

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Entwicklung des Trommelfellmodells zur Laserparazentese

##### 3.1.1. Bestimmungen von Wassergehalt und Schichtdicke

<u>Gewebe</u>	<u>Wassergehalt</u>	<u>Schichtdicke</u>
humanes Trommelfell	79 %, ± 1,2	98 µm, ± 4,8
Pferdetrommelfell	78 %, ± 1,0	104 µm, ± 4,6
Schweinetrommelfell	78 %, ± 1,2	48 µm, ± 4,8
Meerschweinchentrommelfell	77 %, ± 0,8	31 µm, ± 2,8
Schafdura	78 %, ± 0,9	135 µm, ± 7,8
Hühnerschalenmembran	78 %, ± 1,0	71 µm, ± 4,4

Tab. 2: Durchschnittlicher Wassergehalt und Schichtdicke für das Referenzgewebe humanes Trommelfell und alle Modellgewebe (Mittelwert ± s.e.m.)

Alle Modellgewebe haben wie das Referenzgewebe Humanes Trommelfell einen durchschnittlichen Wassergehalt von ca. 78 %, eine vergleichbare Ankopplung der infraroten Laserstrahlung ist damit für beide Lasertypen zu erwarten. Alle Modellgewebe erfüllen das erste Kriterium zur Auswahl eines Trommelfellmodells. Eine dem humanen Trommelfell vergleichbare Schichtdicke weist nur das Pferdetrommelfell und mit Einschränkungen die Modellgewebe Schafdura und Hühnerschalenmembran auf, die übrigen Modellgewebe erfüllen das zweite Kriterium zur Modellbestimmung nicht.

### 3.1.2. Trommelfellmodellentwicklung am Erbium:YAG-Laser und am CO<sub>2</sub>-Laser

Zur Modellbestimmung am **Erbium:YAG-Laser TwinEr<sup>®</sup>OPMI 11** wurde die Laser-Gewebe-Interaktion am Referenzgewebe und allen Modellgeweben untersucht. Auf die Gewebe wurden ansteigende Energien von 10 mJ bis maximal 100 mJ bei fokussiertem Laserstrahl (Spotdurchmesser: ca. 400 µm) appliziert.

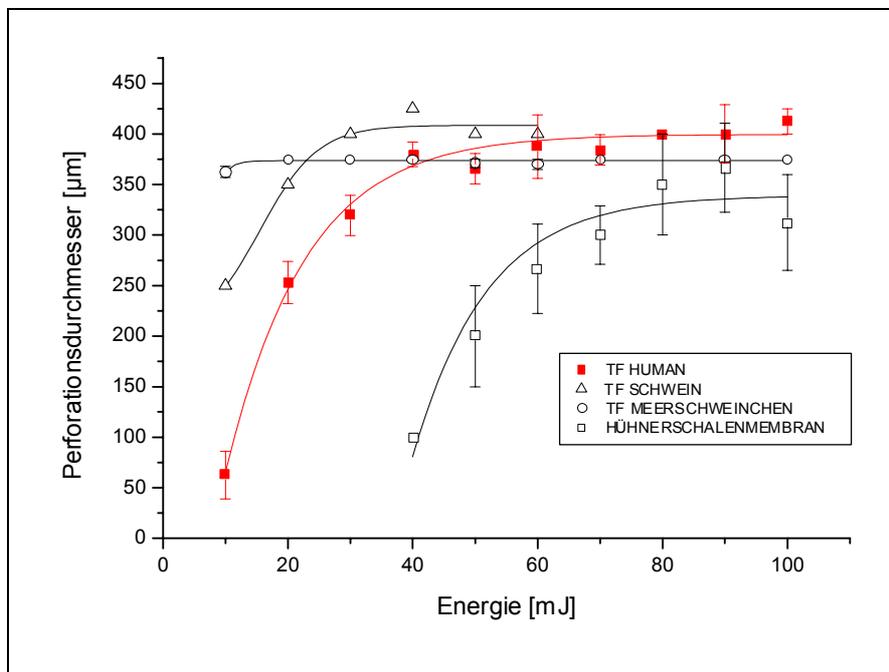


Abb. 6: Abhängigkeit der Perforationsdurchmesser von der applizierten Laserenergie für das humane Trommelfell und die Modellgewebe Pferdetrommelfell, Schweinetrommelfell, Meerschweinchentrommelfell und Hühnerschalenmembran am TwinEr<sup>®</sup>OPMI 11 (Mittelwert ± s.e.m.)

