

Diplomarbeit

**Vergleich zweier Lasersysteme zur Entfernung von
Tätowierungen: Nanosekunden versus Picosekunden**

eingereicht von

Dipl.Ing. Karoline Glockner

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der gesamten Heilkunde

(Dr. med. univ.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt am

Universitätsklinik für Dermatologie und Venerologie Graz

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dr. med. univ. Daisy Kopera

Graz, am 17. 12. 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 17.12.17

Karoline Glockner eh

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Frau Univ.Prof.in.Dr.in. Daisy Kopera für die fachliche Anleitung und die persönliche Betreuung und Unterstützung bedanken. Frau Prof. Kopera stand mir stets unkompliziert bei jeglichen Fragen bei der Erstellung der Arbeit zur Seite und unterstützte mich in der Durchführung der Testreihe. Ich möchte mich für die freundliche Führung durch die Diplomarbeit und das Interesse an mir und meiner Arbeit herzlich bedanken.

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich während meines Studiums begleitet haben: Ein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern, die mir mein zweites Studium ermöglicht haben und mir immer unterstützend und liebevoll zur Seite standen.

Ein großer Dank geht an meine Brüder Georg und Sebastian.

Meinen Freunden Max, Laura, Bene, Jenny und besonders meiner Freundin Illy danke ich für viele tolle Momente und ihre jahrelange Freundschaft.

Meinem Freund Max danke ich für seine liebevolle Unterstützung und die gemeinsame Zeit.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Grundlagen der Lasertechnik und ihre Anwendung in der Dermatologie, besonders zur Entfernung von Tätowierungen und Pigmentläsionen, beschrieben. Der theoretische Kern der Arbeit besteht in der Aufarbeitung der anatomischen Gegebenheiten an der Haut – besonders an Tätowierungen und Pigmentläsionen - einerseits und der technischen Grundlagen zum Thema Laserbehandlung andererseits.

Das Ziel der Arbeit ist es zu untersuchen, ob für die Entfernung von Tätowierungen mit dem Picosekundenlaser schneller und zielführender ist als die bekannte und bewährte Nanosekunden Laserbehandlung.

Zu diesem Zweck wurde der Klinik im Oktober 2016 ein Picosekundenlaser zur Tattoorentfernung zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Arbeit wurde eine Testreihe mit 7 Probandinnen mit insgesamt 11 Tätowierungen durchgeführt. Die tätowierten Hautareale wurden teils mit dem Nanosekundenlaser teils mit dem Picosekundenlaser behandelt, um die Systeme direkt miteinander vergleichen zu können und deren Wirkung zu detektieren. Ziel war es die Wirksamkeit des Picosekundenlasers zu testen und eventuelle Fortschritte in der Lasertechnologie aufzuzeigen.

Abstract

In this thesis, the basic principles of laser technology and its application in dermatology, especially the removal of tattoos and pigmented lesions, are described. The theoretical core of the work consists in the processing of the anatomical principles of the skin and the technical specifications of laser treatment of pigmented lesions and tattoos.

The aim of the study is to investigate whether the removal of tattoos with the picosecond laser is more effective than the known and proven nanosecond laser treatment.

For this purpose, a picosecond laser for tattoo removal was made available to the clinic in October 2016. A series of 7 patients with a total of 11 tattoos were included. 50% of the tattoos were treated with the nanosecond laser 50% with the picosecond laser in order to be able to compare the systems directly and to detect their effects.

The aim was to test the effectiveness of the picosecond laser and to show possible advances in laser technology.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	II
ZUSAMMENFASSUNG	III
ABSTRACT	IV
INHALTSVERZEICHNIS	V
GLOSSAR UND ABKÜRZUNGEN	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	II
TABELLENVERZEICHNIS	IV
1 EINLEITUNG	5
1.1 LASER	6
1.1.1 <i>Physikalische Grundlagen</i>	6
1.1.2 <i>Prinzip Laser</i>	10
1.1.3 <i>Technischer Aufbau des Lasers</i>	12
1.1.4 <i>Laserparameter</i>	13
1.2 LASER IN DER MEDIZIN	15
1.2.1 <i>Laser in der Dermatologie</i>	17
<i>Dermatologische Indikationen zur Laseranwendung:</i>	17
1.2.2 <i>Anwendung von Lasersystemen in der Dermatologie</i>	18
1.3 DIE MENSCHLICHE HAUT	24
1.3.1 <i>Epidermis</i>	24
1.3.2 <i>Dermis</i>	26
1.3.3 <i>Subkutis</i>	29
1.3.4 <i>Einteilung der Hauttypen nach Pigmentierung</i>	29
1.3.5 <i>Funktionen der Haut</i>	31
1.3.6 <i>Optische Eigenschaften der Haut</i>	33
1.3.7 <i>Reaktionsmechanismen Laser – Gewebe</i>	35
1.4 TÄTOWIERUNGEN	39
1.4.1 <i>Ursprung/Etymologie</i>	39
1.4.2 <i>Aktuelle Entwicklungen</i>	43
1.4.3 <i>Bedeutung und Funktion</i>	44
1.4.4 <i>Technik und Formen</i>	45
1.5 ENTFERNUNG VON TÄTOWIERUNGEN	49
1.5.1 <i>Mechanismus der Aufhellung</i>	50
1.5.2 <i>Laseranwendung zur Entfernung von Tätowierungen</i>	51
1.5.3 <i>Mögliche Nebenwirkungen bei der Entfernung von Tätowierungen mittels Lasertherapie</i>	52

2	MATERIAL UND METHODEN	55
2.1	EINFÜHRUNG.....	55
2.2	ZIELSETZUNG.....	55
2.3	PROBANDENENREKRUTIERUNG	56
2.4	DURCHFÜHRUNG.....	58
3	ERGEBNISSE – RESULTATE	59
3.1	PROBANDIN 1.....	60
3.1.1	<i>Tattoo Nr. 1</i>	60
3.1.2	<i>Tattoo Nr. 2</i>	62
3.2	PROBANDIN 2.....	64
3.2.1	<i>Tattoo Nr.3</i>	64
3.2.2	<i>Tattoo Nr. 4</i>	66
3.2.3	<i>Tattoo Nr. 5</i>	68
3.3	PROBANDIN 3.....	70
3.3.1	<i>Tattoo Nr. 6</i>	70
3.4	PROBANDIN 4.....	72
3.4.1	<i>Tattoo Nr. 7</i>	72
3.5	PROBANDIN 5.....	74
3.5.1	<i>Tattoo Nr. 8</i>	74
3.6	PROBANDIN 6.....	76
3.6.1	<i>Tattoo Nr. 9</i>	76
3.6.2	<i>Tattoo Nr. 10</i>	78
3.7	PROBANDIN 7.....	80
3.7.1	<i>Tattoo Nr. 11</i>	80
3.8	ZUSAMMENFASSENDE ERGEBNISSE UND ERKENNTNIS	82
4	DISKUSSION	84
5	LITERATURVERZEICHNIS.....	86

Glossar und Abkürzungen

μm}	.....	Mikrometer
Ar}^+	.....	Argon-Ionen
cm	.....	Zentimeter
CO_2	.....	Kohlendioxid
Cr}^+	.....	Chromium
Cr^{3+}	.....	Chrom
cw	.....	continuous wave
DNA	.....	Desoxyribonukleinsäure
Er	.....	Erbium
fd	.....	frequenzverdoppelt
FPDL	.....	Flashlamp pumped dye laser
GHz	.....	Gigahertz
HBL	.....	hochenergetische Blitzlampen
Hz	.....	Hertz
kHz	.....	Kilohertz
km	.....	Kilometer
KTP	.....	Kaliumtitanylphosphat
LLS	.....	Laser- und Nichtlaser-Lichtquellen
LPTDL	.....	langgepulsten Farbstofflaser, long pulsed tunable dye laser
m	.....	Meter
mg	.....	Milligramm
MHz	.....	Megahertz
mm	.....	Millimeter
Nd	.....	Neodym
nm	.....	Nanometer
ns	.....	Nanosekunden
PDT	.....	Photodynamische Therapie
ps	.....	Picosekunden
QS	.....	quality switch
QSRL	.....	Q-switch-Rubinlaser
RNA	.....	Ribonukleinsäure
s	.....	Sekunde
US	.....	United States
UV	.....	Ultraviolett
YAG	.....	Yttrium-Aluminium-Granat

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wellenmodell Licht (6)	8
Abbildung 2: Das Prinzip Laser (12).....	11
Abbildung 3: Eindringtiefe verschiedener Lasersysteme	15
Abbildung 4: schematischer und histologischer Aufbau der Haut (8)	25
Abbildung 5: Histologischer Aufbau der Kutis (8)	27
Abbildung 6: Hauttypen I-VI nach Fitzpatrick (25).....	29
Abbildung 7: Einteilung der Hauttypen nach Fitzpatrick und ihre Reaktion auf UV- Exposition (23)	30
Abbildung 8: Optische Eigenschaften von Gewebe bei Bestrahlung mit Laserlicht (2).....	33
Abbildung 9: Laser- Gewebe- Reaktionsmechanismen (2).....	36
Abbildung 10: Schädigung des Gewebes nach Grad der Erwärmung (2).....	37
Abbildung 11: Tätowierung am Unterschenkel von "Ötzi" (32).....	40
Abbildung 12: Ta Moko Tätowierung der Maori (Ölgemälde von Peter Jean Caley)(34) .	41
Abbildung 13: Frau aus dem Volk der Wodaabe mit Skarifizierungstatauierung (38).....	42
Abbildung 14: Tätowierungsvorgang (53)	47
Abbildung 15: Klinisches Bild - "whitening" nach Laserbehandlung (70).....	51
Abbildung 16: Histologisches Bild- "whitening" nach Laserbehandlung (2)	51
Abbildung 17: Infoblatt zur Testreihe im Oktober 2016	57
Abbildung 18: Tattoo Nr.1: VORHER.....	61
Abbildung 19: Tattoo Nr.1: VORHER mit Markierung.....	61
Abbildung 20: Tattoo Nr.1: Direkt nach der Behandlung	61
Abbildung 21: Tattoo Nr.1: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung)	61
Abbildung 22: Tattoo Nr.2: VORHER.....	63
Abbildung 23: Tattoo Nr.2: VORHER mit Markierung.....	63
Abbildung 24: Tattoo Nr.2: Direkt nach der Behandlung	63
Abbildung 25: Tattoo Nr.2: NACHHER 4 Wochen nach Behandlung.....	63
Abbildung 26: Tattoo Nr.3: VORHER Gesamtübersicht.....	65
Abbildung 27: Tattoo Nr.3: VORHER.....	65
Abbildung 28: Tattoo Nr.3: VORHER mit Markierung.....	65
Abbildung 29: Tattoo Nr.3: direkt nach Behandlung	65
Abbildung 30: Tattoo Nr.3: NACHHER.....	65
Abbildung 31: Tattoo Nr.4: VORHER.....	67

Abbildung 32: Tattoo Nr.4: VORHER mit Markierung.....	67
Abbildung 33: Tattoo Nr.4: Direkt nach der Behandlung.....	67
Abbildung 34: Tattoo Nr. 4: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung).....	67
Abbildung 35: Tattoo Nr.5: VORHER.....	69
Abbildung 36: Tattoo Nr.5: VORHER mit Markierung.....	69
Abbildung 37: Tattoo Nr.5: Direkt nach der Behandlung.....	69
Abbildung 38: Tattoo Nr.5: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung).....	69
Abbildung 39: Tattoo Nr.6: VORHER.....	71
Abbildung 40: Tattoo Nr.6: VORHER mit Markierung.....	71
Abbildung 41: Tattoo Nr.6: Direkt nach der Behandlung.....	71
Abbildung 42: Tattoo Nr.6: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung).....	71
Abbildung 45: Tattoo Nr.7: VORHER.....	73
Abbildung 45: Tattoo Nr.7: Direkt nach der Behandlung.....	73
Abbildung 45: Tattoo Nr.7: NACHER (4 Wochen nach Behandlung).....	73
Abbildung 46: Tattoo Nr.8: VORHER.....	75
Abbildung 47: Tattoo Nr.8: VORHER mit Markierung.....	75
Abbildung 48: Tattoo Nr.8: Direkt nach der Behandlung.....	75
Abbildung 49: Tattoo Nr.8: NACHHER.....	75
Abbildung 50: Tattoo Nr.9: VORHER.....	77
Abbildung 51: Tattoo Nr.9: VORHER mit Markierung.....	77
Abbildung 52: Tattoo Nr.9: Direkt nach der Behandlung.....	77
Abbildung 53: Tattoo Nr.9: NACHHER (10 Wochen nach der Behandlung).....	77
Abbildung 54: Tattoo Nr.10: VORHER.....	79
Abbildung 55: Tattoo Nr. 10 VORHER mit Markierung.....	79
Abbildung 56: Tattoo Nr.10: Direkt nach der Behandlung.....	79
Abbildung 57: Tattoo Nr.10: NACHHER (10 Wochen nach der Behandlung).....	79
Abbildung 58: Tattoo Nr.11: VORHER.....	81
Abbildung 59: Tattoo Nr.11: VORHER mit Markierung.....	81
Abbildung 60: Tattoo Nr.11: Direkt nach der Behandlung.....	81
Abbildung 61: Tattoo Nr.11: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung).....	81
Abbildung 62: Ergebnis der Lasertherapie in Punkten.....	82
Abbildung 63: Ergebnis der Lasertherapie in Punkten für Tätowierung Nr.1-11.....	83
Abbildung 64: Gesamtergebnis der Lasertherapie.....	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Medizinische Anwendungsgebiete der verschiedenen Lasersysteme (18)	16
Tabelle 2: Eigenschaften des Nd:YAG-Lasers (13)	19
Tabelle 3: Eigenschaften des KTP-Lasers (13)	20
Tabelle 4: Eigenschaften des Alexandritlasers (13)	21
Tabelle 5: Eigenschaften des Rubinlasers (13)	22
Tabelle 6: Eigenschaften des gepulsten Farbstofflasers (13)	23
Tabelle 7: Tätowierungsfarben und verwendete Laser (2)	52
Tabelle 8: Übersicht Studienteilnehmer	58
Tabelle 9: Ergebnis Tattoo Nr.1	60
Tabelle 10: Ergebnis Tattoo Nr.2	62
Tabelle 11: Ergebnis Tattoo Nr.3	64
Tabelle 12: Ergebnis Tattoo Nr.4	66
Tabelle 13: Ergebnis Tattoo Nr.5	68
Tabelle 14: Ergebnis Tattoo Nr.6	70
Tabelle 15: Ergebnis Tattoo Nr.7	72
Tabelle 16: Ergebnis Tattoo Nr.8	74
Tabelle 17: Ergebnis Tattoo Nr.9	76
Tabelle 18: Ergebnis Tattoo Nr.10	78
Tabelle 19: Ergebnis Tattoo Nr.11	80
Tabelle 20: bis dato durchgeführte vergleichende Studien zwischen Picosekundenlaser und Nanosekundenlaser zur Tattoorentfernung (65)(66)(67)	85

1 Einleitung

Heute ist der Einsatz von Lasersystemen in der Medizin und vor allem in der Dermatologie nicht mehr wegzudenken. Laser werden zur Behandlung unterschiedlichster Indikationen eingesetzt. Die theoretische Grundlage formulierte Albert Einstein bereits 1917 mit „Über die Quantenmechanik der Strahlung“. Er erkannte, dass Atome und Moleküle einen möglichst energiearmen Zustand erstreben und in der Lage sind angeregte Elektronen in höheren Energieniveaus zu entladen. Wird ein angeregtes Atom mit einem bestimmten Licht bestrahlt, kann es ein Photon aufnehmen und zwei idente Photonen aussenden. Die beiden Photonen können diesen Effekt mit weiteren Atomen erreichen, so dass immer mehr identische Photonen entstehen. Dieses Prinzip wird stimulierte Emission genannt und ist die Grundlage für „*die Erzeugung monochromatischen, kohärenten und kollimierten Lichts, womit höhere Leistungsdichten und größere spektrale Reinheit erreichbar sind als mit jeder anderen Lichtquelle*“. (1) Einstein postulierte damit wesentliche Voraussetzungen für die Entwicklung des Lasers.

1950 wurden die theoretischen und physikalischen Grundlagen von den US-amerikanischen Physikern Arthur Schawlow und Charles Hard Townes, sowie den sowjetischen Wissenschaftlern Aleksander Prokhorov und Nikolay Basov geschaffen. 1954 wurde der erste Vorläufer des Lasers, der MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) von Charles H. Townes entwickelt. Ihm gelang die Verstärkung einer Strahlung mittels stimulierter Emission, indem er statt sichtbarem Licht mit Mikrowellen. (2)

1964 wurde Townes, Balov und Prokhorov gemeinsam für ihre fundamentale Arbeit auf dem Gebiet der Quantenelektronik, die zur Konstruktion von Oszillatoren und Verstärkern auf der Basis des Maser- und Laserprinzips führten, der Nobelpreis für Physik verliehen. (2) Der amerikanische Physiker Theodore Maiman entwickelte 1960 den ersten funktionierenden Laser, einen gepulsten Rubinlaser. 1967 wurde der erste Gaslaser, bereits ein Jahr später, der erste Halbleiterlaser gebaut. Bis 1970 wurden laufend weitere Laser entwickelt. So wurden Helium-Neonlaser, Nd:YAG-Laser, Argonionenlaser, CO₂-Laser und Farbstofflaser gebaut. 1997 wurde der Atomlaser erfunden.

In den 50 Jahren die seit der Entwicklung des ersten Lasers vergangen sind, hat sich in der Anwendung viel getan und Lasersysteme sind in Industrie, Wirtschaft und Medizin nicht mehr wegzudenken. Diese Arbeit beschäftigt sich mit Laseranwendungen in der Dermatologie, vor allem mit Lasersystemen zur Entfernung von Tätowierungen. Seit

Jahren hat sich in diesem Bereich der gütegeschaltete Rubinlaser, ein Nanosekundenlaser, bewährt. Mit diesem war jedoch nicht möglich Rot- und Orangetöne gänzlich zu entfernen. Außerdem waren bis zu 15 Sitzungen bis zur vollständigen Aufhellung der Pigmentierung notwendig. Seit kurzem ist ein neuer Laser am Markt, der Picosekunden-Laser, dessen Energieimpulse im Picosekunden Bereich liegen, wodurch Tätowierungen angeblich besser und in wenigen Sitzungen entfernt werden können. Zum Thema Picosekunden-Laser zur Tattoorentfernung gibt es einige Studien, aus welchen sich schließen lässt, dass schnellere Behandlungsergebnisse, weniger erforderliche Sitzungen, vermindertes Komplikationsrisiko und geringere Nebenwirkungen zu erwarten sind.

1.1 Laser

Die Bezeichnung Laser ist ein Akronym für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ (Lichtverstärkung durch induzierte Emission von Strahlung) und wurde 1957 vom US-amerikanischen Physiker Gordon Gould eingeführt aber erst 1960 von Theodore Maiman technisch umgesetzt. (3)

Ein Laser erzeugt Licht in einer exakt bestimmten Wellenlänge, also in bestimmten Farben, und hoher Intensität. Wesentlicher Bestandteil eines Lasers ist das Lasermedium. Maiman entwickelte 1960 einen Laser mit einem Lasermedium aus Rubin, einen 3-Niveau-Rubinlaser. Man bezeichnete ihn als ‚optical maser‘ oder ‚infrared maser‘. Erst seit etwa 1965 verwendet man die Bezeichnung Laser. (4)

Heute unterscheidet man Laser unter anderem nach ihrem Medium in Festkörperlaser, Flüssigkeitslaser und Gaslaser.

1.1.1 Physikalische Grundlagen

Eigenschaften der Laser

Monochromasie (identische Wellenlänge, Einfarbigkeit)

Geringe Divergenz

Kohärenz (Lichtquellen bewegen sich parallel ohne Streuung)

Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse

„Laserstrahlung wird durch verschiedene Parameter charakterisiert: Parallelität des Strahlenbündels, zeitliche und räumliche Kohärenz, Monochromatismus, Divergenz,

räumliche Intensitätsverteilung (Strahlqualität), Polarisation, Leistung bzw. Energie und Betriebsart (gepulst oder kontinuierlicher Lichtstrahl, sog. cw).“(2)

Optische Strahlung von Lasern und die von konventionellen Lichtquellen unterscheiden sich prinzipiell nicht in ihren biologischen Wirkungen. Durch die starke Bündelung der Laserstrahlung können jedoch hohe Intensitäten erreicht werden. Dadurch werden spezielle Gewebereaktionen hervorgerufen, die besonders für medizinisch-therapeutische Anwendungen ausgenutzt werden. Generell sind die Gewebereaktionen von zwei Eigenschaften abhängig. Zum einen von Bestrahlungsparametern der Laserstrahlung, wie Leistungs-/Energiedichte, Wellenlänge und Impulsdauer, zum anderen von den „optischen“ Eigenschaften des Gewebes, wie Reflexion, Streuung und Absorption. (5)

1.1.1.1 Charakteristik des Lichts

Licht ist elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich von **400 bis 700 nm** oder erweitert von **380 bis 750 nm**.

Als Welle kann das Licht auf zweierlei Weise gekennzeichnet werden:

- 1) Wellenlänge λ . Das ist der Abstand zweier benachbarter Wellenberge, bzw. Wellentäler oder sonstiger gleicher Schwingungszustände (Phasen) gemessen in einer Längeneinheit.
- 2) Frequenz ν . Das ist die Anzahl der Schwingungen in der Zeiteinheit, gemessen in Hertz. $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$, also 1 Schwingung/s; $10^3 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$ (Kilohertz), $10^6 \text{ Hz} = 1 \text{ MHz}$ (Megahertz), $10^9 \text{ Hz} = 1 \text{ GHz}$ (Gigahertz). Zwischen den beiden Größen λ und ν besteht für jede Welle die fundamentale Beziehung $\lambda \nu = c$, wobei c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist; für die des Lichtes im Vakuum gilt $c_0 = 299792,50 \text{ km/s}$.

