1 molarem Cacodylatpuffer in einem Verhältnis von 2:1 vorfixiert. Es folgte eine Entwässerung der Präparate in aufsteigender Acetonreihe und die Trocknung mit Hexamethyldisilazan. Zuletzt wurden die Präparate 220 Sekunden mit Gold besputtert. Für die Untersuchungen wurde ein Rasterelektronenmikroskop der Firma Zeiss, Deutschland (Typ DSM 950 digital scanning microscope) eingesetzt.

2.2. Auswahl der Lasersysteme

Die Wirkung der Laserstrahlung an Geweben beruht auf der Wechselwirkung der Laserenergie mit den Molekülen und Molekülverbänden des Gewebes. Dabei kann nur der vom Gewebe absorbierte Anteil der Laserenergie in andere Energieformen (z.B. thermische Energie) umgewandelt werden. Diese Wechselwirkungen sind stark von der Wellenlänge des verwendeten Lasersystems abhängig. Das Trommelfell besteht wie die meisten biologischen Bindegewebe zu einem hohen Anteil (70- 80 %) aus Wasser. Im infraroten Wellenlängenbereich haben Wasser und biologische Bindegewebe ähnliche optische Eigenschaften [Berlin/Müller 1998]. Es zeigen sich die größten Absorptionsbanden bei 2900 nm, sowie ein etwas schwächeres Absorptionsmaximum bei 5900 nm und ein hohes Absorptionsplateau im Bereich von 8000- 11000 nm. Zur Laserparazentese sollten Lasersysteme gewählt werden, deren Wellenlänge im Bereich ausgeprägter Absorptionsbanden

des Wassers und biologischer Bindegewebe liegt. Eine ausreichende Absorption der Laserstrahlung im Gewebe und ein optimaler Abtragungsvorgang ist dann zu erwarten. Diese Voraussetzungen werden vom Erbium:YAG-Laser (2940 nm) und dem CO₂-Laser (10600 nm) erfüllt.

2.2.1. Der Erbium:YAG-Laser (2940 nm)

Der Erbium:YAG-Laser ist ein gepulster, nahezu athermisch arbeitender Laser mit einer Wellenlänge von 2940 nm. Die Gewebeinteraktion dieses Lasers wird durch die Pulsenergie Q (J), der Energiedichte H (J/cm²), der Pulshalbwertsbreite t_{HWB} (μ s) und der Pulswiederholrate (Repetitionsrate) f_p (Hz) beeinflusst. Zur Anwendung kam der Erbium:YAG-Laser TwinEr[®], der über einen mikroskopinternen Mikromanipulator in das Operationsmikroskop OPMI[®] 111E integriert ist (Fa. Zeiss, Oberkochen, Deutschland). Es können Energien zwischen 10 mJ und 100 mJ eingestellt werden. Die Pulshalbwertsbreite variiert entsprechend der eingestellten Energie zwischen 50 μ s und 500 μ s. Das Strahlprofil des TwinEr[®] ist mehrmodig. Der Laserstrahl ist durch einen Drehknopf (0-9) am Mikromanipulator defokussierbar. Im Fokus [Drehknopf (0)] beträgt der effektive Strahldurchmesser 400 μ m, in der maximal defokussierten Einstellung [Drehknopf (9)] ergibt sich ein effektiver Strahldurchmesser von 1660 μ m. Diese Angaben gelten für eine Linsenbrennweite des Hauptobjektivs $f = 300$ mm [Herstellerangaben: Fa. Zeiss, Oberkochen, Deutschland].

Als zweites Lasersystem kam der Erbium:YAG-Laser der Fa. Baasel (Starnberg, Deutschland) zur Anwendung. Die Pulshalbwertsbreite dieses Systems beträgt 250 ms, die Pulsfrequenz beträgt maximal 3 Hz und es sind maximale Energien von 200 mJ möglich. Als Applikationssystem wurde mit diesem Erbium:YAG-Laser ein Laserotoskop gekoppelt (siehe Kapitel 2.3.2.)