Die Abhängigkeit zwischen applizierter Energie und erreichbarem Perforationsdurchmesser kennzeichnet sich am humanen Trommelfell: Ab einer Schwellenenergie von ca. 10 mJ (Energiedichte: 8 J/cm<sup>2</sup>) wird das Trommelfell perforiert (Perforationsdurchmesser: ca. 125 µm). Der Sättigungsbereich wird ab einer Energie von ca. 50 mJ (Energiedichte: 40 J/cm<sup>2</sup>) mit Perforationsdurchmessern von ca. 400 µm erreicht. Höhere Energien führen zu keiner weiteren Zunahme des Perforationsdurchmessers.

Die Applikation von Erbium:YAG-Laserstrahlung auf das Schweinetrommelfell führt mit einer Energie von ca. 10 mJ (Energiedichte: 8 J/cm<sup>2</sup>) zum Erreichen von Perforationsdurchmessern von ca. 250 µm. Der Sättigungsbereich wird mit maximalen Perforationsdurchmessern von ca. 400 µm ab einer Energie von ca. 30 mJ (Energiedichte: 24 J/cm<sup>2</sup>) erreicht.

Beim Meerschweinchentrommelfell wird mit der am TwinEr<sup>®</sup>OPMI 11 kleinsten einstellbaren Energie von ca. 10 mJ (Energiedichte: 8 J/cm<sup>2</sup>) die dem Strahldurchmesser von ca. 400 µm entsprechende maximale Perforationsgröße erreicht.

Für die Hühnerschalenmembran beträgt die Schwellenenergie ca. 40 mJ (Energiedichte: 32 J/cm<sup>2</sup>). Der Sättigungsbereich beginnt ab einer Energie von ca. 70 mJ (Energiedichte: 56 J/cm<sup>2</sup>) mit Perforationsdurchmessern von ca. 300 µm. Dem Spotdurchmesser entsprechenden Perforationsdurchmesser werden nicht erreicht.

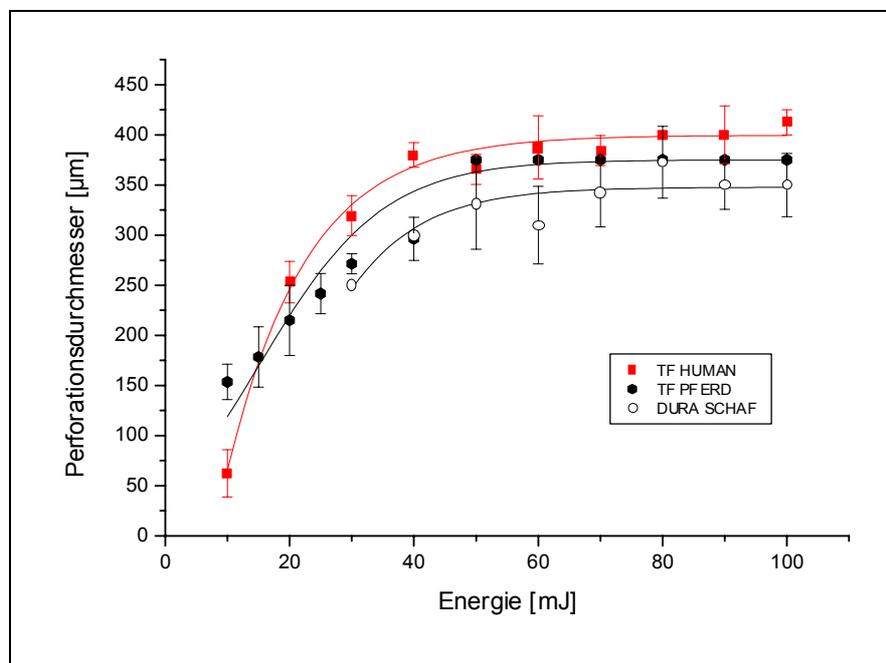


Abb. 7: Abhängigkeit der Perforationsdurchmesser von der applizierten Laserenergie für das Referenzgewebe Humanes Trommelfell und die Modellgewebe Pferdetrommelfell und Schafdura am TwinEr<sup>®</sup>OPMI 11 (Mittelwert ± s.e.m.)