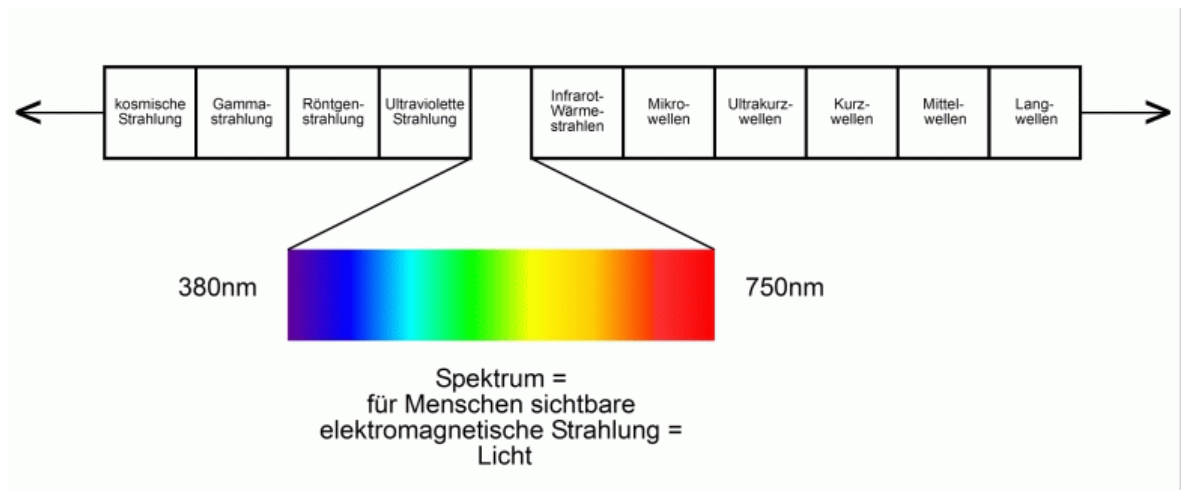


Abbildung 1: Wellenmodell Licht (6)

Wird weißes Licht durch ein Prisma oder ein Gitter zerlegt, so zeigt sich eine Fülle von Farben, ein kontinuierliches Spektrum, an dessen Enden Rot und Violett gesehen werden. Jeder Farbe entspricht eine bestimmte Wellenlänge λ bzw. Frequenz ν . Das menschliche Auge kann Wellenlängen zwischen $\lambda = 400 \text{ nm}$ (violett) bis $\lambda = 720 \text{ nm}$ (rot) wahrnehmen; die entsprechenden Frequenzen sind etwa 749 bzw. 416 Billionen Schwingungen/s. Licht einer bestimmten Wellenlänge wird als „monochromatisch“ bezeichnet. (...) Was das Auge sehen kann – „sichtbares Licht“ – ist nur ein kleiner Teil des großen Bereiches elektromagnetischer Wellen, die es in der Natur gibt. Dieses elektromagnetische Spektrum umfasst nach abnehmender Wellenlänge (zunehmender Frequenz) geordnet die folgenden Bereiche: technischer Wechselstrom, Funkwellen (Lang-, Mittel-, Kurz-, Mikrowellen), Infrarot, sichtbares Licht, Ultraviolett (400 nm bis 280 nm), Röntgenstrahlen, Gammastrahlen, kosmische Strahlen. Der Teil vom Infrarot bis zum Ultraviolett wird als „optischer Bereich“ und dieser inkl. Röntgenstrahlen oft als „Licht“ bezeichnet. Am kurzwelligen Ende des elektromagnetischen Spektrums macht sich der Teilchen-, am langwelligen der Wellencharakter vorzugsweise bemerkbar. (7)

1.1.1.2 Laserstrahlung

Laserlicht ist eine elektromagnetische Strahlung, die sich in Wellenform ausbreitet und zeitlich und räumlich kohärent, also frequenz- und phasengleich, ausgestrahlt wird. (8) Es unterscheidet sich von natürlichem Licht und Licht aus konventionellen Lichtquellen durch diese Kohärenzen. Insbesondere die räumliche Kohärenz ist für Anwendungen in der Medizin von Bedeutung: sie macht es möglich, Laserlicht auf sehr kleine Durchmesser zu

fokussieren und damit hohe Intensität zu erreichen. Durch die zeitliche Kohärenz können sehr kurze Pulse erzeugt werden. Im Gegensatz zu natürlichem Licht ist Laserlicht hochenergetisch und monochromatisch. Es zeichnet sich durch starke Bündelung, geringe spektrale Linienbreite, hohe Frequenzstabilität und die Möglichkeit ultrakurze Lichtimpulse abzugeben aus. (9)

Laserstrahlung wird als elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von 100 nm bis 1 mm definiert. Die von Lasern erzeugte Strahlung reicht vom Infraroten zum Ultravioletten Bereich. Von Licht, dem sichtbaren Spektrum, spricht man dagegen von einer Wellenlänge von 400 bis 700 nm im sichtbaren Bereich oder erweitert von 380 bis 700 nm. (2) An den kurzwelligen Bereich schließt sich die ultraviolette Strahlung, an den langwelligen Bereich schließt sich die infrarote Strahlung an. (10)

Ein Laser wirkt als Oszillator und Verstärker für monochromatisches Licht im Infrarot- und Ultraviolettbereich. Er deckt in diesen Funktionen den Wellenlängenbereich zwischen etwa 0,1 μm und 3 mm, d. h. rund 15 Oktaven des elektromagnetischen Spektrums, ab. Das „sichtbare Licht“ umfasst im Vergleich nur die Oktave von ca. 0,37 bis 0,75 μm Wellenlänge. Meist wird die Strahlung eines Lasers in einem engen Strahl gebündelt, der sich auf Distanz nur geringfügig ausweitet. Diese Ausweitung erfolgt durch den Effekt der Lichtbeugung. Ein sichtbarer Laserstrahl mit Wellenlänge 0,6 μm und Durchmesser 2mm verbreitert sich auf einer Distanz von 100 m Distanz auf nur 3 cm. (4)

1.1.1.3 Stimulierte Emission

„Ein Laser ist ein Gerät zur Umwandlung elektrischer Energie in „geordnete“ Lichtenergie. Er unterscheidet sich damit ganz wesentlich von herkömmlichen Lichtquellen, die auf dem Prinzip der spontanen Emission beruhen.“ (11)

Das Prinzip eines Lasers beruht auf der stimulierten Emission, durch die Lichtenergie verstärkt wird. Ein Photon kann von einem Atom absorbiert werden, wenn seine Energie der eines höheren Orbital entspricht. Trifft das Photon auf ein Elektron dieses Atoms in einem angeregten Zustand mit der Energie E_2 , so kann es dieses dazu anregen, spontan in den Grundzustand E_1 zurückzufallen und dabei ein Photon mit der Differenzenergie der beiden Zustände, $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$, emittieren. (h = Planck'sche Konstante) Die spontane Emission des Photons und seine Richtung sind willkürlich. Anders bei der stimulierten Emission: Hier wird der Zustand eines Photons von der Interaktion mit einem Atom

beeinflusst. Wie ein elektrischer Dipol reagiert das Atom und oszilliert mit dem externen Feld. Durch die Anwesenheit eines anderen Photons wird ein Elektron gezwungen in ein energetisch tieferes Niveau abzusinken. Es emittiert ein zweites, phasengleiches Photon. Dieses bewegt sich in dieselbe Richtung und besitzt gleiche Energie und Polarisation. Folglich sind beide Photonen kohärent und eine Verstärkung kann initiiert werden. (2)

1.1.2 Prinzip Laser

Lasersysteme bestehen grundsätzlich aus drei Komponenten:

Energiequelle (Pumplicht)

Donator (aktives Lasermedium)

Resonator (2 Spiegel, einer totalreflektierend und undurchlässig, einer teildurchlässig)

Diese ausgesendete Strahlung ist monochromatisch, kohärent und räumlich gerichtet.

Um Laserstrahlung zu erzeugen, muss ein Medium durch Energiezufuhr aus einem Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts in einen aktiven Zustand überführt werden. Der Laser wird über eine Pumpquelle mit externer Energie versorgt. Im Inneren des Lasers befindet sich der Donator in Form eines aktiven Lasermediums, bestehend aus einem Feststoff, einer Flüssigkeit oder einem Gas. Es ist zwischen zwei Spiegeln, dem Resonator, platziert. Dieser besteht im einfachsten Fall aus einem totalreflektierenden, undurchlässigen und einem zweiten teildurchlässigen Spiegel. (11) Die beiden Spiegel reflektieren die Strahlung und eine weitere Zunahme an Strahlung wird ausgelöst. Dadurch wird das Laserlicht verstärkt und ihm eine bestimmte Richtung gegeben.

Ein Teil der Strahlung kann durch den teildurchlässigen Spiegel austreten, der andere Spiegel reflektiert das Licht vollständig. Durch die Energiezufuhr von außen werden die Atome des Lasermediums in einen metastabilen Zustand gehoben, wodurch die Atome zu einer Emission von Photonen angeregt werden. Im Resonator entwickelt sich so eine stehende Welle, es entsteht kohärentes Licht, welches durch den teildurchlässigen Spiegel austreten kann. Durch präzise Anordnung der Spiegel werden die Photonen im Laser immer wieder zurückgeführt. Sie kollidieren dadurch häufig mit Elektronen und erzeugen kontinuierlich neue Photonen. Die Strahlung des Lasermediums wird verstärkt und gleichzeitig durch den teildurchlässigen Spiegel gebündelt. In gebündelter Form verlassen

sie den Laser durch eine kleine Austrittsöffnung.

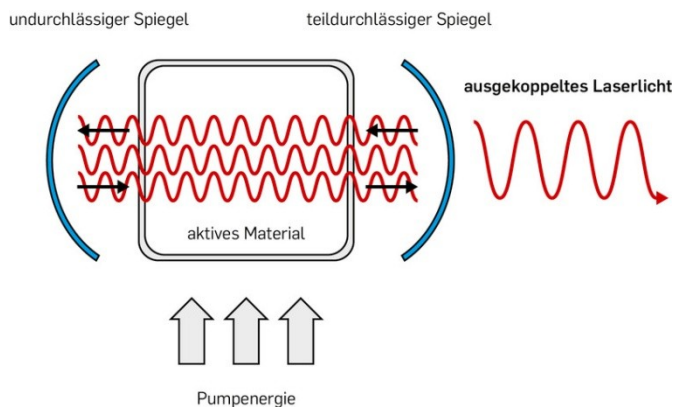


Abbildung 2: Das Prinzip Laser (12)

1.1.2.1 Lichtverstärkung

Sind am Prozess der stimulierten Emission viele Atome beteiligt, kann es zu einer messbaren Lichtverstärkung kommen. Vorausgesetzt die Atome befinden sich in enger räumlicher Umgebung und haben den selben angeregten Zustand. Befinden sich alle Atome im angeregten Zustand, spricht man von einer Inversion. Diese Atome, Moleküle oder Ionen, befinden sich im aktiven Lasermedium, welches als Festkörper, Flüssigkeit oder in gasförmiger Form vorliegen kann. Photonen gleicher Wellenlänge und Richtung werden emittiert. Verständlicherweise ist dadurch das emittierte Laserlicht monochromatisch. (13)

1.1.2.2 Resonator

Um eine Maximierung der Lichtverstärkung zu erreichen, werden die Atome in einem optischen Resonator gebracht. Wie einführend beschrieben, besteht ein Lasersystem aus einer Energiequelle (Pumpe), einem Lasermedium, zwei Spiegeln und einer lichtverstärkenden Komponente, dem Resonator. In den parallel angeordneten Spiegeln wird das Licht wellenselektiv reflektiert. Diese Reflexion bringt das entstandene Licht dazu, das Lasermedium immer wieder zu durchschreiten. Dadurch kommt es zu einer weiteren Verstärkung des Lichts bis die Laserschwelle erreicht wird und ein Laserstrahl abgefeuert werden kann. Die Laserschwelle ist als Energiebilanz im Resonator definiert und kann nur überschritten werden, wenn die Verstärkung größer ist als die Summe der Verluste im Resonator. (13)

1.1.2.3 Pumpen

Die Emission von Laserlicht ist nur erreichbar, wenn von außen Energie durch sogenannte Pumpen zugeführt wird. Die zugeführte Energie bestimmt die optische Leistung eines Lasers. Als Energiequelle für Festkörperlaser und Farbstofflaser werden meist Blitzlampen oder Diodenlaser verwendet. Bei Gaslasern wird Energie aus elektrischem Strom zugeführt. (13)

1.1.3 Technischer Aufbau des Lasers

Der Grundbestandteil jedes Lasersystems ist der Laserresonator mit der optischen oder elektrischen Anregung. Der Resonator liegt gemeinsam mit der Steuerungselektronik, der elektrischen Versorgung und der Kühlung in einem abgeschlossenen Gehäuse. Nach der Erzeugung im Laser wird das Laserlicht mittels Lichtapplikation an den Patienten, die Patientin herangeführt. Ein Lichtleiter und ein Handstück am distalen Ende des Lichtleiters sind für die Applikation notwendig. Für den Transport des Lichts können im einfachsten Fall Glaslichtleiter verwendet werden. Das Laserlicht wird in den Lichtleiter eingekoppelt. In diesem befindet sich ein Quarzkern, der von einer reflektierenden und einer Schutzschicht umgeben ist. Dort erfolgt der Lichttransport in Längsrichtung. Seitliches Austreten wird durch die Totalreflexion, möglich durch den Unterschied im Brechungsindex zwischen Glas und Reflexschicht, verhindert. Am Ende des Lichtleiters tritt das Laserlicht fast ungeschwächt und defokussiert aus. Daher wird das Licht mittels Optik aus Linsen parallelisiert bzw. fokussiert. Diese Optik befindet sich mit der Auskopplung des Lichtleiters im Handstück des Lasersystems. Am Handstück ist ein Distanzstück angebracht, um einen, für die Re- Fokussierung wesentlichen, Abstand zur Haut einzuhalten. So ist außerdem eine freie Sicht auf das zu behandelnde Hautareal gegeben und die Optik verschmutzt nicht zu schnell. Der Einbau von Spiegelgelenksarmen ist bei Infrarotlasern (z.B. CO₂-Laser) notwendig, um die Lichtleitung über das Quarzglas zu ermöglichen. Die Spiegelgelenksarme bestehen aus drei Gelenken mit Umlenkspiegeln, um den Weg durch das Glasmaterial kurz zu halten, da in den Spiegeln keine Fokussierung erforderlich ist. (13)

1.1.4 Laserparameter

Die verschiedenen Lasersysteme definieren sich durch unterschiedliche Parameter bzw. können durch die Anpassung dieser Parameter unterschiedliche Effekte erzielt werden. So ergeben sich verschiedene Anwendungsgebiete.

1.1.4.1 Wellenlänge

Die Wellenlänge des emittierten Laserlichts ist neben der Gewebebeschaffenheit entscheidend für die Absorptions- und Streuverhältnisse des Laserlichts im Gewebe. Je nach Zielstruktur und gewünschter Wirkung kommen Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen zum Einsatz, denn die resultierenden Wechselwirkungen sind im ultravioletten Bereich, im sichtbaren Bereich und im infraroten Bereich ganz unterschiedlich. Je nach Wellenlänge ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Eindringtiefe ins Gewebe, der Absorption in den Chromophoren und somit den Effekten in den Zielstrukturen. (14) Grundsätzlich hat Laserlicht also eine Wellenlänge, die im Zielchromophor absorbiert wird. Dabei entsteht Hitze und dadurch ein Effekt in der Zielstruktur. (13)

1.1.4.2 Energie und Leistung

Neben der Wellenlänge sind in der Lasertechnik auch Energie und Leistung von Bedeutung.

$$\text{Energie (in Joule)} = \text{Leistung (in Watt)} \times \text{Zeit (in s)}$$

Die Energie des Laserimpulses wird in Joule angegeben. In der Medizin wird die Energiedichte in Joule/cm^2 (oder Watt/cm^2) angegeben, da der Laserstrahl auf eine Hautfläche kreisförmig (r^2) appliziert wird. Die Menge an Energie, die auf die Haut einwirkt, wird als Energiedichte in Hinblick auf den Strahldurchmesser (spot size) bezeichnet. Der Strahldurchmesser kann am Lasergerät eingestellt werden und richtet sich nach der Indikation.

$$\text{Energiedichte} = (\text{Leistung} \times \text{Zeit}) / \text{Fläche}$$

Die Energie und Intensität des Laserlichtes mit der Größe Watt/cm^2 beschrieben und ist abhängig von Frequenz und Wellenlänge. Die Intensität des Laserlichts ist meist höher als die des kohärenten Lichts und erzielt unterschiedliche Effekte im Gewebe. (13)

1.1.4.3 Zeit und Impulsdauer

Bei Lasersystemen in der Medizin kommen zwei unterschiedliche Formen bezüglich der Impulsdauer zur Anwendung. Laserlicht kann entweder kontinuierlich (Dauerstrichlaser/cw-Laser: continuous wave) oder als kurzer Lichtimpuls emittiert werden. Dauerstrichlaser (z.B. Argonlaser, CO_2 -Laser) verlangen eine kontinuierliche Energiezufuhr in das Lasermedium. Wesentlich häufiger werden in der Medizin gepulste Laser eingesetzt. Hier werden die Impulsdauern im Millisekunden (10^{-3} s) oder Mikrosekundenbereich (10^{-6} s) durch zeitlich begrenzte Energiezufuhr erreicht. Für Impulse im Nanosekunden (10^{-9} s) und Picosekundenbereich (10^{-12} s) ist zusätzlich ein Güteschalter (QS = quality switch) notwendig.

Die Zielstruktur wird für eine begrenzte Zeit, die Impulsdauer, erhitzt. Innerhalb einer bestimmten Zeit, der thermischen Relaxationszeit, breitet sich Wärme von der erhitzten Zielstruktur in die Umgebung aus. Ist die Impulsdauer kürzer als die thermische Relaxationszeit, bleibt die Zerstörung auf die Zielstruktur beschränkt. (13)

1.1.4.4 Zielstruktur und Eindringtiefe

Die Eindringtiefe ist wie die Streuung der Laserstrahlung in der Haut wellenlängenabhängig. Im sichtbaren und nahen Infrarotbereich nimmt die Eindringtiefe mit zunehmender Wellenlänge zu, die Streuung dagegen ab. Im Gewebe finden Streuung und Absorption gleichzeitig statt. Dadurch verändert sich die effektive Absorption und die Lichtintensität nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Bei sehr hohen Wellenlängen über 1000 nm kommt es zu einer vermehrten Absorption von Wasser, was zu einer Abnahme der Eindringtiefe führt. Der Strahldurchmesser hat auch Einfluss auf die Eindringtiefe des Laserstrahls. So werden bei kleinem Durchmesser relativ mehr Photonen gestreut und die Eindringtiefe nimmt ab. Bei großem Durchmesser werden hingegen relativ mehr Photonen in den Strahl zurückgestreut und die Eindringtiefe nimmt zu. Wenn bei gleicher

Energiedichte der Strahldurchmesser eines Nd:YAG-Lasers von 1,0 mm auf 2,0 mm vergrößert wird, nimmt die Koagulationstiefe um etwa 40% zu. (13)

Je nach Wellenlänge haben die Laser also verschiedene Eindringtiefen. Während die Laser im sichtbaren Bereich (z.B. Rubin-, Alexandritlaser) für Ziele in der oberflächlichen Dermis (oberflächliche Pigmente, Kapillargefäße) gut geeignet sind, dringt der Neodym-YAG-Laser bei 1064 nm im nahen Infrarotbereich sehr tief in das Gewebe ein. Eine sehr oberflächliche Wirkung zur Hautablation findet im mittleren Infrarotbereich aufgrund der hohen Wasserabsorption bei CO₂- und Erbium-YAG-Lasern statt. (14)

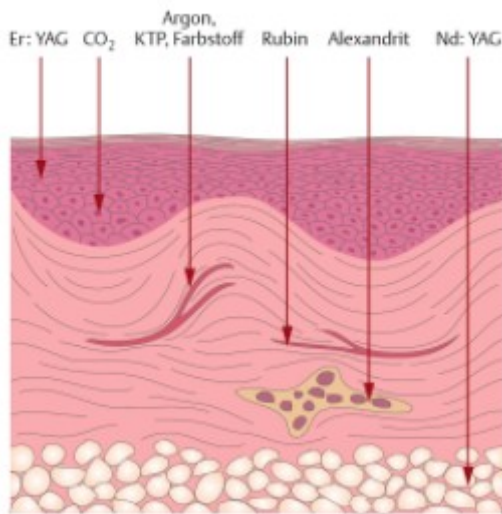


Abbildung 3: Eindringtiefe verschiedener Lasersysteme

1.2 Laser in der Medizin

Die Lasertechnik ist von Beginn an eng mit Anwendungen in der Medizin verknüpft. Die Charakteristik der Laserstrahlung liegt darin, dass sie eine gut steuerbare Energiequelle ist, die zur gezielten Erhitzung von Gewebe, zur Zerstörung von Zielstrukturen oder zur selektiven Anregung photochemischer Prozesse eingesetzt werden kann. (15)

So begann man bereits kurz nach der Erfindung des ersten Lasers die neue Lichtquelle auch in der Medizin einzusetzen. Schon 1961 wurde der Laser in der Ophthalmologie zur Behandlung der Retina verwendet. Zu Beginn wurde die Lasertechnik in der Medizin hauptsächlich in der Chirurgie als Skalpell verwendet, später wurden die verschiedenen Laser spezifisch eingesetzt. Es gibt aber nicht nur einen medizinischen Laser, sondern es

sind verschiedene Lasertypen und Wellenlängen einsetzbar. Hauptvorteil des Lasers in der Medizin ist die Möglichkeit, die Laserenergie über flexible Fasern in den Körper hineinzuleiten. (16)

In der Medizin kommt die thermische Wirkung der Laserstrahlung im Wesentlichen zum Verdampfen und Koagulieren von Gewebe zum Einsatz. Die unterschiedlichen thermischen Wirkungen führen zu reversiblen und irreversiblen Gewebeschädigung und diese können anhand der laserinduzierten Temperatur und der Dauer der Temperatureinwirkung charakterisiert werden. (17) Heute hat sich der Laser in verschiedenen Fachgebieten einen festen Platz erworben. Je nach gewünschter Gewebewirkung, werden die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Lasersysteme herangezogen. (18)

LASER	MODUS	ANWENDUNGSFELD
Ar ⁺ (Cr ⁺)	cw	Dermatologie, Ophthalmologie, HNO
KTP	gepulst	Dermatologie, Plastische Chirurgie
FPDL (flashlamp pumped dye laser)	gepulst	Dermatologie (585 nm), Urologie (504 nm)
Nd:YAG	cw	Chirurgie, Urologie, Gynäkologie, Neurochirurgie, Gastroenterologie, Pulmologie
Nd:YAG	gepulst	Ophthalmologie, Lithotripsie
CO ₂	cw	Dermatologie, Chirurgie, HNO, Gynäkologie, Neurochirurgie, Plastische Chirurgie
Diode	cw	Dermatologie (810, 940, 980, 800 nm), Photodynamische Therapie (630 nm)
Excimer	gepulst	Angiologie, Ophthalmologie
Rubin	gepulst	Dermatologie
Alexandrit	gepulst	Dermatologie

Tabelle 1: Medizinische Anwendungsgebiete der verschiedenen Lasersysteme (18)

1.2.1 Laser in der Dermatologie

Die Anwendung von Lasersystemen ist auch aus der Dermatologie nicht mehr wegzudenken. Ihr Einsatz erweist sich als relativ unkompliziert, da die Haut als oberflächlichstes Organ leicht zugänglich ist.

Die ersten Laser erzeugten einen kontinuierlichen Laserstrahl (continuous wave/cw-Modus), welcher hauptsächlich von dermalen Zielstrukturen absorbiert wird. Dass die Laserenergie durch Wärmeleitung auch auf benachbarte Hautstrukturen einwirkten, erwies sich als limitierender Faktor. Der Argonionenlaser war der erste klinisch weitverbreitet angewendete Laser. (19)

Heute eröffnet sich der Laseranwendung in der Dermatologie ein breites Indikationsspektrum. Zum einen kommen Laser für medizinisch induzierte Therapie von Hauterkrankungen zu Einsatz, zum anderen werden Lasersysteme zur Behebung kosmetisch-ästhetische beeinträchtigender Hautveränderungen verwendet. (20) Aus den verschiedenen Wellenlängen der Lasersysteme ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Eindringtiefe, Absorption und der daraus resultierenden Effekte. Prinzipiell werden durch Lasereinwirkung Koagulation, Vaporisation und Ablation erreicht. Für den klinischen Einsatz in der Dermatologie sind Laser mit Emissionslinien im UV-Bereich, im sichtbaren Bereich, aber auch im nahen und mittleren Infrarotbereich von Bedeutung.

