

Thermokinetische Selektivität – ein neues hoch-effektives Wirkprinzip zur dauerhaften Haarentfernung: Erfahrung mit dem LPIR-Alexandrit-Laser

M. Fuchs

Krankhafte oder kosmetisch störende Gesichts- und Körperbehaarung sind ein Problem für viele Menschen. Neben den klassischen Methoden zur Haarentfernung wie Rasieren, Wachs, Nadel-Elektrolyse sind seit einigen Jahren verschiedene Laser-Systeme sowie inkohärentes Licht zum Einsatz gekommen, um störende Behaarung zu therapieren. Dabei entwickelte sich die Laser-Epilation zu einer Alternative zur bekannten Nadel-Elektrolyse. Bei letzterer sind im allgemeinen Behandlungszeiträume von mehreren Jahren nötig, um zum Beispiel die Beine zu enthaaren, da jeder Follikel einzeln behandelt werden muß und das mehrfach. Dazu kommt die Gefahr der Entzündung und Infektion im Behandlungsgebiet sowie die Narbenbildung.

Das wohl verbreitetste System zur Laser-Epilation ist der Ruby-Laser, wobei unterschiedliche Systeme mit Pulslängen in »free running mode« zwischen 0,8 und 3 Millisekunden im Einsatz sind. Die Hauptindikation des Ruby-Lasers ist jedoch nach wie vor die, wenn auch sehr umstrittene, Behandlung von gutartigen pigmentierten Hautläsionen und die Entfernungen von Tätowierungen. Durch Umrüstung und spezielle Applikatoren kam hier die Indikation der Laser-Epilation hinzu. Aufgrund physikalischer Eigenschaften und Gewebe-Strahl-Interaktion ist dabei insbesondere der Ruby-Laser mit einer Pulslänge von 1 Millisekunde als nicht ideal für die Zerstörung des Haarfollikels zu bezeichnen. Die Eindringtiefe des bei 694 Nanometer arbeitenden Ruby-Lichtes als auch die ungewünschten Effekte an der Epidermis (Schmerzhaftigkeit, Verbrennung, Blasenbildung – »Nicholski-Effekt«) ließen insbesondere dieses Gerät

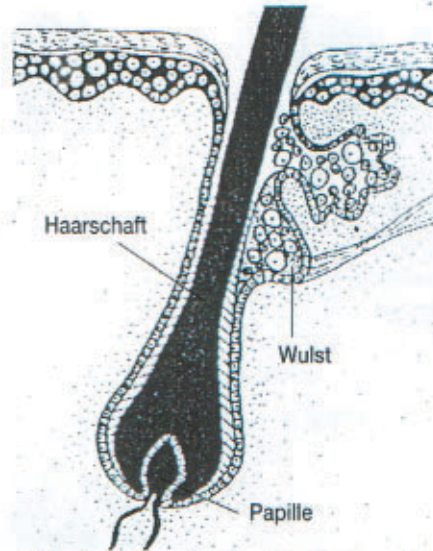


Abb. 1: Schematische Darstellung des Haarfollikels

in den Augen erfahrener Laser-Anwender als nicht optimal erscheinen und die Suche nach einem geeigneteren Gerät, gegebenenfalls sogar nach

einem anderen Wirkprinzip wurde in letzter Zeit deutlich forciert.

Mit Impulszeiten von bis zu 20 Millisekunden und dem Prinzip der thermokinetischen Selektivität arbeitet ein von der Firma Cynosure entwickelter Long-Puls-Infrarot-Alexandrit-Laser mit einer Wellenlänge von 755 Nanometer. Mit dem zur Zeit europaweit einzigen Gerät, welches uns von der Firma Laser-Medical, Schubert, zur Verfügung gestellt wurde, wurden in den letzten vier Monaten zahlreiche Patienten behandelt und zum Teil studienmäßig nachbetreut (die Ergebnisse der noch laufenden Studien werden zusammengestellt und publiziert).

Aufgrund der ausgesprochen guten Ergebnisse und Patientenakzeptanz bei und nach der Behandlung sollen im folgenden einige Grundlagen und Vorabresultate dargestellt werden.