Für das Pferdetrommelfell beträgt die Schwellenenergie ca. 10 mJ (Energiedichte: 8 J/cm<sup>2</sup>). Der Bereich der maximalen Perforationsdurchmesser wird ab einer Energie von ca. 50 mJ (Energiedichte: 40 J/cm<sup>2</sup>) erreicht. Die Perforationen haben einen Durchmesser von ca. 375 µm. Im Anstiegsbereich besteht eine starke Streubreite zwischen minimalen und maximalen Perforationsdurchmessern, diese nimmt im Sättigungsbereich deutlich ab.

An der Schafdura werden mit einer Schwellenenergie von ca. 30 mJ (Energiedichte: 24 J/cm<sup>2</sup>) Perforationen von ca. 250 µm Durchmesser erzeugt. Der Sättigungsbereich beginnt bei einer Energie von ca. 50 mJ (Energiedichte: 40 J/cm<sup>2</sup>) mit Perforationsdurchmessern von ca. 400 µm. Bei der Schafdura besteht über den gesamten Sättigungsbereich eine weite Streubreite zwischen minimalen und maximalen Perforationsdurchmessern.

Zur Modellbestimmung am **CO<sub>2</sub>-Laser** (Sharplan 1020c mit Mikromanipulator Mikroskad<sup>®</sup> 719) wurde die Beziehung zwischen erreichbarem Perforationsdurchmesser und notwendiger Laserleistungsdichte am Referenzgewebe humanes Trommelfell untersucht und mit den Modellgeweben Pferdetrommelfell und Schafdura verglichen. Auf die Gewebe wurden Leistungen zwischen 1 W bis maximal 14 W bei fokussiertem Laserstrahl (Spotdurchmesser: ca. 700 µm) appliziert. Es wurde eine konstante Pulsdauer von 50 ms verwendet.

Für das humane Trommelfell beträgt die Schwellenleistung ca. 2,5 W (Leistungsdichte: 690 W/cm<sup>2</sup>). Mit ihr werden Perforationen von ca. 250 µm Durchmesser erzeugt. Der Sättigungsbereich beginnt bei einer Leistung von ca. 6,5 W (Leistungsdichte: 1780 W/cm<sup>2</sup>) mit Perforationsdurchmessern von ca. 750 µm. Die minimalen und maximalen Perforationsdurchmesser zeigen im gesamten Kurvenverlauf nur geringe Abweichungen vom mittleren Perforationsdurchmesser.