Dermatologische Indikationen zur Laseranwendung:

Vaskuläre Fehl- und Neubildungen: z.B. Naevus flammeus, Hämangiome,

Teleangiektasien, Besenreißer

Pigmentierte Hautveränderungen: z.B. Aktinische Lentigines, Nävuszellnävi,

Tätowierungen

Narben und Keloide

Benigne Tumoren: z.B. Xanthelasma, Neurofibrom, Rhinophym, Seborrhoische Keratosen

Maligne Tumoren: z.B. Aktinische Keratose, Mb. Bowen, Leukoplakie

Dermatosen: z.B. Vulgäre Warzen, Condyloma acuminata

Ästhetische Indikationen: z.B. Skin Resurfacing, Skin Rejuvenation

Laserepilation: z.B. Hypertrichose, Haarentfernung

1.2.2 Anwendung von Lasersystemen in der Dermatologie

Es gibt verschiedenartige Laser die auf unterschiedlichen Gebieten zum Einsatz kommen. Man kann Lasersysteme, je nach Aggregatzustand des Lasermediums, in Feststoff-, Gas-, Flüssigkeits-, Halbleiter-/Dioden- und freien Elektronenlaser einteilen. (18)

Die Ausnutzung der verschiedenen Parameter wie Wellenlänge, Strahldurchmesser, Strahldivergenz, Leistungs- und Energiedichte, Leistungs-Zeitdauer-Verlauf, Puls-Wiederholfrequenz, Scan- bzw. Ablenkgeschwindigkeit, Flächenmuster usw. ermöglicht den Einsatz von Lasern in unterschiedlichen Wirkungsweisen. So lassen sich mit einem fokussierten Laserstrahl Gewebe durchtrennen, während bei gleicher Leistung mit einem defokussierten oder aufgeweiteten Laserstrahl eine koagulierende Wirkung erzielt wird, da unterschiedliche Leistungsdichten vorliegen. Durch Adaptierung des Parameters Einwirkdauer, durch gepulsten oder gütegeschalteten Betrieb, lässt sich der jeweilige Effekt bei gleicher Wellenlänge verändern. Das bedeutet aber nicht, dass mit einem einzigen Laser alle medizinischen Indikationen abgedeckt werden können. (5)

1.2.2.1 Gepulste und Gütegeschaltete Laser

Extrem hohe Leistungsdichten von über 10^8 Watt/cm² können durch gepulste und gütegeschaltete Laser (Q-switch-Mode) erzielt werden. Anders als die kontinuierlich emittierenden Dauerstrichlaser erzeugen sie hochenergetische Einzelpulse im Mikro- und Nanosekundenbereich. In der Anwendung treten die thermischen Wechselwirkungen in den Hintergrund. Bei entsprechender Wellenlänge kommt es durch photoablativ Effekte mit einer direkten Sprengung molekularer Brücken zur oberflächlichen Ablation der Haut ohne nennenswerte thermische Kollateralschäden (Erbium-YAG-Laser). (14) Der gepulste Modus wird vor allem bei vaskulären Indikationen angewendet, da das Laserlicht in Hämoglobin gut absorbiert wird und es zu einer thermischen Schädigung vaskulärer Strukturen kommt. Bei umschriebenen Läsionen, wie Lippenangiomen und Teleangiektasien, kommt der gepulste Modus des Nd:YAG Lasers zum Einsatz. Im gütegeschalteten Modus wird eine sehr kurze Impulsdauer von wenigen Nanosekunden bei einer Energiedichte von 1-5 Watt/cm² erreicht. Mit diesem Modus können pigmentierte Hautveränderungen behandelt werden. (13)

1.2.2.2 Dauerstrichlaser („continuous wave“)

Dauerstrichlaser emittieren kontinuierlich das Laserlicht und ermöglichen so getaktete Pulslängen bis in den Millisekundenbereich. Bei langen Bestrahlungszeiten von Sekunden bis Minuten und niedrigen Energiedichten von 10^{-3} bis 1 Watt/cm^2 kommt es zu photochemischen Effekten, die z.B. in der Photodynamischen Therapie zur Anwendung kommen. Bei kürzeren Pulslängen und höheren Leistungsdichten bis 10^3 Watt/cm^2 kommt es zu unterschiedlich starken thermischen Schädigungen, wie sie für die Applikationen in der Dermatologie wesentlich sind. Je nach gewählten Laserparametern lassen sich unterschiedliche Wirkungen, reversible thermische Schädigung (Ödemzone), Gewebekoagulation ($>60^\circ\text{C}$), Karbonisation ($>150^\circ\text{C}$) und Vaporisation ($>300^\circ\text{C}$) im Gewebe erzielen. Dies wird auch zur Gewebedisektion bei fokussierter Applikation und entsprechender Leistung als Lichtskalpell zum Schneiden genutzt.(14)

1.2.2.3 Nd:YAG-Laser (1064 nm)

Wellenlänge	1064 nm
Aktives Medium	Neodym (Nd) -Ionen dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-(YAG) Kristall
Pumpen	hochenergetische Blitzlampen (HBL), Diodenlaser
Modus	gepulster Modus, gütegeschalteter Modus, kontinuierlicher Modus
Zielchromophore	Wasser, Pigmente, Hämoglobin
Indikationen	Pigmentierte und vaskuläre Hautveränderungen, Haarepilation, Koagulation

Tabelle 2: Eigenschaften des Nd:YAG-Lasers (13)

Der Nd:YAG-Laser ist ein Festkörperlaser, der als aktives Medium einen Neodym-dotierten Yttrium-Aluminium-Granat-(YAG) Kristall verwendet und infrarote Strahlung mit einer Wellenlänge von 1064 nm emittiert. Er ist universell einsetzbar und gehört zu den vielseitigsten Lasern in der Dermatologie und ästhetischen Medizin. Im YAG-Kristall kann seine Energie gespeichert werden, um sie anschließend gepulst abzugeben. Zielchromophor ist vorwiegend Wasser, im gepulsten Modus sind auch Hämoglobin und

Melanin, im gütegeschalteten Modus exogene Pigmente und Melanin von Bedeutung. Im kontinuierlichen Modus ist der cw-Nd:YAG-Laser, wie jeder andere Laser in diesem Wellenlängenbereich, für eine unspezifische wasserabhängige Koagulation von Gewebe einsetzbar. Je nach verwendeter Leistung und Strahldurchmesser ist eine tiefe Koagulation, eine Vaporisation bzw. das Schneiden von Gewebe oder eine Kombination möglich. Mit gepulste Nd:YAG-Lasern im Nano- und Picosekundenbereich (Q-switch Nd:YAG) kann eine Photodisruption erreicht werden und daher sind sie in der Ophthalmologie, z.B. zur Nachstarbehandlung, etabliert.(18)

In der Dermatologie kommt der Nd:YAG-Laser aber fast ausschließlich zur unspezifischen Koagulation zum Einsatz, da sich die Wundheilung der Skalpellenchirurgie unterlegen erwiesen hat. Hauptindikationen sind die Behandlung von größeren Hämangiomen und vaskulärer Malformationen, sowie die interstitielle Behandlung von Blutgefäßen. (13)

1.2.2.4 KTP- Laser Nd:YAG-Laser (532 nm)

Wellenlänge	532 nm (Frequenzverdoppelt)
Aktives Medium	Neodym (Nd) -Ionen dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-(YAG) Kristall
Pumpen	hochenergetische Blitzlampen (HBL), Diodenlaser
Modus	gepulster Modus, gütegeschalteter Modus
Zielchromophore	Pigmente, Hämoglobin
Indikationen	Pigmentierte und vaskuläre Hautveränderungen

Tabelle 3: Eigenschaften des KTP-Lasers (13)

Beim KTP-Laser wird die Wellenlänge durch Vorschalten eines frequenzverdoppelnden (fd) Kristalls (Kaliumtitanylphosphat) auf eine Wellenlänge von 532 nm halbiert. So wird aus dem normalen Nd:YAG Laser der fd-Nd:YAG Laser.

Um schwarz-blauen Tätowierungen zu entfernen, werden vom Neodym-YAG-Laser gütegeschaltet extrem kurze Pulse mit hoher Energie produziert. Durch Vorschalten eines Frequenzverdoppelnden Kristalls kann die Wellenlänge des Lasers auf 532 nm halbiert werden. Die extrem kurzen Laserpulse mit hoher Energie werden im gütegeschalteten Modus produziert und zur Entfernung von farbigen Tätowierungen verwendet. Eine weitere Option des Nd:YAG-Lasers ist der frequenzverdoppelte langgepulste Modus mit einer Wellenlänge von 532 nm. Er kommt vor allem bei Gefäßerweiterungen zur Anwendung, da die Gefäße durch die Energie dauerhaft verschlossen werden und nicht mehr zu sehen sind. Auch Hämangiome, Spider Naevi und Naevus flammeus können mit dieser Wellenlänge gut behandelt werden. (21)

1.2.2.5 Alexandritlaser (755 nm)

Wellenlänge	755 nm
Aktives Medium	Cr ³⁺ (Chrom) -Ionen
Pumpen	hochenergetische Blitzlampen (HBL)
Modus	gepulster Modus, gütegeschalteter Modus
Zielchromophore	Pigmente, Hämoglobin
Indikationen	Pigmentierte und vaskuläre Hautveränderungen, Haarepilation

Tabelle 4: Eigenschaften des Alexandritlasers (13)

Zielchromophore: Hämoglobin, Pigmente

Der Alexandritlaser ist, wie der Rubinlaser, ein Festkörperlaser, in dem Cr³⁺-Ionen in einem Glasstab mittels Blitzlampen zur Emission von Photonen angeregt werden. Die Wellenlänge dieser Laseremission beträgt 755 nm und die Energie kann auch hier mehrere Joule/Impuls betragen. Auch dieser Laser kann mit oder ohne Güteschaltung verwendet werden, daraus ergeben sich wieder Impulsdauern im Nano- und Millisekundenbereich. Seit einiger Zeit werden auch Impulsdauern im Picosekundenbereich erreicht. Die verwendeten Wellenlängen des Alexandritlasers und des Rubinlasers liegen nur etwa 60 nm auseinander. Bei einer Wellenlänge von 755 nm ist die Absorption von Licht im Pigment Melanin zwar etwa um 20% kleiner als beim Rubinlaser, dafür ist die Eindringtiefe des langwelligeren Lichts in die Haut etwas größer. Indikationsspektrum und Wirkung der beiden Laser ist ähnlich. Da die Lichtabsorption im Hämoglobin bei 755 nm etwas höher ist, können mit dem Alexandritlaser auch größere Gefäße (z.B. Besenreiser) behandelt werden. (13)

1.2.2.6 Rubinlaser (694 nm)

Wellenlänge	694 nm
Aktives Medium	Cr ³⁺ (Chrom) – Ionen
Pumpen	hochenergetische Blitzlampen (HBL)
Modus	Gepulster Modus, gütegeschalteter Modus,
Zielchromophore	Pigmente
Indikationen	Pigmentierte Hautveränderungen, Haarepilation

Tabelle 5: Eigenschaften des Rubinlasers (13)

Der erste jemals realisierte Laser war ein Rubinlaser. Er wurde 1960 von Theodore Harold Maiman entwickelt. Das aktive Verstärkermaterial bestand aus einem Rubinkristall, welcher durch die Einstrahlung von Licht elektronisch angeregt wurde. Der Laserstrahl wurde aus der Stirnfläche des Rubinstabes emittiert. (9) Frühere Rubinlaser wiesen technische Schwächen, wie einen geringen Wirkungsgrad oder lokale Intensitätsüberhöhung auf. Heute verwendete, moderne Rubinlaser sind allerdings kompakte und sehr zuverlässige Systeme.(18)

Der Rubinlaser zählt zu den Festkörperlasern, in dem Cr³⁺Ionen (Chrom) in einem Glasstab mittels Blitzlampen zur Emission von Photonen angeregt werden. Der Rubinlaser hat eine Wellenlänge von 694 nm und kann mit oder ohne Güteschaltung verwendet werden. Seine Impulsdauern befinden sich im Nano- und Millisekundenbereich. Das Laserlicht wird im Pigment Melanin absorbiert, weshalb der Rubinlaser zur Entfernung von Tätowierungen verwendet wird. (13) Im gütegeschalteten Modus (Q-switch-Rubinlaser, QSRL) liefert der Rubinlaser hochenergetisches Licht mit einer Pulslänge von 20-40 ns. (18) Mit seiner Hilfe können blaue und schwarze Tätowierungen, sowie oberflächliche pigmentierte Hautveränderungen (Lentigines, Café-au-lait-Flecken) behandelt werden. Im gepulsten Modus mit längeren Pulsdauern (0,3-5 ms) findet der Rubinlaser auch zur Haarepilation Anwendung. (18) Allerdings ist das Risiko der Hypopigmentierung bei der Applikation auf stärker pigmentierter Haut, aufgrund der hohen Melaninabsorption, erhöht. (13)

1.2.2.7 Blitzlampen – gepulster Farbstofflaser (585 - 600 nm)

Wellenlänge	585 nm – 600 nm
Aktives Medium	Farbstoffmoleküle (Rhodamin 6G, Sulforhodamin B)
Pumpen	hochenergetische Blitzlampen (HBL)
Modus	FPDL (flash lamp pumped dye laser), LPTDL (long pulsed tunable dye laser)
Zielchromophore	Hämoglobin
Indikationen	Vaskuläre Hautveränderungen

Tabelle 6: Eigenschaften des gepulsten Farbstofflasers (13)

Das Prinzip des Farbstofflasers (dye laser) basiert auf der Anregung einer Farbstofflösung zur Fluoreszenz. Beim FPDL (flash lamp pumped dye laser) sorgen Lichtblitze einer hochenergetischen Blitzlampe für die Energiezufuhr und die nötige Inversion im aktiven Lasermedium. Die Farbstoffmoleküle (z.B. Rhodamin 6G) werden in einem Lösungsmittel verflüssigt und in einem Glasrohr zwischen den Resonatorspiegeln platziert. Mittels der Anregung durch die Blitzlampen, parallel zum Farbstoffrohr, wird Licht z.B. im gelb-roten Spektralbereich emittiert. Die Wellenlänge (z.B. 585 nm) wird innerhalb des Verstärkungsprofils des verwendeten Laserfarbstoffs eingestellt. In der Regel hat der FPDL eine Wellenlänge von 585 nm, diese kann in einem Bereich von 585 nm bis 600 nm variiert werden, und eine Impulsdauer von 0,45 ms. Weiters gibt es einen langgepulsten Farbstofflaser (LPTDL) mit variabler Wellenlänge von 585 nm bis 600 nm und einer Impulsdauer von mindestens 1,5 ms.

Indikationen für den FPDL sind vaskuläre Hautveränderungen, wie Naevus flammeus, kindliche Hämangiome und Teleangiektasien, da Gefäße der Haut selektiv koaguliert werden können. Längere Impulsdauern (LPTDL) kommen bei großkalibrigen, oberflächlichen Gefäßen, wie Besenreisern, zur Anwendung.

Je nach angewandter Energie und Impulsdauer kann nach der Behandlung zu blaugrau bis

blauschwarzer Purpura im bestrahlten Hautareal kommen. Diese Verfärbungen sind reversibel und bilden sich innerhalb von 7- 14 Tagen zurück. Als Nebenwirkungen können, je nach verwendeter Energiedichte und Pigmentierungsgrad der Epidermis, Bläschen und Krusten auftreten. Häufig treten nach der Behandlung reversible Hypo- und Hyperpigmentierungen auf. (13)

1.3 Die menschliche Haut

Die Haut (das Integument) stellt mit einer Gesamtfläche von 1,5 bis 2 m², einer Dicke von 1,5 bis 4 mm und einem Gewicht von 3,5 bis 10 kg das größte Organ des Menschen dar. Ihr Relief ist individuell unterschiedlich. Sie besteht grob aus 3 Schichten

Epidermis (Oberhaut)

Dermis (Korium, Lederhaut)

Subkutis (Unterhautfettgewebe, Hypodermis)

Epidermis und Dermis werden zusammen als Kutis bezeichnet und bilden gemeinsam mit der Subcutis eine Funktionseinheit, die den Menschen vor Dehydration, pathologischen Keimen und Umwelteinflüssen schützt.

Weiters sind verschiedene Adnexe (Hautanhangsgebilde), wie Haarfollikel, Drüsen und Nägel, integrale Bestandteile. (8)

1.3.1 Epidermis

Die mehrschichtige Epidermis (Oberhaut) ist die oberste Schicht der Haut und hat eine Dicke von etwa 0,1 mm. (22) Sie besteht aus vier horizontalen Schichten: Stratum basale, Stratum spinosum, Stratum granulosum und Stratum corneum.

Das verhornende Plattenepithel ektodermaler Herkunft besteht zu mehr als 95% aus speziellen, ziegelartig geschichteten Hautzellen, den Keratinozyten. Im Laufe ihrer Differenzierung wandern die Keratinozyten langsam durch die verschiedenen Schichten der Epidermis zur Hautoberfläche und differenzieren sich dort zu flachen, abgestorbenen Korneozyten. Sie bilden die äußere Begrenzung der Haut, die Hornschicht. Schließlich werden sie bei der Desquamation als tote Hornzellen abgestoßen und sorgen so ca. alle 4 Wochen für eine kontinuierliche Hauterneuerung. Daher stellen die unterschiedlichen

Zellen der Epidermis die verschiedenen Differenzierungsstadien derselben Zelle dar. Die Epidermis funktioniert wie ein holokrines Organ, dessen Endprodukt die Hornschicht ist. Im Normalfall brauchen die Keratinozyten etwa zwei Wochen, bis sie vom Stratum basale an die Grenze der Hornschicht gewandert sind. Etwa 26 bis 42 Tage benötigen sie zum Durchwandern der gesamten Epidermis. Während der Keratinisierung, der Verhornung, kommt es neben Größenzunahme und Abflachung der einzelnen Zellen auch zu Dehydrierung, struktureller Reorganisation, Spezialisierung des Zellmetabolismus und Expression spezifischer Zellorganellen und Rezeptoren.

Die Epidermis verleiht der Haut ihr typisches Erscheinungsbild und Pathologien können zur Austrocknung mit sichtbarer Rauigkeit und Schuppung der Hautoberfläche führen. (23) Weiters beherbergt die Epidermis Melanozyten, die Pigmentzellen der Haut, und Langerhans-Zellen, sowie das Mikrobiom, zahlreiche physiologisch die Haut besiedelnde Mikroorganismen. (22)

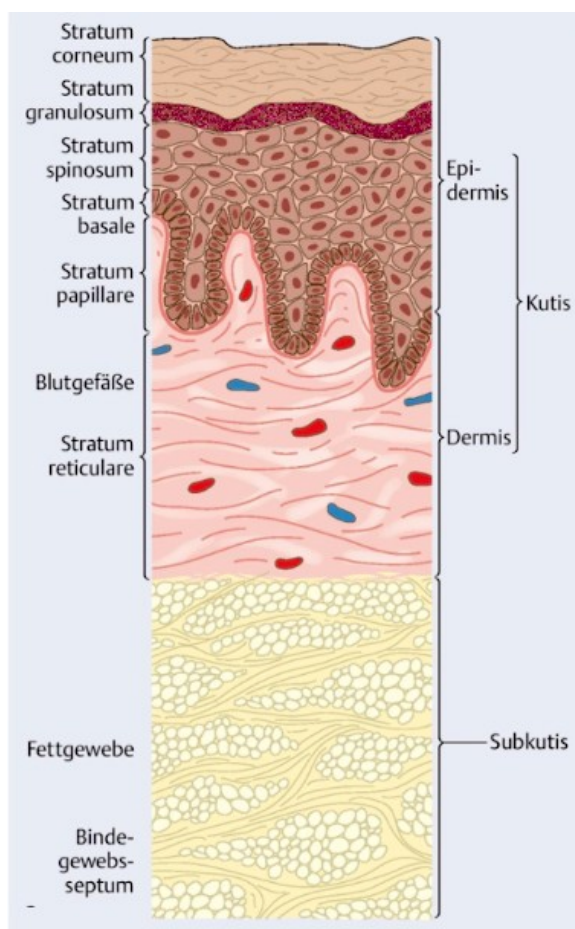


Abbildung 4: schematischer und histologischer Aufbau der Haut (8)

Zwischen Epidermis und Dermis, unterhalb des Stratum basale der Epidermis befindet sich die Basalmembran. Sie besteht aus der weniger elektronendichten Lamina lucida (25 bis 50

nm) und der darunter gelegenen, elektronendichten Lamina densa („Basallamina“, 20 bis 50 nm) und dem sublaminären Raum. Mittels Hemidesmosomen erfolgt die Verankerung der epidermalen Basalzellen an die Basalmembran. Durch verschiedene fibrilläre Proteine ist die Basallamina mit dem Bindegewebe der darunterliegenden Dermis verbunden. (23)

Das Stratum basale, die tiefste Schicht der Epidermis, schließt direkt an die Basallamina an und enthält epidermale Stammzellen sowie Vorläuferzellen (Progenitorzellen). Hier finden in der gesunden Epidermis die Mitosen statt.

Das Stratum spinosum, aufgebaut aus zwei bis fünf Schichten polygonaler Zellen, schließt an die Basalschicht an. Durch Desmosomen bildet sie ein stabiles Gerüst und ist charakterisiert durch den Beginn des Verhornungsprozesses der Keratinozyten, der Keratinisierung.

Im einschichtigen Stratum granulosum befinden sich Keratinozyten mit im Inneren eingeschlossener Keratohyalingranula. Hier findet der Verlust des Zellkerns und der Zellorganellen statt.

Das Stratum corneum stellt die oberste Epidermisschicht dar. Sie besteht aus kernlosen, abgeflachten Keratinozyten, den Korneozyten. Die Korneozyten stellen das Endprodukt der Differenzierung der Keratinozyten dar. Sie präsentieren sich als polygonale Plättchen mit einer Dicke von 5 μm und einem Durchmesser von 30 μm . Als Hornschicht bilden sie die Grenze zur Außenwelt und eine mechanisch und chemisch robuste Diffusionsbarriere. (24)

1.3.2 Dermis

Das bindegewebige Gerüst unter der Epidermis wird von der Dermis (Lederhaut, Korium) gebildet. Sie ist ein hoch elastisches und reißfestes Gewebe, das sich bis zur darunterliegenden Hautschicht, der Subkutis, erstreckt und erscheint makroskopisch als zugfestes Gewebe mit weißlicher Farbe. Die Dermis besteht hauptsächlich aus zwei Schichten, Stratum papillare und Stratum reticulare, mit Bindegewebszellen, den Fibrozyten und Fibroblasten, und Bindegewebsfasern, Kollagen und Elastin, die in die extrazelluläre Matrix eingebettet sind. Dominierende Zelle in der Dermis sind die Fibroblasten. Diese spindelförmigen Zellen mit langen Fortsätzen, die ein Netz bilden,

synthetisieren alle Fasern und die extrazelluläre Matrix (Grundsubstanz). Monozyten wandern vom Knochenmark über die Gefäße in die Dermis ein und differenzieren dort zu Histozyten. Makrophagen, die aktive Form der Histozyten, phagozytieren und speichern abgestorbene Zellen, Abbaustoffe wie Melanin, Fette, Proteine und Antigene und sind an immunologischen Reaktionen beteiligt. Auch Mastzellen, Melanozyten, Langerhans-Zellen und Lymphozyten kommen in der Dermis vor. (8)

Durch die in ihr verlaufenden Nerven, Blut- und Lymphgefäße stellt die Dermis den Versorgungsteil der Haut dar.

Kollagenfasern, zusammengesetzt aus Kollagenfibrillen, sind die wichtigsten Fasern der Dermis. Sie formen, parallel zur Hautoberfläche, ein Netzwerk und bedingen die mechanische Stabilität und Dehnbarkeit der Dermis wesentlich. Typ-I-Kollagen ist mengenmäßig das Hauptstrukturprotein des Bindegewebes. Durch Verankerungsfibrillen (aus Kollagen VII) wird die Epidermis in der Dermis verankert. Diese ziehen von der Lamina densa der Basalmembran zu Kollagenfasern in der oberen Dermis. Neben den Kollagenfasern sind die elastischen Fasern, mit denen sie häufig verbunden sind, die wichtigsten Fasern. Sie bilden subepidermal ein feines Netz, den Elastikaplexus, in der tieferen Dermis bilden sie hingegen gewellt verlaufende Bänder. Bestehend aus Elastin und Fibrillin sind die elastischen Fasern für die Festigkeit und Elastizität der Haut verantwortlich. (8)

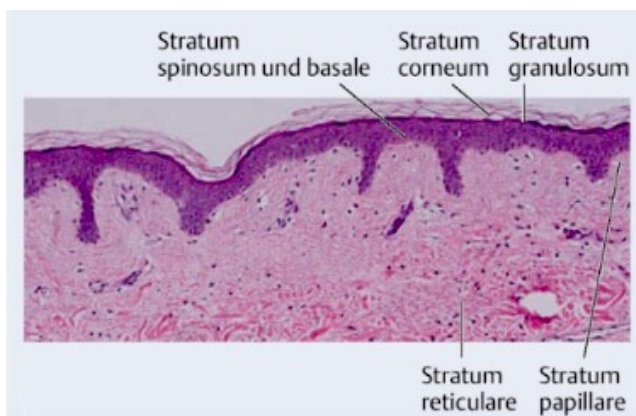


Abbildung 5: Histologischer Aufbau der Kutis (8)

Epidermis und Dermis sind durch eine sägezahnartige Verbindung, die dermo-epidermale Junctionszone, miteinander verbunden. Sie ist für die mechanische Widerstandskraft der Haut mitverantwortlich und dient als Reserve bei Dehnung. Als Reteleisten (Retezapfen) werden die Vorwölbungen der Epidermis bezeichnet, die komplementären Ausstülpungen der Dermis „dermale Papillen“. Die Dermis histologisch in Stratum papillare und Stratum reticulare unterteilt. (siehe Abb.5) Das Stratum papillare bildet den oberflächlichen, schmalen Teil der Dermis und verfügt über feinere Kollagenfasern, einen höheren

Zellgehalt und eine bessere Vaskularisierung als das Stratum reticulare. Das Stratum reticulare bildet die tiefe, breitere Schicht und besteht aus reichlich Kollagenfaserbündel und elastischen Fasern. Im Gegensatz zum Stratum papillare sind hier fast keine Zellen und Gefäße zu finden. (23)

Die Dermis ist der Subkutis, einem Fettgewebepolster, der in der Tiefe den Faszen aufruht, aufgelagert. (22) Sie beherbergt auch die Hautanhangsgebilde.

