

Aus dem Department für Kleintiere und Pferde
der Veterinärmedizinischen Universität Wien
Universitätsklinik für Pferde

Leiterin: Univ.-Prof. Dr.med.vet. Florian Jenner, Dipl.ACVS Dipl.ECVS

Licht- und Lasertherapie beim Pferd. Anwendungsmöglichkeiten, Effektivität und ihre Grenzen

Bachelorarbeit

Veterinärmedizinische Universität Wien

Vorgelegt von

Sonja Lukic

Wien, im September 2024

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof.Dr.med.vet. H. H. Florian Buchner

Veterinärmedizinische Universität Wien

Klinische Abteilung für Pferdechirurgie

Veterinärplatz 1 1210 Wien

Inhaltverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Material und Methode	2
3. Geschichte	3
4. Physikalischer Hintergrund	4
4.1. Laser.....	6
4.2. Photobiomodulation.....	7
4.3. Thermische Dynamik des Gewebes während der Laserbehandlung.....	9
5. Physiologische Wirkungen von Licht	14
5.1. Reproduktion.....	15
5.2. Wirkung von Licht im Sport und Training.....	19
6. Therapeutische Wirkungen von Licht	22
6.1. Wundheilung beim Pferd.....	22
6.2. Therapeutische Wirkung am Bewegungsapparat von Pferden.....	23
6.2.1. Therapeutische Wirkung auf Gelenke.....	26
7. Diskussion	32
8. Zusammenfassung	35
9. Summary	36
10. Literaturverzeichnis	37
11. Abbildungsverzeichnis	41

Abkürzungen

ATP	Adenosintriphosphat
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
UV	Ultraviolettstrahlung
engl.	Englisch
GnRH	Gonadotropin-releasing-hormon
KI	Konfidenzintervall
3D	Dreidimensional
LED	Light-emitting Diode
mW	Megawatt
NIR	Nahinfrarot
Nm	Nanometer
PBMT	Photobiomodulation Therapy
z.B.	zum Beispiel
KI	Konfidenzintervall
µm	Mikrometer
Ms	Mikrosekunde
J/cm ²	Joule pro Quadratcentimeter
Mm	Millimeter
LLLT	Low-level-Lasertherapie
LLL	Low-level-Laser
HILT	Hochintensiven-Lasertherapie
TNF α	Tumornekrosefaktor Alpha
LPS	Lipopolysaccharide
PGE ₂	Prostaglandin E ₂
LH	Luteinisierendes Hormon
Lx	Lux

bM/HA	Betamethason in Kombination mit Hyaluron
P	Wert

1. Einleitung

Seit über 5500 Jahren ist das Pferd ein nicht mehr wegzudenkender Begleiter des Menschen. Sei es als Arbeitstier, Statussymbol oder Familienmitglied, auch in diesem Jahrtausend besitzt es nach wie vor einen hohen Stellenwert in der Gesellschaft (Klecel und Martyniuk 2021). Je höher die körperliche und geistige Fitness eines Individuums ist, desto höher ist seine Leistungsbereitschaft. Aus diesem Grund existieren seit Jahrtausenden sich immer wieder wandelnde Ernährungspläne, Trainingspläne und diverse medizinische Konzepte, die auf die Gesunderhaltung und auf das Heilen von Krankheiten der Pferde ausgelegt sind. Immer populärer werden in diesem Kontext auf Licht basierende Behandlungen beim Pferd. Das Spektrum reicht von Lasertherapie für Schmerz- und Wundmanagement bis zur Modulation von Stoffwechselprozessen und Hormonhaushalten mit der Hilfe von Licht bestimmten Wellenlängen.

Lasertherapie findet seit Jahrzehnten schon Anwendung in der Humanmedizin, sein Einzug in die Veterinärmedizin ist aber noch relativ neu. Lasertherapie hat, ähnlich zur therapeutischen Ultraschalltherapie, einen entzündungshemmenden und schmerzreduzierenden Effekt. Ähnlich wie beim therapeutischen Ultraschall und der Stoßwellentherapie, besitzt Lasertherapie analgetische Wirkung. Dieser Effekt wird dadurch erklärt, dass der zelluläre Metabolismus angeregt wird. (Schlachter und Lewis 2016).

Lasertherapie hat sich in den letzten 10 Jahren immer mehr in der Veterinärmedizin etabliert. Zum Zeitpunkt 2015 nutzen in Nordamerika um die 20% der Tierkliniken therapeutischen Laser. Einer der Gründe für die große Nachfrage von Lasertherapie ist, dass sie nicht invasiv und eine medikamentenfreie Therapieoption ist. Mit steigender Anwendung steigt auch die Zahl der wissenschaftlichen Forschungen zur Lasertherapie und in deren Folge die Anwendungsmöglichkeiten (Pryor und Millis 2015).

Ziel dieser Arbeit ist es, in Form einer Literaturrecherche einen Überblick über die aktuellen Anwendungsmöglichkeiten von Licht- und Lasertherapie beim Pferd und deren Effektivität zu geben.

2. Material und Methode

Für diese Bachelorarbeit wurden wissenschaftliche Publikationen von Onlinebibliotheken Pubmed, Google Scholar, ScienceDirect und Elsevier verwendet. Die verwendeten Suchbegriffe wurden sowohl auf Englisch als auch auf Deutsch gesucht. Die meisten Ergebnisse wurden in der englischen Sprache gefunden. Gesuchte Suchbegriffe waren „horse/Pferd“, „light/Licht“, „photomodulation/Fotomodulation“, „laser/Laser“, „light therapy/Lichttherapie“ und „chronobiology/Chronobiologie“. Die Begriffe wurden in verschiedenen Kombinationen verwendet. Da auch natürliches Licht einen Einfluss auf Verhaltensweisen und biologische Prozesse hat, wurden diese Studien nicht exkludiert. Von der Studie ausgeschlossen wurden Publikationen, die über Lasertherapie in Form von Laser als Schneidewerkzeug in der Chirurgie berichteten, da die dort verwendete Intensität und Wellenlänge so gravierende Gewebsveränderungen auslöst, dass man nicht von „Therapie“ im herkömmlichen Sinne reden kann. Zudem würde das Kapitel über Laser als Operationswerkzeug den Rahmen dieser Bachelorarbeit sprengen.

Die wissenschaftlichen Publikationen wurden hinsichtlich ihres Inhaltes, als auch ihrer statistischen Signifikanz untersucht. Hierzu wurden zum Beispiel besseren Übersicht zwei Tabellen angefertigt. Beide Tabellen beinhalten den Fokus (Themengebiet der Studie), Gruppengröße (Anzahl der Pferde oder Probenstücke), Randomisierung (zufällige Auswahl der Probanden), Verblindung (dem Untersuchenden ist nicht bekannt, wer behandelt wird), Behandlungszuordnung geheim (für den Untersuchenden), Kontrollgruppe und Ausfälle der Teilnehmer im Laufe der Studie.

Die Tabelle für die physiologische Fragestellung enthält das Beurteilungskriterium „Erfolg“. Dieses wurde mit positiv (statistischer signifikanter Einfluss auf den Organismus) oder negativ (kein statistischer signifikanter Einfluss auf den Organismus) definiert.

Die Tabelle über die therapeutischen Studien enthält das Beurteilungskriterium „Verbesserung der Symptome“. Dieses wurde mit positiv (eindeutig nachgewiesene statistisch signifikante Verbesserung der Symptome), negativ (keine eindeutig nachgewiesene statistisch signifikante Verbesserung der Symptome) oder einer Welle (sowohl eindeutige als auch nicht eindeutig nachweisbare Verbesserung der Symptome) definiert.

3. Geschichte

Licht, genauer gesagt Sonnenlicht, wurde seit Menschengedenken als Heilmittel für diverse Hautkrankheiten beim Menschen genutzt. Die moderne Behandlung mit künstlichem Licht (Phototherapie) hat ihren Ursprung im 19. Jahrhundert, als die heilungsfördernde Wirkung bei Anthrax Infektionen entdeckt wurde. In den späten 1980er Jahren erschienen die ersten Publikationen von Niels Finsen zur Behandlung von Lupus vulgaris mit UV-Licht und Pockennarben Behandlung mit rotem Licht im British Medical Journal. Er erhielt hierfür auch den Nobelpreis in Medizin 1903 (Liebert, A., und Kiat, H. 2021).

Jahrzehnte nahm die Forschung im Bereich Medizin und Licht immer stärker zu. 2017 erhielten die Forscher Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash und Michael W. Young den Nobelpreis für Medizin und Physiologie für die Entdeckung der molekularen Mechanismen, welche den zirkardischen Rhythmus steuern (All Nobel Prizes, n.d.).

4. Physikalischer Hintergrund

Licht ist Energie in Form einer elektromagnetischen Welle mit dualen Eigenschaften. Die Dualität des Lichts bedeutet, dass Licht sowohl Eigenschaften von Teilchen als auch von Wellen aufweist. Als Licht bezeichnet werden die sichtbaren Teile des elektromagnetischen Spektrums. Ihre Eigenschaften werden durch die Frequenz und Wellenlänge bestimmt. Dies wird durch konzeptionelle Rahmenbedingungen erläutert, die darauf hinweisen, dass Licht sowohl diskrete Teilcheneigenschaften (z.B. Energie) als auch Welleneigenschaften (z.B. Beugung) besitzt. Diese Dualität bedeutet, dass Licht sich sowohl wie ein Teilchen als auch wie eine Welle verhalten kann, abhängig vom Experiment. Die Teilchenform des Lichts wird als Photon bezeichnet, während die Wellenform als elektromagnetische Strahlung bekannt ist (Bischoff 1998, Bayehi 2001).

Licht ist im klassischen Sprachgebrauch der Teil des elektromagnetischen Spektrums, das eine Hell- und Farbempfindung in uns auslöst. Nicht nur innerhalb einer Spezies variiert dieses Ausmaß, zwischen verschiedenen Spezies gibt es noch größere Unterschiede. Der Mensch kann Licht meist im Bereich von einer Wellenlänge von 400nm bis 780nm erfassen. Dieser Bereich wird als sichtbares Licht beschrieben. Eine elektromagnetische Welle besteht aus einem elektrischen Feld und einem Magnetfeld, die abwechselnd schwächer und stärker werden. Die Richtungen der Felder sind normal stehend zur Richtung, in die sich die Welle bewegt. In der folgenden Abbildung sieht man die 3D-Modellierung einer elektromagnetischen Welle (Bayhedi 2001).

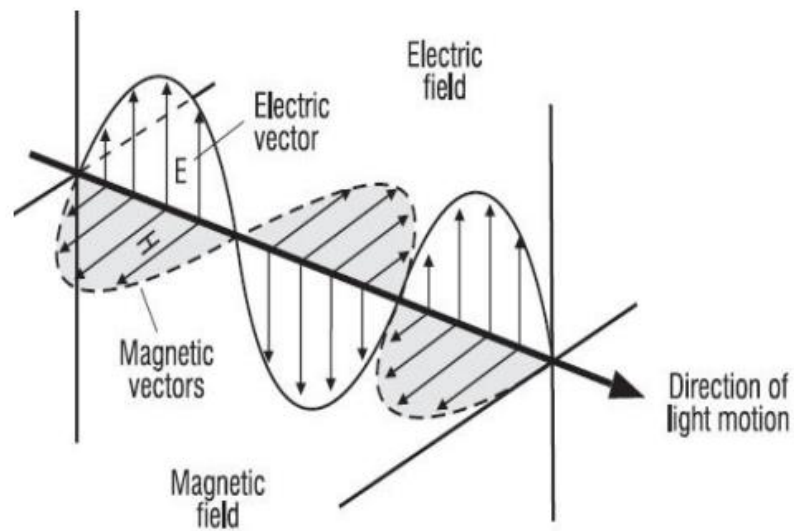


Abb. 1: Elektromagnetische Welle mit senkrecht zueinanderstehenden elektrischen und magnetischen Feldern (Bundesamt für Strahlenschutz 2022).