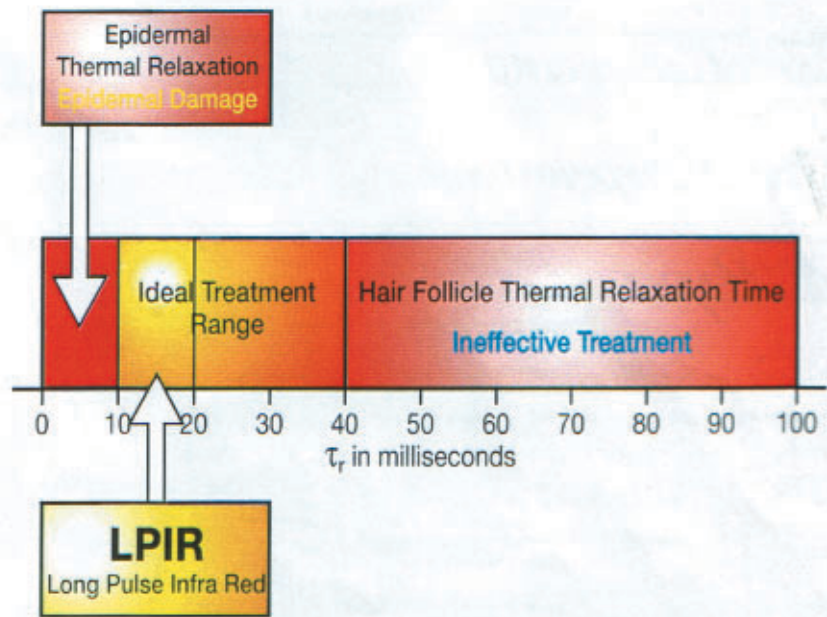


Abb. 2: Ideale Behandlungsbreite für die Laser-Epilation

Thermokinetic Selectivity

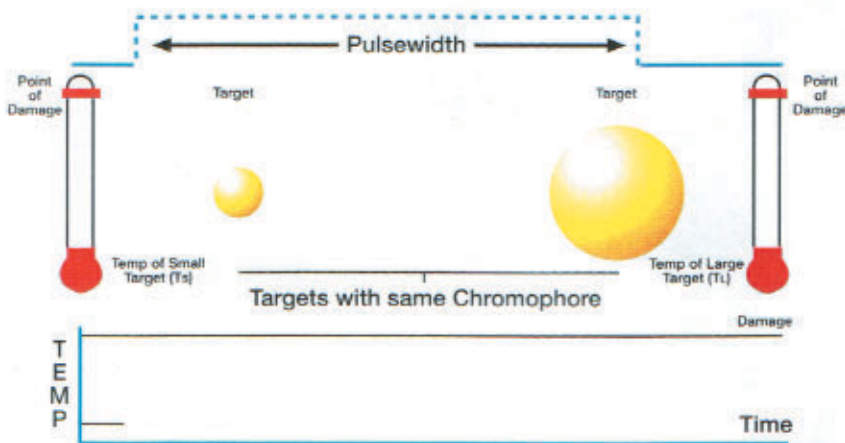


Abb. 3a: Durch sorgfältige Wahl der Pulsdauer und der Energie vermag der Laser große Ziele so aufzuheizen, daß sie zerstört werden während kleinere Strukturen des gleichen Chromophors lediglich erwärmt werden. Dies ist das Prinzip der thermokineticen Selektivität. Die Graphik stellt den Zustand vor der Laserung dar. Beide potentielle Ziele haben die gleiche Temperatur