1.3.2.1 Hautanhangsgebilde

Zu den Hautanhangsgebilden, den Adnexen, zählen Schweiß- und Talgdrüsen, Haarfollikel und Nägel. Funktionell und morphologisch bilden die Haaranlagen und Talgdrüsen eine gemeinsame Einheit. Trotz ihres epidermalen Ursprungs liegen die Adnexe tief in der Dermis. Die Schweiß- und Talgdrüsen bilden die, auf der Hornschicht liegende, Lipid-Wasser-Schicht. Talgdrüsen sind lobuläre Drüsen, die holokrin sezernieren und in den Haarfollikelkanal einmünden. Die Größe, Aktivität und Dichte der Drüsen ist individuell unterschiedlich. So haben Menschen mit wenigen aktiven Talgdrüsen eine schwächer ausgebildete Talgschicht, die durch Verdunstung leichter Feuchtigkeit verliert und dadurch eine fettärmere und trockenere Haut. Weiters kann die Dicke und Zusammensetzung der Lipid-Wasser-Schicht durch die unterschiedliche regionale Verteilung der Talg- und Schweißdrüsen auch intraindividuell stark variieren. In der Haut kommen neben den Talg und apokrinen Drüsen, die mit dem Haarfollikel verbunden sind auch ekkrine Schweißdrüsen ohne Beziehung zum Haarfollikel vor. (8)

Die ekkrinen Schweißdrüsen des Menschen sind am gesamten Integument zu finden, wobei sie in einigen Regionen, wie Handflächen und Fußsohlen, in größerer Anzahl vorkommen. Sie produzieren geruchlos, elektrolytreichen Schweiß, der erst nach der Zersetzung durch die, in der Epidermis angesiedelten, Bakterien den charakteristischen Geruch entwickelt. Apokrine Schweißdrüsen (Duftdrüsen) befinden sich nur in bestimmten Regionen, wie Axillen und Anogenitalbereich. (23)

1.3.2.2 Gefäße und Nerven der Haut

Die Versorgung der Haut erfolgt durch ein arterielles und venöses Netz, das nur in Dermis und Subkutis zu finden ist. Die Epidermis besitzt keine Blutversorgung. Die Arteriolen gelangen aus den tiefen Gefäßen in die Subkutis und werden weiter in die Dermis geführt.

Diese vertikal zur Hautoberfläche verlaufenden Arteriolen sind durch zwei parallel zur Hautoberfläche verlaufende Plexus miteinander verbunden. Im unteren Stratum papillare verläuft der superfizielle Plexus, im unteren Stratum reticulare an der Grenze zur Subkutis verläuft der tiefe Plexus. Die Kapillarschleifen, die sogenannten Papillengefäße, verlaufen in den dermalen Papillen. Das Blut durchläuft diese Kapillarschleife und strömt über analog zur arteriellen Versorgung laufende venöse Gefäße wieder in die Tiefe. Auch im venösen System gibt es einen oberflächlichen und einen tiefen waagrecht verlaufenden Plexus. Ausserdem gelangt die Lymphe über einen oberflächlichen und einen tiefen Lymphplexus in die nächstgelegenen Lymphknoten.

Die sensible Versorgung der Haut erfolgt über ein dichtes Netzwerk sensibler Nerven, deren Endungen teils bis in die Epidermis reichen. Sinneswahrnehmungen, wie Druck, Vibration, Schmerz, Wärme und Kälte, werden von afferenten Nervenfasern aufgenommen und an das zentrale Nervensystem weitergeleitet. (23)

1.3.3 Subkutis

Die Subkutis, das Unterhautfettgewebe, die Hypodermis, liegt als tiefste Schicht der Haut unter der Dermis und besteht aus Fettgewebe, unterteilt durch lockeres Bindegewebe. Makroskopisch erscheint die Subkutis als in Läppchen angeordnetes, gelbliches Gewebe. In der Tiefe stellt die allgemeine Körperfazie die Grenze zu tiefer gelegenen Geweben, wie Muskulatur, dar. Die Subkutis spielt in der Funktion eines mechanischen Polsters und als Energiereserve des Körpers eine Rolle. Im die Fettgewebsläppchen unterteilenden Bindegewebe kommen die Kollagensubtypen I, III und V vor. (23)

1.3.4 Einteilung der Hauttypen nach Pigmentierung

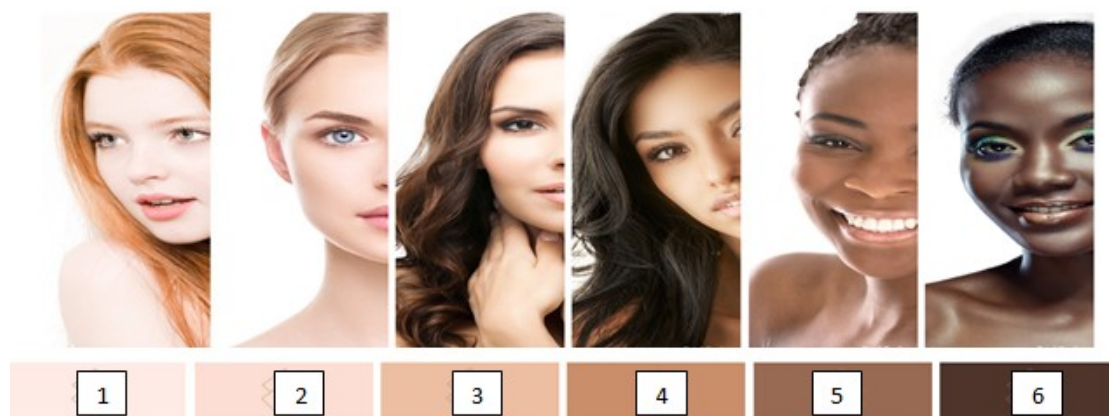


Abbildung 6: Hauttypen I-VI nach Fitzpatrick (25)

Entsprechend der individuellen Reaktionen auf UV-Licht und den Grad der dadurch entstehenden Pigmentierung differenziert man verschiedene Hauttypen. Die unterschiedlichen Pigmentierungstypen der menschlichen Haut nach Fitzpatrick (Typ I-VI) unterscheiden sich nicht durch ihre Anzahl an Melanozyten, sondern durch die Mengenrelation der beiden Melaninsubtypen, dem schwarzen Eumelanin und dem roten Phäomelanin, wie auch der Form, der Größe und der Anzahl ihrer Melanosomen. Im Zytoplasma werden Melanosomen, die durch melanozytäre Dendriten an benachbarte Keratinozyten abgegeben wurden, einzeln (bei dunklem Hautfototyp) oder als Komplexe (bei Kaukasiern) gelagert. Während der epidermalen Durchwanderung der Keratinozyten werden die Melanosomen durch Verschmelzung mit Lysosomen langsam abgebaut. Die Funktion des Melanins ist vorrangig der Schutz vor UV-Licht durch Absorption von Photonen. UV-Exposition der Haut aktiviert die Melanozyten und bewirkt durch Formationsänderung der bereits vorhandenen Melaninmolekülen eine Sofortpigmentierung der Haut (immediate pigment darkening). Durch Induktion von Pigmentneusynthese wird eine länger anhaltende Spätpigmentierung bewirkt. (23)

HT	Phänotyp	Reaktionen auf UV-Exposition	Durchschnittliche MED ^a [J/cm ²]
I	z.B. <i>Irischer/keltischer Typ</i> Auffallend helle, „Porzellan farbene“ Haut mit Sommersprossen, rote/rötlich-blonde Haare, meist grüne oder blaue Augen	Immer Sonnenbrand (im Hochsommer während der Mittagszeit bereits nach etwa 5–10 min), nie Bräunung	0,015–0,03
II	z.B. <i>Nordeuropäischer Typ</i> Helle Haut, blonde Haare, graue, blaue oder grüne Augen	Oft Sonnenbrand (meist schon nach 10–20 min bei sonnenentwöhnter Haut), nach Sonnengewöhnung diskrete Bräunung	0,025–0,04
III	z.B. <i>Mitteleuropäischer Typ</i> Hellbrauner Teint, brünette/braune oder dunkelblonde Haare, graue oder braune Augen	Manchmal Sonnenbrand (nach etwa 20–30 min bei sonnenentwöhnter Haut), gute und fortschreitende Bräunung nach wiederholten Bestrahlungen	0,03–0,05
IV	z.B. <i>Mediterraner Typ</i> Olivfarbenes, hellbraunes Hautkolorit, schwarze/dunkle Haare, braune Augen	Selten Sonnenbrand (frühestens nach 40 min bei sonnenentwöhnter Haut), tiefe und schnelle Bräunung	0,045–0,06
V	z.B. <i>Indischer/lateinamerikanischer Typ</i> Dunkelbraune Hautfarbe, schwarze Haare, dunkelbraune Augen	Praktisch nie Sonnenbrand	0,06–0,09
VI	z.B. <i>Schwarzafrikanischer Typ</i> Schwarze Hautfarbe und Haare, dunkelbraune Augen	Nie Sonnenbrand	0,09–0,15

^a MED Minimale Erythemdosis UVB

Abbildung 7: Einteilung der Hauttypen nach Fitzpatrick und ihre Reaktion auf UV-Exposition (23)

1.3.5 Funktionen der Haut

Die Haut erfüllt mehrere Funktionen. So hat sie neben Reizaufnahme, vermittelt durch Rezeptoren für Schmerz, Wärme und Tastreize, auch Austausch- und Schutzfunktionen.

1.3.5.1 Schutzfunktion

Da die Haut stark elastisch und verformbar ist, zugleich aber eine große Zugfestigkeit aufweist, bietet sie einen ausgezeichneten Schutz vor mechanischen Einwirkungen. Die Haut stellt durch den speziellen Aufbau der oberen Epidermis mit Transformation der Keratinozyten in Schuppen, den Tight Junctions und dem Fettgehalt eine Barriere dar, die Eindringen und Abgabe von Substanzen und Pathogenen kontrolliert. Der Säureschutzmantel, der saure pH der Hautoberfläche besitzt eine enorme Pufferkapazität. Die oberste Schicht der Haut, die Epidermis, stellt eine Barriere gegen Austrocknung dar, da es ohne Epidermis zu einer Wasserverdunstung von 20 Liter pro Tag kommen würde. Die Haut bietet teils auch Schutz vor UV-Licht. Ein Teil des Lichtes wird reflektiert, der Rest wird absorbiert und verursacht so photochemische Reaktionen, die die Haut in unterschiedlicher Weise schädigen. Durch Melaninsynthese, Reparatur der lichtbedingten DNA-Schäden, sowie Akanthose und Hyperkeratose der Epidermis werden Schädigungen abgewendet. (8)

Die Haut bietet auch Schutz gegenüber Mikroorganismen und immunologischen Schutz. Das subkutane Fett dient als Schutzpolster, fängt stumpfe Gewalteinwirkung auf, verteilt sie und mildert sie dadurch ab. Als Schutz vor Friktionstraumen fungieren die Hornschicht und die dermo-epidermale Junktionszone. (22)

1.3.5.2 Austauschfunktion

Die wichtigste Austauschfunktion der Haut ist die Wärmeabgabe an die Umgebung, um die Körpertemperatur aufrecht zu erhalten. Am wichtigsten dabei ist der Wärmeabstrom durch Verdunstung von Schweiß (sensible Wasserabgabe) und durch Wasser, das durch die Hautoberfläche diffundiert (insensible Wasserabgabe). Weiters findet durch Leitung und Konvektion sowie durch Strahlung eine trockene Wärmeabgabe statt. Bei sehr kalten Temperaturen oder Sonnenbestrahlung kann die Strahlung auch umgekehrt ins Körperinnere gerichtet sein. (8)

1.3.5.3 Reizaufnahme

Durch sensible Nervenfasern (A- und C-Fasern) ist die Haut in der Lage Reize aufzunehmen und verschiedene Empfindungen zu vermitteln. Hier wird Tastsinn (Mechanorezeptoren), Temperatursinn (Thermorezeption) und Schmerzsin (Nozirezeption) unterschieden. Tastsinn erfolgt durch spezialisierte Zellen (Meissner-Körperchen, Pinkus-Haarscheiben, Pacini- und Ruffini-Körperchen), die unterschiedliches Zeitverhalten (sehr rasch, rasch, langsam adaptierend) und unterschiedliche Lokalisation zeigen.

Freie Nervenendigungen dienen der Temperaturrezeption. In der Haut existieren Kälte- und Wärmerezeptoren, deren Aktivität von der absoluten Temperatur und der Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur abhängt.

Die Wahrnehmung aller auf den Körper einwirkenden Noxen mittels Nozirezeptoren ist der Schmerzsin. Die verschiedenen Schmerzrezeptoren sprechen auf chemische, mechanische, thermische oder auf spezifische Reize, die zu Schmerzen führen, an. Erlebt werden zwei Schmerzarten, die mit verschiedenen Nervenfasern verknüpft sind. So wird ein heller, gut lokalisierbarer und ein dumpfer, diffuser Schmerz unterschieden.

Markhaltige Nervenfasern leiten den hellen, marklose den dumpfen Schmerz weiter. Charakteristisch für Nozirezeptoren ist, entsprechend ihrer Schutzfunktion, die geringe Adaptationsfähigkeit.

Eine dem Schmerz ähnliche Sinneswahrnehmung, die mit dem Bedürfnis nach mechanischer Reizantwort, wie Kratzen oder Scheuern, beantwortet wird, ist der Juckreiz (Pruritus). Es wird zwischen akutem Juckreiz, der dazu dient Parasiten oder Fremdkörper von der Hautoberfläche zu entfernen, und chronischem Juckreiz, der mehr als 6 Monate besteht, unterschieden. Der Juckreiz wird von freien Nervenendigungen markloser C-Fasern im Papillarkörper und innerhalb der Epidermis auf physikalische, mechanische und chemische Reize generiert. (8)

1.3.6.2 Streuung

Das Streuverhalten der Haut ist besonders von Bedeutung, da es die Volumenverteilung der Lichtintensität im Gewebe bestimmt. Da die Haut einen heterogenen Aufbau, mit inhomogener Verteilung von Zellen, zellulären Bestandteilen, Kollagenfasern, Haarfollikeln, Drüsen und Blutgefäßen aufweist, kommt es zum Phänomen der Lichtstreuung. Eine lineare und kalkulierbare Ausbreitung des Lichts wird durch die hohe Lichtstreuung im Gewebe behindert. (26) Photonen, die im kollimierten (vertikal gerichteten) Strahl auf die Hautoberfläche appliziert werden, treffen im Gewebe auf verschiedene Strukturen bzw. Streuzentren und werden einfach oder mehrfach von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt. Infolgedessen weitet sich der Laserstrahl und die Intensität des Laserstrahls verändert sich. Streuung kann die lokale Lichtintensität im Gewebe entweder verkleinern oder erhöhen. Optisch ist die Haut keine transparente Glasscheibe, sondern ein sehr trübes Medium, in dem verschiedene Streumechnismen ablaufen. Das Ausmaß der Streuung hängt von der strukturellen Zusammensetzung des jeweiligen Hautareals und der Wellenlänge des Lichts ab. So kann Lasertherapie an unterschiedlichen Hautarealen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Trotz Streuphänomenen kommt es zu einem effektiven Photonenfluss in die Tiefe des Gewebes, da die Streuung überwiegend in Ausbreitungsrichtung des Lichts (nicht isotrop) gerichtet ist. (13)

1.3.6.3 Absorption

Laserlicht unterliegt im Gewebe nicht nur der Streuung, sondern die Photonen können je nach ihrer Wellenlänge in den Chromophoren der Haut absorbiert werden. Die lineare Absorption wird durch den Absorptionskoeffizienten μ_a und ist in der Regel wellenlängenabhängig. Im Gewebe bedeutet Absorption, dass die Lichtintensität nach der Durchdringung dieses Gewebes um einen bestimmten Wert abgenommen hat. (13) Auch die thermische Wirkung der Laserstrahlung im Gewebe beruht auf der Absorption und der damit verbundenen Umwandlung der Lichtenergie in Wärme. In der Tiefe des Gewebes nimmt die absorbierte Strahlungsmenge und damit auch die induzierte Wärmemenge und die Temperatur ab. (Lambert-Beer'schen Gesetz) Gleichzeitig wird Wärme durch die Wärmeleitung und Perfusion abgeführt. (17) In der Haut sind die wesentlichen lichtabsorbierenden Chromophore die verschiedenen Formen von Hämoglobin, Wasser

und Melanin, sowie exogen eingebrachte Farbstoffe. Hämoglobinabsorption weist bei etwa 410 nm einen Hauptgipfel auf. (13) Argonionen-Laser, Farbstofflaser und Diodenlaser interagieren deshalb mit Blut effektiv, der Alexandritlaser mit Melanin und die MIR-Laser (mid-infrared) mit Wasser im Gewebe. (2)

Schwarze Pigmente in Tätowierungen absorbieren in einem breiten Spektralbereich, so dass verschiedene Laserwellenlängen verwendet werden können. Die Zusammensetzung und somit das Absorptionsspektrum von farbigen Tätowierungspigmenten ist hingegen nicht bekannt, sodass die Wahl der richtigen Wellenlänge schwierig ist.

1.3.7 Reaktionsmechanismen Laser – Gewebe

Wenn ein Laserstrahl auf die Haut trifft, finden je nach Intensität der Strahlung unterschiedliche Reaktionen im Gewebe statt. Hochenergielaser erzielen ihre Wirkung im Gewebe durch Hitzentwicklung. Eine wichtige Einteilung ist die Unterscheidung in photochemische Reaktionen (z. B. Photodynamische Therapie) und photothermische Reaktionen (Lasertherapie). Während photochemische Reaktionen mit geringer Lichtintensität (wenigen Photonen pro Zeiteinheit) auskommen, erfordern photothermische Reaktionen eine hohe Lichtintensität (10^3 - 10^8 W/cm²). In der Praxis kann der gewünschte thermische Effekt in der Zielstruktur mittels ausgewählter Impulsdauer und Lichtintensität erzielt werden. (13)

Nichtthermische, chemische Reaktionen

Biostimulation

Photochemische Reaktion - Photodynamische Therapie

Photothermische Reaktionen

Trifft ein Laserstrahl auf Gewebe wird das Licht absorbiert, reflektiert, gestreut oder durchdringt die Haut (Transmission) und wirkt auf die molekularen und zellulären Gewebestrukturen. Damit es zu einer gewünschten Reaktion des Gewebes kommt, muss die Laserstrahlung im Gewebe absorbiert werden. (13) Da der menschliche Körper zum größten Teil aus Wasser besteht, ist für den medizinischen Einsatz von Lasern der Absorptionskoeffizient von Wasser von großer Bedeutung. Im sichtbaren Bereich ist die Absorption in Wasser so gering, dass sich eine mittlere Eindringtiefe von > 10 m ergibt. Im infraroten Spektralbereich werden Schwingungen im Wasser angeregt. Dadurch steigt die

Absorption an und erreicht bei einer Wellenlänge von 2,9 μm ein Maximum. Im sichtbaren Spektrum existieren spezifische Absorptionen, wie von Hämoglobin und Melanin, durch die die Eindringtiefe in das Gewebe begrenzt wird.

Im nahen Infrarot verteilt sich die Strahlung homogen im Gewebe, deshalb kann die Eindringtiefe abhängig von der Wellenlänge mehr als 5 mm betragen. Im mittleren und fernerem Infrarot wird die Strahlung von Wasser absorbiert. Die Eindringtiefe und das Verteilungsvolumen sind sehr gering und es kommt bereits bei geringen Leistungsdichten zu einer Verdampfung des Gewebes. (18)

Die Ausbreitung des Laserstrahls wird auch von der Reflexion, wie z.B. an Schichten mit unterschiedlichen Brechzahlen, bestimmt. Da die Haut aus inhomogenem Gewebe besteht, wird ein großer Teil der Laserstrahlung durch die Gewebestandteile und -strukturen aus der Ausbreitungsrichtung gestreut. (5) Neben Einfachstreuung kann auch eine Mehrfachstreuung auftreten, so dass ein eingedrungenes Photon das Gewebe gegebenenfalls wieder verlässt.

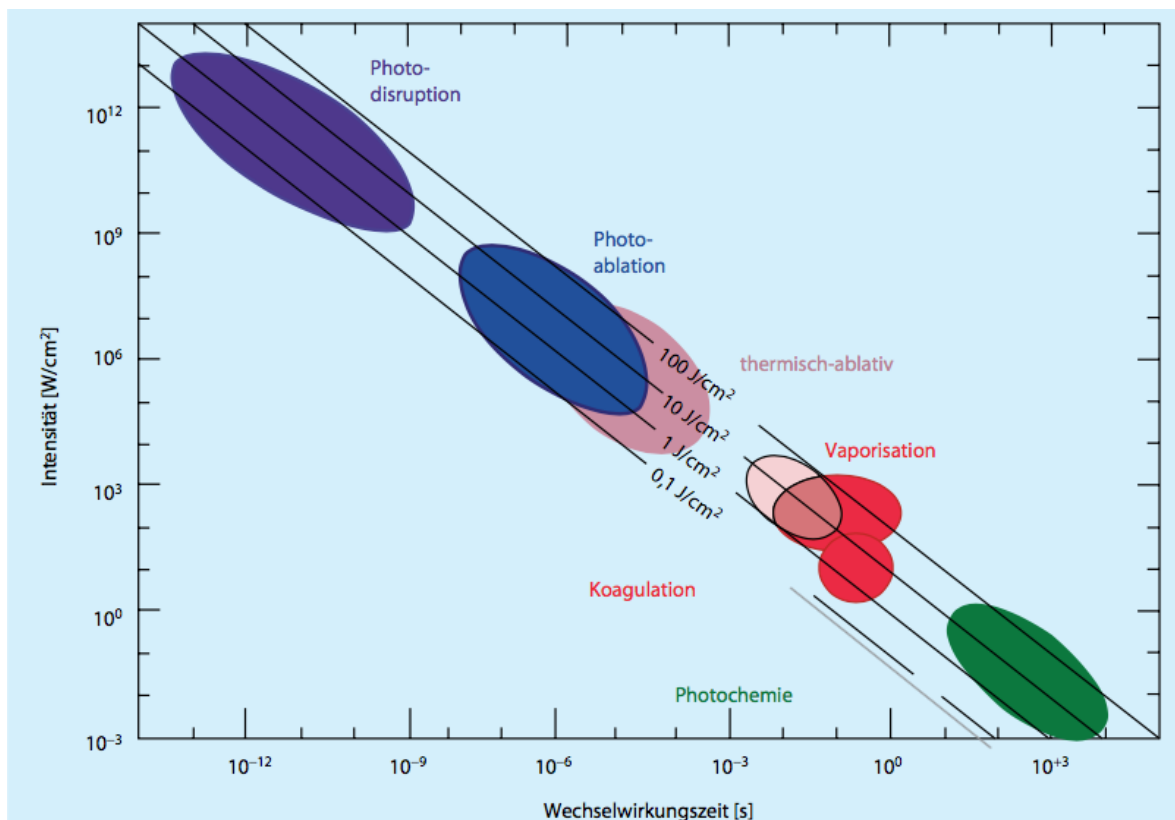


Abbildung 9: Laser- Gewebe- Reaktionsmechanismen (2)

Die Prozesse, die in der Lasertherapie zur Anwendung kommen:

- Photochemie (PDT)
- Photothermik (Koagulation, Vaporisation)
- Photoablation
- Photodisruption

In der Anwendung von Lasersystemen wird die Wirkung der Strahlung durch Einwirkdauer und Leistungsdichte der Strahlung bestimmt. Bei niedriger Leistung und langer Einwirkzeit werden durch die Photonen des Laserlichts photochemische Prozesse im Gewebe ausgelöst. Das wird im Bereich der photodynamischen Therapie, Schmerztherapie, Wundheilung und Allergietherapie eingesetzt. Im Gewebe wird die Energie des Laserstrahls durch Absorption der Photonen in Wärme umgewandelt. Je nach einwirkender Wellenlänge sind die Absorber DNA/RNA, Proteine, Wasser oder andere Zielchromophore. Je nach Grad der Erwärmung wird eine schrittweise und selektive Schädigung der Strukturen erreicht. (2)

Erwärmungsgrad	Gewebeschädigung
42–45 °C	Beginn der Hyperthermie, Konformationsänderungen, Schrumpfen der Kollagene
50 °C	Reduktion der enzymatischen Aktivität
60 °C	Denaturierung von Proteinen, Koagulation der Kollagene, Membranpermeabilisierung
100 °C	Gewebeaustrocknung und Vakuolenbildung
>100 °C	Beginn der Vaporisation und Karbonisierung des Gewebes
300–1.000 °C	Thermoablation des Gewebes, Photoablation and Disruption

Abbildung 10: Schädigung des Gewebes nach Grad der Erwärmung (2)

Die Photoablation und die Photovaporisation zählen zu den gewebeabtragenden Effekten und unterscheiden sich in ihren zeitlichen Abläufen.

Lasersysteme mit Emissionswellenlängen mit großer optischer Eindringtiefe werden für die thermische Denaturierung von Geweberegionen (Koagulation) verwendet. Koagulationsverfahren werden klinisch sowohl oberflächlich als auch interstitiell angewendet. Für die interstitielle Anwendung werden spezielle Lichtwellenleiter direkt

im zu behandelnden Gewebe positioniert.“ (17)

Ab einer Leistung von einigen 100 W/cm^2 wird das Gewebe photothermisch verändert, das Gewebe wird koaguliert. Dieser Prozess wird zur Blutstillung oder Gewebereduktion eingesetzt (Tumorthherapie, Glättung von Hautfalten).