Beschrieben wird es mit nachfolgender Formel.

$$c = \frac{\lambda}{\tau} = \lambda \cdot f$$

c Geschwindigkeit der Welle

λ Wellenlänge für eine Periode

τ Wellenperiode

f Frequenz der Welle

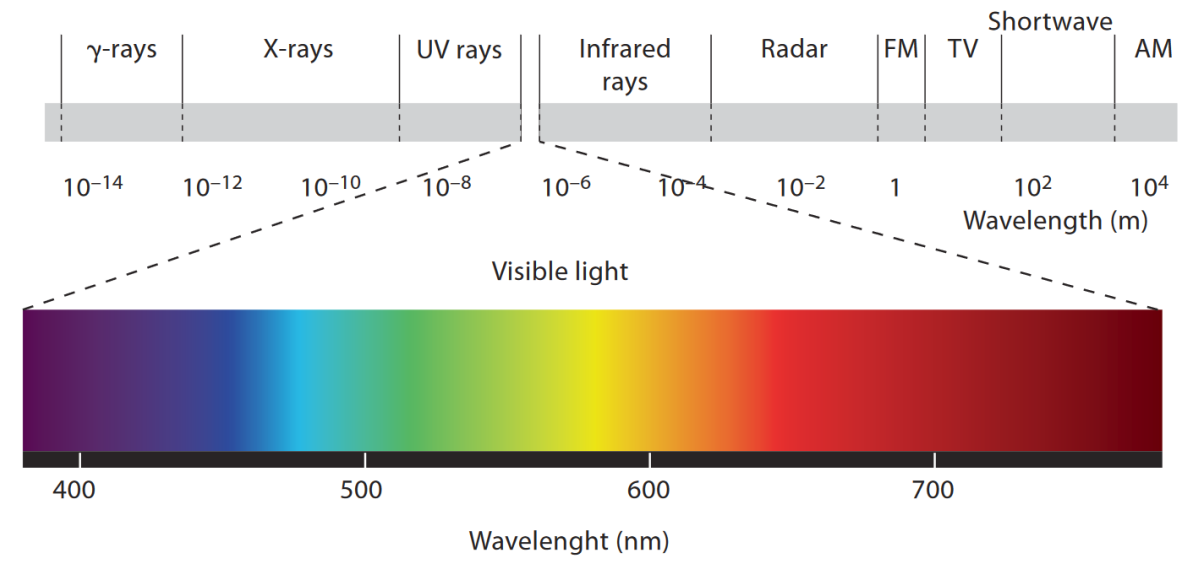


Abb. 2: Diagramm des elektromagnetischen Spektrums (Kaufman 2011).

4.1. Laser

Das Wort "Laser" ist ein Akronym für "light amplification by stimulated emission of radiation", was auf Deutsch "Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung" bedeutet. Im Gegensatz zur spontanen Emission bei natürlichen Lichtquellen erzeugt der Laser gezielt Licht in einer einzigen Wellenlänge und kohärenten Ausrichtung. Dies ermöglicht eine hohe Energiedichte auf einem kleinen Bereich, was Anwendungen wie präzises Schneiden, Bohren, Temperaturerhöhung für Materialbearbeitung und für medizinische Zwecke ermöglicht. Der erste Laser wurde am 7. Juli 1960 von Theodore H. Maiman hergestellt, indem Rubin als Lasermedium verwendet wurde und durch intensive Lichtblitze angeregt wurde (Kaufman 2011).

Laserlicht wird durch vier Hauptmerkmale beschrieben, die nachfolgend kurz erklärt werden: Monochromatizität, Brillanz, Kohärenz und Direktionalität.

- Monochromatizität bedeutet, dass das Licht eine einzige Wellenlänge oder ein schmales Wellenlängenband hat, was präzise Ausrichtung innerhalb von Geweben ermöglicht.
- Brillanz bezieht sich auf die Intensität und Ausrichtung des Lichtstrahls, die durch Techniken wie Pulsieren und Q-Switching (ist eine Lasertechnik, die kurze, intensive Lichtimpulse erzeugt) verbessert werden kann, um extrem hohe Spitzenleistungen zu erreichen.
- Kohärenz bezeichnet die räumliche und zeitliche Phasenübereinstimmung der emittierten Photonen, was eine präzise Fokussierung ermöglicht.
- Direktionalität bedeutet, dass alle Photonen in einer Richtung schwingen, was zu einem schmalen Lichtstrahl führt, der sich langsam ausbreitet und sehr präzise fokussiert werden kann (Dhami 2008).

Licht- und Lasertherapie ist ein Sammelbegriff für auf Licht basierende Methoden, welche Gewebestrukturen beeinflussen. Die Lichtquellen können unterschiedlicher Herkunft und Art sein. Je nach Herkunft der Lichtquelle, ob natürliches Sonnenlicht oder künstlich erzeugtes Licht, variiert die Wellenlänge und Art der Welle (Millis und Bergh 2023).

Der in der Medizin verwendete chirurgische Laser, welcher als Schneidewerkzeug zum Einsatz kommt, wird in dieser Arbeit nicht näher beleuchtet.

4.2. Photobiomodulation

Ähnlich wie bei der Photosynthese in Pflanzen, bei der aus Sonnenlicht Energie gespeichert und Sauerstoff erzeugt wird, ist der Prozess bei der Photobiomodulation. Trifft Licht auf die Körperoberfläche, tritt es in Wechselwirkung mit den Zellen der verschiedenen Schichten. Der Begriff "Photobiomodulation" ist am treffendsten, da einige biochemische Ereignisse hochreguliert und andere herunterreguliert werden können (Pryor und Millis 2015).

Photobiologische Reaktionen können in zwei verschiedene Arten unterteilt werden, nämlich in primäre und sekundäre Reaktionen. Primäre Reaktionen sind die, welche bei einer Interaktion der Zellen mit den emittierten Photonen auftreten. Diese Reaktionen sind innerhalb kurzer Zeit zu beobachten. Die sekundären photobiologischen Reaktionen treten erst nach Stunden oder sogar Tagen auf (Abreu Chaves et al. 2014).

Ein bekanntes Beispiel für Photobiomodulation im Körper des Menschen ist die Synthese von Vitamin D mithilfe von UV-Licht und der Haut. Es gibt mehrere Wirkmechanismen, die von Ziel und Art der modulierten Zelle abhängen. Der am besten erforschte Mechanismus ist der des Cytochrom-c-Systems. Dieser Mechanismus befindet sich in der inneren Zellmembran in den Mitochondrien und wirkt als Photorezeptor. Cytochrom c absorbiert Licht im Bereich von 500 bis 1100 nm aufgrund spezifischer Eigenschaften dieses großen Moleküls. Nachdem Cytochrom c Licht absorbiert hat, wird es angeregt und bildet Bindungen mit Stickstoffmonoxid (NO). Diese Aktion ermöglicht eine vermehrte Bindung mit Sauerstoff und die optimale Produktion von Cytochrom-c-Oxidase. Cytochrom-c-Oxidase ist entscheidend für die Bildung von ATP. ATP ist für die Energieproduktion in der Zelle unerlässlich und führt zu vielen günstigen biologischen Reaktionen oder sekundären Mechanismen, einschließlich der Reduzierung von Schmerzen und Entzündungen sowie der Gewebereparatur (Pryor und Millis 2015).

Wellenlängen im Bereich von Blau (400nm) bis Mittelinfrarot (1100nm) können zu einer photochemischen Reaktion in Zellen führen. Je nach Quelle und Tierart sowie Tiergröße unterscheiden sich diese Angaben. Die Eindringtiefe ist eines der entscheidendsten Elemente der Laserbehandlung. Wenn Licht mit biologischem Gewebe interagiert, wird es absorbiert, gestreut (einschließlich Reflexion) und/oder übertragen. Wellenlängen von 600nm (rotes Ende des Spektrums) bis 1100nm (nahes Infrarotes des Spektrums) befinden sich im optimalen Bereich, um in das Gewebe einzudringen und werden häufig als „therapeutisches Fenster“ bezeichnet. Auch die Resorption des Lichtes spielt eine Rolle für die Eindringtiefe. Die wichtigsten Chromophore, die Licht absorbieren und das Eindringen von Licht in das Zielgewebe verhindern, sind Melanin, Hämoglobin und Wasser. Melanin hat eine sehr hohe Absorption, daher absorbiert dunkle Haut mehr Licht, insbesondere bei Wellenlängen unter 830 nm. Wellenlängen länger als 1300nm absorbieren stark in Wasser, und daher ist das Eindringen schwierig. Licht von Lasergeräten mit längeren Wellenlängen, wie dem CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10.600nm, wird stark von Wasser absorbiert und wird folglich für chirurgische Anwendungen verwendet. Durch die entstehende Hitze, ist es möglich, Gewebe präzise zu schneiden und zu kautern (Pryor und Millis 2015).


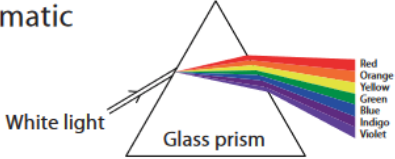

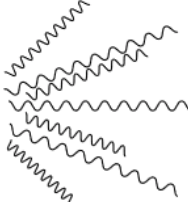

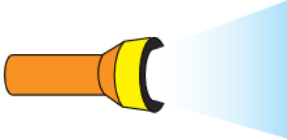
Laser light	Non-laserlight (e.g. flashlight)
Monochromatic 	Polychromatic 
Coherent 	Incoherent 
Collimated 	Divergent 

Abb. 3: Die Vergleichung Eigenschaften von Laserlicht und nicht-Laserlicht (Kaufman 2011).

4.3. Thermische Dynamik des Gewebes während der Laserbehandlung

Thermische Energie strebt nach Gleichgewicht und diffundiert von Gebieten mit hoher Temperatur zu Gebieten mit niedrigerer Temperatur. Die Auswahl der Laserparameter durch Chirurgen beeinflusst die thermische Diffusion und damit die Erwärmungsraten des Gewebes. Bevor das Gewebe die Ablationsgrenzwerte erreicht, kann sich akkumulierte thermische Energie auf benachbartes Gewebe ausbreiten. Kürzere Energieimpulse können Ablationsereignisse generieren, ohne das benachbarte Gewebe zu beeinträchtigen, wenn sie schneller als die thermische Diffusionszeit geliefert werden. Die "1-Mikrosekunden-Regel" besagt, dass Impulse von weniger als $1 \mu\text{s}$ in der Regel keine Nebenwirkungen durch thermische Verletzungen verursachen. Die thermische Relaxationszeit variiert je nach Gewebetyp und Wellenlänge des Lichts und ist entscheidend für eine effektive Laserbehandlung. Viele Punkte beeinflussen das Ergebnis nicht-ablativer, medizinischer Laserprozeduren. Wichtigster Punkt ist die Eindringtiefe. Die Eindringtiefe von Laserlicht im Gewebe wird als die Strecke definiert,

die Photonen zurücklegen, wenn die Intensität des Strahls um 63 % abnimmt. Diese Tiefe variiert je nach Wellenlänge der einfallenden Photonen und den optischen Eigenschaften des Gewebes. Die Eindringtiefe entspricht nicht unbedingt der effektiven Behandlungstiefe, kann aber zur Vorhersage verwendet werden, wenn ein Energiegrenzwert für die Reaktion bekannt ist. Wenn beispielsweise eine Fluenz von 100 J/cm^2 angewendet wird und der Reaktionsgrenzwert 50 J/cm^2 erfordert, wird die effektive Behandlungstiefe geringer sein als eine Eindringtiefe. Die Geometrie des einfallenden Strahls beeinflusst die Fluenz-Tiefenverteilung im Gewebe. In der Mitte des Strahls besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit für den Ersatz von Photonen aufgrund von Streueignissen im Vergleich zur Peripherie. Dies führt zu einem breiteren anfänglichen Verteilungsmuster als der Durchmesser des einfallenden Strahls und einem schnelleren Abfall an der Peripherie. Auch die Größe des einfallenden Punktes spielt eine Rolle. Eine Erhöhung der Größe des einfallenden Punktes um das Vierfache der Eindringtiefe erhöht die Fluenztiefe, wodurch ein höherer Prozentsatz von Photonen nach jedem Streueignis im primären Strahlenfeld verbleibt. Streueignisse von Photonen im Gewebe können in entgegengesetzter Richtung auftreten, was zu einer internen Reflektion führt. Dieses Phänomen führt zu einer Gesamtleistungsdichte an der Gewebeoberfläche, die größer ist als die einfallende Leuchtdichte des Laserstrahls selbst. Die optische Eindringtiefe ist abhängig von der Wellenlänge. Für Wellenlängen zwischen 600 und 900nm, die tief in Weichgewebe eindringen, beträgt die optische Eindringtiefe in nicht-melanotischem Gewebe typischerweise 3 bis 5 mm. Wenn das Gewebe jedoch Melanin enthält, wird diese Tiefe auf 1 bis 2 mm reduziert. Berechnungen basierend auf angenommener Eindringtiefe und Durchmesser des einfallenden Punktes werden verwendet, um die Leistungsdichte in verschiedenen Tiefen im Gewebe abzuschätzen. Diese Richtwerte gelten in der Humanmedizin. Dort werden Leistungsdichten unter bestimmten Schwellenwerten empfohlen, um thermische Verletzungen des Gewebes während nicht-ablativer Verfahren zu verhindern. Dieser Sicherheitsaspekt ist schwer für equines Gewebe anwendbar, da hier Studien und Daten fehlen, daher dienen die Richtlinien aus der Humanmedizin oft als Richtwert (Peavy 2002).