2.2.2. Der CO₂-Laser (10600 nm)

Der CO₂-Laser ist ein kontinuierlich strahlender, thermisch wirkender Laser mit einer Wellenlänge von 10600 nm. Die Effekte im Gewebe werden durch die applizierte Leistung P (W), den effektiven Strahldurchmessers d (mm), die Leistungsdichte E (W/cm²) und die Pulsdauer t (s) bestimmt. Das in dieser Arbeit verwendete CO₂-Lasersystem (Typ: 1020c/1025c, Firma ESC-Sharplan, Tel Aviv, Israel) erzeugt ein Strahlprofil im TEM₀₀-Mode (Gaussche Verteilung der Photonen mit einem Maximum in der Strahlmitte). Es wurde im getakteten Dauerstrichbetrieb (continuous wave, cw) betrieben. Die einstellbare Leistung umfaßt einen Bereich bis 20 W. Die Pulsdauer ist in Zeiten von 50 ms bis 500 ms wählbar. Über den Spiegelgelenkarm des Lasers ist die Kopplung verschiedener Applikationssysteme realisierbar. Es wurden folgende Applikationssysteme untersucht: Mikromanipulator Mikroslad[®] 719 und Acuspot[®] 710 mit Scanner SilkTouch[®] 768, Laserotoskop 1 (UKBF) mit Scanner SilkTouch[®] 768, Laserotoskop 2 (ESC-Sharplan) mit Scanner SurgiTouch[®], Silberhalid-Faser mit Handotoskop (siehe Kapitel 2.3.2.).

2.3. Allgemeiner Laserversuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Applikation der Laserstrahlung erfolgte in allen Versuchsreihen orthogonal zur Präparatebene. Die Präparate waren im Felsenbeinfixateur befestigt oder wurden mit Stecknadeln auf Korkplatten fixiert. Bei beiden Lasersystemen ermöglichte ein HeNe-Pilotstrahl die Positionierung der infraroten Laserstrahlung auf dem zu bearbeitenden Gewebe. Die erreichten Perforationsdurchmesser wurden unter einem Stereomikroskop (Fa. Leica, Deutschland) mit einem Messokular (Messgenauigkeit: 25 µm) ausgemessen. Bei ovaler Perforation wurde aus dem Längs- und Querdurchmesser der Mittelwert gebildet. In jeder Energieeinstellung wurden 5 Messungen durchgeführt. Für die Berechnung von Energie- und Leistungsdichten wurde der Spotdurchmesser des Laserstrahls zugrunde gelegt. In den Grafiken wurden der Mittelwert und die Standardabweichung vom Mittelwert angegeben. Nach Laserapplikation wurden die Präparate histologisch und elektronenmikroskopisch untersucht (siehe Kapitel 2.1.5. und 2.1.6.).

2.3.1. Laserversuche zur Auswahl des Trommelfellmodells

In den Versuchsreihen zur Trommelfellmodellentwicklung wurde zunächst die Beziehung zwischen applizierter Energie und Leistungsdichte und erreichbarem Perforationsdurchmesser mit dem Erbium:YAG-Laser am Referenzgewebe natives, humanes Trommelfell bestimmt und danach für alle Modellgewebe erarbeitet. Modellgewebe, die bezüglich dieser Beziehung dem Referenzgewebe ähnlich waren, wurden weiter mit dem CO₂-Laser untersucht, nicht geeignete Modellgewebe schieden aus. Das Modellgewebe, das dem Referenzgewebe in o.g. Beziehung am nächsten lag, wurde als Trommelfellmodell benannt und in allen Versuchen zur Testung verschiedener Laserapplikations- und Laserscannersysteme eingesetzt.

Zur Bestimmung dieser Abhängigkeit wurde als Erbium:YAG-Laser das TwinEr[®]-Lasersystem der Fa. Zeiss, Oberkochen, Deutschland eingesetzt. Die Applikation der Laserstrahlung erfolgte über den Operationsmikroskop-integrierten Mikromanipulator. Die Gewebeproben wurden mit ansteigenden Energiedichten (8 J/cm² bis 80 J/cm²) bestrahlt. Durch ein betriebsinternes Leistungsmessgerät wurde die applizierte Gesamtenergie erfasst, die sich aus dem Energieinhalt der einzelnen Laserpulse multipliziert mit der Zahl der Laserpulse ergibt. Kumulierte Energie und Pulszahl wurden auf dem Laserdisplay angezeigt.