Bei hohen Leistungsdichten von über 10^6 W/cm^2 wird eine Photoablation des Gewebes (Photomechanik) erreicht. Darunter wird eine schichtweise, präzise Abtragung der Haut ohne thermische Schädigung des darunterliegenden Gewebes verstanden.

Durch stark in der Interzellularflüssigkeit absorbierte Wellenlängen und kurze Pulszeiten wird dies erreicht. (27) Durch die Einwirkung des Laserstrahls wird Gewebe rapide erhitzt und verdampft.

Mit gütegeschalteten Festkörperlaseren können noch höhere Leistungsdichten bis im Bereich von 10^9 W/cm^2 erreicht werden. (9)

1.3.7.1 Selektive Photothermolyse

Das Konzept der selektiven Photothermolyse von Anderson und Parrish aus dem Jahr 1983 bietet die Grundlage für die Wirksamkeit von Lasern zur Entfernung von Tätowierungen. (28) Ihre Theorie besagt die Zerstörung einer Zielstruktur durch Wärmeentwicklung ohne Beschädigung der Umgebung und basiert auf dem Konzept, dass ein Chromophor (Anteil eines Farbstoffs, der dessen Farbigkeit erst möglich macht) innerhalb der Haut durch Manipulation der Absorption und Pulsdauer des Lasers gezielt zerstört oder entfernt werden kann. Die relevanten Parameter sind die Absorptionseigenschaften der Zielstruktur, die Wellenlänge des eingesetzten Lichtes, die Dauer der Laserpulse, die Größe und Form der Zielstruktur sowie die Menge der eingesetzten Energie.

Voraussetzungen für die selektive Photothermolyse sind eine Wellenlänge mit selektiver, im Vergleich zur Umgebung sehr viel höheren Absorption in der Zielstruktur und sehr kurze, unter der thermischen Relaxationszeit der Zielstruktur liegende Impulszeiten. So kann die absorbierte Energie aufgrund der kurzen Pulszeit der Zielstruktur nicht an die Umgebung weitergegeben werden und führt zur selektiven Zerstörung derselben. Das Prinzip der selektiven Photothermolyse kommt in den letzten Jahren auch bei der Entfernung von Tätowierungen zur Anwendung. (27)

1.4 Tätowierungen

Tätowierungen sind dauerhafte Veränderungen der menschlichen Haut, die dadurch entstehen, dass Farbpigmente durch manuelle oder elektrische Punktierung mit Nadeln, Bambushölzchen o. ä. in die Dermis eingebracht werden. (29)

1.4.1 Ursprung/Etymologie

Die Technik des Tätowierens hat ihren Ursprung nicht in einer bestimmten geografischen Region. Sie hat sich vielmehr als „künstlerische Äußerung“ bei verschiedenen Kulturen und indigenen Gesellschaften selbstständig und voneinander unabhängig entwickelt. Auch die zeitlichen Anfänge des Kults sind, mangels Belegen, nicht bestimmbar. Man vermutet, dass die permanente Art der Körperbemalung in die Zeit der Höhlenmalerei zurückreicht. (30)

Man geht davon aus, dass Tätowierungen aus den Körperbemalungen entstanden sind. Bei verschiedenen indigenen Stämmen und Ureinwohnern, beispielsweise in Afrika und Papua- Neuguinea, wurden Bemalungen zur Verschönerung auf die Haut aufgebracht, um auf das andere Geschlecht attraktiver zu wirken oder traditionelle Riten zu zelebrieren. Auch die Tradition der Kriegsbemalung existierte in fast allen Kulturen. Wahrscheinlich ist, dass bei diesen Praktiken Farbe in frische Wunden eingebracht wurde, und später als Farbmale zurückblieb. Auf Grund fehlenden medizinischen Wissens scheinen einige Völker davon ausgegangen zu sein, dass von den Farbmalen heilende und schützende Kräfte ausgingen.

Allerdings liegen die Ursprünge und genauen Beweggründe der vorsätzlich eingebrachten Pigmentierungen, durch die fehlende schriftliche Überlieferung, im Dunkeln. Die Schrift wurde in den meisten Kulturen erst danach erfunden und eingesetzt. Darum wird anhand von archäologischen Funden versucht Zusammenhänge herzustellen. (31)

Die Tätowierung gilt als älteste Art der Körpermodifikation. Der älteste Nachweis für die Tätowierung des menschlichen Körpers stammt aus der Jungsteinzeit. Der gefrorene Leichnam eines Mannes wurde 1991 in den Ötztaler Alpen gefunden. „Ötzi“ wird auf ein Alter von ca. 5300 Jahren geschätzt. In seiner mumifizierten Haut fand man an mehreren Stellen blaufarbene Zeichen aus Kohlenstaub.



Abbildung 11: Tätowierung am Unterschenkel von "Ötzi" (32)

Auffällig waren die einfachen Formen, ohne ornamentalen Charakter. Man vermutet, dass es sich bei den zierlosen Strichen und Formen, nicht um Schmucktätowierungen, sondern um Akupunkturpunkte und therapeutische Male handeln könnte, (33) da unter einigen Tätowierungen Abnutzungen und Verletzungen festgestellt wurden. Aus Japan sind aus der Jungsteinzeit eine weitere Form von Tätowierungen bekannt. Allerdings verweist man hier nicht auf Mumienfunde, sondern auf Keramiken, die Personen mit farbigen Mustern darstellen. In Frauenmumienfunden (ca. 2000 v.Chr.) aus Ägypten sind Tätowierungen auf Bauch, Schultern, Armen und Oberschenkeln nachweisbar. Keramikfunde belegen, dass bereits ab dem 4. Jahrtausend v.Chr. in Ägypten tätowiert wurde. Funde aus Nordägypten konnten erste Tätowierwerkzeuge auf 1450 v.Chr. datieren. Es wird angenommen, dass im antiken Ägypten nur Frauen tätowiert wurden. Diese Tätowierungen waren vorwiegend an Ober- und Unterbauch, Innenseite der Oberschenkel und Brüsten lokalisiert, weshalb man davon ausgeht, dass sie die Frauen während der Schwangerschaft und Geburt schützen sollten. Im benachbarten Libyen trugen um 1300 bis 1100 v.Chr., belegt durch Zeichnungen in Gräbern und Tempeln, auch Männer geometrische Muster an Armen und Beinen.

Aber auch in anderen Regionen der Welt waren Tätowierungen bekannt. In der Kultur der Skythen, einem Nomadenvolk um 500 bis 300 v.Chr., im heutigen Südrussland und der Ukraine, wurden Tätowierungen genutzt, um Angehörige des Adels zu klassifizieren. Nicht-tätowiert-Sein galt als Zeichen für niedrige Geburt.

Römer und Griechen kannten im 1. Jahrhundert n.Chr. die Aufbringung von Zeichen, sogenannten Stigmata, als passive Kennzeichnung zur Bestrafung, als Kennzeichnung von Eigentum bei Sklaven oder als Markierung von Kriminellen. Auch in vorkolumbianischen Kulturen Perus und Chiles wurden auf mumifizierten Überresten von Menschen Tätowierungen auf Gesicht und Körper nachgewiesen. (31)

In der Zeit der Yayoi (ca. 5. bis 3. Jhdt.v.Chr.) galt die Tätowierung in Japan als Schutz vor bösen Drachen für den Königssohn. Ab 720 stach man Straffälligen „irezumi“ und stigmatisierte sie so. (31) Sie konnten sich nicht mehr in die Gesellschaft eingliedern und eine neue Schicht, die Yakuza, entstand. Tätowierungen sind heute noch ein wichtiger Teil der Yakuza Kultur.



Abbildung 12: Ta Moko Tätowierung der Maori (Ölgemälde von Peter Jean Caley)(34)

Der Entdecker Captain James Cook brachte 1774 den über und über tätowierten Polynesier Omai und mit ihm den Begriff Tattoo, abgeleitet vom polynesischen Wort „Tatau“ (Wunden schlagen), mit nach Europa. Auf den Inselgruppen Polynesiens bezeichnet man mit Tatau den traditionellen Akt der Körperverzierung. Mit aus Knochen oder Stoßzähnen gefertigten Tatauierkämmen wurden rhythmisch Wunden in die Haut geschlagen und anschließend eine Paste aus Ruß, Samenkernen und Kokosöl in die Wunde eingebracht, was eine permanente Verfärbung der Haut erzeugte. (35)

Tätowierungen entfalten ihre farbliche Wirkung nur auf heller Haut, deshalb sind sie vor allem in Europa und in Asien, besonders in Japan, in Polynesien und unter den Ureinwohnern Neuseelands, den Maori, verbreitet gewesen. In Polynesien symbolisierten die Tattoos Kampferfahrung, soziale Funktionen im Stamm und wichtige Abschnitte im Leben. (36) In Teilen Afrikas und in Papua-Neuguinea waren dagegen Piercings, Körperbemalungen und vor allem Skarifizierungen oder Narbentatouierungen weit verbreitet. Durch Hautritzungen, die die natürliche Tendenz schwarzer Haut zur Bildung

hypertropher Narben ausnutzen, werden plastische Muster erzeugt. Sie hatten die Bedeutung der äußerlich sichtbaren Volksgruppenzugehörigkeit. (37) Auch heute verzieren Völker in Afrika, zum Beispiel das Nomadenvolk der Wodaabe in der Shabel Wüste von Westafrika, ihre Haut auf diese Weise.



Abbildung 13: Frau aus dem Volk der Wodaabe mit Skarifizierungstatauierung (38)

Im 18. Jahrhundert brachten britische Seeleute von ihren Schiffsreisen Souvenirs unter der Haut mit nach Hause und importierten Tätowierungen nach Europa. (36) Den Hauptteil der Anhänger der bunten Bilder machten die unteren und untersten sozialen Schichten aus, aber auch in adeligen Kreisen waren sie beliebt. Kaiserin Elisabeth von Österreich-Ungarn ließ sich angeblich auf einer Reise durch die Ägäis 1888 einen Anker auf die linke Schulter tätowieren. (39) Laut Kaiser Franz Joseph „*ein verzweifelter Versuch, der Wahrheit des Traums vom irdischen Paradies Dauer zu verleihen*“. Auch Kronprinz Rudolf, Erzherzog Ferdinand sollen Zeichen unter der Haut getragen haben. Das Bürgertum wurde in diesem Trend weitgehend übersprungen. Der Glanzzeit der Tätowierung folgte bald eine verbale Diskreditierung und die Bilder auf der Haut wurden Symbol für den Widerstand gegen eine moralisch legitimierte bürgerliche Ordnung des kapitalistischen Leistungsprinzips. (40) 1908 postulierte der Architekt Adolf Loos in „Ornament und Verbrechen“, dass „*der moderne mensch, der sich tätowiert (...) ein verbrecher oder ein degenerierter*“ ist. „*die tätowierten, die nicht in haft sind, sind latente verbrecher oder degenerierte aristokraten. Wenn ein tätowierter in freiheit stirbt, so ist er eben einige jahre, bevor er einen mord*

verübt hat, gestorben.“ (41) Lange Zeit galten Tattoos als zwangsweise Markierung und diese Stigmatisierung.

Im 19. Jahrhundert wurde die Tätowierkunst in Europa zum Massenphänomen. Der deutsche Historiker Stephan Oettermann sieht einen Grund in den sozialen Veränderungen der industriellen Revolution: *„Es sind die Probleme der Pauperisierung und Verstädterung der Landbevölkerung, der Auflösung der Zünfte und der Proletarisierung des Handwerkers zum Fabrikarbeiter wie sie in Deutschland seit den 60er Jahren des 19. Jahrhunderts immer drängender wurden, die für die Tätowierung und den Diskurs über die Tätowierung so etwas wie Obertöne gaben.*“ (33) Nach dem großen Aufschwung nach der Kommerzialisierung der Tattoos in den 1990er Jahren, genossen Tätowierungen vorübergehend wenig Ansehen. In den letzten Jahren erfreuen sie sich wieder zunehmender Popularität in den unterschiedlichsten Alters- und Gesellschaftsgruppen. (42)

1.4.2 Aktuelle Entwicklungen

Die Kunst des Tätowierens ist bereits Jahrtausende alt und unterlag einer gesellschaftlichen Entwicklung. Bis in das 20. Jahrhundert wurden Tätowierungen mit Randgruppen, Kriminalität, psychischen und sozialen Störungen assoziiert. (43) Mit dem 21. Jahrhundert kam der Wandel und Tätowierungen erfuhren zunehmend Akzeptanz.

Auch die Technik, Motive und ihre Bedeutung haben sich im Laufe der Zeit transformiert. (44) Waren Tätowierungen früher Zeichen einer Zugehörigkeit oder des Protests, sind sie heute längst Mainstream.

Laut neuesten Studien sind in den USA, Europa und Australien 10 bis 20% der Bevölkerung tätowiert. Die Verteilung nach Altersgruppen zeigt deutlich, dass 45-65-Jährige weniger tätowiert sind, als die jüngeren Altersgruppen. (45) So sind in den USA rund 40% der 26-40-Jährigen tätowiert. (46) In Deutschland ist in dieser Altersgruppe jeder 4. tätowiert.

Laut einer Studie des IMAS Instituts aus 2016 hat bereits jeder 5. Österreicher zumindest eine Tätowierung. Bei den unter 35-Jährigen sind es bereits knapp zwei Fünftel, die eine oder mehrere Tätowierungen haben. Es sind vor allem jüngere Personen und Menschen mit höherer Bildung, die mit dieser Art von Körperkult ein Zeichen setzen. Heute spielt es für 52% der österreichischen Bevölkerung keine Rolle, ob jemand tätowiert ist oder nicht, nur für 14% wird eine noch unbekannte Person durch eine Tätowierung unsympathischer. (47) Das Image des Tätowierkults und die

Einstellungen rund ums Tätowieren hat sich in den letzten Jahrzehnten gewandelt. Für sieben von zehn Österreichern sind Tätowierungen akzeptabel und reine Privatsache. Die „Generation 60 plus“ lehnt diese Art der Körperkunst aber mehrheitlich ab. (48) Topmodels und First Ladies mit Tattoos sind durchaus akzeptiert und beweisen, dass Tätowierungen nicht mehr Ausdruck einer Subkultur sind.

Die Motive unterliegen, wie die Mode, Trends. Waren es nach der Prohibition bei den US-Soldaten Tätowierungen, die Patriotismus zeigen sollten, sind sie heute meist Zeichen der Erinnerung. Von Stacheldrahtbändern am Oberarm, Rosen auf dem Schulterblatt und Delfinen am Knöchel Anfang der 90er, über chinesische Schriftzeichen am Oberarm und Tribals am Steiß Mitte der 90ern. So waren es Anfang der 2000er Jahre Rosenkränze am Fußgelenk, Barcodes, Vogelschwärme und kleine Sterne. Mitte der 2000er waren Anker, Würfel und farbige Cartoons beliebte Motive. Heute sind geometrische Formen, Liedzeilen und Sprüche auf Rippen, und Minitattoos auf Handgelenken und Fingern oder abstrahierte Tiermotive auf dem Oberschenkel besonders gefragt.

Der Tätowierkult zieht sich heute quer durch alle Bildungsschichten. So wurden Tätowierungen früher eher in bildungsferneren Gesellschaftsschichten zugeordnet.

1.4.3 Bedeutung und Funktion

Abgesehen von der dekorativen Bedeutung und dem Tätowieren als aktuelles Trendphänomen gab und gibt es traditionelle Bedeutungen. In alten Traditionen waren das etwa der soziale Stand, bestandene Kämpfe oder Zugehörigkeit zu einem Stamm oder einer Religion. Meist gab es bestimmte Symbole, die Aussagen über den Träger oder die Trägerin möglich machten. In der polynesischen Kultur symbolisieren die Tätowierungen Eigenschaften, die lebenslang und untrennbar mit diesem Menschen verbunden sind. Kampferfahrung von Kriegern, soziale Funktionen im Stamm und die wichtigen Abschnitte im Leben, wie das Erwachsenwerden, die Hochzeit oder die Geburt eines Kindes. (36) Die Motivation, die dem Tätowieren zu Grunde liegt, könnte laut dem Anthropologen Wilfrid Dyson Hambly auch die Heilung einer Krankheit, die Schaffung von Identität, die Funktion eines Talismans, die Ästhetik, die Religion oder auch die Erzeugung von Dauerhaftigkeit und Sicherheit sein. Tattoos repräsentieren oft Emotionen,

Glauben, Ereignisse und Erfahrungen und symbolisieren eine „Ausgrenzung durch Eingrenzung“. (49)

1.4.4 Technik und Formen

Man unterscheidet zwischen Schmutz- und Schmucktätowierungen. Durch Eindringen oder Einbringen von Farbpartikeln in das Bindegewebe der Haut entsteht eine meist permanente, umschriebene Pigmentierung.

1.4.4.1 Schmutztätowierungen

Schmutztätowierungen entstehen grundsätzlich durch das Eindringen von gefärbten und färbenden Partikeln, Schmutz- und Staubpartikeln in die Haut, vor allem bei Auto-, Fahrrad- und Motorradunfällen. Als Siderose wird die bräunliche Verfärbung ausgelöst durch das Eindringen von Metallsplittern in die Haut bezeichnet. Kohlestaubtätowierungen entstehen durch Einbringung von Kohlepartikeln, häufig bei Bergleuten. Bei der Pulvertätowierung erfolgt die Pulvereinsprengung in die Haut durch Schussverletzungen oder durch explodierende Feuerwerkskörper. (50) In der Regel können Schmutzpartikel innerhalb der ersten 72 Stunden durch Ausbürsten relativ einfach entfernt werden. Danach kann die Pigmentierung nur mittels Stanzexzision oder Lasertherapie entfernt werden. (8)

1.4.4.2 Schmucktätowierungen

Schmucktätowierungen sind das beabsichtigte Einbringen von Farbpigmenten in die Haut. Sie können je nach Eindringtiefe der Nadel permanent und semi-permanent gestochen werden. Für eine semi-permanente Tätowierung wird die Nadel nur 0,3 bis 0,5 mm in die Epidermis geführt, was zu einem langsamen Ausbleichen des eingebrachten Pigments über Monate oder Jahre führen sollte. Zu dieser Form wird auch permanent Make-Up gezählt. Hier werden aus kosmetischen Gründen Lidstrich oder Augenbrauen mittels Tätowiermaschine pigmentiert. Oft bleiben diese Tätowierungen oder Teile davon aber doch permanent unter der Haut und werden aus kosmetisch-ästhetischen Gründen entfernt. Bei Schmucktätowierungen unterscheidet man zwischen Laientätowierungen und professionellen Tätowierungen. Bei Laientätowierungen werden zur Applikation meist Nadeln, auch gebündelt, oder andere spitze Gegenstände benutzt, mit denen Pigment in die

Haut eingebracht wird. Überwiegend werden Tuschen und Tinten, sowie Aufschwemmungen von Ruß verwendet. Die Farbpigmente sind unregelmäßig verteilt und erreichen die untere Dermis und eventuell die Subkutis, was zu einem Verrinnen der Farben führt. Bei professionellen Tätowierungen werden die Farbpartikel mittels Tätowiermaschinen wesentlich gleichmäßiger und dichter in die Haut eingebracht. Dies führt durch die größere Pigmentdichte zu höherer Farbigkeit und Brillanz der Tätowierungen und in weiterer Folge zu einem schlechteren Ansprechen auf die Lasertherapie. (13)

Die medizinische Pigmentierung stellt eine Kombination aus Tätowierung und Permanent-Make-Up dar. Sie kommt zum Beispiel nach Mastektomie zur Anwendung. Hier werden Mikro- oder Feinpigmentierungen eingesetzt, um nach einer Rekonstruktionsplastik Brustwarzen zu imitieren und das kosmetische Ergebnis zu vervollständigen. (51)

1.4.4.3 Technik

Nach Vorstellung des Kunden fertigt der Tätowierer eine Vorlage an, die Haut aufgelegt und mit Lösungsmittel übertragen wird. Zuerst werden die Umrisse oder Outlines der Tätowierung gestochen. Hierfür wird eine, in die Tätowiermaschine eingespannte, Nadel verwendet. Diese Nadel wird mittels elektromagnetischen Spulen oder mittels eines Exzentrers in Bewegung versetzt und vor- und zurückbewegt. Die gestochenen Umrisse der Tätowierung verheilen nach etwa drei bis vier Wochen. Dann kann, falls gewünscht, mit dem Schattieren in Farbe begonnen werden.

Die Eindringtiefe der Nadel hat einen signifikanten Effekt auf das Erscheinungsbild der Tätowierung. Da sich die Zellen der Epidermis alle vier Wochen erneuern, verschwindet dort zu wenig tief eingebracht Farbe. Dringt man zu tief in die Haut, in die tiefe Dermis oder Subcutis, ein, verläuft die Farbe durch Narbenbildung. Nur ins obere Drittel der Dermis eingebrachte Pigmente bleiben zum großen Teil erhalten. Die winzigen Pigmente verbinden sich miteinander und lassen sich durch ihre Größe von den Immunzellen nicht abtransportieren. Die Pigmente werden schließlich eingekapselt und sind so permanent unter der Haut. (52) Zur permanenten Pigmentierung werden mit winzigen Stichen 1 bis 2 mg Farbpigment pro cm^2 in die Dermis eingebracht. Dadurch, dass die darüberliegende Epidermis sehr dünn ist, scheinen die Pigmente durch diese durch.

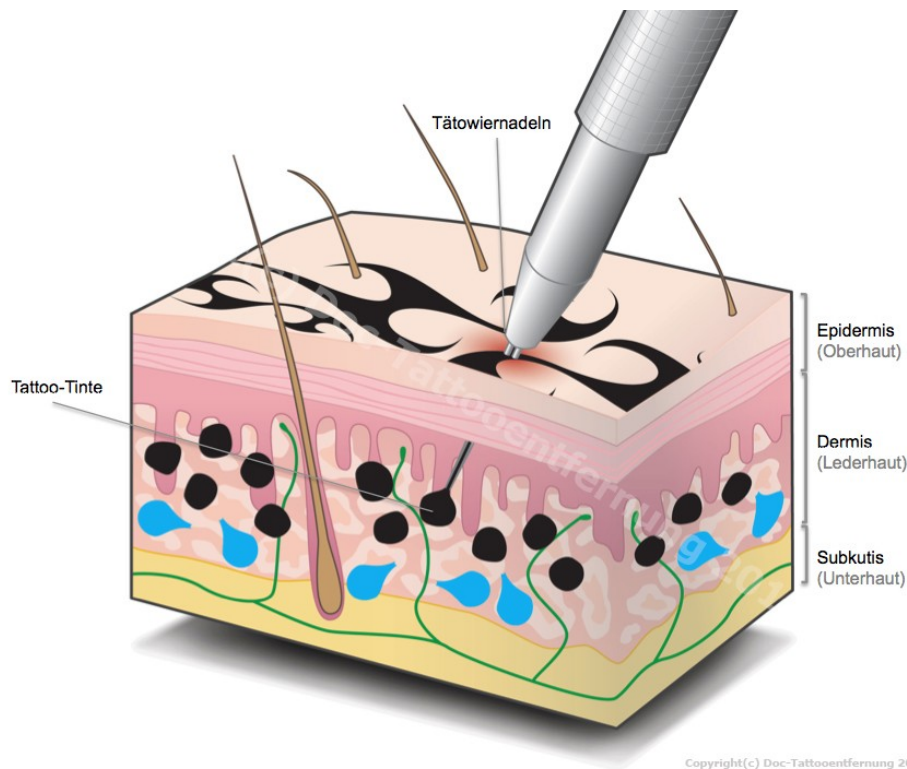


Abbildung 14: Tätowierungsvorgang (53)

Um in die Dermis zu gelangen, werden Tätowierungsmaschinen, in denen sich drei bis fünfzehn Nadeln mit fünfzig bis dreitausend Stichen pro Minute auf- und abbewegen, verwendet. Die Nadeln werden zuvor in die gewünschte Farbe, die durch Kapillarwirkung anhaftet, getaucht. In der Haut fließt die Farbe an der Nadel nach unten und dringt mit der Nadel bis in die Dermis ein. Dort wird sie abgegeben und verbleibt dort permanent. Die Nadeln werden immer wieder in die Farbe getaucht. So werden mit winzigen Stichen pro cm^2 1-2 mg Farbpigment eingebracht. (54)

1.4.4.3.1 Farbpigmente in Tätowierungen und ihre Risiken

Die verschiedenen Intensitäten der Farbe werden durch eingebrachte Menge, Anordnung und Farbwahl erzielt. Bei der Auswahl der Farben gibt es unzählige Möglichkeiten und je nach Hauttyp ist variiert das Erscheinungsbild der Farbe an der Hautoberfläche.