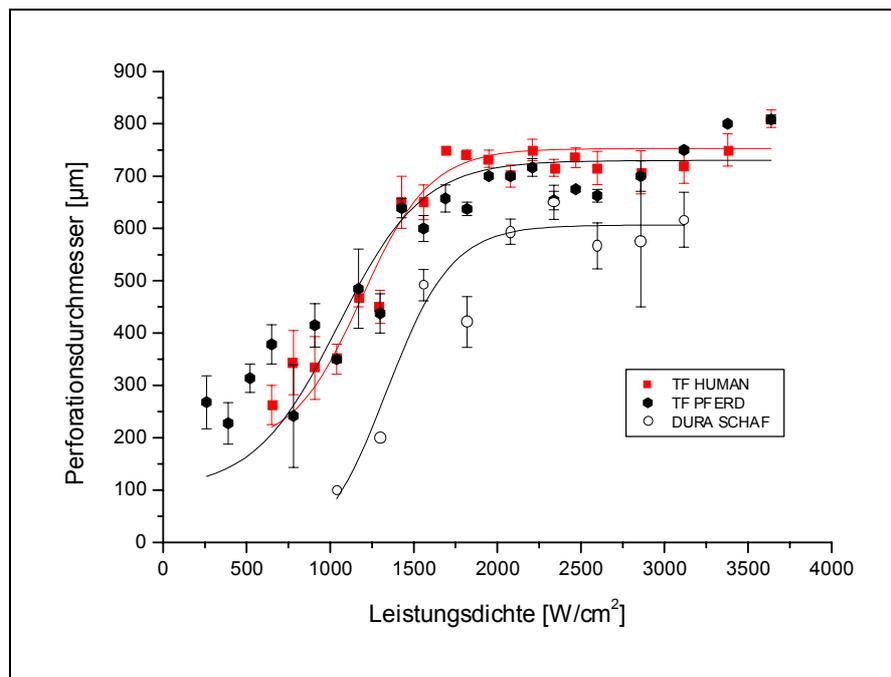


Abb. 8: Abhängigkeit der Perforationsdurchmesser von der Leistungsdichte für das Referenzgewebe Humanes Trommelfell und die Modellgewebe Pferdetrommelfell und Schafdura am CO<sub>2</sub>-Laser (Mikrosrad<sup>®</sup> 719, Mittelwert ± s.e.m.)

Beim Pferdetrommelfell beträgt die Schwellenleistung ca. 1 W (Leistungsdichte: 280 W/cm<sup>2</sup>). Mit ihr werden Perforationen von ca. 280 µm Durchmesser erzeugt. Eine Erhöhung der Leistung auf ca. 7,5 W (Leistungsdichte: 2100W/cm<sup>2</sup>) führt zu einer Vergrößerung der Perforationsdurchmesser auf ca. 700 µm. Ab dieser Leistung beginnt der Sättigungsbereich. Im Leistungsbereich von 1 W - 7,5 W besteht eine starke Streubreite zwischen minimalen und maximalen Perforationsdurchmessern, die ab dem Sättigungsbereich deutlich abnimmt.

Bei der Schafdura führt eine Schwellenleistung von ca. 4 W (Leistungsdichte: 1040 W/cm<sup>2</sup>) zu Perforationen von ca. 100 µm Durchmesser. Der Sättigungsbereich ist mit Leistungen von ca. 8 W (Leistungsdichte: 2250 W/cm<sup>2</sup>, Perforationsdurchmessern: ca. 600 µm) erreicht. Bei der Schafdura besteht im Anstiegsbereich und über den gesamten Sättigungsbereich eine starke Streubreite zwischen minimalen und maximalen Perforationsdurchmessern.

Zusammenfassend wird festgestellt: Für das Modellgewebe Pferdetrommelfell ist die Abhängigkeit Perforationsdurchmesser von Laserenergie und Leistungsdichte als Parameter für die Interaktion von Laserstrahlung und Gewebe dem Referenzgewebe humanes Trommelfell am ähnlichsten. Beide Gewebe besitzen eine Gewebestärke von ca. 100 µm und haben einen vergleichbaren histologischen Aufbau. Das Pferdetrommelfell erfüllt als einziges Modellgewebe alle Kriterien zur Trommelfellmodellbestimmung und ist daher von allen untersuchten Geweben als Modell am geeignetsten. Es konnte in allen weiteren Versuchsreihen zur Testung der verschiedenen Laserapplikations- und Scannersystem als Trommelfellmodell eingesetzt werden.

## 3.2. Testung von Laserapplikations- und Scannersystemen am Trommelfellmodell

### 3.2.1. Laserapplikationssysteme für den Erbium:YAG-Laser

Die Ergebnisse für die Energieparameter zur Laserparazetese mit dem Erbium:YAG-Laser TwinEr<sup>®</sup> OPMI 11 mit mikroskopgekoppeltem Mikromanipulator sind im Kapitel 3.1.2. beschrieben.