Thermokinetic Selectivity

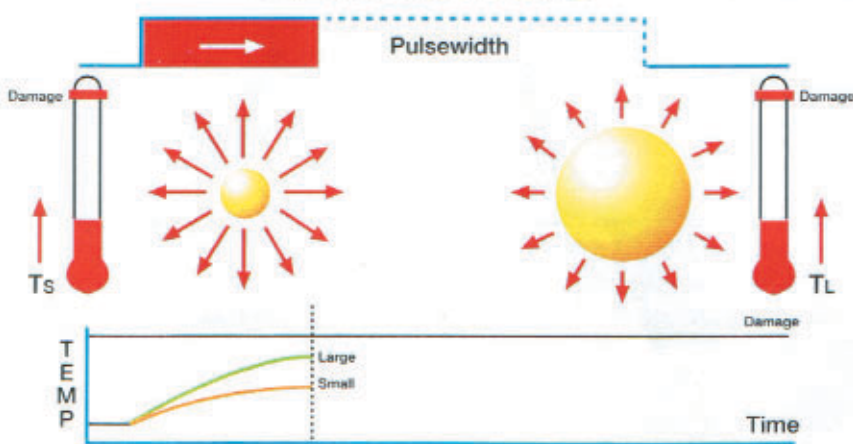


Abb. 3b: Während des Laser-Pulses wird die Energie von beiden Zielen absorbiert. Beide Ziele strahlen in unterschiedlicher Stärke Hitze wieder ab, während die Temperatur weiter ansteigt. Bedingt durch das günstigere Oberflächen-volumenverhältnis des kleinen Ziels, kann es die Energie effektiver in die Umgebung abgeben als ein großes Ziel mit ungünstigerem Oberflächen-volumenverhältnis dieses vermag. Daher steigt die Temperatur in kleineren Zielobjekten langsamer an, als in der größeren Struktur

Thermokinetic Selectivity

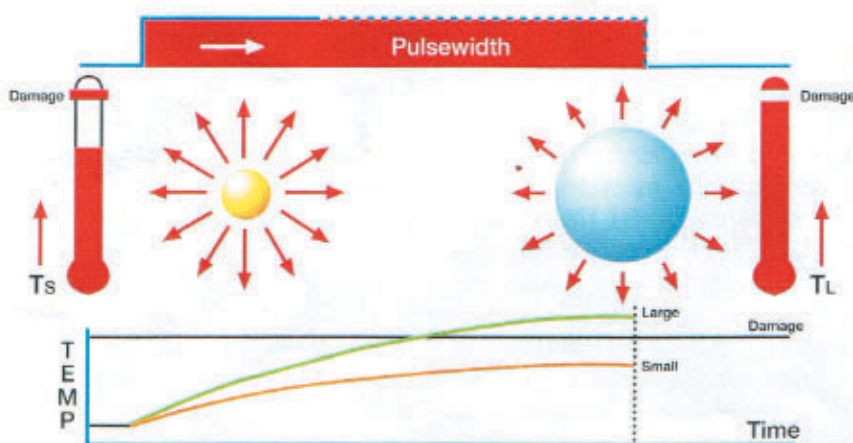


Abb. 3c: Bei fortgesetzter Pulsdauer erreicht das kleinere Ziel sein Temperaturplateau schneller und heizt sich insgesamt nicht so schnell auf, wie das große Ziel. Um die schmale Struktur zu schonen und die große zu schädigen, muß die Zeit (Pulslänge) in der eine ausreichende Energie eingestrahlt wird, lang genug sein

Thermokinetic Selectivity

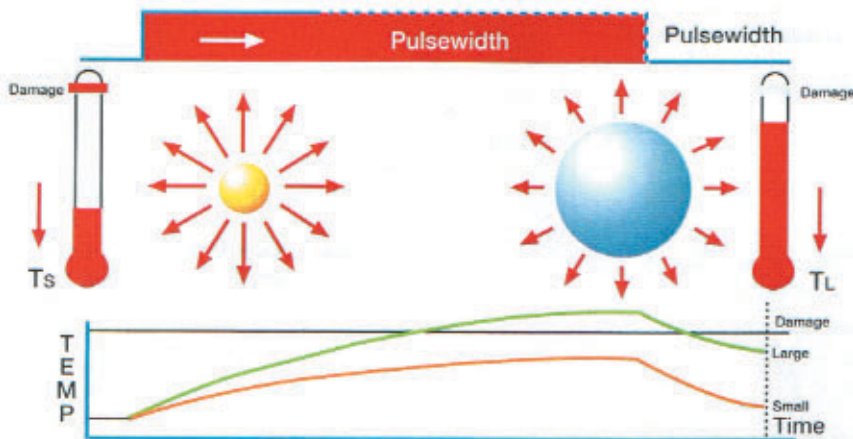


Abb. 3d: Wenn der Laser-Puls beendet ist, kühlen sich beide Strukturen ab. Die größere Struktur ist Dank dieses Vorgangs geschädigt worden, die kleinere Struktur nicht