Die Zusammensetzung der Farbstoffe, die für Tätowierungen verwendet werden, ist nicht einheitlich geregelt und variiert je nach Hersteller. Für die bunten Tätowierungsfarben wurden früher häufig Metallsalze (Chrom, Mangan, Quecksilber, Kobalt) als Farben verwendet. (13) Die färbenden Bestandteile in Tätowierungsfarbstoffen können zwei

verschiedenen Gruppen zugeordnet werden. Für schwarze Tätowierungsfarbstoffe („Carbon Black“) werden amorphe Kohlenstoffpartikel, wie Ruß und Nebenprodukten der Rußherstellung verwendet. Farbige Tätowierungspigmente bestehen im Wesentlichen aus industriellen organischen Pigmenten in Form von Azo- oder polyzyklischen Verbindungen bestehen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Chemie enthalten diese Tätowiermittel üblicherweise verschiedene Verbindungen, wie Nebenprodukte und Verunreinigungen.

(55)

Während des Tätowierens werden große Mengen an Tätowierungspigmenten in die Haut injiziert. Studien haben gezeigt, dass etwa 2,5 mg Farbpigment verwendet wird, um 1 cm² Haut zu färben. Der größte Anteil der Tätowierungsfarbstoffe verbleibt in der Haut, da die Pigmentteilchen unlöslich und für den Transport zu groß sind. Etwa ein Drittel der Farbpigmente verschwindet jedoch innerhalb von Wochen nach dem Tätowieren aus der Haut. Es hat sich gezeigt, dass ein Teil der Pigmente über die Lymphe abtransportiert wird und die Lymphknoten in unmittelbarer Umgebung der Tätowierung anfärbt. Bis heute wurden keine Untersuchungen durchgeführt, um zu bestimmen, ob und in welchem Ausmaß Tätowierungsfarbstoffe in anderen Organen des menschlichen Körpers gefunden werden können. Das Tätowieren von Farbstoffen in die Haut bringt also eine komplexe Reaktion der Haut mit sich, die eine Immunreaktion und Transportprozesse auslöst, die zusätzliche Gesundheitsrisiken nicht nur für die Haut, sondern auch für andere Organe des Menschen darstellen können. (55)

Offiziell existiert in Deutschland und Österreich keine offizielle Zulassungsregelung für Tätowierungsstoffe. Pigmente für Kosmetika, Textilstofffarben und Lebensmittelfarben müssen genau definiert werden, für Tattoofarben gilt diese Regelung noch nicht. Da es jedem Tätowierer überlassen bleibt, welche Farben verwendet werden und wie diese gemischt werden, ergibt sich hohes allergologisches Potential. Nicht selten werden Grundfarben aus der Automobilindustrie verwendet, um Farbmischungen anzufertigen.

(50) Die Tätowierer setzen diese Pigmente ein, da sie nahezu unlöslich sind und so für eine brillante, beständige Tätowierung sorgen. (56) Tätowierungspigmente in der Haut scheinen zunächst in der Regel gut vertragen zu werden. Doch kommt es immer wieder zu unerwünschten Reaktionen, insbesondere allergische oder Fremdkörperreaktionen, die seit Jahren in der Fachliteratur beschrieben werden. Häufig lösen rote Tätowierungspigmente unerwünschte Reaktionen aus. Mittlerweile wird in der medizinischen Fachliteratur auch über das Auftreten von Hauttumoren nach Tätowierungen berichtet, ein pathologischer

Zusammenhang wurde aber noch nicht nachgewiesen. (56) Auch die Menge an Pigment dürfte für das Auftreten von unerwünschten Nebenwirkungen nicht unerheblich sein. Ein tätowierter Oberarm entspricht in etwa 2 g Pigment, eine Tätowierung des ganzen Oberkörpers rund 10 g. (57)

Laut der Fachgruppe für Produktsicherheit am Bundesinstitut für Risikobewertung in Berlin treten bei rund 70% der Menschen nach dem Tätowieren lokale Reaktionen, wie Blutung, Schwellung oder Verkrustung auf. Auch Reaktionen wie Schwindel, Abgeschlagenheit und Fieber sind häufig. (57)

1.5 Entfernung von Tätowierungen

Das Tätowieren ist seit den frühesten Anfängen der modernen Zivilisation ein Teil der menschlichen Kultur. Über die Jahrtausende haben sich die Farben und Methoden, mit denen Motive und Gedanken unter die Haut eingebracht werden verändert. Auch die Motivwahl unterliegt häufig dem Wandel der Zeit. Das führt zu dem Wunsch, das zu ändern oder zu entfernen, was einst als permanente Erinnerung unter die Haut gestochen wurde.

Ansätze Tätowierung zu entfernen gehen bis auf die Ursprünge des Tätowierens zurück. So wurden Schleifmittel verwendet, um die Oberfläche der Haut zu traumatisieren und anschließend Reizstoffe auf die Haut aufzubringen, um die Pigmentteilchen durch die offene Wunde zu entfernen. (58) Obsolet sind heute unspezifische Entfernungsmethoden, wie die chirurgische Exzision, Dermabrasion, Salabrasion oder Infrarotkoagulation, da sie mit Narbenbildung verbunden sind. (2)

1963, schon drei Jahre nach der Konstruktion des ersten Lasers durch Maiman, beschrieb Leon Goldman erste dermatologische Laseranwendungen an vaskulären Veränderungen und Tätowierungen. (59) Trotz erfolgreicher Anwendung wurde die Methode 20 Jahre nicht weiterverfolgt. Erst 1983 wurden erneut klinische Studien durchgeführt, die die effektive und narbenfreie Entfernung von schwarzen Tätowierungen nachweisen konnten. 7 Jahre und zahlreiche klinische und experimentelle Studien später hatte sich die Methode im angloamerikanischen Raum etabliert. (2) 1987 veröffentlichte eine Schweizer Arbeitsgruppe die erste deutschsprachige und internationale Beschreibung der Anwendung von Nd:YAG-Lasersystemen zur Entfernung von Tätowierungen. (60)

1.5.1 Mechanismus der Aufhellung

Ein Meilenstein in der Laseranwendung war die Veröffentlichung des Prinzips der selektiven Photothermolyse 1983 durch Anderson und Parrish. (28) Diesem Prinzip folgend sind zur Zerstörung von Tätowierungspigmenten kurze Impulsdauern im Nanosekundenbereich und darunter erforderlich. Voraussetzung für eine erfolgreiche Aufhellung ist, dass das Tätowierungspigment die eingestrahlten Wellenlängen absorbieren kann. Blauschwarze Pigmente absorbieren alle verwendeten Wellenlängen relativ stark und können meist gut entfernt werden. Farbige Tätowierungspigmente, auch optisch gleich aussehende Farbschattierungen, zeigen sehr unterschiedliche Absorptionseigenschaften. Daher sprechen farbige Tätowierungen sehr unterschiedlich und teilweise ineffektiv auf eine Laserbehandlung an. Manche Farbtöne können mit den derzeit verfügbaren Lasersystemen nicht entfernt werden.

Bei professionell gestochenen Tätowierungen sind aufgrund der höheren Pigmentdichte, die durch die Verwendung von Tätowiermaschinen sehr viel höher, gleichmäßiger und tiefer reichend ist, mehr Laserbehandlungen erforderlich als bei Laientätowierungen. (2) Für professionell gestochene Tattoos sind häufig 20 bis 25 Behandlungen im Abstand von 4 bis 6 Wochen notwendig. Einfacher zu behandeln sind Laien- und Schmutztätowierungen. Sie können oft schon in 5 bis 10 Sitzungen entfernt werden. Auch medikamenteninduzierte Dyschromien sprechen gut auf die Lasertherapie an. (26) Auch die Lokalisation der Tätowierung scheint für den Behandlungserfolg von Bedeutung zu sein. So lassen sich distal gelegene Tätowierungen, z.B. an Unterarmen und Unterschenkeln, langsamer aufhellen, was möglicherweise auf den geringeren Lymphabfluss und den dadurch verzögerten Abtransport der Farbpigmente zurückzuführen ist. Die beim Vorgang des Tätowierens in die Dermis eingebrachten Farbpartikel verbleiben dort im besten Fall permanent. Die meisten Tätowierungen verblassen jedoch über die Jahre spontan, was sich histologisch mit einer Umlagerung der Pigmentgranula in tiefere Schichten erklären lässt. (2)

Der genaue Mechanismus, der zur Aufhellung der Tätowierung führt, ist heute noch weitgehend unbekannt. Untersuchungen ergaben keinen wesentlichen Unterschied der Aufhellung in „in vivo“ oder „ex vivo“ Behandlungen. Daraus lässt sich schließen, dass die Lasertherapie zu einer sofortigen Änderung der optischen Eigenschaften der

Tätowierungspigmente führt. Durch die Lasertherapie werden die vor Therapie praktisch ausschließlich intrazellulär gelagerten Pigmente freigesetzt. Makrophagen und das Lymphsystem sind dann für den Abtransport der Pigmentpartikel verantwortlich. (13)

Trifft der Laserstrahl auf die Zielstruktur, das Tätowierungspigment in der Dermis, kommt es durch die Energie des Laserimpulses zu einem Anstieg der Temperatur auf mehrere Hundert Grad Celsius, wodurch das Pigment explosionsartig zertrümmert wird.

Anschließend kommt es zur Resorption bzw. Ausschleusung dieser Partikel durch Makrophagen über das Lymphsystem. Das Ergebnis ist eine erwünschte Aufhellung von störenden Hyperpigmentierungen oder Tätowierungen. (8) Etwa 5 Minuten nach der Behandlung zeigt sich eine deutliche Vakuolenbildung im Bereich der Dermis, die klinisch an einer Weißfärbung der Hautoberfläche, „whitening“, zu sehen ist. Innerhalb von 20 Minuten werden die Vakuolen resorbiert und die Weißfärbung verschwindet wieder. (2)

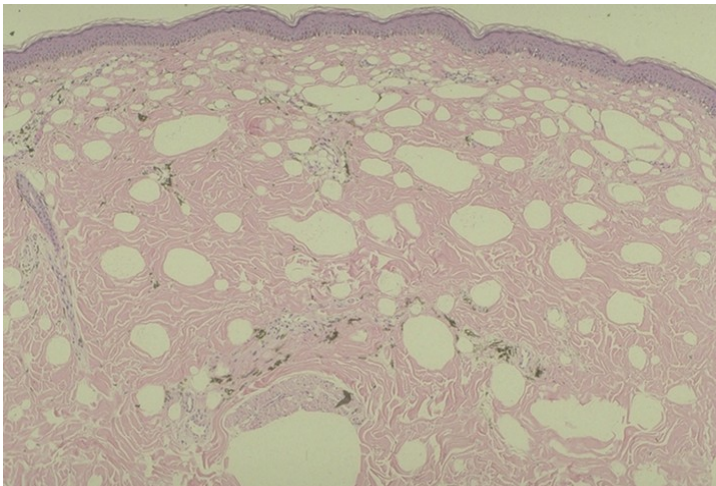


Abbildung 15: Histologisches Bild- "whitening" nach Laserbehandlung (2)



Abbildung 16: Klinisches Bild - "whitening" nach Laserbehandlung (70)

1.5.2 Laseranwendung zur Entfernung von Tätowierungen

Eine sichere und effektive Methode zur Entfernung von Tätowierungen ist die Therapie mittels gütegeschalteter Laser. Zur Entfernung mittels selektiver Photothermolyse kommen gütegeschaltete Lasersysteme, wie der Rubin- (694 nm), der Nd:YAG- (532 nm/1064 nm) oder der Alexandritlaser (755 nm) zum Einsatz. (2)

LASER	WELLENLÄNGE	IMPULSDAUER	TÄTOWIERUNGSFARBE
Nd:YAG-Laser	532 nm	10 ns	Rot, Gelb
Rubin-Laser	694 nm	30 ns	Schwarz, Blau, Grün
Alexandrit-Laser	755 nm	50-100 ns	Schwarz, Blau, Grün
Nd:YAG-Laser	1064 nm	10 ns	Schwarz, Blau

Tabelle 7: Tätowierungsfarben und verwendete Laser (2)

Diese Festkörperlaser geben durch ihre Güteschaltung extrem kurze Lichtblitze, mit einer Pulsdauer von 20 bis 100 ns ab. Seit 2012 ist ein neuer Laser, der Picosekunden Laser, am Markt. Seine Energieimpulse liegen im Picosekunden Bereich.

Ziel der Behandlung mittels Laser ist es, die in der Dermis liegenden Tätowierungspigmente, mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern, gewebeschonend soweit zu verkleinern, dass sie über das Gefäßsystem abtransportiert werden können. Die dadurch erreichte Verminderung der Pigmentkonzentration in der Haut führt zu einer sichtbaren Aufhellung der Tätowierung. Klinische Studien zeigen, dass der Erfolg der Behandlung neben der Pigmentkonzentration auch von der Pigmentfarbe abhängt. (56)

1.5.3 Mögliche Nebenwirkungen bei der Entfernung von Tätowierungen mittels Lasertherapie

Nach der Laserbehandlung können, abhängig von der verwendeten Energiedichte, im Behandlungsareal Quaddeln, punktförmige Blutungen, Bläschen und Krusten auftreten. Texturveränderungen heilen meist innerhalb von 4 bis 6 Wochen ab. Deshalb sollte zwischen das Intervall zwischen den einzelnen Behandlungssitzungen 4 bis 6 Wochen betragen.(2)

Häufig kommt es zum Auftreten von meist transienten Hypopigmentierungen, die meist 2 bis 6 Monate persistieren. Vor allem bei dunkleren Hauttypen kann es in einigen Fällen zu einer postinflammatorischen Hyperpigmentierung kommen.

Narbenbildung ist möglich, das Risiko ist bei korrekter Anwendung aber gering. Bei der Entfernung von mehrfarbigen Tätowierungen können Farbreste zurückbleiben. (13)

Narben, die im Rahmen des Tätowierens entstanden sind, und erst nach Entfernung der Tätowierung sichtbar sind, stellen hingegen ein Problem dar.

Bei Tätowierungen mit Schattierungen, bei denen zur Aufhellung der Farben Zusatzstoffe wie Eisenoxid und Titanoxid verwendet wurden, besteht das Risiko des „Ink Darkening“. Durch die hochenergetischen Laserimpulse werden die Substanzen chemisch reduziert und dunkeln nach. Außerdem besteht bei früher verwendeten Farben mit Metallsalzen wie Quecksilber (Rot), Kadmium (Gelb), Chrom (Grün) und Kobalt (Blau), die Möglichkeit einer lokalen, allergischen Reaktion in Form urtikarieller, lichenoider oder granulomatöser Hautveränderungen. Sehr selten kommt es zu photoallergischen Hautreaktionen oder einer anaphylaktischen Reaktion. (2)

Unter Kenntnis der selektiven Photothermolyse lassen sich mögliche Nebenwirkungen des jeweiligen Lasertyps vorhersagen. So können Laser mit Wellenlängen, die gut von Melanin absorbiert werden, melaninhaltige Zellen zerstören, aber auch Hypopigmentierungen hervorrufen. Laser, die die Absorptionskurve des Oxyhämoglobins kreuzen, können Gefäßschädigung und Purpura erzeugen. Wenn die Epidermis verletzt wird, besitzen alle Laser ein gewisses Potential zur Bildung postinflammatorischer Hyperpigmentierungen. Aufgrund der nichtspezifischen, thermischen Diffusion besteht beim cw- und quasi-continuous -wave Laser besteht ein größeres Risiko zu Narbenbildungen und Texturveränderungen. Laser, die nach dem Konzept der selektiven Photothermolyse gebaut wurden, wirken spezifischer auf Gewebe und haben ein geringeres Risiko der Narbenbildung. Aber auch hier können, abhängig von der Wellenlänge, Energie und Pulsdauer, Pigmentveränderungen, epidermale Zellschädigung, Texturveränderungen und auch Krustenbildung auftreten. Prinzipiell kann jedes Lasersystem bei inkorrekt Anwendung (z.B. Einsatz des falschen Lasertyps, zu hohe Energiedichte) Verletzungen und Gewebeveränderungen verursachen. (19)

Um schädliche Nebenwirkungen zu vermeiden, kann jeder Gerätetyp, jede Indikation und jeder einzelne Parameter eine unterschiedliche Herangehensweise notwendig machen. Typische Begleiterscheinungen, über die vor einer Laserbehandlung aufgeklärt werden muss, und die indikations- und gerätebezogen auftreten, sind: Ödeme, Blutungen, Purpura, Blasen, Krusten, Schmerzen, temporäre Hypo- und Hyperpigmentierungen und Haarverlust. Selten auftretende schwere Nebenwirkungen nach der Laseranwendung sind: Narben, Keloide, Verbrennungen und permanente Hypo- und Hyperpigmentierung. (61)

Um das Risiko Nebenwirkungen zu minimieren und Fehleinschätzungen zu vermeiden, sind einige therapierelevante Parameter vor und während jeder Behandlung indikations-, geräte- und patientenbezogene Überlegungen erforderlich.

Hauttyp/ Bräunungsgrad: Bei Lasersystemen mit Wellenlängen kleiner als 900-1000 nm ist die Absorption von Melanin nicht zu vernachlässigen. Bei hoher Energiedichte sind Verbrennungen, Krusten, Hypo- und postinflammatorische Hyperpigmentierungen und Narbenbildung möglich.

Energiedichte: Eine korrekte Wahl der Energiedichte ist wichtig um Nebenwirkungen zu vermeiden und die gewünschte Wirkung zu erzielen. So hängt die Energiedichte (in J/cm^2) neben Wellenlänge, Impulsdauer, Impulsform, Kühlverfahren und Indikation auch von der Hautpigmentierung ab. Zu hohe Energiedichte kann zur Entstehung von Verbrennungen, Krusten, Hypo- und postinflammatorische Hyperpigmentierungen und Narbenbildung führen. Bei zu niedriger Energiedichte wird die erwünschte Wirkung nicht erzielt. (62)

Wellenlänge: Die Wahl der richtigen Wellenlänge ist von der Zielstruktur und dem Pigmentierungsgrad der Haut abhängig. Wird die Wellenlänge falsch gewählt, wird keine Wirkung erzielt und das Nebenwirkungsspektrum kann kleiner oder größer werden. Im ungünstigsten Fall erreicht man keine Wirkung und maximale Nebenwirkungen. Zum Beispiel beim Einsatz des KTP-Nd:YAG-Lasers (532 nm) bei dunklem Hauttyp und tiefer liegenden Gefäßen. Im Melanin wird das kurzwellige Licht sehr gut absorbiert und verursacht epidermale Schäden. Durch die geringe Penetrationstiefe wird das tief liegende Gefäß nicht erreicht. Zielführender ist hier der Einsatz einer Nd:YAG-Lasers (1064 nm), da er über große Wellenlänge und hohe Penetrationstiefe verfügt. (19)

Strahldurchmesser: Um möglichst wenig nichtbetroffene Haut mit zu behandeln, sollte der Strahldurchmesser an die Größe der Zielstruktur angepasst werden. Durch reduzierte Randstreuungseffekte erlauben größere Strahldurchmesser bei sonst gleichbleibenden Parametern eine tiefere Penetration. Ein Mittelweg zwischen Penetrationstiefe und Wirkungsbereich muss gefunden werden. Bei Behandlungen von großflächigen Hautarealen sind große Strahldurchmesser hilfreich, da die Behandlung schneller durchgeführt werden kann. Dadurch steigt aber auch das Risiko der unabsichtlichen Behandlung von Hautarealen, die schwieriger ausgespart werden können. So werden bei der Photoepilationstherapie nicht selten Naevuszellnaevi mitbehandelt, obwohl sie bei LLS- Bestrahlung (LLS= Laser- und Nichtlaser-Lichtquellen) ausgespart werden sollten. (62)

Aufklärung: Eine korrekte und umfassende Aufklärung vor der Laserbehandlung ist von großer Bedeutung. Aus einer unvollständigen Aufklärung können falsche Erwartungen des Patienten oder der Patientin, fehlerhafte Nachbehandlung, spätere Unzufriedenheit oder sogar rechtliche Schritte resultieren.

2 Material und Methoden

2.1 Einführung

Gütegeschaltete Laser haben die Entfernung von Tätowierungen revolutioniert. Durch die Beschränkung der Impulsdauer werden die Tätowierungspigmente sehr hoch erhitzt, wobei die benachbarten Strukturen relativ verschont bleiben. Dies verringert die Narbenbildung, die häufig nach nichtselektiven Entfernungsmethoden bei Tätowierungen, wie der Dermabrasion oder der Behandlung mit einem Kohlendioxidlaser, auftritt.

Gütegeschaltete Laser, wie der Neodym: YAG-Laser und der Rubinlaser, haben sich bei der Behandlung blauschwarzer Tätowierungen als besonders wirksam erwiesen. Sie können Tattoos ohne Narben entfernen, wobei ihre Wirksamkeit von der Wellenlänge abhängt, die für das Zielchromophor verwendet wird. (63) Im klinischen Alltag geben Nanosekundenlaser Pulse in 10 ns Intervallen ab. Es hat sich gezeigt, dass das am häufigsten vorkommende in blauschwarzen Tätowierungen vorkommende Pigmentpartikel, Ruß, einen Durchmesser von etwa 40 nm aufweist. Diese Pigmentpartikel haben thermische Relaxationszeiten von weniger als 10 ns. Unter Annahme eines thermischen oder mechanischen Mechanismus zur Entfernung von Tätowierungen sollten Impulse unter Nanosekunden, also Picosekunden, theoretisch wirksamer sein.

2.2 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist es zu untersuchen, ob für die Entfernung von Tätowierungen mit dem Picosekundenlaser schneller und effektiver ist als die bekannte und bewährte Nanosekunden Laserbehandlung.

Zu diesem Zweck wurde der Universitätsklinik für Dermatologie Graz im Oktober 2016 ein Picosekundenlaser mit den Wellenlängen 1064 nm und 532 nm unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Arbeit wurden in einer Testreihe an 11 Tätowierungen Laserbehandlungen durchgeführt. Die Tätowierungen wurden sowohl mit dem Nanosekunden-Laser, dem Rubinlaser der Klinik, als auch mit dem Picosekundenlaser behandelt, um die Systeme direkt miteinander vergleichen zu können und deren Wirkung zu detektieren.

Ziel war es die Wirksamkeit des Picosekundenlasers zu testen und eventuelle Fortschritte in der Lasertechnologie aufzuzeigen.

2.3 Probandenrekrutierung

Um für die Testreihe im Oktober 2016 Probanden und Probandinnen zu rekrutieren, wurde ein Infoblatt erstellt. Dieses wurde auf den Grazer Universitäten und am Klinikum ausgehängt. Außerdem wurden auf Online-Plattformen Anzeigen geschaltet. Zu Kommunikationszwecken wurde eine eigene Emailadresse eingerichtet.

7 weibliche Probandinnen mit insgesamt 11 Tätowierungen, 6 davon blauschwarz, 5 mit färbigen Anteilen, stellten sich freiwillig für die Testreihe zur Verfügung.

Zentrum für Ästhetische Medizin am LKH-Univ. Klinikum Graz

In einem Forschungsprojekt zum Thema

TATTOO-Entfernung

vergleichen wir die Wirksamkeit von Lasersystemen

1. Behandlung kostenfrei

Weiterbehandlung bzw. Folgetermine im Zentrum für Ästhetische Medizin sind möglich. Die Anzahl der Termine ist abhängig von Art und Größe der Pigmentierung



Vorher



6 Wochen nach der 1. Behandlung

© Syneron Candela

Weitere Informationen unter: 06606526005 und laserstudie2016@gmx.at

Nächster Termin: 16.10.2016

Abbildung 16: Infoblatt zur Testreihe im Oktober 2016

2.4 Durchführung

Im Oktober und November 2016 wurde die Testreihe an 7 weiblichen Probandinnen mit insgesamt 11 Tätowierungen durchgeführt. Die teilnehmenden Probandinnen mit Fitzpatrick Hauttyp I bis III waren zwischen 21 und 52 Jahren alt.

Jede Tätowierung wurde vor der Behandlung markiert und 50% der jeweiligen tätowierten Fläche mit dem Picosekunden- und 50% mit dem Nanosekundenlaser behandelt. Um den Aufhellungseffekt beider Lasersysteme miteinander zu vergleichen erfolgte eine singuläre Laserbehandlung. Die Probandinnen wurden 4 bis 6 Wochen später zur Kontrolle und Fotodokumentation wiederbestellt.

Für die Fotodokumentation und zur Auswertung der Ergebnisse wurden Fotos vor der Behandlung, direkt nach der Behandlung und 4 bis 6 Wochen nach der Behandlung aufgenommen.