Da die Energie des Lasers auf das zu behandelnde Gewebe nicht nur von den Gegebenheiten des Lasers und seinen Einstellungen abhängt, sondern auch stark von der Hautoberfläche, weil die Standardeinstellungen aus der Humanmedizin nicht auf Pferdehaut anwendbar sind, war das Ziel einer Studie, die Penetration von energiereichem Laserlicht durch die Haut von Pferden zu messen und den Absorptionsanteil durch die digitalen Flexorensehnen der Pferde zu bestimmen. Es wurde ein therapeutischer Laser mit Wellenlängen von 800nm und 970nm

verwendet. Proben von 19 Pferdeleichen wurden genommen, und die Energiepenetration wurde anhand verschiedener Faktoren wie Haarfarbe, Hautvorbereitung, Dicke und Wellenlänge bewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass die meiste Laserenergie von der Haut absorbiert oder gestreut wurde, wobei nur ein kleiner Teil die Sehnen erreichte. Die Berücksichtigung von Hautmerkmalen und Wellenlänge ist entscheidend für die effektive Lieferung von Laserenergie an die Sehnen (Duesterdieck-Zellmer et al. 2016).

Um eine ausreichende Lichtpenetration für therapeutische Ergebnisse zu erzielen, ist nicht nur die Dicke und Farbe der Haut, sondern auch die Behaarung ausschlaggebend, wie viel Energie die Haut durchdringen kann. Hier besteht ein Unterschied zwischen Klasse IV-Laser und Photobiomodulation Therapy (PBMT)-Gerät, welches mit Lichtblitzen im Infraroten Spektrum arbeitet. Das Photobiomodulation Therapy (PBMT)-Gerät zeigte eine mehr als zehnfache Penetration im Vergleich zum Laser der Klasse IV, wobei die Penetration in heller und dunkler Haut jeweils 17- bzw. 8-mal größer war. Dies legt nahe, dass das PBMT-Gerät therapeutisch wirksamer sein könnte, insbesondere auf hellerer Haut. Die Studie betonte auch die Fähigkeit des PBMT-Geräts, intakte Haut zu durchdringen, was es für den Einsatz bei Showpferden geeignet macht, bei denen ein Scheren nicht möglich ist. Die Hautfarbe beeinflusste die Penetration, wobei dunkle Haut eine reduzierte Penetration zeigte und die Notwendigkeit von Einstellungsanpassungen basierend auf der Hautfarbe betonte. Die in vivo durchgeführte Studie an der Halswirbelsäule lieferte klinisch anwendbare Ergebnisse und deutet darauf hin, dass das PBMT-Gerät der Klasse I eine größere Penetration für Sehnenprobleme im unteren Beinbereich bietet im Vergleich zum Laser der Klasse IV. Weitere klinische Untersuchungen sind empfehlenswert, um die Ergebnisse von Verletzungen nach der Anwendung dieser Geräte zu vergleichen (Loueiro Luna et al. 2019).

Eine andere Studie untersuchte die Eindringtiefe der Low-Level-Lasertherapie (LLLT) bei Pferden und deren Beziehung zum Haarschnitt und zur Reinigung des Behandlungsbereichs. Die Ergebnisse zeigten, dass die Lichtübertragung verbessert wurde, wenn der Bereich rasiert und gereinigt wurde, unabhängig von der Fellfarbe oder dem individuellen Pferd. Daher wird die Vorbereitung des Behandlungsbereichs für eine effektive Anwendung der LLLT bei Pferden empfohlen (Ryan und Smith 2007).

Eine weiterführende Arbeit, diesmal aus dem Bereich der Histologie, beschäftigt sich mit den akuten Auswirkungen verschiedener Dosen von defokussiertem CO₂-Laser auf die Hauthistologie von Pferden. In dieser Studie wurden die potentiellen Nebenwirkungen von CO₂-Laserbehandlungen genauer untersucht. Dreizehn Standardbred-Pferde erhielten eine

Behandlung mit defokussiertem CO₂-Laser an verschiedenen Hautbereichen, wobei die Dosen von therapeutischen bis chirurgischen Niveaus reichten. Die Hauthistologie wurde 90 Minuten nach der Therapie beurteilt. Es wurden milde bis schwere Veränderungen in der Hauthistologie beobachtet, abhängig von der Dosis. Die höchste Dosis (450 J/cm²) führte zu erheblichen Gewebeschäden. Akute dosisabhängige Veränderungen in der Hauthistologie von Pferden wurden nach der Behandlung mit defokussiertem CO₂-Laser festgestellt, wobei bei höheren Dosen schwere Schäden beobachtet wurden. Eine sorgfältige Bewertung der Laserparameter ist entscheidend, um potenzielle Nebenwirkungen zu minimieren. Vorsicht ist geboten, insbesondere bei Dosen über 91 J/cm² bei der Behandlung der Pferdehaut (Bergh, Ridderstrale, und Ekman 2006)

Eine Studie aus Schweden untersuchte die Auswirkungen der Lasertherapie mit defokussiertem CO₂-Laser auf den lokalen Blutfluss bei Pferden. Obwohl davon ausgegangen wird, dass die Lasertherapie die Heilung fördert, bleibt ihr Wirkmechanismus unklar. Die Studie ergab, dass die Behandlung mit defokussiertem CO₂-Laser die Temperaturen im oberflächlichen Gewebe der Pferde erhöhte, was häufig zu einem erhöhten lokalen Blutfluss führte und so zur Gewebeheilung beitragen kann. Trotz der weit verbreiteten Anwendung von Lasertherapie in der tierärztlichen Medizin mangelt es an veröffentlichten Untersuchungen zu ihrer Auswirkung auf den Blutfluss bei Pferden. Ziel der Studie war es, dies zu untersuchen, indem die Änderungen im Blutfluss mittels Laser-Doppler-Flussmessung analysiert und mit Temperaturschwankungen in verschiedenen Gewebetypen korreliert wurden. Zehn Pferde nahmen an der Studie teil, wobei acht eine aktive Laserbehandlung und zwei ein Placebo erhielten. Die aktive Lasertherapie führte zu einem signifikanten Anstieg sowohl des Blutflusses als auch der Temperatur in den oberflächlichen Hautschichten, während keine bemerkenswerten Veränderungen im darunterliegenden Muskelgewebe beobachtet wurden. Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit weiterer Forschung, um das therapeutische Potenzial der Lasertherapie bei der Linderung von Schmerzen und der Verbesserung der Heilungsprozesse bei Pferden zu erforschen (Bergh et al. 2017).

Um den Behandlungserfolg von HILT zu überprüfen, könnten Untersuchungen zur Temperaturveränderungen des behandelten Gewebes in Zukunft verwendet werden. Eine Studie aus Polen hatte zum Ziel, Temperaturveränderungen an der Oberfläche des Fesselgelenks bei klinisch gesunden Rennpferden nach einer Hochintensitätslasertherapie (HILT) zu bewerten. Sechzehn Vollblut-Rennpferde im Alter von 3-4 Jahren nahmen teil. Temperaturmessungen wurden vor und nach der HILT mit einer Thermografiekamera

durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten einen statistisch signifikanten Anstieg der durchschnittlichen Oberflächentemperatur des Fesselgelenks nach der HILT. Die Thermografie erwies sich als einfache und präzise Methode zur Bewertung von Temperaturveränderungen im behandelten Bereich. Diese Erkenntnisse könnten für zukünftige Forschungen zur Verwendung der Thermografie zur Überwachung der Effekte von HILT und zur Bestimmung optimaler Therapieparameter nützlich sein (Godlewska et al. 2020).

Eine weitere Studie aus Schweden untersuchte die Auswirkungen der Lasertherapie mit defokussiertem CO₂-Laser auf den lokalen Blutfluss bei Pferden. Obwohl davon ausgegangen wird, dass die Lasertherapie die Heilung fördert, bleibt ihr Wirkmechanismus unklar. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die Behandlung mit defokussiertem CO₂-Laser die Temperaturen im oberflächlichen Gewebe der Pferde erhöhte, was häufig zu einem erhöhten lokalen Blutfluss führte und so zur Gewebeheilung beitragen kann. Trotz der weit verbreiteten Anwendung von Lasertherapie in der tierärztlichen Medizin mangelt es an veröffentlichten Untersuchungen zu ihrer Auswirkung auf den Blutfluss bei Pferden. Ziel der Studie war es, dies zu untersuchen, indem die Änderungen im Blutfluss mittels Laser-Doppler-Flussmessung analysiert und mit Temperaturschwankungen in verschiedenen Gewebetypen korreliert wurden. Zehn Pferde nahmen an der Studie teil, wobei acht eine aktive Laserbehandlung und zwei ein Placebo erhielten. Die aktive Lasertherapie führte zu einem signifikanten Anstieg sowohl des Blutflusses als auch der Temperatur in den oberflächlichen Hautschichten, während keine bemerkenswerten Veränderungen im darunterliegenden Muskelgewebe beobachtet wurden. Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit weiterer Forschung, um das therapeutische Potenzial der Lasertherapie bei der Linderung von Schmerzen und der Verbesserung der Heilungsprozesse bei Pferden zu erforschen (Bergh et al. 2017).

5. Physiologische Wirkungen von Licht

Die biologische, innere Uhr ist in einzelligen Algen bis zu mehrzelligen, komplexen Lebensformen wie Säugetieren, ein essentielles Hilfsmittel, um Zeitperioden einzuschätzen und sich innerhalb der wechselnden Jahreszeiten zu orientieren. Je komplexer der Mechanismus, umso komplexer das Nervensystem und die dazugehörige Chronobiologie. Bei Säugetieren liegt der dominierende Anteil der chronobiologisch wirkenden Zellen im so genannten Suprachiasmatischen Nucleus, einer Kernregion im Zwischenhirn (Murphy 2009).

Der so genannte „Zeitgeber“, ein Wort, welches sich auch in der englischen Sprache etabliert hat, ist der Zeitpunkt des Tag- und Nachtwechsels. Die Lichtveränderung wird durch die Nervenzellen in der Retina aufgenommen und über das Zentralnervensystem, mittels Retinohypothalamic-Tract ans Hirn weitergeleitet (Murphy 2009).

Je nach externem Input (Lichtstärke, Wellenlänge, Beleuchtungsdauer) werden nach der Verarbeitung im Zentralnervensystem verschiedene Gensequenzen angeregt, welche dann in diversen Geweben exprimiert werden. Diese Gensequenzen werden „clock“ engl. „Uhr“ Gene genannt. Diese Uhrgene sitzen in verschiedenen Gewebetypen, wie zum Beispiel Fibroblasten oder adipösen Fettgewebe. Es konnte eine stabile, rhythmische Oszillation dieser Uhren-Gene in diesen Gewebetypen nachgewiesen werden. Diese Tatsache kann bei der Behandlung von Hufrehe und Hyperlipidämie eine wichtige Rolle spielen (Murphy 2009).

Das Immunsystem des Pferdes ist wie bei jedem anderen Säugetier auf eine reaktive Homöostase ausgelegt. Das bedeute, dass es, innerhalb einer gewissen Schwankungsbreite und auf äußere Reize reagierend, physiologische Variablen durch verschiedene Mechanismen konstant hält. Zu diesen äußeren Reizen gehört auch der Tag- und Nachtwechsel. Es ist beim Pferd experimentell erwiesen, dass zum Beispiel Hormone wie Cortisol und Melatonin einer gewissen tageszeitlichen Schwankung unterliegen. Behandlungsintervalle sollten tageszeitlich abgestimmt werden, da zum Beispiel Hormone wie Kortisol Entzündungsreaktionen beeinflussen und Einfluss auf den Behandlungserfolg hat. Tageszeitspezifische Behandlungen, die sogenannte Chronotherapie, stecken noch in den Kinderschuhen der Forschung. Auch die Wirkung von Impfungen ist tageszeitabhängig. Es gibt auch starke Hinweise darauf, dass das Immunsystem selbst Einfluss auf die innere (zirkadiane) Uhr ausüben kann. Wenn das Immunsystem von Tieren mit einem Krankheitserreger beschäftigt ist, ändern sich zirkadiane Verhaltensweisen. Aktivitäten mit hohem Stoffwechsel Aufwand (z.B. Futtersuche, Fellpflege)

werden durch energieärmere Aktivitäten (z.B. Ruhen) oder Wärmeerzeugende Verhaltensweisen (Zittern) ausgetauscht. Dies scheint eine Anpassungsreaktion des Organismus zu sein, um die Gesundheit wieder herzustellen (Murphy 2009).