Thermokinetic Selectivity and Pulsewidth

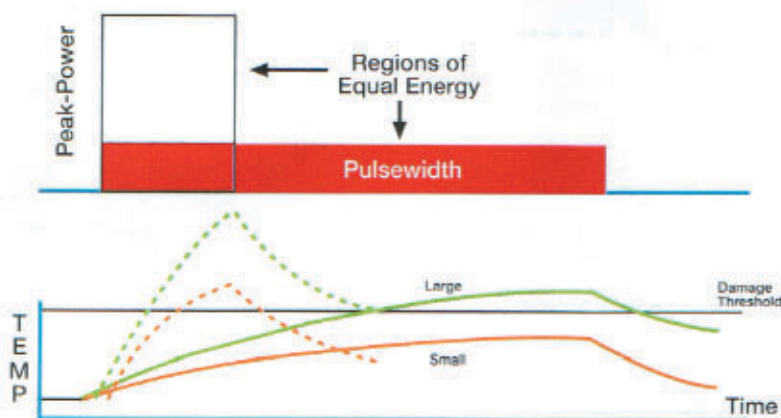


Abb. 3e: Diese Graphik stellt den Unterschied zwischen Lasern dar, die die gleiche Energiedosis liefern, jedoch dieses während unterschiedlicher Pulslängen tun. Bei kürzeren Pulslängen muß die Spitzenenergie deutlich höher sein, um eine definierte Energiedosis in der Zielstruktur zu erreichen. Eine höhere Energie wird aber zwangsläufig eine deutliche Temperaturerhöhung bewirken und daher sowohl große als auch kleine Strukturen gleichermaßen schädigen

Wirkweise

»Thermokinetic Selektivität« – oder »Dicke schwitzen eher als Dünne« (modifizierte Allen'sche Regel)

Idealerweise muß die Pulslänge zwischen der thermischen Relaxationszeit der Epidermis (zwischen 3–10 Millisekunden) und des Haarfollikels liegen (Grossman et al., 1996).

Das Ziel aller Methoden zur Laser-Epilation ist die möglichst irreversible Zerstörung des Haarfollikels. Hierbei kommen neben der Papille weitere histo-

logisch definierte Strukturen in Frage, die für die Regenerationen und die Steuerung der Wachstumsfunktion des Haarfollikels eine Bedeutung haben (Abb. 1). Die gesamte Energie des Laser-Lichtes, in diesem Fall bei 755 Nanometer, sollte möglichst selektiv durch das Melanin des Haarschaftes und des Bulbus absorbiert werden, während möglichst wenig oder keine Absorptionen im Bereich der umgebenden Strukturen der Haut oder im Bereich der Blutgefäße des dermalen Kapillarsystems stattfinden. Durch die Energieaufnahme und thermische Aufheizung des Haarschaftes kommt es

idealerweise zu einer Zerstörung der dem Haarschaft direkt benachbart liegenden oben genannten Strukturen. Das Problem und gleichzeitig die Herausforderung an die Entwicklung eines modernen Lasers war hierbei die Möglichkeit, eine große Struktur energetisch zu schädigen und gleichzeitig überlegende kleinere Strukturen mit dem gleichen Chromophor zu schonen.

Selektive Photothermolyse – thermokinetic Selektivität

Das weithin bekannte Prinzip der *selektiven Photothermolyse* bedeutet, durch

- Reflection
- Transmission
- Scatter
- Absorption



Abb. 4: Laser-Gewebsinteraktion

Absorptionskoeffizient bei 755 nm: 28 cm⁻¹
 bei 694 nm: 47 cm⁻¹

$$(X) = \frac{1 - e^{-\alpha_{755} \cdot x}}{1 - e^{-\alpha_{694} \cdot x}} \quad x = 0,1 \quad (\text{Epidermale dermale Übergangszone})$$