	Anzahl
Geschlecht	
weiblich	7 (100%)
männlich	0
Alter	21-52
Hauttyp	
I	1 (14%)
II	3 (43%)
III	3 (43%)
Art der Tätowierung	
Professionell	11 (100%)
Laientätowierung	0
Farbe der Tätowierung	
Blau/schwarz	6 (54%)
mit färbigen Anteilen	5 (46%)
Lokalisation	
Obere Extremität	4 (36,5%)
Torso	4 (36,5%)
Kopf	1 (9%)
Untere Extremität	2 (18%)

Tabelle 8: Übersicht Studienteilnehmer

Für die Testreihe wurde ein gütegeschalteter Nanosekunden Rubinlaser mit folgender Einstellung verwendet:

694 nm, 4,5 J/cm², 1, 3 Hz, spot size 4 mm, Impulsdauer 40 ns

Für die Testreihe wurde ein gütegeschalteter Picosekunden (fd)-Nd:YAG-Laser mit folgenden Einstellungen verwendet:

Einstellung 1 für blauschwarze Anteile der Tätowierung:

1064 nm, 0,9 J/cm², 1 Hz, spot size 6 mm, Impulsdauer 450 ps

Einstellung 2 für farbige Anteile der Tätowierung:

532 nm, 0,9 J/cm², 1 Hz, spot size 6 mm, Impulsdauer 375 ps

3 Ergebnisse – Resultate

Um die Ergebnisse festzuhalten und auswerten zu können wurden mehrere Fotos von den Tätowierungen angefertigt. Die Fotos wurden vor Beginn der Behandlung, direkt nach der Behandlung und bei der Kontrolluntersuchung 4 bis 6 Wochen nach der Behandlung gemacht.

Die Ergebnisse wurden für beide Lasersysteme mit „-“ für keine Aufhellung, mit „+“ für mäßige Aufhellung und „++“ für gute Aufhellung durch die einmalige Lasertherapie bewertet. Beurteilt wurde sowohl die Aufhellung der blauschwarzen als auch der verschiedenen farbigen Anteile der Tätowierungen. Die Punkte der einzelnen Teilbewertungen wurden am Ende addiert.

3.1 Probandin 1

Probandin A.B., 37 Jahre, weiblich, Fitzpatrick Hauttyp II, nimmt mit zwei farbigen Tätowierungen mit blauschwarzen Anteilen an der Testreihe teil. Beide Tätowierungen sind etwa 15 Jahre alt und wurden professionell im Ausland gestochen.

3.1.1 Tattoo Nr. 1

Ausgangsbefund:

Die erste Tätowierung am rechten Handgelenk, besteht aus einer farbigen (Rot, Gelb) Blume mit schwarzen Outlines und schwarzer Schrift. Bereits vor der Behandlung zeigen sich die Schrift und Outlines der Blume etwas unscharf. Auch die rote Pigmentierung der Blume ist in kleinen Bereichen leicht abgeblasst. Es finden sich keine Schattierungen.

Verlauf:

Nach der Behandlung sind im Bereich des Rubinlasers ein deutliches „Whitening“ zu sehen. Das behandelte Hautareal zeigt sich generell leicht gerötet.

Der Abheilungsprozess gestaltete sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Vier Wochen nach der Erstbehandlung kommt die Probandin zur Kontrolle. Im Schriftzug und den Outlines der Blume zeigen sich im Bereich des Rubinlasers leichte Aufhellung in der blauschwarzen Pigmentierung. Die farbige Pigmentierung scheint unverändert sowohl im Rot- als auch im Gelbbereich. Im mit dem Picolaser behandelten Anteil der Tätowierung zeigen sich sowohl im farbigen als auch im blauschwarzen Bereich keine Veränderungen.

LASER	Schwarz	Farbe (Rot)	Farbe (Gelb)	Punkte
Rubinlaser	+	-	-	1
Picolaser	-	-	-	0

Tabelle 9: Ergebnis Tattoo Nr.1



Abbildung 17: Tattoo Nr.1: VORHER



Abbildung 18: Tattoo Nr.1: VORHER mit Markierung



Abbildung 19: Tattoo Nr.1: Direkt nach der Behandlung



Abbildung 20: Tattoo Nr.1: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung)

3.1.2 Tattoo Nr. 2

Am linken Handgelenk befindet sich die zweite Tätowierung, ein farbiger (blau-türkis, weiß) Salamander mit schwarzen Outlines.

Verlauf:

Nach der Behandlung sind im Bereich des Rubinlasers deutliches „Whitening“ zu sehen.

Das behandelte Hautareal zeigt sich generell leicht gerötet.

Der Abheilungsprozess gestaltete sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Vier Wochen nach der Erstbehandlung kommt die Probandin zur Kontrolle. Die schwarzblauen Outlines und die türkis-blauen Pigmentierung des Salamanders zeigen sich im Bereich des Rubylasers deutlich aufgehellt. Im Bereich des mit dem Picolaser behandelten Teils der Tätowierung ist eine leichte Aufhellung in der türkis-blauen Pigmentierung des Salamanders zu erkennen. Die schwarzblauen Outlines scheinen fast unverändert, die dunkle Schattierung dezent aufgehellt.

LASER	Schwarz	Farbe (Blau)	Punkte
Rubinlaser	++	++	4
Picolaser	+	+	2

Tabelle 10: Ergebnis Tattoo Nr.2



Abbildung 21: Tattoo Nr.2: VORHER



Abbildung 22: Tattoo Nr.2: VORHER mit Markierung



Abbildung 23: Tattoo Nr.2: Direkt nach der Behandlung



Abbildung 24: Tattoo Nr.2: NACHHER 4 Wochen nach Behandlung

3.2 Probandin 2

Probandin H.M., 34 Jahre, weiblich, Fitzpatrick Hauttyp I, nimmt mit insgesamt drei professionell gestochenen Tätowierungen an der Testreihe teil. Eine Farbtätowierung mit dunklen Anteilen und zwei blauschwarze Tätowierungen werden einmalig behandelt.

3.2.1 Tattoo Nr.3

Ausgangsbefund:

Die erste Tätowierung mit einer Größe von ca. 35x20 cm befindet sich über den Schulterblättern. Behandelt wird nur ein ca. 25 cm² großer Teil im Bereich der linken Schulter.

Die Tätowierung besteht aus einem farbigen (Rot, Gelb, Orange) Drachen mit schwarzen Outlines. Vor der Behandlung fällt eine unterschiedliche Intensität in der Pigmentierung der Farben auf. Es finden sich keine Schattierungen.

Verlauf:

Nach der Behandlung sind im Bereich des Rubinlasers ein dezentes „whitening“ und kleine Blutungen in den dunkeln Pigmentierungsanteilen zu sehen. Das behandelte Hautareal zeigt sich generell leicht gerötet. Auch im Bereich des Nanolasers finden sich ein dezentes „whitening“ und kleine Blutungen in den dunkeln Pigmentierungsanteilen.

Der Abheilungsprozess gestaltete sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Vier Wochen nach der Erstbehandlung kommt die Probandin zur Kontrolle. In den dunkel pigmentierten Anteilen der Tätowierung zeigen sich im Bereich des Rubinlasers leichte Aufhellungen. Die farbige Pigmentierung scheint unverändert sowohl im Rot- als auch im Gelb- und Orangebereich. Im mit dem Picolaser behandelten Anteil der Tätowierung zeigen sich sowohl im farbigen als auch im blauschwarzen Bereich keine Veränderungen.

LASER	Schwarz	Farbe (Rot)	Farbe (Gelb)	Farbe (Orange)	Punkte
Rubinlaser	+	-	-	-	1
Picolaser	-	-	-	-	0

Tabelle 11: Ergebnis Tattoo Nr.3



Abbildung 25: Tattoo Nr.3: VORHER
Gesamtübersicht



Abbildung 26: Tattoo Nr.3: VORHER



Abbildung 27: Tattoo Nr.3: VORHER mit Markierung



Abbildung 28: Tattoo Nr.3: direkt nach Behandlung

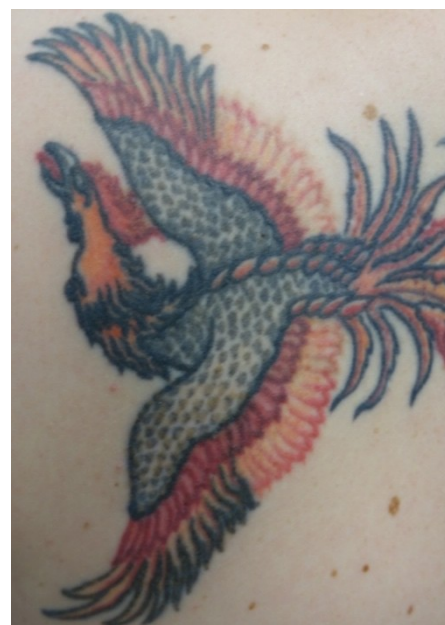


Abbildung 29: Tattoo Nr.3: NACHHER

3.2.2 Tattoo Nr. 4

Ausgangsbefund:

Diese blauschwarze Tätowierung mit 24x11 cm befindet sich in der Steißregion und wurde vor ca. 12 Jahren professionell gestochen.

Vor der Behandlung fällt eine dezente Narbenzüge, die bereits im Rahmen des Tätowierens entstanden sind, in den tätowierten Hautarealen auf. Es finden sich keine Schattierungen, aber der caudale Anteil der Tätowierung erscheint bereits etwas verblasst.

Verlauf:

Nach der Behandlung ist auf der gesamten Tätowierung ein „whitening“, ausgeprägter im Bereich des Rubinlasers, zu sehen. Das behandelte Hautareal und die Umgebung zeigt sich generell leicht gerötet.

Der Abheilungsprozess gestaltete sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Vier Wochen nach der Erstbehandlung kommt die Probandin zur Kontrolle. Im Bereich des Rubinlasers zeigen sich deutliche Aufhellungen. Im mit dem Picolaser behandelten Anteil der Tätowierung zeigen sich keine wesentlichen Veränderungen.

LASER	Schwarz	Punkte
Rubinlaser	++	2
Picolaser	-	0

Tabelle 12: Ergebnis Tattoo Nr.4



Abbildung 30: Tattoo Nr.4: VORHER



Abbildung 31: Tattoo Nr.4: VORHER mit Markierung



Abbildung 32: Tattoo Nr.4: Direkt nach der Behandlung



Abbildung 33: Tattoo Nr. 4: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung)

3.2.3 Tattoo Nr. 5

Ausgangsbefund:

Diese blauschwarze Tätowierung, bestehend aus fünf, je ca. 2 bis 3 cm großen Zeichen findet sich entlang des lateralen Fußrückens und Knöchels des linken Fußes und wurde vor ca. 7 Jahren im Ausland professionell gestochen.

Vor der Behandlung fällt ein Unterschied in der Intensität der Pigmentierung der einzelnen Zeichen auf. Es finden sich keine Schattierungen.

Verlauf:

Nach der Behandlung ist auf der gesamten Tätowierung ein dezentes „whitening“, ausgeprägter im Bereich des Rubinlasers, zu sehen. Das behandelte Hautareal und die Umgebung zeigt sich generell leicht gerötet.

Der Abheilungsprozess gestaltete sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Vier Wochen nach der Erstbehandlung kommt die Probandin zur Kontrolle. Im Bereich des Rubinlasers zeigen sich deutliche Aufhellungen. Im mit dem Picolaser behandelten Anteil der Tätowierung zeigt sich keine wesentlichen Veränderungen.

LASER	Schwarz	Punkte
Rubinlaser	++	2
Picolaser	-	0

Tabelle 13: Ergebnis Tattoo Nr.5



Abbildung 34: Tattoo Nr.5: VORHER



Abbildung 35: Tattoo Nr.5: VORHER mit Markierung



Abbildung 36: Tattoo Nr.5: Direkt nach der Behandlung



Abbildung 37: Tattoo Nr.5: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung)

3.3 Probandin 3

Probandin S.G., 23 Jahre, weiblich, Fitzpatrick Hauttyp III, nimmt mit einer professionell gestochenen blauschwarzen Tätowierung an der Testreihe teil.

3.3.1 Tattoo Nr. 6

Ausgangsbefund:

Diese blauschwarze Tätowierung in Form eines Schriftzugs im Ausmaß von 20x9 cm befindet sich zwischen den Schulterblättern und wurde vor ca. 5 Jahren gestochen.

Vor der Behandlung fallen unscharfe Buchstaben, die sich in der Intensität der Pigmentierung unterscheiden, auf. Es finden sich keine Schattierungen.

Verlauf:

Nach der Behandlung tritt im Bereich des Rubinlasers ein ausgeprägtes, im Bereich des Picolasers ein dezentes „whitening“ auf. Das behandelte Hautareal und die Umgebung zeigt sich generell gerötet.

Der Abheilungsprozess gestaltet sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Vier Wochen nach der Erstbehandlung kommt die Probandin zur Kontrolle. Im Bereich des Rubinlasers zeigen sich deutliche Aufhellungen. Im mit dem Picolaser behandelten Anteil der Tätowierung zeigt sich keine wesentlichen Veränderungen.

LASER	Schwarz	Punkte
Rubinlaser	++	2
Picolaser	-	0

Tabelle 14: Ergebnis Tattoo Nr.6

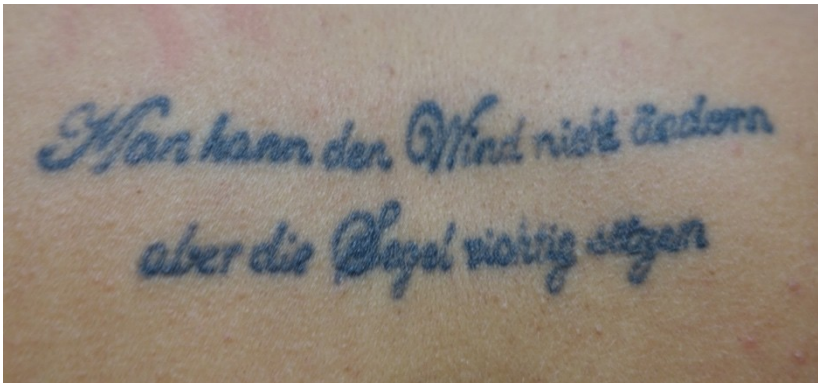


Abbildung 38: Tattoo Nr.6: VORHER

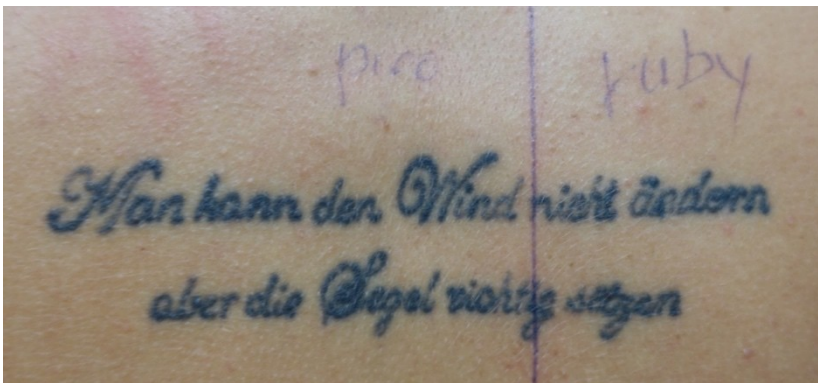


Abbildung 39: Tattoo Nr.6: VORHER mit Markierung



Abbildung 40: Tattoo Nr.6: Direkt nach der Behandlung

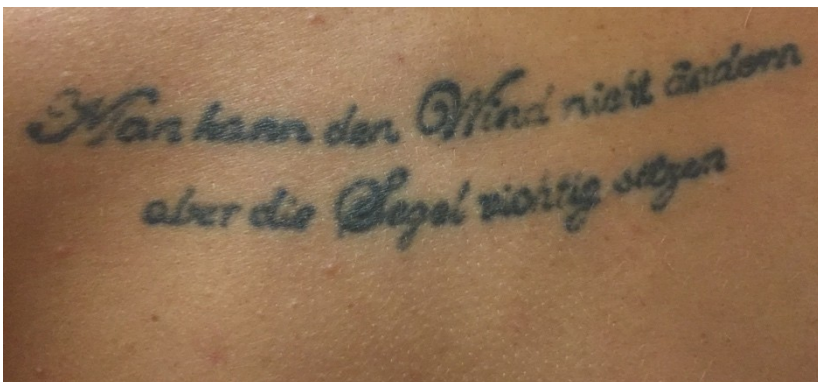


Abbildung 41: Tattoo Nr.6: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung)

3.4 Probandin 4

Probandin C.K., 35 Jahre, weiblich, Fitzpatrick Hauttyp III, nimmt mit einer professionell gestochenen Farbtätowierung an der Testreihe teil.

3.4.1 Tattoo Nr. 7

Ausgangsbefund:

Diese farbige Tätowierung in Form eines Schriftzugs mit einer Größe von ca. 5x2 cm befindet sich auf der Innenseite des linken Handgelenks und wurde vor ca. 4 Jahren professionell gestochen.

Die Buchstaben sind violett-pink pigmentiert. Es finden sich keine Schattierungen. Diese Tätowierung wird auf Grund der Farbe und Größe nur mit dem Picolaser mit einer Wellenlänge von 532 nm behandelt.

Verlauf:

Nach der Behandlung ein dezentes „whitening“ zu sehen. Das behandelte Hautareal und die Umgebung zeigt sich leicht gerötet.

Der Abheilungsprozess gestaltet sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Vier Wochen nach der Erstbehandlung kommt die Probandin zur Kontrolle. In der mit dem Picolaser (532 nm) behandelten Tätowierung zeigen sich keine wesentlichen Veränderungen.

LASER	Farbe (Violett)	Punkte
Picolaser	-	0

Tabelle 15: Ergebnis Tattoo Nr.7



Abbildung 42: Tattoo Nr.7: VORHER



Abbildung 43: Tattoo Nr.7: Direkt nach der Behandlung



Abbildung 44: Tattoo Nr.7: NACHER (4 Wochen nach Behandlung)

3.5 Probandin 5

Probandin K.A., 52 Jahre, weiblich, Fitzpatrick Hauttyp II, nimmt mit einer professionell gestochenen blauschwarzen Tätowierung mit färbigen Anteilen an der Testreihe teil.

3.5.1 Tattoo Nr. 8

Ausgangsbefund:

Die blauschwarze Tätowierung mit hellblau färbigen Anteilen imponiert vor der Behandlung bereits ausgebleicht und leicht verwaschen und befindet sich in Form eines Delfins im Ausmaß von 6x3 cm befindet sich am Dekolleté links und wurde vor ca. 14 Jahren professionell gestochen. Es finden sich keine Schattierungen.

Verlauf:

Nach der Behandlung ist im Bereich des Rubinlasers ein deutliches „whitening“ zu sehen. Das behandelte Hautareal und die Umgebung zeigt sich leicht gerötet. Der Abheilungsprozess gestaltet sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Vier Wochen nach der Erstbehandlung kommt die Probandin zur Kontrolle. Die schwarzblauen Bereiche der Tätowierung haben auf beide Laser sehr gut angesprochen und auch die hellblauen Anteile imponieren aufgehellt, wobei das Ergebnis mit dem Rubinlaser etwas besser erscheint.

LASER	Schwarz	Farbe (Blau)	Punkte
Rubinlaser	++	++	4
Picolaser	++	+	3

Tabelle 16: Ergebnis Tattoo Nr.8



Abbildung 45: Tattoo Nr.8: VORHER



Abbildung 46: Tattoo Nr.8: VORHER mit Markierung



Abbildung 47: Tattoo Nr.8: Direkt nach der Behandlung



Abbildung 48: Tattoo Nr.8: NACHHER

3.6 Probandin 6

Probandin A.G., 29 Jahre, weiblich, Fitzpatrick Hauttyp II, nimmt mit zwei professionell gestochenen blauschwarzen Tätowierung an der Testreihe teil.

3.6.1 Tattoo Nr. 9

Ausgangsbefund:

Die blauschwarze Tätowierung in Form einer Musiknote in der Größe von 2x2 cm befindet sich hinter dem linken Ohr und wurde vor ca. 7 Jahren professionell in Graz gestochen.

Es finden sich keine Schattierungen.

Verlauf:

Nach der Behandlung sind dezente Bläschen, stärker im Bereich des Rubinlasers, zu sehen.

Das behandelte Hautareal und die Umgebung zeigt sich leicht gerötet.

Der Abheilungsprozess gestaltet sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Die Probandin kommt nicht zur Kontrolle, übermittelt aber 10 Wochen nach der Behandlung ein Foto. Soweit beurteilbar zeigen sich sowohl im mit dem Rubinlaser behandelten, als auch im mit dem Picolaser behandelten Teil der Tätowierung keine wesentlichen Veränderungen.

LASER	Schwarz	Punkte
Rubylaser	-	0
Picolaser	-	0

Tabelle 17: Ergebnis Tattoo Nr.9



Abbildung 49: Tattoo Nr.9: VORHER



Abbildung 50: Tattoo Nr.9: VORHER mit Markierung



Abbildung 51: Tattoo Nr.9: Direkt nach der Behandlung



Abbildung 52: Tattoo Nr.9: NACHHER (10 Wochen nach der Behandlung)

3.6.2 Tattoo Nr. 10

Ausgangsbefund:

Die blauschwarze Tätowierung in Form von Schriftzeichen mit einem Stern mit einer Größe von 6x1,5 cm befindet sich am lateralen Rand des linken Fußes und wurde vor ca. 9 Jahren in Asien gestochen. Die Tätowierung erscheint bereits vor der Behandlung verschwommen. Es finden sich keine Schattierungen.

Verlauf:

Nach der Behandlung tritt im Bereich des Rubinlasers eine Weißfärbung auf. Der Abheilungsprozess gestaltet sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Die Probandin kommt nicht zur Kontrolle, übermittelt aber 10 Wochen nach der Behandlung ein Foto. Soweit beurteilbar zeigen sich die Picolaser behandelten Schriftzeichen etwas ausgedünnt. Der mit dem Rubinlaser behandelte Bereich erscheint im Wesentlichen unverändert.

LASER	Schwarz	Punkte
Rubinlaser	-	0
Picolaser	+	1

Tabelle 18: Ergebnis Tattoo Nr.10



Abbildung 53: Tattoo Nr.10: VORHER

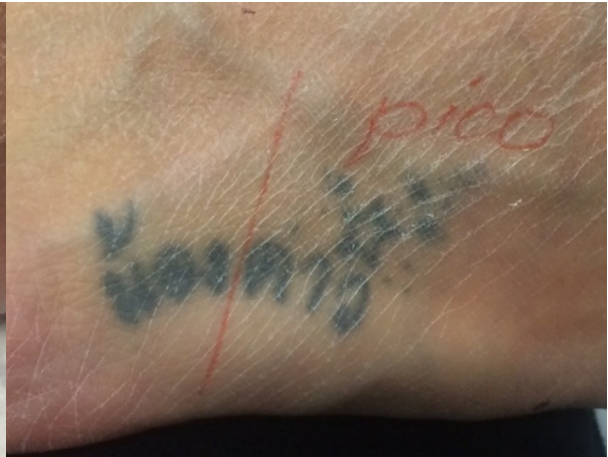


Abbildung 54: Tattoo Nr. 10 VORHER mit Markierung



Abbildung 55: Tattoo Nr.10: Direkt nach der Behandlung



Abbildung 56: Tattoo Nr.10: NACHHER (10 Wochen nach der Behandlung)

3.7 Probandin 7

Probandin B.C., 24 Jahre, weiblich, Fitzpatrick Hauttyp II, nimmt mit einer professionell gestochenen blauschwarzen Tätowierung an der Testreihe teil.

3.7.1 Tattoo Nr. 11

Ausgangsbefund:

Die blauschwarze Tätowierung in Form eines 2x2 cm großen Sterns befindet sich am Handrücken der rechten Hand zwischen Daumen und Zeigefinger und wurde vor ca. 5 Jahren professionell gestochen. Die Tätowierung erscheint bereits vor der Behandlung dezent unscharf begrenzt und stellenweise etwas aufgehellt. Es finden sich keine Schattierungen.

Verlauf:

Nach der Behandlung tritt in beiden Bereichen ein „whitening“ auf, das im Bereich des Rubinlasers stärker ausgeprägt ist.

Der Abheilungsprozess gestaltet sich laut Probandin komplikationslos.

Ergebnis:

Die Probandin kommt nach 6 Wochen zur Kontrolle. Der mit dem Rubinlaser behandelte Bereich erscheint im Vergleich zum Picolaserbereich dezent aufgehellt.