Am CO₂-Laser 1020c (Firma ESC-Sharplan, Tel Aviv, Israel) erfolgte die Bestimmung mit dem Mikromanipulator Mikroslad[®] 719 (gekoppelt an Operationsmikroskop OPMI 1, Fa. Zeiss, Deutschland). Der Laserstrahl wurde durch eine Linse (BaF₂-Linse, Linsenbrennweite: 250 mm) fokussiert. Die Gewebeproben wurden mit ansteigenden Leistungsdichten (280 W/cm² bis 3900 W/cm²) bei konstanter Pulsdauer (50 ms) bestrahlt. Vor und nach jeder Versuchsreihe wurde die reale Ausgangsleistung des Laser mit einem Leistungsmessgerät gemessen (Fa. Coherent, Santa Clara, CA, USA).

2.3.2. Versuche zur Untersuchung verschiedener Laserapplikations- und Scannersysteme am Trommelfellmodell

Als Applikationssystem für den Erbium:YAG-Laser wurde das Erbium:YAG-Laserotoskop (Baasel Lasertechnik, Starnberg, Deutschland) eingesetzt (Abb. 2). Es ist eine Modifikation eines Laserhandstücks für die Glaukomtherapie, auf welches ein Ohrtrichteraufsatz, ein HeNe-Pilotlaser und eine Lichtquelle montiert wurden. Das Zielgewebe wird dabei durch eine 2-fach vergrößernde Linse direkt betrachtet. Der fokussierte Strahldurchmesser beträgt 500 μm . Auf das Modellgewebe wurden Energien zwischen 15 mJ (Energiedichte 8 J/cm^2) und 90 mJ (Energiedichte 41 J/cm^2) appliziert.



Abb. 2.: Erbium:YAG-Laserotoskop mit Linsensystem und Ohrtrichter, Umlenkspiegel und HeNe-Pilotstrahl

Am CO_2 -Laser wurde in der ersten Versuchsreihe der Mikromanipulator Acuspot[®] 710 (Fa. ESC-Sharplan, Tel Aviv, Israel) in Verbindung mit dem Scannersystem SilkTouch[®] 768 (Fa. ESC-Sharplan, Tel Aviv, Israel) getestet. Der Mikromanipulator war an das Operationsmikroskop OPMI 1 (Fa. Zeiss, Deutschland) gekoppelt, der Scanner wurde zwischen Spiegelgelenkarm des Lasers (1020c, ESC-Sharplan, Tel Aviv, Israel) und Mikromanipulator geschaltet. Der Spotdurchmesser des Acuspot[®] 710 beträgt bei fokussiertem Laserstrahl und einer Linsenbrennweite von $f = 275 \text{ mm}$ ca. 180 μm . Der speziell für die Laserparazentese modifizierte Scanner SilkTouch[®] 768 erzeugt eine spiralähnliche Rotationsfigur. In Kombination mit dem Mikromanipulator Acuspot[®] 710 sind

verschieden große Scannflächen wählbar (Tab. 1). Die Laserpulsdauer ist dabei von der Umlaufzeit der Spiegelsysteme des Scanners (50 ms, 100 ms, 150 ms) abhängig. Es wurden in den Versuchen auf das Trommelfellmodellgewebe Leistungsdichten zwischen 3100 W/cm^2 und 35000 W/cm^2 appliziert.

In der zweiten Versuchsreihe wurde das CO₂-Laserotoskop 1 (UKBF) mit dem SilkTouch[®] 768-Scanner gekoppelt (Abb. 3). Das CO₂-Laserotoskop 1 (UKBF) ist die Modifizierung eines CO₂-Laserbronchoskop (Firma ESC-Sharplan, Tel Aviv, Israel) und wurde von JOVANOVIC et al. im Rahmen der Forschungsarbeiten zur Laserparazentese entwickelt [Jovanovic 1995]. Durch das Beobachtungsookular ist eine direkte, koaxiale Sicht auf das Operationsfeld möglich. Am Oskoptubus ist ein herkömmlicher Ohrtrichter, der Anschluß einer Rauchabsaugung und die Faser einer externen Kaltlichtquelle angebracht. Die Fokusebene der Oskoptlinse liegt etwa 1,2 cm vor der Ebene der Ohrtrichterspitze, der fokussierte Spotdurchmesser beträgt ca. $700 \mu\text{m}$, der maximal defokussierte Spotdurchmesser beträgt ca. $1800 \mu\text{m}$. Auf das Modellgewebe wurden Leistungsdichten von 175 W/cm^2 bis 2800 W/cm^2 bei einer Pulsdauer von 50 ms appliziert. In Systemkombination mit dem SilkTouch[®] 768-Scanner sind variable Scannflächen möglich (Tab. 1).