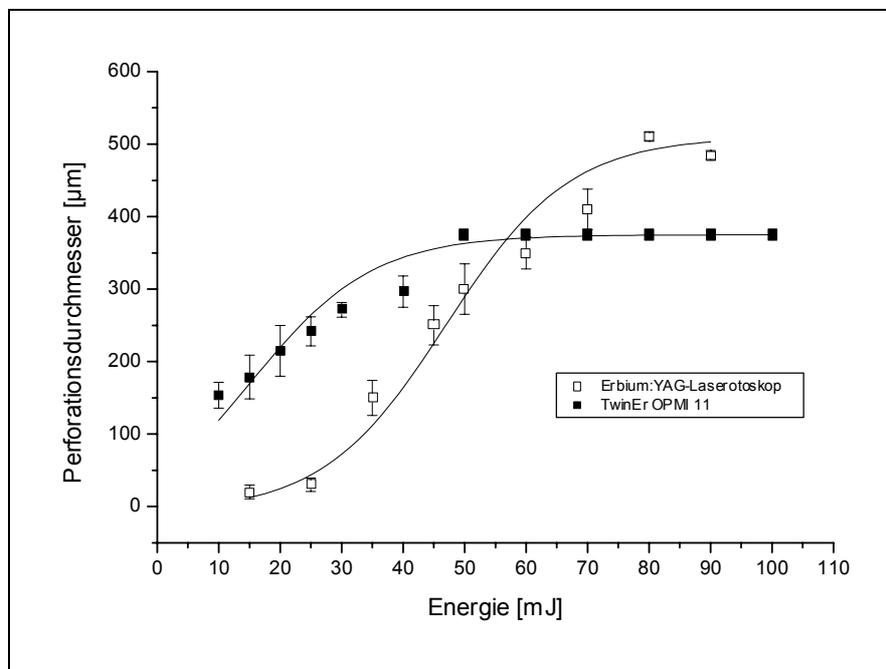


Abb. 9: Abhängigkeit der Perforationsdurchmesser von der Energie (TwinEr<sup>®</sup> OPMI 11 und Erbium:YAG-Laserotroskop, Pferdetrummelfell, Mittelwert  $\pm$  s.e.m.)

Bei Verwendung des Erbium:YAG-Laserotroskops (Basel Lasertechnik) am Pferdetrummelfell liegt die Schwellenenergie bei ca. 20 mJ (Energiedichte: 11 J/cm<sup>2</sup>), der Sättigungsbereich wird mit Perforationsdurchmessern von ca. 500 µm bei einer Energie von ca. 80 mJ (Energiedichte: 41 J/cm<sup>2</sup>) erreicht.

### 3.2.2. Laserapplikations- und Scannersystemen für den CO<sub>2</sub>-Laser

Die Ergebnisse für den Mikromanipulator Mikroslad<sup>®</sup> 719 sind im Kapitel 3.1.2. dargestellt.

#### 3.2.2.1. Acuspot<sup>®</sup> 710 und Scannersystem SilkTouch<sup>®</sup> 768

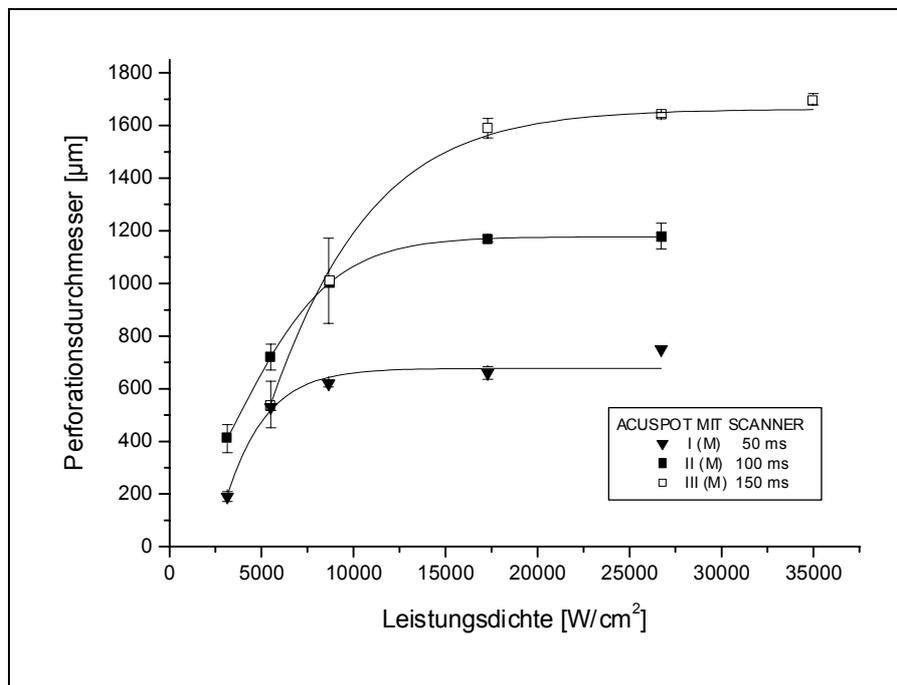


Abb. 10: Abhängigkeit des Perforationsdurchmessers von der Leistungsdichte (Acuspot<sup>®</sup> 710 mit Scannersystem SilkTouch<sup>®</sup> 768, Scannermodi I-III (Medium), Pulsdauer: 50-150 ms, Pferdetrommelfell, Mittelwert ± s.e.m.)