Abb. 5: Formel

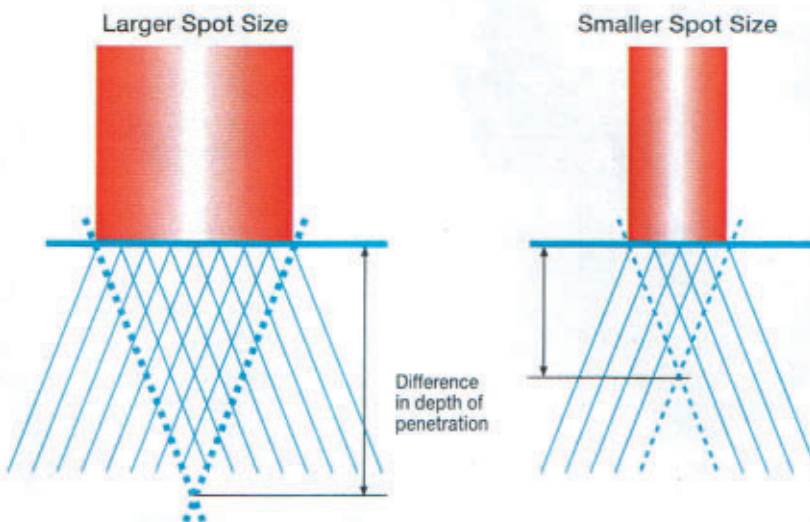


Abb. 6: Fokus-abhängige Eindringtiefe

Wahl der Wellenlänge, der Energie, der Pulslänge und Beachtung der Relaxationszeit der Zielzelle zu einer Zerstörung des Ziels zu kommen und gleichzeitig das umgebende Gewebe möglichst komplett zu schonen (Beispiel: Therapie von Tätowierungen). Problematisch wird es hierbei, wenn das Ziel den gleichen Chromophor hat, wie umgebendes oder überliegendes Gewebe und anatomische Strukturen. Einen anderen Weg geht hier der LPIR-Alexandrit-Laser mit

dem Prinzip der *thermokinnetischen Selektivität*. Großvolumige Zielstrukturen (z.B. das Haar) sind aufgrund des ungünstigen Volumenoberflächenverhältnisses (Allen'sches Gesetz) schlechter in der Lage, die absorbierte Energie (Hitze) über die relativ kleine Oberfläche abzustrahlen und in die Umgebung abzuleiten, als kleinvolumige Strukturen des gleichen Zielchromophors dieses vermögen. Das führt bei einer entsprechenden Expositionszeit

(Pulslänge) dazu, daß es zu einer Aufheizung der Zielstruktur und letztlich zu einer thermischen Schädigung auch der direkt benachbarten Strukturen (Papille, germinative Zellschicht, Bulgearea) kommt. Konsequenterweise muß die Impulsdauer daher über der thermischen Relaxationszeit der Epidermis und unterhalb der thermischen Relaxationszeit der Zielzelle liegen. Daraus ergibt sich, daß eine Impulsdauer von 10–40 Millisekunden ideal sein müßte, den Haarfollikel zu schädigen, ohne zu einer epidermalen Schädigung zu führen (siehe Abb. 2 u. 3a–d). Diese Voraussetzung und damit die thermokinnetischen Selektivität erfüllt der Long-Puls-Alexandrit-Laser mit Pulslängen bis zu 20 Millisekunden.

Energiedichte und Eindringtiefe

Da das Haarorgan kein statisches, sondern ein dynamisches Gebilde darstellt und die Zielstrukturen während des Durchlaufens des Haarzyklusses vom Anagen- zum Telogenstadium sich in unterschiedlichen Tiefen der Dermis befinden, muß die absorbierte Energie auch in der Tiefe noch ausreichend sein, um zu einer möglichst bleibenden Schädigung zu führen. Hierbei wird das Licht insbesondere durch Reflexion, Absorption und Streuungen geschwächt (Abb. 4). Zusätzlich ist die Eindringtiefe eine Funktion der Wellenlänge (im Gegensatz zum Ruby-Laser mit 694 Nanometer geht das Licht des Alexandrit-Lasers bei 755 Nanometer etwa 1–1,5 mm – entsprechend etwa 33% – weiter in die Tiefe (Abb. 5). Auch die Fokusgröße des eingestrahelten Laser-Lichtes spielt hier eine Rolle. Je größer der Fokus ist, um so höher ist die kumulative Energiedichte in der Tiefe (Abb. 6). Die Spotgröße beim LPIR ist mit 1 cm² etwa 4fach größer als beim Ruby-Laser. Energien bis 40 Joule/cm² werden mit dem LPIR erreicht. Die oben genannten Faktoren zusammen bewirken eine hohe Energiedichte in der Dermis, dieses ist insbesondere nötig, da sich zum frühen Zeitpunkt der Anagenphase, also der Phase, in welcher idealerweise eine bleibende Schädigung des Haaror-