Experimentell induzierte Entzündungen bei Pferden durch Endotoxine von *Escheria coli* O26:B6 führten zu Symptomen wie Tachykardie, Lethargie, Fieber und erhöhter Atemfrequenz, wahrscheinlich aufgrund der Aktivität von Tumornekrosefaktor alpha (TNF α). Die Untersuchung dieser Reaktion bot die Möglichkeit, die Interaktion zwischen dem Immun- und dem zirkadianen System bei Pferden zu analysieren, da ihnen im Gegensatz zum Menschen zirkadiane Rhythmen der Uhr-Gene im Blut fehlen. Die Studie bestätigte, dass endotoxisches Fieber, ausgelöst durch LPS und vermittelt durch PGE $_2$, die Rhythmen der Uhr-Gene synchronisieren kann. Weiterhin wurde beobachtet, dass polymorphkernige Neutrophile eine Schlüsselrolle bei der Regulation dieser Gene unter immunologischem Stress spielen. Diese Erkenntnisse betonen die Bedeutung weiterer Forschungen zur Rolle der Neutrophilen im angeborenen Immunsystem und zur tageszeitlichen Dynamik ihrer Interaktion mit Pathogenen (Murphy 2009).

Der Cortisolspiegel bei Pferden unterliegt tageszeitlichen Schwankungen. Um diesen zu erforschen, wurde für eine Studie aus Ungarn im Jahr 2013, sowohl die Konzentration von Cortisol im Blut als auch im Speichel von 20 gesunden Pferden untersucht. Beide Cortisolwerte, sowohl die im Blut, als auch im Speichel, ergaben, dass es eindeutig zirkadiane Schwankungen gibt, wobei der maximale Cortisolwert in der Früh gemessen werden kann und der niedrigste am Abend (Bohák et al. 2013).

Selbst ein menschengemachter, unnatürlicher Tagesrhythmus, wie bei einer Gruppe von Pferden auf der Rennbahn, konnte die Maxima des Cortisolspiegels zeitlich nicht ändern. Auch wenn bei diesen außergewöhnlichen Belastungen der generelle Cortisolspiegel höher liegt als bei Pferden auf der Koppel, waren die Spitzenwerte immer noch tageszeitabhängig (Alexander und Irvine 1994).

5.1. Reproduktion

Das Pferd ist eine saisonale, polyöstrale Art, deren Paarungszeit im Frühling mit zunehmendem Tageslicht beginnt und sich bis September erstreckt. Zuchtverbände legen oft den 1. Januar als offizielles Geburtsdatum für Fohlen fest, mit einer Paarungszeit von Februar bis Juni. Diese Praxis setzt Züchter unter Druck, Stuten früh zu decken, um den Fohlen einen

Altersvorteil zu verschaffen. Aktuelle Forschungen untersuchen die Mechanismen der saisonalen Reproduktion bei Stuten, insbesondere im Bereich der Photoperiode, da der Fortpflanzungs-Rhythmus bei Pferden hauptsächlich durch die Tageslichtlänge beeinflusst wird (Nagy et al. 2000).

Die künstliche Simulation langer Tage durch künstliches Licht (Photomodulation) wird seit mindestens 15 Jahren genutzt und erforscht. Neue Erkenntnisse haben das Verständnis über die Photomodulation vertieft und zu effektiveren Methoden geführt. Obwohl eine Verlängerung des Tageslichts wirksam ist, um etwa zyklische Ovarial-Aktivität im Frühling auszulösen, erfordert diese Methode einen Behandlungsstart im Dezember (Nagy et al. 2000).

Die Zirbeldrüse schüttet während dunkler Phasen vermehrt Melatonin aus. Zudem scheinen längere Dunkelphasen mit einer sinkenden Gonadotropin-Sekretion verbunden zu sein und einer somit verringerten Eierstockaktivität. Der genaue Mechanismus für die verringerte Gonadotropin- und vermutlich GnRH-Sekretion während der anöstrischen Periode bei Stuten ist nicht vollständig erforscht und verstanden. Es wird vermutet, dass das Fehlen zyklischer Aktivität auf einen Mangel an positiven Reizen zurückzuführen sein könnte, wie etwa eine lange Tageslänge oder die Anwesenheit eines Hengstes. Neuere Erkenntnisse legen nahe, dass die saisonale reproduktive Aktivität direkt durch Signale wie kurze Tageslänge, ungünstige Wetterbedingungen und schlechte Ernährung induziert werden kann. Saisonale Hinweise helfen dabei, den angeborenen, zirkulanten Fortpflanzungsrythmus von Tieren wie Stuten mit Winter und Sommer zu synchronisieren (Nagy et al. 2000).

Der zirkadiane Melatonin Rhythmus bei Pferden stellt herkömmliche Annahmen über die zirkadiane Regulation in Frage, insbesondere in Bezug auf Licht-Dunkel-Zyklen. Im Gegensatz zu vielen anderen Arten zeigen Pferde unter verlängerter Dunkelheit keine klare zirkadiane Rhythmik in den Melatoninspiegeln, was auf eine einzigartige Anpassung hinweist. Dieses Phänomen ist nicht auf Pferde beschränkt, da ähnliche Muster auch bei arktischen Rentieren beobachtet wurden, was auf potenzielle Anpassungen an extreme Lichtverhältnisse hinweist. Trotz des Fehlens einer klaren endogenen zirkadianen Regulation bleibt die Melatoninproduktion bei Pferden von Umweltlichtsignalen beeinflusst und beeinflusst sowohl zentrale als auch periphere Gewebsrhythmen. Diese sofortige Reaktion auf Licht oder Dunkelheit steht im Gegensatz zur allmählichen Anpassung, die bei den meisten Organismen zu beobachten ist, was darauf hindeutet, dass photoperiodische Störungen bei Pferden ausgeprägte Auswirkungen auf die zirkadiane Regulation haben können. Weitere Forschung ist

erforderlich, um das komplexe Zusammenspiel zwischen Umweltreizen und der Regulation von Melatonin innerhalb verschiedenen Arten zu verstehen (Murphy 2019).

Die zirkannuale Regulation der equinen Reproduktion ermöglicht es saisonal fortpflanzenden Säugetieren, ihre Paarungsaktivität mit optimalen Umweltbedingungen für das Überleben des Nachwuchses zu synchronisieren. Bei Stuten wird die reproduktive Aktivität im Frühling durch eine verminderte Produktion von Melatonin in der Zirbeldrüse eingeleitet, die durchzunehmende Tageslichtstunden beeinflusst wird. Melatonin beeinflusst indirekt die Sekretion von Gonadotropin-Releasing-Hormon (GnRH), das für die ovarielle Zyklik entscheidend ist. Während die Photoperiode hauptsächlich die Reproduktion reguliert, modulieren Faktoren wie Temperatur, Futtermittelverfügbarkeit und Nähe von Hengsten ihre Wirkung. Die Forschung zu Umweltreizen, die die saisonale Reproduktion beeinflussen, wie z.B. die künstliche Lichtstimulation, hat kritische Tageslängen offenbart, die erforderlich sind, um die ovulatorische Saison voranzutreiben. Zirkannuale reproduktive Rhythmen zeigen Phasenantwortkurven auf, wobei die Empfindlichkeit der Stuten gegenüber Photoperiodenübergängen je nach Jahreszeit variiert. Die Exposition gegenüber langen Tageslängen kann Stuten gegenüber saisonalen Signalen wieder empfindlich machen und zeigt das Potenzial für Managementstrategien zur Synchronisierung der ovulatorischen Saison in verschiedenen Breitengraden auf (Murphy 2019). Zirkannuale Signale beeinflussen viele Aspekte der equinen Reproduktion und Physiologie, wie Eierstockaktivität, Tragzeit und das Geburtsgewicht der Fohlen, welche alle von der Photoperiode abhängen. Prolaktin beeinflusst das Haarwachstum bei Fohlen, und künstliche Langtagstimulation im letzten Trimester kann das Geburtsgewicht beeinflussen. Zudem sind Veränderungen im glykämischen Index von Futterpflanzen mit zirkannualen Variationen im equinen Stoffwechsel verknüpft, was die Manipulation von Photoperiode und Diät zur Optimierung der Skelettentwicklung nahelegt. Das Konzept des "zirkadianen Lichts", das in der menschlichen Gesellschaft für seine gesundheitlichen Vorteile beliebt ist, könnte auch für Pferde angepasst werden, um gesunde zirkadiane Rhythmen zu fördern. Zukünftige Forschungen in der equinen Chronobiologie könnten signifikante Verbesserungen in der Pferdegesundheit und -leistung bringen, indem sie Umweltreize berücksichtigen (Murphy 2019).

Um den Zyklus der Stute effektiv zu modellieren, sind neben der Tageslichtlänge auch andere Faktoren wie Photorefraktivität zu beachten. Stuten reagieren nicht auf konstante Lichtverhältnisse und kehren auch unter einem 16-stündigen Licht- und 8-stündigen Dunkelzyklus zum Winteranöstrus zurück. Eine regelmäßige Änderung der Lichtmenge erhält die Lichtsensitivität. Wichtig ist dabei ein gradueller Wechsel, da abrupte Änderungen

wirkungslos sind. Unterschiedliche Lichtprotokolle können ähnliche ovariale Reaktionen induzieren, was die Bedeutung der Lichtverhältnisse rund 9,5 Stunden nach Dunkelheitsbeginn betont, eher als die Gesamtdauer von Licht und Dunkelheit (Nagy, et al. 2000).

Viele Studien haben die positive Auswirkung, dass ein verlängerter Lichtzyklus die Ovarialaktivität im Frühling effektiv initiiert, wobei eine tägliche Tageslichtexposition von 14,5–16 Stunden ab der Wintersonnenwende die folliculäre Aktivität binnen zwei Wochen steigert und nach 6–12 Wochen zu einer Ovulation führt. Ein späterer Beginn der künstlichen Photoperiode verzögert die Ovulation möglicherweise auf den natürlichen Zeitpunkt. Wichtig ist eine minimale Dunkelphase, da 20 Stunden Tageslicht nicht zur maximalen Stimulation führen. Alternativ kann die photosensitive Phase genutzt werden, indem 1–2 Stunden Licht etwa 9,5 Stunden nach Dunkelheitsbeginn eingesetzt werden. Eine geringe Lichtintensität (10 lx) reicht aus, um die zyklische Ovarialaktivität zu beschleunigen (Nagy, et al. 2000).

Die Effizienz im reproduktiven Management von anöstrischen Stuten kann durch Kombination von klassischer Lichtbehandlung und Progestogen- oder Estradiol-Behandlung gesteigert werden, was das Intervall bis zur ersten Ovulation verkürzt. Zusätzlich verkürzen Kombinationen von Photoperiode und Dopaminantagonisten die Gesamtbehandlungszeit signifikant. Experimente mit blauem Licht, insbesondere mittels Lichtmasken, die auf ein einzelnes Auge gerichtet sind, fördern einen frühen Beginn der zyklischen Ovarialaktivität. Künstliche Beleuchtung, besonders zeitgesteuertes, niedrig dosiertes blaues Licht, hat sich als effektiv erwiesen, um die Paarungssaison bei Pferden zu beschleunigen, bietet wirtschaftliche Vorteile und verbessert das Wohlbefinden der Tiere (Murphy et al. 2013).