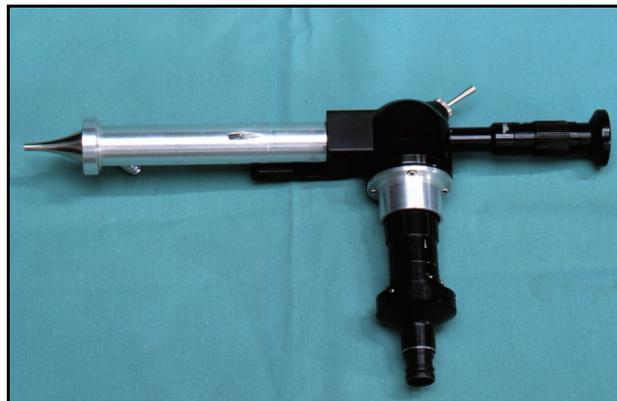


Abb. 3: CO₂-Laserotoskop 1 (UKBF) nach Jovanovic et al., links der Oskoptubus (hell) mit Ohrtrichter, Rauchabsaugung und Öffnung für die Kaltlichtquelle, rechts der Mikromanipulator (schwarz) mit Endoskopkoppler und Beobachtungsookular

In der dritten Versuchsreihe wurde das CO₂-Laserotoskop 2 (Fa. ESC- Sharplan, Tel Aviv, Israel) in Verbindung mit dem Scannersystem SurgiTouch[®] (Fa. ESC- Sharplan, Tel Aviv, Israel) verwendet (Abb. 4.). Dieses Laserotoskop ist der Prototyp eines mittlerweile kommerziell verfügbaren Systems. Es wurde über den Spiegelgelenkarm an den Laser angekoppelt. Die Betrachtung des Trommelfells erfolgte mit Hilfe einer integrierten Videokamera über einen Monitor. Sobald das Videobild scharf erschien, war der Laserstrahl fokussiert. Angaben zum Spotdurchmesser und zum Durchmesser der einstellbaren Scannflächen finden sich in Tabelle (1). In der Versuchsreihe wurden Leistungsdichten zwischen 2200 W/cm² und 8000 W/cm² auf das Modellgewebe appliziert. Die Pulsdauer betrug 200 ms. Vor und nach jeder Versuchsreihe wurde die reale Ausgangsleistung des Laser mit einem Leistungsmessgerät gemessen (Fa. Coherent, Santa Clara, CA, USA).

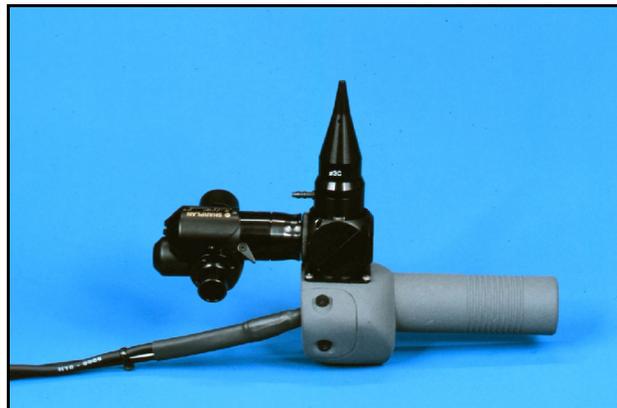


Abb. 4: CO₂-Laserotoskop der Fa. ESC-Sharplan, im Handgriff (grau) ist eine Chip-Kamera eingebaut, oben im Bild der Ohrtrichter, links die opto-mechanische Einheit des SurgiTouch[®]-Scanner (schwarz), an welcher der Spiegelgelenkarm des CO₂-Lasers befestigt wird

In der vierten Versuchsreihe wurde die von DeROWE und KATZIR 1994 erstmalig vorgestellte Laserfaser mit Handotoskop verwendet. Sie besteht aus einem auf Faserlänge (max. 3 m) ausgezogenen Silberhalid-Kristall mit einem Durchmesser von 900 µm (Abb. 5a). Die im Experiment verwendete Faser von 1,5 m Länge überträgt im kontinuierlichen Strahlbetrieb Leistungen bis zu 20 W. Bei hohen Energietransmissionen ist eine Gaskühlung (Stickstoffdioxid) der Fasereingangs- und Ausgangsenden notwendig [Sa'ar 1987].