Tabelle

Haar-Wachstums-Tabelle (Richards-Meharg-Table)

| | Percentage of testing hairs Telogen | Percentage of growing hairs Anagen | Percentage of transition hairs in Catagen | Percentage of Uncertain growth stage | Duration of growth time in Telogen | Duration of growth time in Anagen | Number of follicles per square cm | The hairs daily rate of growth | Total number of follicles in the area | Approx. Depth of terminal anagen follicle |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---|
| Head | | | | | | | | | | |
| Scalp | 13 | 85 | 1-2 | 1-2 | 3-4 month | 2-6 years | 350 | 0.35 mm | | 3-5 mm |
| Eyebrows | 90 | 10 | | | 3 month | 4-8 weeks | | 0.16 mm | | 2-2.5 mm |
| Ear | 85 | 15 | | | 3 month | 4-8 weeks | | | | |
| Cheeks | 30-50 | 50-70 | | | | | 880 | 0.32 mm | | 2-4 mm |
| Beard-Chin | 20 | 70 | | | 10 weeks | 1 year | 500 | 0.38 mm | | 2-4 mm |
| Mustache Upper Lip | 35 | 65 | | | 6 weeks | 16 weeks | 500 | | | 1-2.5 mm |
| Body | | | | | | | | | | |
| Axillae | 70 | 30 | | | 3 month | 4 month | 65 | 0.3 mm | | 3.5-4.5 mm |
| Trunk | NA | NA | | | | | 70 | 0.3 mm | 425,000 | 2-4.5 mm |
| Pupic Area | 70 | 30 | | | 3 month | 4 month | 70 | | | 3.5-5 mm |
| Arms | 80 | 20 | | | 18 weeks | 13 weeks | 80 | 0.3 mm | 220,000 | 2-4.5 mm |
| Legs & Thigs | 80 | 20 | | | 24 weeks | 16 weeks | 60 | 0.21 mm | 370,000 | 2.5-4 mm |
| Breasts | 70 | 30 | | | | | 65 | 0.35 mm | | 3-4.5 mm |

gans erfolgen kann, die Papille und germinativen Strukturen bis zu 4 mm unterhalb der Hautoberfläche befin-

den. Die Tiefe hierbei variiert je nach Körperstelle, ebenso wie das prozentuale Verhältnis von Anagen- und Telo-

genfollikeln lokalisationsunterschiedlich ist (siehe Richards-Meharg-Tabelle). Ein Blick in diese Tabelle zeigt auch