Auch die Wellenlänge beeinflusst den Zyklus der Stute. Eine Studie von 2021 untersuchte die Effekte von blauem LED-Licht (468nm) auf die Trächtigkeit von Stuten. Über zwei Jahre wurde das Verhalten von 20 Stuten und ihren Einlingsgeburten in einem Cross-over Design verglichen: Ein Jahr mit verlängerter Photoperiode und blauem LED-Licht via Kopfmaske auf ein Auge, ein anderes Jahr als Kontrollgruppe ohne Behandlung. Ergebnisse zeigen, dass die Tragzeit bei behandelten Stuten kürzer war, deren Fohlen hatten geringere Widerristhöhen, ähnliche Gewichte, schnellere Aufstehzeiten und kürzeres Fell im Vergleich zu Kontrollfohlen. Dies deutet darauf hin, dass das künstliche Licht die Reifung des Fötus beschleunigt (Lutzer et al. 2021).

Zudem scheint es einen zirkardiären Rythmus vom luteinisierenden Hormon (LH) zu geben, zumindest bei Nagetieren. Dieser Einfluss scheint auch beim Pferd zu bestehen, da mehr als zwei Drittel Pferden in der Nacht ovulieren. Auch Geburten erfolgen meist in der Nacht. Dies scheint

aufgrund der rhythmischen zirkadianen Schwankungen der Oxytocin Ausschüttungen und deren Einfluss auf das Endometrium der Gebärmutter zu sein (Lutzer et al. 2021).

In den letzten Jahren hat unser Verständnis für die Regulation der saisonalen Fortpflanzung bei Stuten erheblich zugenommen. Dieses neu gewonnene Wissen wird voraussichtlich dazu beitragen, wirksamere Behandlungsstrategien zur Induktion zyklischer Ovarialaktivität im frühen Frühling zu entwickeln. Die Hoffnung besteht darin, dass wir in den kommenden Jahren ein tiefergehendes Verständnis für die Mechanismen gewinnen werden, die die Entwicklung der Anöstrus-Phase kontrollieren. Angesichts der anhaltenden Nachfrage in der Pferdeindustrie nach einer Verlängerung der Paarungssaison erscheint die fortlaufende Forschung auf diesem Gebiet gerechtfertigt (Nagy, et al. 2000).

Nicht nur Stuten unterliegen Licht bedingten, hormonellen Schwankungen, sondern auch die Testosteronwerte von Hengsten sind vom Licht beeinflusst. Bei gefangenen Wildpferden zeigen sich um 8 Uhr morgens leicht erhöhte Testosteronwerte, während die Tiefstwerte um 23 Uhr in der Nacht lagen. Diese Werte sind nicht abhängig von der Zuchtsaison (Kirkpatrick et al. 1976).

5.2. Wirkung von Licht im Sport und Training

Die zirkadiane und zirkannuale Regulation bei Pferden betont ihre internen Zeitmechanismen als Spitzenathleten. Es taucht in die biologischen Rhythmen ein, die die täglichen und jährlichen Zyklen dieser Tiere regieren, und hebt die Bedeutung des Verständnisses ihrer inneren Uhren für optimale Leistung und Management hervor. Die komplexe Koordination physiologischer Prozesse wie Stoffwechsel, Hormonsekretion und Verhalten mit externen Umweltreizen unterstreicht die Anpassungsfähigkeit und Widerstandsfähigkeit von Pferden in verschiedenen Bedingungen. Darüber zeigt die Publikation des University College Dublin's Animal Research Ethics Committee, wie Störungen dieser inneren Rhythmen die Gesundheit und Leistung von Pferden beeinflussen können, und betont die Bedeutung der Aufrechterhaltung stabiler zirkadianer Rhythmen. (Murphy 2019).

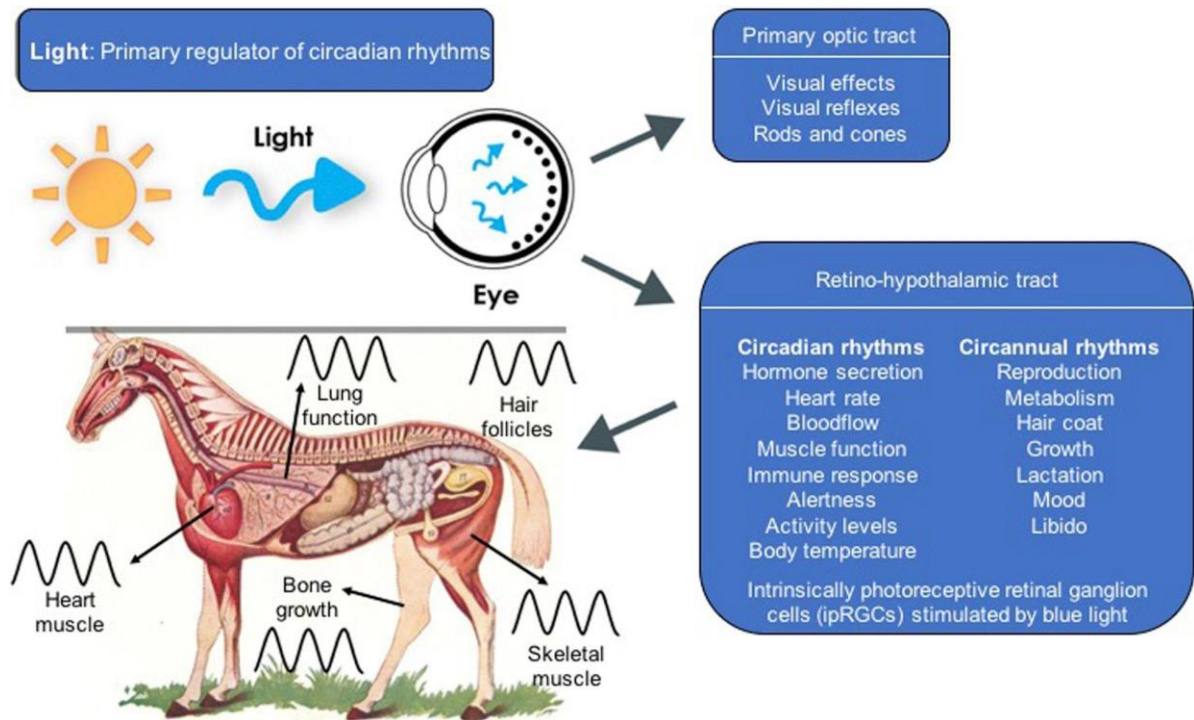


Abb. 4: Diagramm zur Veranschaulichung der Einwirkung von Licht auf den equinen Organismus (Murphy 2019).

Eine Studie untersucht den Einfluss eines regelmäßigen Trainingsprogramms auf den zirkadianen 24-Stunden-Ausdruck von für das Training relevanten Genen in der Skelettmuskulatur von Pferden. Biopsien wurden von sechs Vollblutstuten vor und nach einem achtwöchigen Trainingsprogramm entnommen, und die Genexpression wurde mit Echtzeit-PCR-Assays analysiert. Die Ergebnisse zeigten signifikante Wechselwirkungen zwischen zirkadianer Zeit und Training für bestimmte Muskelgene, wobei bestimmte Gene für Muskelentwicklung, Energiestoffwechsel, Muskelwachstum und Glukosemetabolismus besonders betroffen waren. Die Kernuhr-Gene zeigten eine 24-stündige Rhythmik sowohl vor als auch nach dem Training, während die Expression eines Gens für den zirkadianen Rhythmus nur nach dem Training rhythmisch war. Die Kernuhr-Gene bleiben unabhängig vom Training in einem 24-Stunden-Rhythmus aktiv. Ein anderes Gen zeigt jedoch erst nach dem Training eine rhythmische Aktivität. Das bedeutet, dass Training den zirkadianen Rhythmus dieses Gens beeinflusst und langfristige Veränderungen in der Genexpression bewirken kann. Die Muskelgene für Muskelwachstum und Muskelentwicklung zeigten post-trainingsbedingte signifikante zirkadiane Rhythmik. Diese Ergebnisse legen nahe, dass die Stoffwechsellkapazität der Muskulatur durch geplantes Training

beeinflusst wird und betonen die Bedeutung der Abstimmung von Trainings- und Wettkampfzeiten für optimale sportliche Leistung (Murphy et al. 2014).

6. Therapeutische Wirkungen von Licht

6.1. Wundheilung beim Pferd

Photobiomodulation der Haut mit Licht-emittierenden-Dioden (LED) ist eine weit verbreitete Therapieergänzung zur Unterstützung der Wundheilung, die seit den 1990 Jahren erstmals erwähnt wurde. Eine Literaturstudie aus dem Jahr 2014 befasste sich mit dem therapeutischen Effekt von Licht auf die Wundheilung. Es wurden 68 Studien analysiert, darunter 48 über Laserlicht, 14 in Bezug auf LED-Licht und 6 für beide Lichtarten. Die Meinungen darüber sind gespalten, denn es mangelt an wissenschaftlich qualitativ hochwertigen Forschungen über dieses Thema. Der biologische Effekt von Licht auf das Gewebe hängt von der Absorption der Energie ab, welche von der Wellenlänge und Lichtstärke beeinflusst wird. Manche Autoren sind der Meinung, dass auch die Kohärenz des Lichtes eine Rolle spielt. Da LEDs kein kohärentes Licht emittieren, werden diese als ineffizient eingestuft. Auf der anderen Seite steht die gegenteilige Meinung, dass Kohärenz des Lichtes bei der Interaktion mit Gewebe an Bedeutung verliert und somit keinen Einfluss auf die Wirksamkeit hat. Eine Literaturrecherche aus dem Jahr 2014 über Versuche an Ratten oder in Vitro, kam sowohl bei Laser als auch bei LED-Therapie von Wunden, zu dem Ergebnis, dass sie ähnliche Effekte erzielten (Abreu Chaves et al. 2014).

Bei schlecht heilenden Wunden, wie zum Beispiel offenen Wunden an der distalen Gliedmaße des Pferdes, wird immer öfter auf Lasertherapie zurückgegriffen. Obwohl die Lasertherapie vielversprechende Ergebnisse bei der Stimulierung der Wundheilung durch Mechanismen wie der Proliferation von Fibroblasten, die Kollagensynthese und eine schnellere Epithelisierung gezeigt hat, haben Studien gemischte Befunde hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bei verschiedenen Tiermodellen erbracht. Die beschriebene Studie zielt darauf ab, die Wirkung der Lasertherapie mit niedrigem Niveau (LLLT) auf die Wundheilung bei Pferden zu bewerten. Sie beinhaltete das chirurgische Induzieren von Wunden auf der dorsalen Seite des metakarpophalangealen Gelenks von sechs Pferden, wobei eine Gliedmaße Lasertherapie erhielt und die andere als Kontrolle diente. Die Ergebnisse der laserbehandelten Wunden unterschieden sich nicht signifikant von den Kontrollgruppen. Es wurde aber eine subjektiv geringere Schmerzempfindlichkeit bei den laserbehandelten Wunden festgestellt (Petersen et al. 1999).

Eine der wenigen Studien zu LED in der Wundtherapie beim Pferd wurde 2020 in Schweden publiziert. Ein Team der schwedischen Universität in Uppsala führte eine randomisierte Blindstudie durch. Die Studie hatte zum Ziel, den Einfluss von pulsierendem sichtbarem rotem Licht ($\lambda \approx 637$ nm) und nahem Infrarot (NIR)-Licht ($\lambda \approx 956$ nm) auf die Wundheilung bei Pferden zu untersuchen. Acht gesunde Pferde mit kreisförmigen Hautwunden wurden einer Lichtbehandlung unterzogen, während die anderen als unbehandelte Kontrollgruppe dienten. Die Behandlung erfolgte täglich für 4 Minuten und 40 Sekunden über einen Zeitraum von 25 Tagen. Die Wundfläche und Schwellung wurden mittels digitaler Photoplanimetrie gestützten diagnostischem Ultraschall beurteilt. Photoplanimetrie ist ein computergestütztes Verfahren, um die Größe einer Wunde zu bestimmen, ähnlich wie in der Landkarten Vermessung. Die Ergebnisse zeigten keine signifikanten Unterschiede in der Wundfläche oder Schwellung zwischen den behandelten und Kontrollgruppen. Es gab jedoch einen signifikanten Unterschied in der Heilungszeit, wobei Kontrollwunden in 49,0 Tagen (95%-KI = 35,4-62,6) und behandelte Wunden in 51,8 Tagen (95%-KI = 38,7-64,8) heilten. Die Studie kam zu dem Schluss, dass pulsierendes sichtbares rotes Licht und NIR-Licht im Vergleich zur Nichtbehandlung keine klinisch relevanten positiven Effekte auf die Heilung experimenteller Hautwunden bei Pferden zeigten. Da hier nur mit einer Behandlungsdauer von unter 25 Tagen geforscht wurde, lässt diese Studie keine Schlüsse auf Langzeitbehandlungen zu (Michanek et al. 2020).