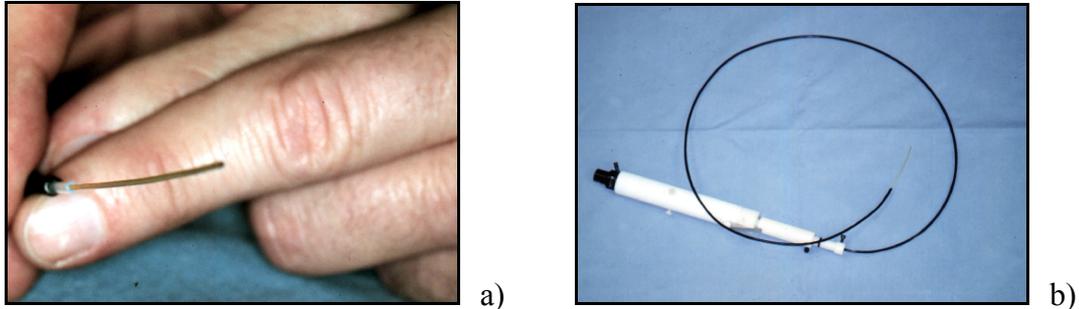


Abb. 5: a) die Faserspitze der Silberhalidfaser mit einem Durchmesser von $900\ \mu\text{m}$, sie ist bis zu einem Biegungsradius von $2\ \text{cm}$ bruchstabil und hat für die CO_2 -Laserwellenlänge ($10600\ \text{nm}$) eine Transmission von 72% , b) Faser-Laser-Konnektor mit Silberhalidfaser, am Konnektor befinden sich die Anschlüsse zur Gaskühlung für die Faserenden, das Handotoskop ist nicht mit abgebildet

Die Silberhalid-Faser war über einen Faser-Laser-Konnektor (Abb.5b) an den Direktausgang des CO_2 -Laser 1025 (Fa. ESC- Sharplan, Israel) angeschlossen. Das Arbeitsende der Faser war an einem Handotoskop (Wellch-Allyn, Skaneateles Falls, NY) befestigt. Das Handotoskop wurde während der Versuche mit der freien Hand im Abstand von $1\ \text{cm}$ zum Gewebe gehalten, der Spotdurchmesser auf dem Gewebe betrug bei diesem Abstand ca. $1400\ \mu\text{m}$. Ein Pilotstrahl war bei dieser Applikationsart nicht notwendig. Auf das Modellgewebe wurden Leistungsdichten zwischen $150\ \text{W}/\text{cm}^2$ und $650\ \text{W}/\text{cm}^2$ bei $50\ \text{ms}$ und $100\ \text{ms}$ Pulsdauer appliziert. Die Leistungsmessung erfolgte vor und nach jeder Versuchsreihe mit einem Leistungsmessgerät Labmaster[®] LM 100 (Fa. Coherent, Santa Clara, CA, USA).

<u><i>Erbium:YAG-Laser</i></u>	<u><i>CO₂-Laser</i></u>	
<i>Applikationssysteme</i>	<i>Applikationssystem</i>	<i>Scannersystem</i>
TwinEr® OPMI 11	Mikroslad® 719	
400 µm im Fokus	700 µm im Fokus	
1600 µm im Defokus		
Er:YAG-Laserotoskop	Acuspot® 710	SilkTouch® 768 im Modus I
500 µm im Fokus	180 µm im Fokus	600 µm (small); 700 µm (medium); 800 µm (large)
1750 µm im Defokus		
		SilkTouch® 768 im Modus II
		1100 µm (small); 1200 µm (medium); 1300 µm (large)
		SilkTouch® 768 im Modus III
		1600 µm (small); 1700 µm (medium); 1800 µm (large)
	Laserotoskop 1	SilkTouch® 768 im Modus II
	700 µm im Fokus	2150 µm (medium); 2350 µm (large)
	1800 µm im Defokus	
	Laserotoskop 2	SurgiTouch® im Modus II
	400 µm im Fokus	1750 µm
		SurgiTouch® im Modus III
		2100 µm
	Silberhalid-Faser	
	1400 µm im Abstand 1mm	

Tab.1: Spotdurchmesser und Durchmesser der Bestrahlungsflächen für Erbium:YAG-Laser und CO₂-Laser bei Verwendung verschiedener Applikationssysteme und Scannersysteme