LASER	Schwarz	Punkte
Rubylaser	+	1
Picolaser	-	0

Tabelle 19: Ergebnis Tattoo Nr.11



Abbildung 57: Tattoo Nr.11: VORHER



Abbildung 58: Tattoo Nr.11: VORHER mit Markierung



Abbildung 59: Tattoo Nr.11: Direkt nach der Behandlung



Abbildung 60: Tattoo Nr.11: NACHHER (4 Wochen nach Behandlung)

3.8 Zusammenfassende Ergebnisse und Erkenntnis

7 Probandinnen (7 Frauen) nahmen freiwillig an der Versuchsreihe teil. 11 Tätowierungen, fünf davon mit farbigen Anteilen, sechs mit ausschließlich blauschwarzem Pigment, wurden einmalig mit beiden Lasern behandelt und das Ergebnis 4 bis 6 Wochen nach der Behandlung bewertet.

Die Ergebnisse wurden mit „-“ für keine Aufhellung, „+“ für mäßige Aufhellung und „++“ für gute Aufhellung der Pigmentierung durch die Lasertherapie bewertet.

Für die Beurteilung wurde das Ansprechen jeder Tätowierung auf die zwei Lasersysteme im blauschwarzen Anteil und in den färbigen Anteilen bewertet.

Für jedes „+“ wurde 1 Punkt vergeben. Beurteilt wurde sowohl die Aufhellung der blauschwarzen als auch der verschiedenen farbigen Anteile der Tätowierungen. Die Punkte der einzelnen Teilbewertungen wurden am Ende addiert.

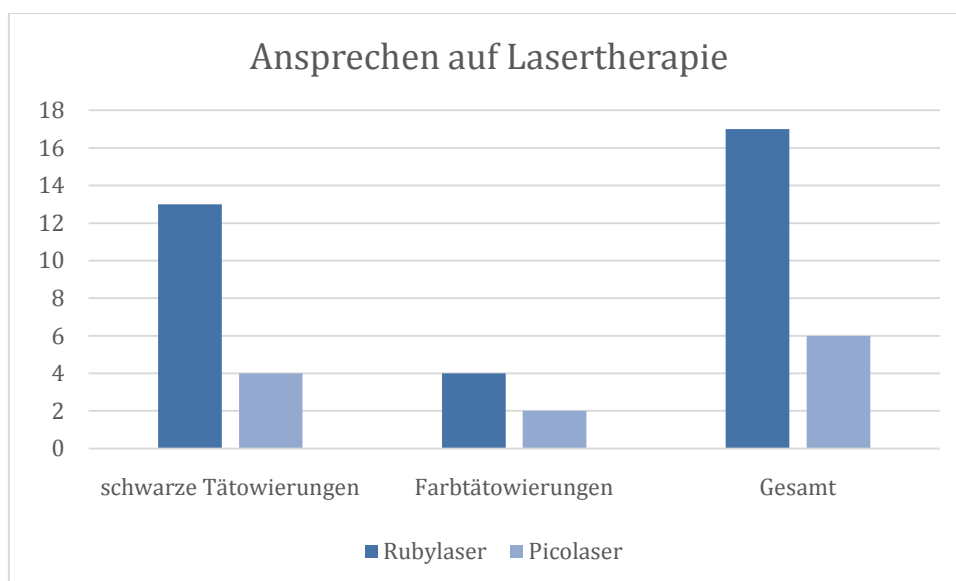


Abbildung 61: Ergebnis der Lasertherapie in Punkten

In der Anwendung auf schwarzen Tätowierungen erreichte der Rubinlaser 13 Punkte, der Picolaser 4. Für die Anwendung auf den farbigen Bereichen der Tätowierungen erzielte der Rubinlaser 4, der Picolaser 2 Punkte.

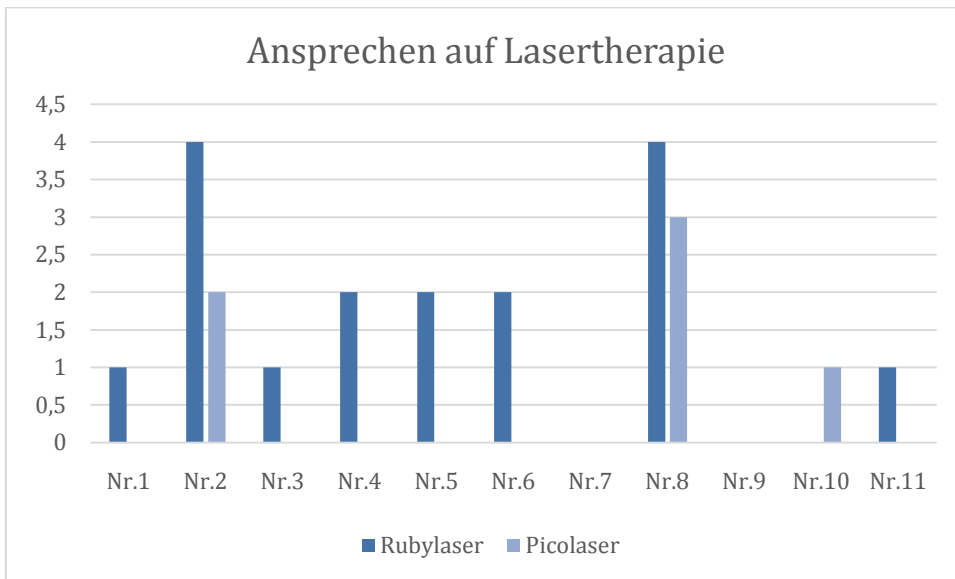


Abbildung 62: Ergebnis der Lasertherapie in Punkten für Tätowierung Nr.1-11

Insgesamt (auf schwarzen und farbigen Bereichen) erreichte der Rubinlaser 17 Punkte, der Picolaser 6.

Zwei der 11 Tätowierungen sprachen weder auf eine Behandlung mit dem Rubinlaser, noch mit dem Picolaser an.

Zusammenfassend konnte in der Versuchsreihe nicht gezeigt werden, dass der Picolaser bei einmaliger Anwendung zur Entfernung von Farbtätowierungen effektiver als der Rubinlaser ist. Auch ein effektiveres Entfernen von schwarzen Tätowierungen konnte nicht beobachtet werden.

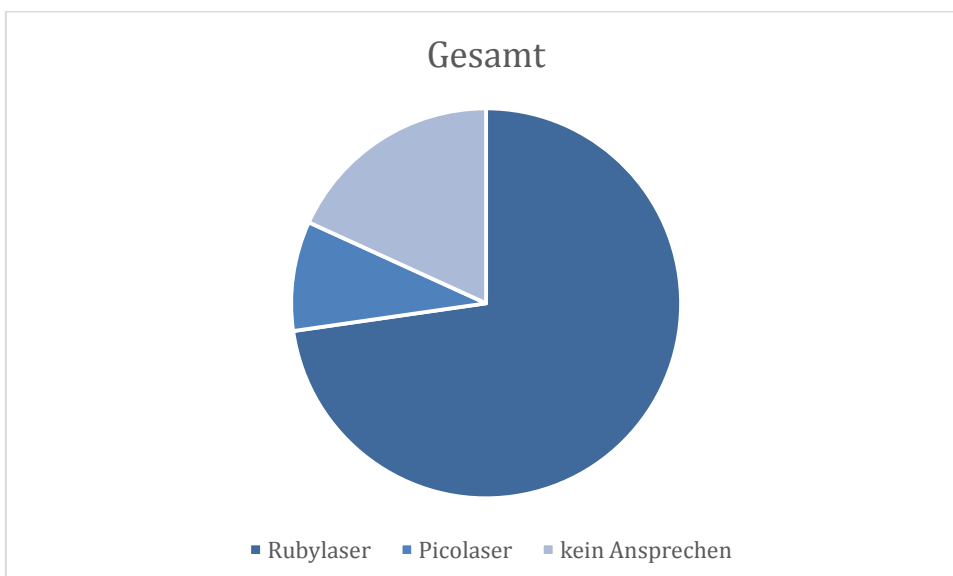


Abbildung 63: Gesamtergebnis der Lasertherapie

4 Diskussion

Ziel der Diplomarbeit war es, im Rahmen einer Testreihe, zu untersuchen, ob die Entfernung von Tätowierungen mit dem Picosekunden Laser schneller und effektiver ist als die bekannte und bewährte Nanosekunden Laserbehandlung.

Obwohl die genaue Physiologie hinter dem Mechanismus der Tattoorentfernung mittels Lasers noch nicht bekannt ist, hat sich der Nanosekundenlaser seit Jahrzehnten in der Behandlung bewährt. In vielen klinischen Studien konnte seine Effizienz in der Entfernung von schwarzen Tätowierungen untersucht und erfolgreich bewiesen werden. Färbige Tätowierungen lassen sich meist, auch mit dem Nanosekundenlaser, nur ineffizient aufhellen.

Seit 2012 können Pulse im Picosekundenbereich zur Tattoorentfernung angewendet werden. Es gibt inzwischen über 20 wissenschaftliche Artikel, die die Wirksamkeit von Picosekundenlasern belegen, aber nur wenige dieser Studien vergleichen ns - und ps - Laser direkt miteinander. (64)

Die erste vergleichende Anwendungsbeobachtung zwischen Nanosekundenlaser und Picosekundenlaser (Ross et al.) am Menschen wurde bereits 1998 mit einem Nd:YAG Laser durchgeführt. (65) Sie kam zu dem Ergebnis, dass Picosekundenlaser zur Entfernung von schwarzen Tätowierungen effektiver sind. Eine 2016 durchgeführte Studie (Pinto et al.) konnte keinen Unterschied in der Effektivität der beiden Impulsdauern feststellen. (66) 2017 kam eine weitere vergleichende Studie (Lorgeou et al.) zu dem Ergebnis, dass der Picosekundenlaser in der Entfernung von schwarzen Tätowierungen dem Nanosekundenlaser zwar überlegen ist, in der Anwendung bei Farbtätowierungen konnte der Picolaser aber keine besseren Ergebnisse erzielen. (67)

Seit 2012 wurden einige wenige Studien an Farbtätowierungen durchgeführt. Hier wurde die Entfernung allerdings nur mit einem Picosekundenlaser durchgeführt und nicht direkt mit einem Nanosekundenlaser verglichen. (68)(69)

STUDIE	LASER	ERGEBNIS
Ross et al. 1998	PSL: Nd:YAG (Model YG501) 1064 nm, 35 ps NSL: Nd:YAG (Model NY82-10) 1064 nm, 10 ns	PSL effektiver bei schwarzen Tätowierungen
Pinto et al. 2016	PSL: Nd:YAG (Picoway) 1064 nm, 450 ps NSL: Nd:YAG (MedLiteC6) 1064 nm, 5 ns	Kein Unterschied bei schwarzen Tätowierungen zwischen PSL und NSL
Lorgeou et al. 2017	PSL: Nd:YAG (Picoway) 1064 nm, 450 ps; 532 nm, 375 ps; Nd: YAG (Enlighten) 532 nm, 375 ps NSL: VersaPulse Cosmetic, 1064 nm, 532 nm, 5 ns	PSL effektiver bei schwarzen Tätowierungen, kein Unterschied bei Farbtätowierungen

Tabelle 20: bis dato durchgeführte vergleichende Studien zwischen Picosekundenlaser und Nanosekundenlaser zur Tattoorentfernung (65)(66)(67)

Aufgrund der wenigen verfügbaren Studien ist die Datenlage zurzeit alles andere als zufriedenstellend und es ist schwierig konkrete Ergebnisse abzulesen und auf ein Patientenkollektiv anzuwenden.

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführte Testreihe zeigte, dass der Picosekundenlaser bei einmaliger Anwendung dem bewährten Nanosekundenlaser unterlegen ist. Man konnte sowohl bei blauschwarzen, als auch bei farbigen Tätowierungen keine besseren Ergebnisse mit dem Picolaser erzielen.

Auch die erhoffte Möglichkeit endlich Farbpigmente in Orange- und Rottönen zu entfernen, konnte nicht bestätigt werden. Sowohl der Picolaser als auch der Nanolaser scheinen die Farbpigmente aufgrund ihrer speziellen Wellenlängen nicht ansteuern zu können.

Da zur vollständigen Entfernung stets mehrere Sitzungen erforderlich sind, ist es durchaus möglich, dass nach mehrmaliger Anwendung ein differierendes Ergebnis zu erwarten wäre. Es sind sicherlich mehr Daten über Picosekundenlaser und weitere vergleichende Studien notwendig um gesicherte Aussagen über die Effizienz des Picolasers zu machen.

5 Literaturverzeichnis

1. Einstein A. Zur Quantentheorie der Strahlung. Leipzig: Hirzel; 1917.
2. Raulin C, Karsai S. Lasertherapie der Haut. 2013. 25-40 p.
3. Gross, Andreas J; Herrmann TRW. History of Lasers. World J Urol. 2007;25(3):217–20.
4. Kneubühl, Fritz Kurt; Sigrist MW. Laser. Wiesbaden: Vieweg+Teubner; 2008.
5. Strahlenschutzkommission Bonn. Gefahren bei Laseranwendung an der menschlichen Haut. In: 169 Sitzung der Strahlenschutzkommission am 31 Oktober 2000. Bonn: SSK Bonn; 2000.
6. Weller DO. Licht als Welle (Wellenmodell). 2017.
7. Dinstl, Karl; Fischer LR. Der Laser. Grundlagen und klinische Anwendung. Berlin Heidelberg: Springer Verlag; 1981.
8. Moll I. Dermatologie. Stuttgart: Thieme Verlag; 2016.
9. Dortmund TU. Laser in der Medizin [Internet]. 2016 [cited 2017 Apr 5]. Available from: https://e3.physik.uni-dortmund.de/~suter/Vorlesung/Medizinphysik_06/12_Laser.pdf
10. Eichler, Jürgen; Seiler T. Laser: Grundlagen Systeme Anwendungen. Berlin Heidelberg: Springer Verlag; 1991.
11. Hügel H. Strahlwerkzeug Laser. Wiesbaden: Springer Fachmedien; 1992.
12. Weiler J. Schnellerer Datentransfer dank Quantenphysik [Internet]. 2015. [cited 2017 Nov 21]. Available from: <http://news.rub.de/wissenschaft/2015-02-25-spin-laser-schnellerer-datentransfer-dank-quantenphysik>
13. Landthaler M, Hohenleutner U. Lasertherapie in der Dermatologie: Atlas und Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer Verlag; 2006.
14. Kaufmann R, Podda M, Landes E. Dermatologische Operationen: Farbatlas und Lehrbuch der Hautchirurgie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2011.
15. Kramme Rüdiger, Krasicka-Rohde Ewa ZF. Medizintechnik: Lasersysteme. Berlin Heidelberg: Springer Verlag; 2011.
16. Berlien H-P, Dörschel K, Müller GJ. Laser in der Medizin. In: Biomedizinische Technik 4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1991. p. 89–112.
17. Laser-Forschungslabor, LIFE-Zentrum, Klinikum der Universität München. Thermische Laseranwendungen [Internet]. [cited 2017 Apr 19]. Available from: <http://www.klinikum.uni-muenchen.de/LIFE->

Zentrum/de/IfI/Forschung/Thermische_Laseranwendungen/Thermische_Laseranwendungen_Info.html

18. Kramme R. Medizintechnik: Verfahren-Systeme-Informationsverarbeitung. Berlin Heidelberg: Springer Verlag; 2017.
19. Raulin C, Greve B. Laser- und IPL-Technologie in der Dermatologie und ästhetischen Medizin. Stuttgart, New York: Schattauer; 2003.
20. Kimmig W. Lasereingriffe in der Dermatologie. Der Hautarzt. 2003 Jul 1;54(7):583–93.
21. Wiese K. Neodym-YAG-Laser [Internet]. 2015 [cited 2017 Nov 10]. Available from: <http://www.hautpraxis-wiese.de/leistungen/lasermedizin/yaglaser.php>
22. Fritsch P. Aufbau und Funktionen der Haut. In Springer Berlin Heidelberg; 2004. p. 3–42.
23. Kerscher M. Dermatokosmetik. Frankfurt am Main, Wiesbaden, Darmstadt: Steinkopff Verlag; 2009.
24. Kühnel W. Taschenatlas Histologie. Stuttgart: Thieme Verlag; 2014.
25. Treatments That Work as Miracle for Melasma [Internet]. 2017 [cited 2017 Dec 8]. Available from: <https://akclinics.org/blog/treatments-that-work-as-miracle-for-melasma/>
26. Landthaler M, Hohenleutner U. Lasertherapie in der Dermatologie. Heidelberg: Springer Verlag; 2006.
27. Landthaler M, Hohenleutner U. Laseranwendungen in der Dermatologie. Dtsch Ärzteblatt [Internet]. 1998 [cited 2017 Apr 18];95(6). Available from: <https://www.aerzteblatt.de/archiv/9351/Laseranwendungen-in-der-Dermatologie>
28. Anderson RR, Parrish JA. Selective photothermolysis: precise microsurgery by selective absorption of pulsed radiation. Science. 1983 Apr 29;220(4596):524–7.
29. Bartl A, Schott H-J. Naturgeschichte, Körpergedächtnis: Erkundungen einer kulturanthropologischen Denkfigur. Würzburg: Königshausen & Neumann Verlag; 2014.
30. Scholz M. “Körpermodifikation - Hilfeschrei der Postmoderne? Die Tätowierung als mögliche Form der Konfliktbewältigung.” Hochschule Neubrandenburg; 2012.
31. Abendroth A. Bodymodification: Körpermodifikation im Wandel der Zeit. Mossautal: U-Line UG; 2009.
32. Institut für Mumien und den Iceman [Internet]. [cited 2017 Nov 23]. Available from: <http://www.eurac.edu/de/research/health/iceman/Pages/default.aspx>

33. Lobstädt T. Die Zeichentheorie der Tätowierung. In: Tätowierung, Narzissmus und Theatralität. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften; 2011. p. 97–142.
34. caleyartnz.com/tamoko.html [Internet]. [cited 2017 Nov 23]. Available from: <http://www.caleyartnz.com/tamoko.html>
35. Tätowierungen: Tattoos in Europa - Tätowierungen - Mode - Gesellschaft - Planet Wissen [Internet]. [cited 2017 Apr 19]. Available from: http://www.planet-wissen.de/gesellschaft/mode/taetowierungen_schoenheit_die_unter_die_haut_geht/pwiewiekamdastattoonacheuropa100.html
36. Zettl R. Tattoos- Symbole, die unter die Haut gehen. Abenteuer Philos [Internet]. 2013 [cited 2017 Nov 24];(132). Available from: http://www.abenteuer-philosophie.org/artikel/132_tattoos.pdf
37. Ecce C. Tätowierungen in der westlichen Welt [Internet]. [cited 2017 Apr 10]. Available from: http://www.kulturtechnik-schreiben.imz.uni-erlangen.de/BachelorSS13/hausarbeit_kulturtechnik_schreiben.pdf
38. Wodaabe Gerewol in Niger.
39. Henning G. Sisi für Österreich, hundert Jahre danach. Die Zeit [Internet]. 1998 [cited 2017 Nov 24];(11). Available from: <http://www.zeit.de/1998/11/sisi.txt.19980305.xml>
40. Fischer L. Schattenwürfe in die Zukunft: Kaiserin Elisabeth und die Frauen ihrer Zeit - Lisa Fischer - Google Books. Wien: Böhlau Verlag; 1998.
41. Loos A. Ornament und Verbrechen. Wien: Herold; 1962.
42. Felbermair S. Trends im Wandel der Zeit [Internet]. 2010 [cited 2017 Nov 7]. Available from: <http://orf.at/stories/2006965/2006897/>
43. Ruhnke C. Tätowierung, eine sozio-kulturelle und medizinische Betrachtung. Universität Marburg; 1974.
44. Haidinger C. Christentum . Tattoo . Hinduismus. Universität Wien; 2012.
45. Kluger N. Epidemiology of tattoos in industrialized countries. Curr Probl Dermatol. 2015;48:6–20.
46. Tattoo Statistics [Internet]. 2016 [cited 2017 Apr 27]. Available from: <http://www.statisticbrain.com/tattoo-statistics/>
47. Einstellungen, Meinungen und Nutzung von Tätowierungen in Österreich 2016 [Internet]. 2016 [cited 2017 Apr 27]. Available from: <http://www.marktmeinungsmensch.at/studien/einstellungen-meinungen-und-nutzung-von-taetowieru/>

48. Gartner G. Land der Tätowierer [Internet]. 2017 [cited 2017 Nov 7]. Available from: <http://derstandard.at/2000055586950/Land-der-Taetowierer>
49. Jung EG. Tätowieren und Tattoo. Aktuelle Derm. 2005;(31):527–30.
50. Altmeyers Enzyklopaedie: Schmucktätowierung [Internet]. 2014. Available from: <https://www.enzyklopaedie-dermatologie.de/dermatologie/schmucktatowierung-3637>
51. RPM Medical & Kosmetik. Medizinische Pigmentierung [Internet]. [cited 2017 Apr 27]. Available from: <http://www.med-pigmentierung.de/medizinische-pigmentierung.html>
52. Hautgesundheit und Tattoos - MEDIZIN ASPEKTE [Internet]. [cited 2017 Apr 27]. Available from: https://medizin-aspekte.de/11508-tatoos_16279/
53. Tattoorentfernung – wir zeigen, wie es geht! | DocTattoorentfernung.com [Internet]. 2012 [cited 2017 Nov 30]. Available from: <https://doc-tattoorentfernung.com/tattoo-entfernung-mit-laser>
54. Gerl B. Bilder, die unter die Haut gehen [Internet]. 2006 [cited 2017 Nov 8]. Available from: <http://www.spektrum.de/news/bilder-die-unter-die-haut-gehen/850210>
55. Bäuml W. Absorption, distribution, metabolism and excretion of tattoo colorants and ingredients in mouse and man: the known and the unknown. Curr Probl Dermatol. 2015;48:176–84.
56. Vasold R, Vasold R, Engel E, Landthaler M. Gesundheitsrisiko durch Tätowierungspigmente. :1–3.
57. Tattoos: Ruß unter der Haut [Internet]. 2013 [cited 2017 Dec 9]. Available from: <http://derstandard.at/1369362689621/Tattoos-Russ-unter-der-Haut>
58. Bernstein EF. Laser tattoo removal. Semin Plast Surg. 2007 Aug;21(3):175–92.
59. Konz B, Plewig G. Fortschritte der Dermatologie: Ein Rückblick auf 50 Jahre. Berlin Heidelberg: Springer Verlag; 2002.
60. Brunner F, Hafner R, Giovanoli R, Zala L, Hunziker T, Krebs A. Removal of tattoos with the Nd:YAG laser. Hautarzt. 1987 Oct;38(10):610–4.
61. Hammes S. Qualitätssicherung in der Ästhetischen Medizin durch universitäre Weiterbildung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2012.
62. Metelmann H-R, Hammes S. Lasermedizin in der Ästhetischen Chirurgie. Metelmann H-R, Hammes S, editors. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015.

63. KILMER SL, ANDERSON RR. Clinical Use of the Q-Switched Ruby and the Q-Switched Nd:YAG (1064 nm and 532 nm) Lasers for Treatment of Tattoos. *J Dermatol Surg Oncol*. 1993 Apr 1;19(4):330–8.
64. Ross E V. The picosecond revolution and laser tattoo treatments: are shorter pulses really better? *Br J Dermatol*. 2017;176(2):299–300.
65. Ross EV, Naseef G, Lin C, Kelly M, Michaud N, Flotte TJ, et al. Comparison of Responses of Tattoos to Picosecond and Nanosecond Q-Switched Neodymium:YAG Lasers. *Arch Dermatol*. 1998 Feb 1;134(2):167.
66. Pinto F, Große-B S, Karsai S, Weiß C, Hammes S, Felcht M, et al. Neodymium-doped yttrium aluminium garnet (Nd:YAG) 1064-nm picosecond laser vs. Nd:YAG 1064-nm nanosecond laser in tattoo removal: a randomized controlled single-blind clinical trial Funding sources. 2016;
67. Lorgeou A, Perrillat Y, Gral N, Lagrange S, Lacour JP, Passeron T. Comparison of two picosecond lasers to a nanosecond laser for treating tattoos: A prospective randomized study on 49 patients. *J Eur Acad Dermatology Venereol*. 2017;
68. Brauer JA, Reddy KK, Anolik R, Weiss ET, Karen JK, Hale EK, et al. Successful and Rapid Treatment of Blue and Green Tattoo Pigment With a Novel Picosecond Laser. *Arch Dermatol*. 2012;148(7):820–3.
69. Bernstein EF, Schomacker KT, Basilavecchio LD, Plugis JM, Bhawalkar JD. A novel dual-wavelength, Nd:YAG, picosecond-domain laser safely and effectively removes multicolor tattoos. *Lasers Surg Med*. 2015;47(7):542–8.
70. Kopera D. 2014.