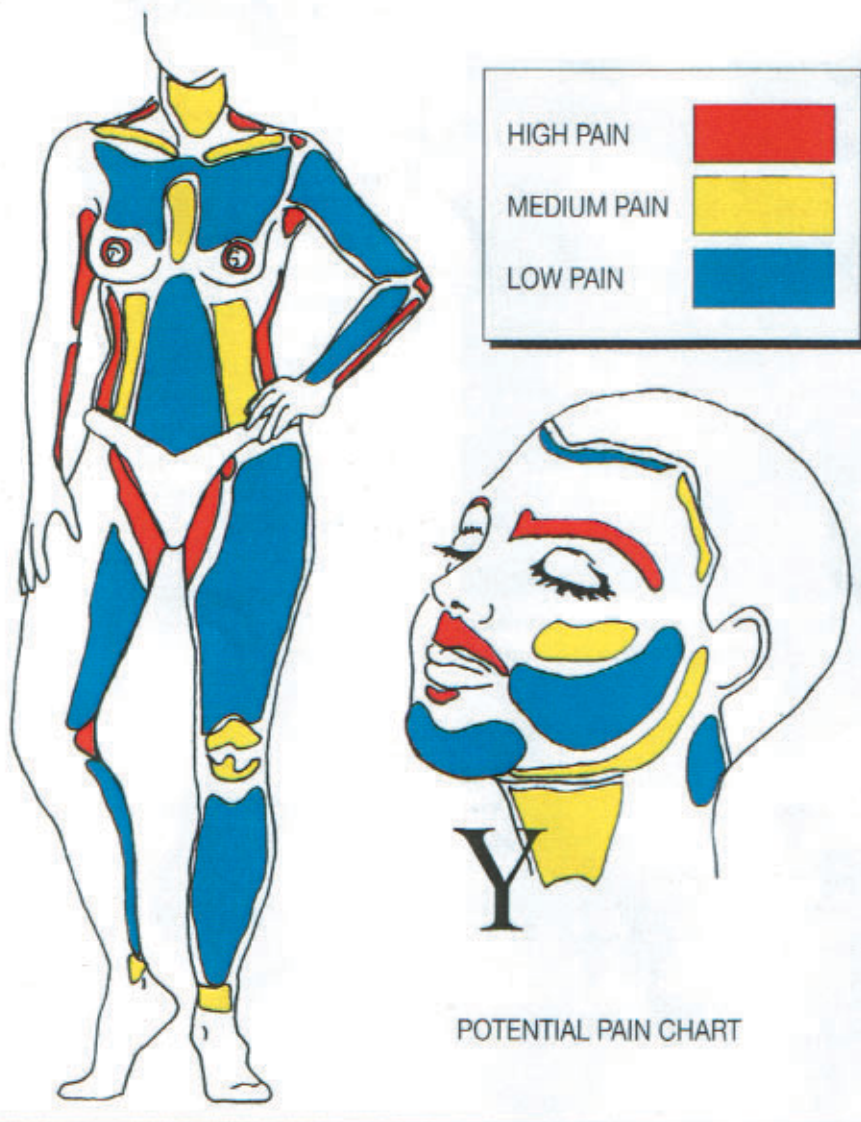


Abb. 7: Jeder Patient empfindet Schmerzen unterschiedlich. Bestimmte Bereiche des Gesichtes und des Körpers sind schmerzempfindlicher als andere. Dieses Diagramm zeigt eine grobe Verteilung der Gebiete mit niedrigen, mittleren und hohen Schmerzempfindungen

sofort, wo das Problem liegt, sich prospektivisch über den Erfolg der Behandlung und die Anzahl der irreversibel gestörten Haarfollikel zu äußern. Während im Bart- und Kinnbereich gut 70% der Haare im anagenen Wachstumsstadium und somit sich im optimalen Stadium für die Laser-Behandlung befinden, sind es im Bereich der Beine und Oberschenkel nur 20%. Außerdem befinden sich die Haare im Beinbereich 24 Wochen im Telogenstadium, so daß eigentlich erst nach diesem Zeitpunkt Aussagen zu Effektivität und gegebenenfalls Weiterbehandlung sinnvoll sind. Eine weitere Information

ergibt sich aus der Richards-Merhag-Tabelle. Sie gibt die durchschnittliche Tiefe der Anagen-Haarfollikel lokalisationsbezogen an. Bei Tiefen des anagenen Follikels bis zu 4 mm zeigt sich auch, wo insbesondere bei Laser-Systemen mit ungünstiger Tiefenwirkung wie dem Ruby-Laser die Probleme und therapeutischen Versager liegen.

Falldarstellung und Behandlungsparameter

In den letzten Monaten wurden über 100 Patienten mit dem LPIR-Alexan-

drit-Laser behandelt. Behandelt wurden neben dem Gesicht die Leistenregion, die Unter- und Oberschenkel, die Achselregion sowie Brust und Rücken. Am Tage vor der Behandlung, zum Teil auch direkt vor der Behandlung wurde eine gründliche Rasur und eine Einzeichnung der zu behandelnden Region vorgenommen. Eisgekühltes Sonographiegel wurde gleichmäßig in einer Dicke von etwa 1 mm aufgetragen, um eine Kühlung der Epidermis und eine Reduktion der häufig als leichtes Prickeln empfundenen Mißempfindung zu erreichen. Lediglich im Bereich der Oberlippe wurde regelmäßig Emla-Salbe 1-2 Stunden vor der Behandlung aufgetragen (Abb. 7).