Auch bei der Heilung anderer Gewebetypen, wie zum Beispiel der equinen Pharynx-Schleimhaut, steht die Lasertherapie im Fokus der medizinischen Forschung. Chirurgische Eingriffe am equinen Pharynx führen oft zu Komplikationen wie Infektionen und abnormer Narbenbildung. Die Therapie mit niedrig dosiertem He-Ne Laser wird vorgeschlagen, um die Wundheilung durch Förderung der Zellproliferation und Kollagenproduktion zu beschleunigen, wie eine Studie der Universität Cordoba zeigen konnte (Gomez-Villamandos et al. 1995).

6.2. Therapeutische Wirkung am Bewegungsapparat von Pferden

Laserbehandlungen von Pferden mit Sehnenverletzungen ist ein oft publiziertes Forschungsgebiet, da vor allem im Leistungssport Sehnenverletzungen die häufigsten Verletzungen sind. Eine Studie der Nördlichen Technischen Universität Irak untersuchte den Einsatz von Hochleistungslasern zur Behandlung von Pferden mit geschädigten Sehnen. Die Ergebnisse waren durchwegs positiv und ohne Nebenwirkungen. Das angewendete

Behandlungsmuster führte zu einer signifikanten Verbesserung der Ultraschallbewertungen und Lahmheit innerhalb von 2-6 Wochen. Pferde mit bestimmten Sehnenläsionen zeigten höhere Lahmheitsgrade, und trotz unterschiedlicher Grade zu Beginn der Studie, zeigten alle Sehnenverletzungen nach der Laserbehandlung eine signifikante Verbesserung im Ultraschall und eine Reduzierung der Lahmheit (Jaafar, Al-Bayti, und Abdullah 2021).

Die biophysikalischen Effekte der Hochleistungslaserbeleuchtung, wie die Anregung der Mitochondrien, die erhöhte ATP-Produktion, die Aktivierung der Mikrozirkulation sowie analgetische und entzündungshemmende Wirkungen, tragen zu den beobachteten positiven Ergebnissen bei. Das Rezidivverhältnis in der Studie war niedriger im Vergleich zu früheren Untersuchungen mit verschiedenen Behandlungsmustern. Bemerkenswert war, dass die Gruppe, die nur Laserbehandlung erhielt, bessere Ergebnisse in der Reduzierung der Lahmheit zeigte im Vergleich zur Gruppe, die Laserbehandlung in Kombination mit anderen Methoden erhielt. Das Fehlen einer Kontrollgruppe stellt eine Einschränkung dar, und die Autoren legen nahe, dass die alleinige Laserbehandlung möglicherweise vorzuziehen ist. Die Ergebnisse weisen auf eine kürzere Erholungszeit hin, wobei die Pferde innerhalb von 6 Wochen wieder an Rennen teilnehmen und innerhalb von 6 Monaten ihre vorherige Leistungsfähigkeit erreichen konnten. Die Studie erkennt jedoch Einschränkungen an und betont die Notwendigkeit von prospektiven Forschungsprotokollen, um die therapeutischen Effekte der Hochleistungslaserbehandlung an verletzten Bändern weiter zu validieren (Jaafar, Al-Bayti, und Abdullah 2021).

Die durch Überbelastung verursachte Sehnenentzündung stellt eine äußerst herausfordernde Behandlungssituation dar, sowohl für das Pferd in Boxenruhe, als auch für die behandelnden Personen. Trotz Interventionen ist die Sehnenreparatur oft langwierig, und die Qualität des geheilten Gewebes entspricht möglicherweise nie der eines gesunden Sehngewebes. Dies erhöht das Risiko für eine erneute Verletzung und funktionelle Beeinträchtigungen auch nach scheinbarer Heilung. Aufgrund des Mangels an einer universell wirksamen Behandlungsmethode werden eine Vielzahl von Ansätzen eingesetzt, um den Reparaturprozess zu modifizieren und dessen Geschwindigkeit und Qualität nach einer akuten Verletzung zu verbessern. Die Hauptziele der Behandlung akuter Sehnenentzündungen sind die Verringerung der Entzündung, die Minimierung der Narbengewebsbildung und die Wiederherstellung der normalen Sehnenstruktur und -funktion. Die Erreichung dieser Ziele erfordert ein tiefes Verständnis der normalen Anatomie, Physiologie, Verletzungsmechanismen und Reparaturprozesse der Sehnen. Dieses Wissen hilft Klinikern, informierte Entscheidungen über

die Auswahl von Medikamenten und Behandlungsmodalitäten zu treffen, die für die Behandlung von Sehnenentzündungen empfohlen werden. Die Bewertung und Prognose für Sehnenentzündungen hängen oft von der ultraschallgestützten Bewertung der Sehne ab, da die Schwere der Entzündung und des Schmerzes nicht immer mit dem Ausmaß der intratendinösen Schäden übereinstimmen. Dies ist insbesondere bei subakuten Sehnenverletzungen relevant, bei denen die akute Entzündung abgeklungen ist, aber strukturelle Defekte bestehen bleiben. Sehnenentzündungen können sich diffus oder mit Kernläsionen manifestieren, die jeweils maßgeschneiderte Behandlungsansätze basierend auf den ultraschallgestützten Befunden erfordern. Prognostische Bewertungen für zukünftige sportliche Leistungen stützen sich ebenfalls stark auf ultraschallgestützte Merkmale, wobei umfangreiche strukturelle Läsionen unabhängig von der Behandlung auf eine schlechte Prognose hinweisen. Sequenzielle Sonogramme helfen bei der Überwachung des Heilungsprozesses und bei der Anleitung von Rehabilitationsbemühungen. Zusätzlich sind die Dauer der Verletzung, die bisherige Behandlungsgeschichte und die beabsichtigte Verwendung des Pferdes entscheidende Faktoren, die während der initialen Bewertung und Behandlungsplanung berücksichtigt werden (Henninger 1994).

Eine Studie aus Polen hatte zum Ziel, die Auswirkungen der Hochintensitätslasertherapie (HILT) auf Sehnen- und Bänderverletzungen bei Pferden zu bewerten. Die Hochintensitätslasertherapie (HILT) ist eine medizinische Behandlungsmethode, bei der Laser mit hoher Intensität verwendet werden, um tiefere Gewebeschichten zu erreichen und Schmerzen oder Entzündungen zu lindern. Sechszwanzig Pferde mit Tendinopathien wurden zufällig entweder einer HILT-behandelten Gruppe oder einer unbehandelten Gruppe zugeteilt. Beide Gruppen durchliefen dasselbe Rehabilitationsprogramm. Die Behandlungsgruppe erhielt fünfzehn Sitzungen HILT mit konsistenten Parametern. Klinische und Ultraschalluntersuchungen wurden vor, während und nach der Behandlung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Verbesserung von Schmerzen, Schwellungen und Lahmheit in der HILT-Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe. Obwohl keine signifikanten Veränderungen in der Echogenität der Läsion festgestellt wurden, gab es eine signifikante Reduktion des Läsionsprozentsatzes in der HILT-Gruppe. Zusammenfassend zeigte HILT analgetische und anti-ödematöse Effekte, reduzierte Lahmheit und Läsionsgröße bei Pferden mit Sehnen- und Bänderverletzungen, obwohl es die Echogenität der Läsion nicht beeinflusste (Zielińska 2020).

Alte Lehrmeinungen weisen oft darauf hin, dass primäre Rückenschmerzen bei Pferden selten sind und oft als sekundär zu Problemen im Hinterbein oder den Nieren angesehen werden. In den letzten Jahren ist jedoch das Interesse an Rückenproblemen bei Pferden stark gestiegen, was zur Entdeckung führte, dass primäre Rückenschmerzen tatsächlich auftreten. Wenn ein Pferd Lahmheit im Hinterbein zeigt, ist es entscheidend, zu diagnostizieren, ob sie aus dem Bein oder dem Rücken stammt, und falsches Reiten oder eine schlechte Sattelanpassung auszuschließen. Die Wirksamkeit der Behandlung von chronischen Rückenschmerzen variiert, wobei einige Pferde nicht auf konventionelle Therapien reagieren. Akupunktur, insbesondere unter Verwendung von Niedrigleistungs-Lasern, hat sich als eine geeignete Option herausgestellt, da sie ohne Nadeln auskommt und somit in der Handhabung einfacher ist. Akupunkturpunkte können basierend auf der traditionellen chinesischen Medizin oder standardisierten Kombinationen ausgewählt werden, wobei die Behandlungen zwischen 3 und 10 Tagen Abstand haben und typischerweise nach 8 bis 16 Wochen eine Besserung zeigen. Diese eine Studie zeigte, dass Laserakupunktur wirksam sein kann bei einzelnen, therapieresistenten Patienten. Nicht nur der anfängliche Kostenaufwand für die Ausrüstung ist jedoch ein Nachteil, sondern auch die geringe Anzahl von vierzehn Patienten und das Fehlen einer Doppelblindstudie. (Klide und Martin Jr 1987).

Nicht nur zur Geweberegeneration, sondern auch zur chiropraktischen Behandlung von chronischen Rückenschmerzen erzielt Low Level Lasertherapie gute Ergebnisse. Eine Studie an Westernpferden zeigte, dass die Lasertherapie signifikant Schmerzen, muskuläre Hypertonie und Steifheit des Rumpfes reduzierte. Die Kombination aus Lasertherapie und chiropraktischer Behandlung brachte zusätzliche Vorteile. Die alleinige chiropraktische Behandlung führt nicht zu signifikanten Veränderungen der Schmerzen oder Steifheit. Ein multimodaler Ansatz mit Lasertherapie und chiropraktischer Behandlung erwies sich als vorteilhaft für die Behandlung von Rückenschmerzen bei aktiv im Wettbewerb stehenden Pferden (Haussler et al. 2020).

6.2.1. Therapeutische Wirkung auf Gelenke

Kohlendioxid Laser sind Laser auf der Basis von CO₂. Ihre Anwendung im medizinischen Bereich ist auch bei Pferden schon erprobt worden. Eine Studie aus Schweden untersuchte die klinischen Effekte von intraartikulärem Betamethason in Kombination mit Hyaluronan (bM/HA) und der Behandlung mit einem defokussierten Kohlendioxidlaser bei akuter

traumatischer Arthritis des Fesselgelenks bei Pferden. Die Pferde in diesen Studien wurden mittels einer gründlichen Lahmheitsuntersuchung ausgewählt, einschließlich intraartikulärer Anästhesie zur Beseitigung der Lahmheit. Diese Untersuchung umfasste eine verblindete Studie mit 10 Sportpferden und eine prospektive Studie mit 180 Sportpferden. In beiden Studien wurden die Probanden in Gruppen eingeteilt, die entweder mit bM/HA oder einem Kohlendioxidlaser behandelt wurden. Die Behandlungsdosen variierten, und die Genesungszeiten waren zwischen den beiden Studien unterschiedlich. Die Ergebnisse zeigten eine schnellere Genesung in der mit Laser behandelten Gruppe im Vergleich zur bM/HA-Gruppe in der prospektiven Studie. Die Genesungsraten unterschieden sich auch signifikant zwischen den Gruppen in der prospektiven Studie, was darauf hindeutet, dass der defokussierte Kohlendioxidlaser eine wirksame Behandlung für akute traumatische Synovitis bei Pferden sein könnte. Es sind jedoch weitere Forschungen erforderlich, um die biochemischen Mechanismen hinter der Behandlung mit Kohlendioxidlaser zu verstehen (Lindholm et al. 2001).

Eine weitere Studie aus Skandinavien, Schweden und Finnland, mit dem Titel „Defocused CO2 laser therapy in traumatic arthritis of the metacarpophalangeal joint: A randomized clinical study“ beschäftigt sich auch mit der CO2-Lasertherapie bei Arthritis des Metakarpophalangealgelenks bei schwedischen Reit- und Freizeitpferden. Arthritis führt häufig zu Synovitis und Lahmheit. Die Entzündung ist mit erhöhten Niveaus proinflammatorischer Substanzen wie Substanz P und Prostaglandin E2 in der Gelenkflüssigkeit verbunden. Die Behandlung umfasst typischerweise die Reduzierung der Entzündung und die Schmerzkontrolle. Die Lasertherapie, insbesondere der defokussierte CO2-Laser, hat vielversprechende Ergebnisse bei der Behandlung von traumatischer Arthritis durch Modulation von Schmerz und Entzündung gezeigt. Diese Studie zielt darauf ab, die Wirksamkeit der defokussierten CO2-Lasertherapie bei der Schmerzlinderung und Reduzierung von Lahmheit bei Pferden mit traumatischer Arthritis zu bewerten, sowie deren Auswirkungen auf entzündliche Marker in der Synovialflüssigkeit (Bergh et al. 2017).