Die Schwellenleistung beträgt im Scannermodus I und II ca. 1 W (Leistungsdichte: 3150 W/cm<sup>2</sup>), im Scannermodus III beträgt sie ca. 1,4 W (Leistungsdichte: 5500 W/cm<sup>2</sup>). Der Sättigungsbereich wird erreicht: Scannermodus I bei einer Leistung von ca. 2,2 W (Leistungsdichte: 8600 W/cm<sup>2</sup>, Perforationsdurchmesser: ca. 700 µm), Scannermodus II bei einer Leistung von ca. 4,4 W (Leistungsdichte: 17300 W/cm<sup>2</sup>, Perforationsdurchmesser: ca. 1150 µm), Scannermodus III bei einer Leistung von ca. 6,8 W (Leistungsdichte: 26800 W/cm<sup>2</sup>, Perforationsdurchmesser: ca. 1650 µm).

### 3.2.2.2. Laserotoskop 1 (UKBF) und Scannersystem SilkTouch® 768

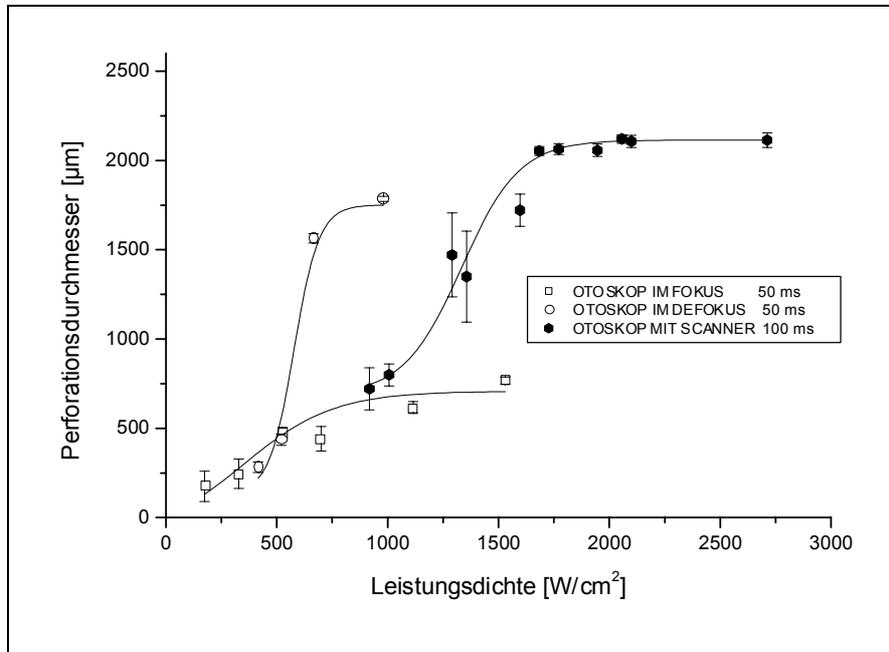


Abb. 11: Abhängigkeit des Perforationsdurchmessers von der Leistungsdichte (Laserotoskop 1 (UKBF) im Strahlfokus und Strahldefokus sowie mit Scannersystem SilkTouch® 768, Scannermodus II (Medium), Pulsdauer: 50-100 ms, Pferdettrommelfell, Mittelwert  $\pm$  s.e.m.)

Für das Laserotoskop 1 (UKBF) liegt bei fokussiertem Laserstrahl die Schwellenleistung bei ca. 1 W (Leistungsdichte: 180 W/cm<sup>2</sup>). Ab Leistungen von ca. 5,1 W (Leistungsdichte: 1100 W/cm<sup>2</sup>) beginnt der Sättigungsbereich mit Perforationsdurchmessern von ca. 750 µm.

In Defokusstellung mit einem Spotdurchmesser des Laserotokopes von ca. 1800 µm liegt die Schwellenleistung bei 10 W (Leistungsdichte: 415 W/cm<sup>2</sup>). Bei einer Leistung von ca. 25 W (Leistungsdichte: 982 W/cm<sup>2</sup>) sind Perforationen mit einem Durchmesser von ca. 1800 µm möglich.