Im Anschluß an die Behandlung kam es in einem Teil der Fälle zu einer zwischen 3 und 24 Stunden andauernden Rötung im Behandlungsareal. Blasenbildung, Nicholski-Phänomene wurden bisher nicht beobachtet. Insbesondere sind auch bis zum jetzigen Zeitpunkt postoperativ keine Hyper- oder Hypopigmentierungen und Narbenbildungen aufgetreten, bleibende Mißempfindung im Sinne von Hyper- oder Hypästhesien gleichfalls nicht. Alle Patienten wurden mit 20 Millisekunden Pulsdauer und einer Energiedichte zwischen 18 und 30 Joule/cm² behandelt. Zur Anwendung kam ausschließlich die 10-mm-Sonde mit 1-Hertz-Repetitionsfrequenz. Die Behandlungszeit des Hirsutismus der Oberlippe beträgt etwa eine 1 Minute. Postoperativ wurde einmalig eine Steroid-haltige antiseptische Creme aufgetragen und die Patienten wurden angewiesen, bei Rötung oder Mißempfinden das Areal leicht zu kühlen.

Grundsätzlich wurde zunächst pro Patient nur eine Behandlung durchgeführt, das zu behandelnde Areal wurde vollständig in einer Sitzung gelasert und der Patient zur Kontrolle des Befundes nach 2 Tagen und 14 Tagen wieder einbestellt. Bis zum jetzigen Zeitpunkt sind die Ergebnisse als äußerst positiv und erfolgversprechend zu bezeichnen. Bei den meisten Behandlungen im Gesichtsbereich waren ledig-



Abb. 8: Psychisch stark belastender Oberlippenbart bei einer 53jährigen Frau. Einmalige Behandlung mit dem LPIR-Laser führte zu nahezu vollständiger Haarreduktion (Beobachtungszeitraum 11 Wochen)

lich 1–2 Behandlungen, wobei mindestens ein Abstand von 6 Wochen eingehalten wurde, nötig. Bei vielen Patienten sind auch nach 3–4 Monaten und nach einmaliger Behandlung lediglich vereinzelt Haare nachgewachsen, so daß man bei Nachbeobachtungszeiträumen von derzeit 4 Monaten zumindest im Gesichtsbereich davon ausgehen kann, daß der überwiegende Teil der Haarfollikel durch die Behandlung zerstört worden ist. Histologische Untersuchungen, die durchschnittlich am 2. Tag, am 14. Tag sowie 6 Wochen nach der Behandlung entnommen worden sind, scheinen diese zu bestätigen. Endgültige Ergebnisse und Histologien werden in einer Publikation Ende vorgelegt.

Zusammenfassend zeichnet sich ab, daß mit dem LPIR-Alexandrit-Laser und dem Prinzip der photodynamischen Selektivität ein neues Gerät zur Behandlung des Hirsutismus zur Verfügung stehen wird. Die Patientenakzeptanz und die Effektivität darf nach jetzt 4monatiger Anwendung als ausgesprochen gut bezeichnet werden. Insbesondere muß aufgrund physikalischer und anatomischer Überlegungen dieses Gerät dem Ruby-Laser als in

allen Punkten überlegen bezeichnet werden. Behandlungsregime wie dort üblich mit 10–15 Behandlungen scheinen hier nicht notwendig zu sein. Zu erwähnen ist noch, daß dieses Gerät auf dem amerikanischen Markt die Zulassung zur Behandlung kleiner bis mittelgroßer Blutgefäße hat, insbesondere sind hier die zwischen 0,6 und 3 mm zu nennen. Die physikalische Grundüberlegung ist hier die gleiche, das Behandlungsregime allerdings etwas anders. Von uns durchgeführte Behandlungen an bisher 20 Patienten mit Besenreisern und kleinen retikulären Varizen im Größenordnungsreich 1–2 mm scheint auch hier durchaus erfolgversprechend zu sein.

Zusammenfassung

Es wird über ein neues Laser-Gerät (LPIR-Alexandrit-Laser; 755 nm) zur dauerhaften Haarentfernung berichtet.

Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der thermokinetischen Selektivität. Große Zielstrukturen speichern Energie länger als kleine Strukturen desselben Zielchromophors dieses vermögen. Die Laser-physikalischen Grund-

lagen werden in diesem Artikel erklärt und erste Erfolge und Ergebnisse dargestellt.

Summary

This is the first report of a new laser (LPIR-Alexandrit laser; 755 nm) for permanent hair removal.

The laser works by thermokinetic selectivity. Because the ratio of surface to volume is smaller with a large structure, it stores the absorbed energy heat much longer than a small structure of the same chromophore. The laser specific basics and the first results are reported.

Anschrift des Verfassers:

*Dr. Marco Fuchs
Freiherr-vom-Stein-Straße 10
47475 Kamp-Lintfort*