Niedrigenergie-Impulslaser wurden in der Laserakupunktur eingesetzt und zur Förderung der Heilung bei verschiedenen Erkrankungen wie Nacken- und Rückenschmerzen, Sehnenentzündungen, Arthrose und immunvermittelten Störungen bei Pferden. Diese Therapie reduziert Entzündungen, Muskelkrämpfe und fördert die Gewebeheilung. In einer Pilotstudie wurden einundzwanzig Pferde mit Hufrehe einer Niedrigenergie-Lasertherapie (LLLT) an Akupunkturpunkten und topisch unterzogen. Die Schmerzskalen vor und nach der Behandlung

waren signifikant unterschiedlich ($p < 0,001$), was auf die Wirksamkeit von LLLT bei der Linderung von Schmerzen im Zusammenhang mit Hufrehe hinweist. Die Ergebnisse legen nahe, dass LLLT eine praktikable Behandlungsoption für equine Hufrehe sein könnte und weitere Untersuchungen für ihre Anwendung bei anderen Tierkrankheiten gerechtfertigt sind (Petermann 2011).

Eine weitere Anwendung von LLL ist, die analgetischen Effekte verschiedener Behandlungen (Lidocain, Laserstrahlung und Lidocain plus Laserstrahlung) zu verstärken, die mittels kaudaler Epiduralinjektion bei Pferden verabreicht wurden. Ergebnisse einer Studie aus Iran verglich die Schmerzausschaltung von der Behandlung rein mit Lidocain, nur LLL-Bestrahlung und Lidocain plus LLL-Bestrahlung. Die Ergebnisse zeigten, dass das beide Verfahren allen Pferden Analgesie bot, aber die Kombination von Lidocain mit Niedrigenergie-Lasertherapie (LLL) eine länger anhaltende Analgesie ermöglicht. Obwohl es keine signifikanten Unterschiede in der sensorischen und motorischen Stimulation zwischen den Gruppen gab, könnte die Kombination aus LLL und Lidocain gegenüber einer Hochdosis- Lidocain allein für die kaudale Epiduralanästhesie bei Pferden bevorzugt werden sollte. (Ghazaleh et al. 2017).

Studie	Fokus	Gruppengröße	Randomisierung	Verblindung	Behandlungszuordnung geheim	Kontrollgruppe	Ausfälle	Erfolg
Bohák et al. 2013	Circadiane Rythmen im Plasmakortisolspiegel	20 Pferde	-	+	+	-	-	+
Alexander und Irvine 1994	Circadiane Rythmen im Plasmakortisolspiegel	211 Pferde	-	-	-	+	-	+
Murphy et al. 2013	Reproduktion	60 Pferde	-	-	-	+	-	+
Lutzer et al. 2021	Reproduktion unter blauen LED-Licht	20 Pferde	+	+	+	+	-	+
Kirkpatrick et al. 1976	Circadiane Plasma-Testosteron-werte	4 Pferde	-	-	+	-	-	+
Murphy et al. 2014	Circadiane Rythmen des equinen Skelettmuskel	6 Pferde	-	-	+	-	-	+

Tabelle 1 : Tabellarische Auflistung der Studien zur physiologischen Wirkung der Lichtbehandlung. „positive“ Erfolge zeigen signifikante Änderungen durch die Lichtbehandlung.

Studie	Fokus	Gruppengröße	Randomisierung	Verblindung	Behandlungszuordnung geheim	Kontrollgruppe	Ausfälle	Verbesserung der Symptome
Petersen et al. 1999	Wundheilung Haut	6 Pferde	+	+	+	+	-	-
Michanek et al. 2020	Wundheilung Haut	8 Pferde	+	+	+	+	-	-
Gomez-Villamandos et al. 1995	Wundheilung Schleimhaut	12 Pferde	-	-	-	+	-	+
Jaafar, Al-Bayti, und Abdullah 2021	Lasertherapie Sehnenverletzungen	50 Pferde	-	-	-	-	-	+
Zielińska 2020	Lasertherapie Sehnen- und Bänderverletzungen	26 Pferde	+	-	-	+	-	~*
Klide und Martin Jr 1987	Niedrigenergielaser und Schmerzreduktion	14 Pferde	-	-	-	-	+ (Nachfolgcuntersuchung)	-
Haussler et al. 2020	Thorakolumbalen Schmerzen	61 Pferde	+	-	-	+	+	~**
Lindholm et al. 2001	Laser zur Arthritis Behandlung	180 Pferde	-	+	+	-	-	+
Bergh et al. 2017	Auswirkungen Laser auf Haut	10 Pferde	+	+	+	+	-	~***
Petermann 2011	Schmerzreduktion mit Niedrigimpuls Laser	21 Pferde	-	-	-	+	-	+
Ghazaleh et al. 2017	Anästhesie und Niedrigimpuls Laser	18 Pferde	+	-	-	+	-	-
Ryan und Smith 2007	Eindringstärke Laser präparierte/unpräparierte Haut	17 Proben	-	-	-	+	-	+

Tabelle 2 : Tabellarische Auflistung der Studien zur therapeutischen Wirkung der Lichtbehandlung. „positive“ Erfolge zeigen signifikante Heilungsprozesse durch die Lichtbehandlung.

* Drei experimentelle Fragestellungen in einer Publikation. Schwellung, Lahmheit und Schmerzempfinden war nach Laserbehandlung signifikant verbessert, im Gegensatz zur Kontrollgruppe, genauso wie die prozentuellen Schäden der verletzten Strukturen. Nicht signifikant verbessert war die Echogenität der Läsionen.

** Chiropraktische Behandlung führte zu keinen signifikanten Veränderungen.

Kombinierte Therapie konnte einige zusätzliche Vorteile bieten, jedoch waren diese Effekte nicht immer statistisch signifikant.

*** Laser erzeugt eine signifikante Veränderung der Perfusion in der Haut aber nicht im Muskelgewebe.

7. Diskussion

Licht in der Veterinärmedizin bietet ein weites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten, sei es mit herkömmlichen LEDs oder hochspeziellen Lasergeräten. Ihre Behandlungsmöglichkeiten reichen von der Beeinflussung des Biorhythmus bis zur gezielten Heilung bestimmter Gewebsstrukturen.

Sowohl die Photobiomodulation mittels LEDs als auch mit therapeutischem Laser sind vielversprechende Methoden zur Unterstützung der Wundheilung bei Pferden. Es gibt jedoch noch Raum für weitere Forschung, insbesondere um die Wirksamkeit von LEDs im Vergleich zu Laserlicht zu untersuchen (Michanek et al. 2020). Verschiedene Studien haben gemischte Ergebnisse hinsichtlich der Wirksamkeit von Laser- und LED-Therapien gezeigt. Obwohl einige Untersuchungen vielversprechend sind, bleibt der wissenschaftliche Konsens uneinheitlich.

Studien aus Schweden und Polen (Bergh et al. 2017; Godlewska et al. 2020) liefern wichtige Einblicke in die Wirksamkeit von Lasertherapien bei Pferden.

Die Erhöhung des lokalen Blutflusses und der Oberflächentemperatur nach der Behandlung mit defokussiertem CO₂-Laser ist gegeben aber lässt keine Schlüsse auf die Heilung oder Regeneration der darunter liegenden Gewebsschichten zu aber zeigen eine lokale Reaktion des Körpers auf die Behandlung. Die Nutzung von Thermografie zur Bewertung der Effekte von Hochintensitätslasertherapie (HILT) bietet eine innovative Möglichkeit, den Behandlungserfolg zu überwachen. Diese Forschungsergebnisse sind entscheidend, um die therapeutische Anwendung von Lasertherapien weiter zu optimieren und ihre positiven Auswirkungen auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Pferden zu maximieren.

Trotz erfolgreicher Anwendung der Lasertherapie bei Sehnenverletzungen und Gelenksverletzungen bedarf es weiterer Studien, um ihre Wirksamkeit unter verschiedenen Bedingungen zu bestätigen und ihre potenziellen langfristigen Auswirkungen zu verstehen (Jaafar, Al-Bayti, und Abdullah 2021). Die Wirkung von Laserlicht auf verletztes Gewebe ist nachweislich gegeben, im Gegensatz zum fraglichen LED-Licht, nur die Frage nach den optimalen Bedingungen, wie Beleuchtungsdauer, Beleuchtungsstärke und Frequenz um die

maximalen Heilungschancen für den equinen Patienten herauszuholen ist noch nicht genug geklärt.

Auch die saisonale Reproduktion bei Pferden ist ein faszinierendes Thema, das wichtige Erkenntnisse für die Zuchtpraxis liefert. Die Fähigkeit der Stuten, ihre Fortpflanzung an die Länge des Tageslichts anzupassen, zeigt die starke Verbindung zwischen Umweltbedingungen und reproduktivem Verhalten. Die künstliche Simulation langer Tage durch Photomodulation hat sich als effektive Methode erwiesen (Nagy et al. 2000), um die zyklische Ovarialaktivität im Frühling zu fördern, obwohl sie eine frühzeitige Anwendung erfordert. Neue Forschungen zur Bedeutung der Melatoninproduktion und der Einfluss von Licht auf die Reproduktion zeigen die Komplexität dieser Prozesse. Besonders interessant sind die Ergebnisse zur Verwendung von blauem LED-Licht (Lutzer et al. 2021), das positive Effekte auf die Tragzeit und Entwicklung der Fohlen zeigt.

Kontrollgruppen waren teilweise auch aus ethischen Gründen nicht vorhanden, da es nicht vertretbar war, verletzte Tiere nicht zu behandeln oder wurden einfach im Studiendesign nicht berücksichtigt. Eine Verblindung konnte oft aus praktischen Gründen nicht erfolgen, weil z.B. das kontinuierliche Tragen einer Lichtmaske dem Untersucher nicht verborgen bleiben kann, auch die Randomisierung der Gruppen war in vielen Fällen aufgrund des Studiendesign nicht möglich. Der einzige Ausfall von Probanden in der einen Studie (Klide und Martin Jr 1987) wurde nicht genauer beschrieben, es fehlte nur ein Teilnehmer an der späteren Verlaufsuntersuchung.

In der tabellarischen Auflistung der relevanten Primärpublikationen zur physiologischen Wirkung von Licht (Tabelle 1) ist zu sehen, dass alle Publikationen eine signifikante Auswirkung von Licht auf den Organismus aufweisen.

Die tabellarische Auflistung zum therapeutischen Einsatz von Licht (Tabelle 2) ergab nur fünf signifikant positive Studien, vier negative und drei, mit sowohl positiven als auch negativen Teilergebnissen. Diese Gegenüberstellung lässt den Schluss zu, dass Licht sehr wohl einen Einfluss auf den Organismus hat, aber als Therapiemethode nicht immer die gewünschten Erfolge bringt, da hier nicht immer eine eindeutige Verbesserung nachgewiesen werden konnte.

Da nur in den wenigsten Studien eine Randomisierung und/oder eine Verblindung erfolgte, so wie auch nicht immer eine Kontrollgruppe zur Verfügung stand, sollten die Ergebnisse der Studien kritisch betrachtet werden.

Licht als Photobiomodulation und Lasertherapie sind zwar vielversprechende Methoden mit einem weiten Spektrum an Einsatzbereichen, jedoch liefert die Lichttherapie im Sinne von sichtbarem LED-Licht in der Wundheilung noch keine stimmigen Forschungsergebnisse, die sich über den Wert der Kontrollgruppen abheben. Die Lasertherapie hingegen zeigte in manchen Studien (Jaafar, Al-Bayti und Abdullah 2021) verkürzte Heilungszeiten bei Problemen im Bewegungsapparat oder eine Schmerzreduktion bei entzündlichen Prozessen (Lindholm et al. 2001). Trotzdem gab es keine messbare Veränderung der Entzündungsparameter (Bergh et al. 2017), was somit keine belastbare wissenschaftliche Erklärung bietet.