Bei fokussiertem Laserstrahl und in Verbindung mit dem SilkTouch® 768-Scanner im Modus II (Medium) ermöglicht eine Schwellenleistung von ca. 4,2 W (Leistungsdichte: 920 W/cm<sup>2</sup>) Perforationen von ca. 800 µm Durchmesser, der Sättigungsbereich beginnt ab einer Leistung von ca. 8 W (Leistungsdichte: 1800 W/cm<sup>2</sup>) mit Perforationsdurchmessern von ca. 2150 µm.

### 3.2.2.3. Laserotoskop 2 (ESC-Sharplan) und SurgiTouch®

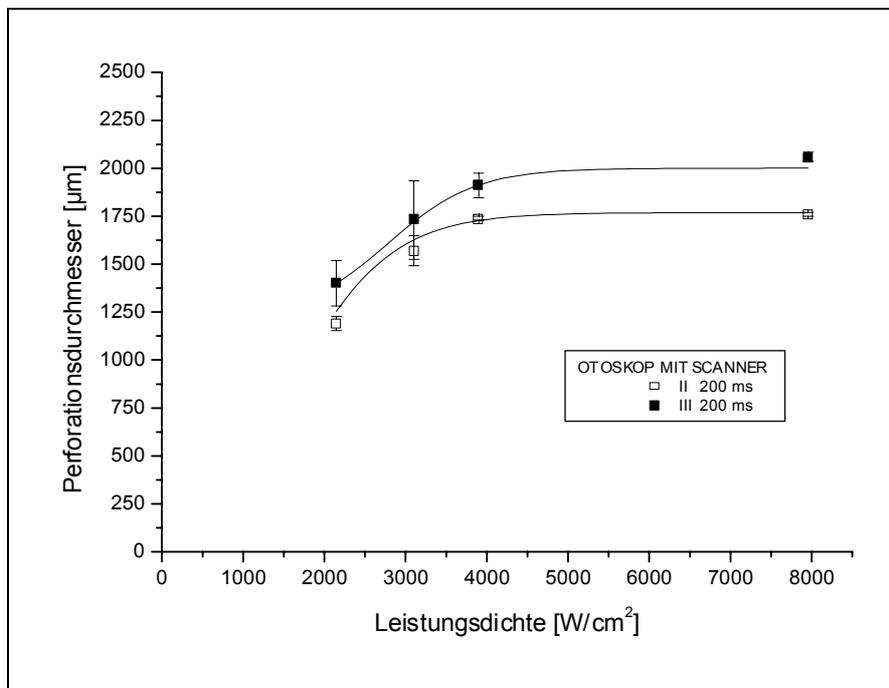


Abb. 12: Abhängigkeit der Perforationsdurchmesser von der Leistungsdichte (Laserotoskop 2 (ESC-Sharplan) mit Scannersystem SurgiTouch®, Scannermodi II-III, Pulsdauer: 200 ms, Pferdetrommelfell, Mittelwert  $\pm$  s.e.m.)

Für das Laserotoskop 2 (ESC-Sharplan) mit Scannersystem SurgiTouch® liegt die Schwellenleistung in den Modi II und III bei ca. 3 W (Leistungsdichte:  $2150 W/cm^2$ ) mit Perforationsdurchmessern von ca.  $1200 \mu m$  bzw.  $1400 \mu m$ . Ab einer Leistung von ca. 5 W (Leistungsdichte:  $3900 W/cm^2$ ) beginnt im Modus II der Sättigungsbereich mit Perforationsdurchmessern von ca.  $1750 \mu m$  und ab ca. 7 W (Leistungsdichte:  $5570 W/cm^2$ ) mit Perforationsdurchmessern von ca.  $2000 \mu m$ .