Zusammenfassend sehe ich großes Potenzial in der Optimierung der Lichtbedingungen zur Verbesserung der Fortpflanzungsergebnisse bei Pferden, aber erachte die LED-Therapie als aktuell noch zu wenig erforscht und ineffizient als Therapieoption. Lasertherapie bietet ein größeres Potential, aber auch hier entspricht die Studienlage noch keinem hohen Standard und sollte noch genauer erforscht werden.

8. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird mittels einer Literaturrecherche untersucht, wo die aktuellen Einsatzmöglichkeiten, die nachgewiesene Effektivität, aber auch die Grenzen der Licht- und Lasertherapie liegen.

Die Onlinedatenbanken Pubmed, Elsevier, ScienceDirect und Google Scholar wurden nach den Stichwörtern „horse/Pferd“, „light/Licht“, „photomodulation/Fotomodulation“, „laser/Laser“, „light therapy/Lichttherapie“ und „chronobiology/Chronobiologie“ durchsucht, um ein möglichst umfassendes Bild über den aktuellen Stand der Wissenschaft widerzuspiegeln. Die Begriffe wurden in verschiedenen Kombinationen verwendet. Von der Studie ausgeschlossen wurden Publikationen, die über Lasertherapie in Form von Laser als Schneidewerkzeug in der Chirurgie berichteten.

Lasertherapie zeigt bei der Wundbehandlung und Schmerzlinderung von Sehnenverletzungen und Gelenkerkrankungen sowohl positive Ergebnisse, als auch in manchen Studien keinen Unterschied zur unbehandelten Kontrollgruppe. Oftmals ist die Studienqualität mangelhaft, da die Probandenanzahl gering ist und häufig die Kontrollgruppe fehlt. Variablen wie Strahlungsintensität, Fellfarbe und Haardichte beeinflussen den Erfolg. LED-Lichttherapie liefert genauso kontroverse Ergebnisse, da die Behandlung häufig keine besseren Ergebnisse als die Kontrollgruppe erzielt. Licht ist jedoch wirksam zur Modulation hormoneller Prozesse und beeinflusst nachweislich den Biorhythmus von Pferden.

Die Studienlage zu den verschiedenen Arten von Lichttherapien bei Pferden besitzt das große Problem, dass die Anzahl der Probanden meist zu gering ist, um eindeutige Aussagen treffen zu können, die meisten Studien meist nicht doppelblind durchgeführt wurden und die Zieldefinition sehr schwammig formuliert ist.

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Feld der Lichtbehandlung bei Pferden sehr breit gefächert ist und weiterhin ein großer Forschungsbedarf besteht.

9. Summary

This study uses literature research to review, the current applications, proven effectiveness, and limitations of light and laser therapy.

The online databases PubMed, Elsevier, ScienceDirect, and Google Scholar were searched using the keywords „horse/Pferd,” „light/Licht,” „photomodulation/Fotomodulation,” „laser/Laser,” „light therapy/Lichttherapie,” and „chronobiology/Chronobiologie” to reflect a comprehensive picture of the current state of science. The terms were used in various combinations. Publications reporting on laser therapy in the form of laser as a cutting tool in surgery were excluded from the study.

Laser therapy shows positive results in wound treatment and pain relief from tendon injuries and joint diseases, as well as, in some studies, no difference from the untreated control group. Often, the study quality is poor due to the small number of subjects and the frequent absence of a control group. Variables such as radiation intensity, coat color, and hair density influence success. LED light therapy also delivers controversial results, as the treatment often does not achieve better results than the control group. However, light is effective in modulating hormonal processes and has been shown to influence the biorhythm of horses.

The body of research on the various types of light therapy in horses faces the major problem that the number of subjects is usually too small to make definitive statements, most studies are not conducted double-blind, and the target definition is often vaguely formulated.

In summary, it can be said that the field of light treatment in horses is very broad and there is still a great need for research.

10. Literaturverzeichnis

1. Abreu Chaves, Maria Emília, Angélica Rodrigues de Araújo, André Costa Cruz Piancastelli, and Marcos Pinotti. "Effects of low-power light therapy on wound healing: LASER x LED." *An Bras Dermatol.* 2014;89(4):616-23
2. Irvine CH, Alexander SL. Factors affecting the circadian rhythm in plasma cortisol concentrations in the horse. *Domest Anim Endocrinol.* 1994 Apr;11(2):227-38.
3. "All Nobel Prizes in Physiology or Medicine." 2017. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-laureates-in-physiology-or-medicine/>. (Zugriff : 19.04.2024).
4. Bergh, A., Nyman, G., Lundeberg, T. *et al.* Effect of Defocused CO₂Laser on Equine Tissue Perfusion. *Acta Vet Scand* 47, 33 (2006).
5. Bergh A, Ridderstråle Y, Ekman S. Defocused CO₂ laser on equine skin: a histological examination. *Equine Vet J.* 2007 Mar;39(2):114-9.
6. Spektrum der Wissenschaft. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/elektromagnetische-wellen/4059>. (Zugriff: 5.5.2024).
7. Bohák Z, Szabó F, Beckers JF, Melo de Sousa N, Kutasi O, Nagy K, Szenci O. Monitoring the circadian rhythm of serum and salivary cortisol concentrations in the horse. *Domestic animal endocrinology.* 2013 Jul;45(1):38-42.
8. Bundesamt für Strahlenschutz. 2022. "Sichtbares Licht - Was versteht man unter Licht?" BfS. <https://www.bfs.de/DE/themen/opt/sichtbares-licht/einfuehrung/einfuehrung.html>. (Zugriff: 12.05.2024).
9. Patil UA, Dhama LD. Overview of lasers. *Indian J Plast Surg.* 2008 Oct;41(Suppl): S101-13.

10. Duesterdieck-Zellmer, K. F., Larson, M. K., Plant, T. K., Sundholm-Tepper, A., & Payton, M. E. (2016). Ex vivo penetration of low-level laser light through equine skin and flexor tendons. *American Journal of Veterinary Research*, 77(9), 991-999.
11. Ghazaleh, N., Sharifi, D., Ghamsari, S. M., Mokmeli, S., & Rasooli, A. (2018). Evaluation of Low-Level Laser Effects on Epidural Anesthesia in Horse. *Iranian Journal of Veterinary Surgery*, 13(1), 47-53.
12. Gomez-Villamandos RJ, Santisteban Valenzuela JM, Ruiz Calatrava I, Gomez-Villamandos JC, Avila Jurado I. He-Ne laser therapy by fibroendoscopy in the mucosa of the equine upper airway. *Lasers Surg Med*. 1995;16(2):184-8.
13. Haussler, Kevin K., Philippe T. Manchon, Josh R. Donnell, and David D. Frisbie. Effects of Low-Level Laser Therapy and Chiropractic Care on Back Pain in Quarter Horses. *J Equine Vet Sci*, 86 (2020), p. 102891
14. Henninger R. Treatment of superficial digital flexor tendinitis. *Vet Clin North Am Equine Pract*. 1994 Aug;10(2):409-24.
15. Jaafar SE, Al-Bayti AAH, Abdullah SI. Using Short Term of High Power Laser Therapy in Horse's Tendon Injuries. *Arch Razi Inst*. 2021 Nov 30;76(5):1437-1444.
16. Bogdan Allemann I, Kaufman J. Laser principles. *Curr Probl Dermatol*. 2011;42:7-23. doi: 10.1159/000328236. Epub 2011 Aug 16.
17. J. F. Kirkpatrick, R. Vail, S. Devous, S. Schwend, C. B. Baker, L. Wiesner, Diurnal Variation of Plasma Testosterone in Wild Stallions, *Biology of Reproduction*, Volume 15, Issue 1, 1 August 1976.
18. Klecel W, Martyniuk E. From the Eurasian Steppes to the Roman Circuses: A Review of Early Development of Horse Breeding and Management. *Animals (Basel)*. 2021 Jun 22;11(7):1859.
19. Martin BB Jr, Klidge AM. Treatment of chronic back pain in horses. Stimulation of acupuncture points with a low powered infrared laser. *Vet Surg*. 1987 Jan-Feb;16(1):106-10.

20. Lindholm AC, Swensson U, de Mitri N, Collinder E. Clinical effects of betamethasone and hyaluronan, and of defocalized carbon dioxide laser treatment on traumatic arthritis in the fetlock joints of horses. *J Vet Med A Physiol Pathol Clin Med.* 2002 May;49(4):189-94.
21. Luna SPL, Schoen A, Trindade PHE, Rocha PBD. Penetration Profiles of a Class IV Therapeutic Laser and a Photobiomodulation Therapy Device in Equine Skin. *J Equine Vet Sci.* 2020 Feb;85:102846.
22. Lutzer A, Nagel C, Murphy BA, Aurich J, Wulf M, Gautier C, Aurich C. Effects of blue monochromatic light directed at one eye of pregnant horse mares on gestation, parturition and foal maturity. *Domest Anim Endocrinol.* 2022 Jan;78:106675.
23. Michanek P, Toth T, Bergström E, Treffenberg-Pettersson H, Bergh A. Effect of infrared and red monochromatic light on equine wound healing. *Equine Vet J.* 2021 Jan;53(1):143-148.
24. Millis DL, Bergh A. A Systematic Literature Review of Complementary and Alternative Veterinary Medicine: Laser Therapy. *Animals (Basel).* 2023 Feb 14;13(4):667.
25. Murphy BA, Wagner AL, McGlynn OF, Kharazyan F, Browne JA, Elliott JA. Exercise influences circadian gene expression in equine skeletal muscle. *Vet J.* 2014 Jul;201(1):39-45.
26. Murphy BA. Chronobiology and the horse: recent revelations and future directions. *Vet J.* 2010 Aug;185(2):105-14.
27. Murphy BA. Circadian and Circannual Regulation in the Horse: Internal Timing in an Elite Athlete. *J Equine Vet Sci.* 2019 May;76:14-24.
28. Murphy BA, Walsh CM, Woodward EM, Prendergast RL, Ryle JP, Fallon LH, Troedsson MH. Blue light from individual light masks directed at a single eye advances the breeding season in mares. *Equine Vet J.* 2014 Sep;46(5):601-5.
29. Nagy, P., D. Guillaume, and P. Daels. Seasonality in mares. *Anim Reprod Sci*, 60-61 (2000), pp. 245-262

30. Peavy GM. Lasers and laser-tissue interaction. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*. 2002 May;32(3):517-34, v-vi. doi: 10.1016/s0195-5616(02)00003-7. Erratum in: *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 2002 Nov;32(6):ix.
31. Petersen SL, Botes C, Olivier A, Guthrie AJ. The effect of low level laser therapy (LLLT) on wound healing in horses. *Equine Vet J*. 1999 May;31(3):228-31.
32. Petermann U. Comparison of pre- and post-treatment pain scores of twenty one horses with laminitis treated with acupoint and topical low level impulse laser therapy. *Am J Trad Chin Vet Met* 2011; 6(1):13-25
33. Pryor, Brian, and Darryl L. Millis. 2015. "Therapeutic Laser in Veterinary Medicine." *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 45 (1) (2015), pp. 45-46
34. Ryan, T., Smith, R. An investigation into the depth of penetration of low level laser therapy through the equine tendon in vivo. *Ir Vet J* 60, 295 (2007).
35. Schlachter C, Lewis C. Electrophysical Therapies for the Equine Athlete. *Vet Clin North Am Equine Pract*. 2016 Apr;32(1):127-47.
36. Zielińska, P.; Nicpoń, J.; Kielbowicz, Z.; Soroko, M.; Dudek, K.; Zaborski, D. Effects of High Intensity Laser Therapy in the Treatment of Tendon and Ligament Injuries in Performance Horses. *Animals* 2020, 10, 1327.

11. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Elektromagnetische Welle mit senkrecht zueinanderstehenden elektrischen und magnetischen Feldern.	5
Abb. 2: Diagramm des elektromagnetischen Spektrums (Kaufman 2011).	6
Abb. 3: Die Vergleichung Eigenschaften von Laserlicht und nicht-Laserlicht (Kaufman 2011).	9
Abb. 4: Diagramm zur Veranschaulichung der Einwirkung von Licht auf den equinen Organismus (Murphy 2019).	20
Tabelle 1 Tabellarische Auflistung der Studien zur physiologischen Wirkung der Lichtbehandlung. „positive“ Erfolge zeigen signifikante Änderungen durch die Lichtbehandlung.	29
Tabelle 2 : Tabellarische Auflistung der Studien zur therapeutischen Wirkung der Lichtbehandlung. „positive“ Erfolge zeigen signifikante Heilungsprozesse durch die Lichtbehandlung.	30