### 3.2.2.4. Silberhalid-Faser mit Handotoskop

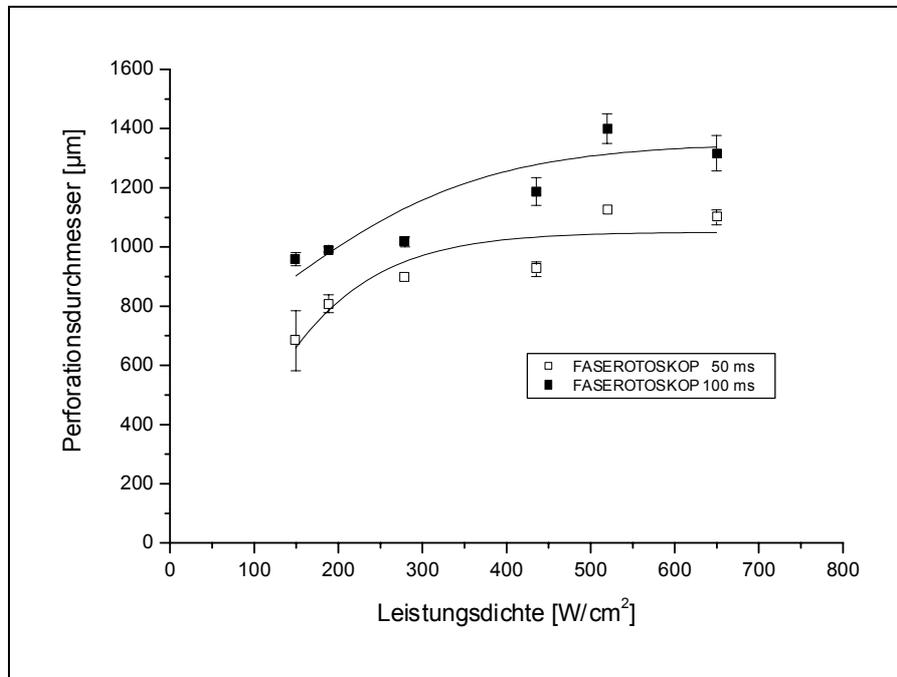


Abb. 13: Abhängigkeit der Perforationsdurchmesser von der Leistungsdichte (Silberhalid-Faser mit Handotoskop, Pulsdauer: 50-100 ms, Pferdettrommelfell, Mittelwert  $\pm$  s.e.m.)

Für die Silberhalidfaser beträgt die Schwellenleistung bei beiden Pulsdauern ca. 2,3 W (Leistungsdichte: 150 W/cm<sup>2</sup>), der Sättigungsbereich ist mit einer Leistung von ca. 8 W (Leistungsdichte: 520 W/cm<sup>2</sup>) mit Perforationsdurchmessern von ca. 1100 µm (Pulsdauer: 50 ms) und ca. 1350 µm (Pulsdauer: 100 ms) erreicht.

<u><i>Erbium:YAG-Laser</i></u>	<u><i>CO<sub>2</sub>-Laser</i></u>	
<b><i>Applikationssysteme</i></b>	<b><i>Applikationssystem</i></b>	<b><i>Scannersystem</i></b>
<b>TwinEr® OPMI 11</b>	<b>Mikroslad® 719</b>	
400 µm im Fokus (50 mJ)	700 µm im Fokus (8 W/ 50 ms)	
<b>Er:YAG-Laserotoskop</b>	<b>Acuspot® 710</b>	<b>SilkTouch® 768 im Modus I</b>
500 µm im Fokus (80 mJ)	180 µm im Fokus	700 µm (medium) (2,2W/ 50 ms)
		<b>SilkTouch® 768 im Modus II</b>
		1200 µm (medium) (4,4 W/ 100 ms)
		<b>SilkTouch® 768 im Modus III</b>
		1700 µm (medium) (6,8 W/ 150 ms)
	<b>Laserotoskop 1</b>	<b>SilkTouch® 768 im Modus II</b>
	700 µm im Fokus (5 W/ 50 ms)	2150 µm (medium) (8 W/ 100 ms)
	1800 µm im Defokus (25 W/50 ms)	
	<b>Laserotoskop 2</b>	<b>SurgiTouch® im Modus II</b>
	400 µm im Fokus	1750 µm (5 W/200 ms)
		<b>SurgiTouch® im Modus III</b>
		2100 µm (7 W/ 200 ms)
	<b>Silberhalid-Faser</b>	
	1400 µm im Abstand 1mm	(8 W/ 50 ms) max. Perforation 1125 µm
		(8 W/ 100 ms) max. Perforation 1350 µm

Tab. 3: Laserparameter (Leistung, Pulsdauer, Energie) zur Laserparazentese für den Erbium:YAG-Laser und den CO<sub>2</sub>-Laser am Modellgewebe Pferdetrommelfell