

Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie  
der Technischen Universität München  
Klinikum rechts der Isar  
(Direktor: Univ.- Prof. Dr. Dr. Dr. h.c. (UMF Temeschburg) H.-H. Horch)

Experimentelle Untersuchungen  
zur Wärmewirkung von CO<sub>2</sub>-Laserstrahlen  
an zahnärztlichen Implantaten

Isabelle Melanie Mendl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität  
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Zahnheilkunde

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.- Prof. Dr. D. Neumeier

Prüfer der Dissertation:

1. Privatdozent Dr. H. Deppe

2. Univ.- Prof. Dr. Dr. Dr. h.c. (UMF Temeschburg)  
H.-H. Horch

Die Dissertation wurde am 21.11.2000 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 10.01.2001 angenommen.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 Einleitung und Fragestellung</b> .....	4
1.1 Einleitung .....	4
1.2 Fragestellung .....	6
1.3 Aufgabenstellung .....	8
<b>2 Materialien und Methode</b> .....	9
2.1 Material .....	9
2.1.1 Der SHARPLAN Silk Touch™ Flashscanner .....	9
2.1.2 Frialit 2 – Implantat .....	12
2.2 Versuchsaufbau .....	13
2.3 Mathematische Grundlagen .....	16
<b>3 Ergebnisse</b> .....	18
3.1 Mittelwertbildung .....	18
3.2 Arithmetische Mittelwerte der Temperaturerhöhungen .....	18
3.2.1 Continuous wave in kontinuierlicher Bestrahlungsart .....	18
3.2.2 Continuous wave im Wiederholungspuls (WHP) .....	19
3.3 Lineare Regression der empirisch ermittelten Temperaturerhöhungen .....	22
2.3.1 Ermittlung der Regressionskoeffizienten .....	22
2.3.2 Ermittlung der Achsenabschnitte .....	23
2.3.3 Regressionsgerade .....	24
<b>4 Prognose der Temperaturerhöhung</b> .....	29
4.1 Ermittlung der Prognoseparameter für alle Pulse einer getesteten Relaxationszeit .....	30
4.1.1 Lineare Regression der Regressionskoeffizienten $b_1$ .....	30
4.1.2 Lineare Regression der Achsenabschnitte $a_1$ .....	35
4.2 Ermittlung der Prognoseparameter für alle Relaxationszeiten eines Pulses .....	39
4.2.1 Polynomiale Regression der Regressionskoeffizienten $b_1$ .....	40
4.2.2 Polynomiale Regression der Achsenabschnitte $a_1$ .....	44
4.3 Prognose der Temperaturerhöhung .....	49

<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	56
5.1	Vergleich der Methodik.....	56
5.2	Verbesserungen und Fehler .....	60
5.2.1	Stelle der Laserbestrahlung.....	61
5.2.2	Stelle des Messfühlers.....	61
5.2.3	Wasserbad.....	61
5.2.4	Expositionszeit, Betriebsart und Leistung des CO <sub>2</sub> -Lasers.....	62
5.2.5	Pressluftschlauch des CO <sub>2</sub> -Lasers .....	62
5.2.6	Silk Touch™ Flashscanner.....	63
5.3	Vergleich der Ergebnisse.....	64
5.4	Ausblick.....	65
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	66
<b>7</b>	<b>Anhang</b> .....	69
7.1	Arithmetischer Mittelwert der Temperaturerhöhung.....	69
7.2	P-Werte.....	84
7.2.1	P-Werte zu den Abb. 8a-d und 9a-d.....	84
7.2.2	P-Werte zu den Abb. 10 und 11.....	85
7.2.3	P-Werte zu den Abb. 12 und 13.....	86
7.2.4	P-Werte zu den Abb. 14 und 15.....	86
7.2.5	P-Werte zu den Abb. 16 und 17.....	87
7.3	Matrizenrechnung.....	87
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	89
<b>9</b>	<b>Danksagung</b> .....	93
<b>10</b>	<b>Lebenslauf</b> .....	94

# 1 Einleitung und Fragestellung

## 1.1 Einleitung

Die enossale Implantologie hat in den letzten 25 Jahren das Therapie-spektrum der chirurgisch-prothetischen Zahnheilkunde entscheidend bereichert. Mittlerweile werden enossale Implantate vermehrt in prothetische Behandlungskonzepte einbezogen, auch das Interesse der Patienten an implantologisch-prothetischen Behandlungen ist in hohem Maße gestiegen [31 s. 5]. Implantate stellen für den Zahnarzt eine neue Möglichkeit der Rekonstruktion dar.

Die kausalen Zusammenhänge der Entstehung periimplantärer Erkrankungen sind bis heute weitgehend noch ungeklärt. Für den periimplantären marginalen Knochenverlust werden aber in erster Linie zwei ätiologische Faktoren verantwortlich gemacht: die bakterielle Infektion und die biomechanische Überbelastung [32 s. 318]. Die meisten Autoren gehen davon aus, dass periimplantäre Erkrankungen (Mukositis, Periimplantitis) – vergleichbar mit Parodontopathien – plaqueinduziert sind [2 s. 7, 15 s. 486, 19 s. 15].

Hierfür sprechen folgende Beobachtungen:

- Periimplantäre Erkrankungen klingen nach Plaquekontrolle und effektiver Mundhygiene - Zähnen vergleichbar - wieder ab.
- Die von Implantatoberflächen entnommene bakterielle Plaque weist hinsichtlich ihrer Zusammensetzung bei gesunden und auch bei erkrankten Implantaten eine große Ähnlichkeit zu Zähnen auf.

Mikrobiologisch scheint der Verlauf einer periimplantären Erkrankung derjenigen einer Erwachsenenparodontitis zu entsprechen. Klinisch auffällige Implantate zeigen mittelhohe Keimwerte für *Actinobacillus actinomycetem comitans*, *Bakteroides intermedius* und *Bakteroides gingivalis*. Auch die Werte für *Prevotella intermedia*, Fusobakterien und Spirochäten sind im Vergleich zu gesunden Implantaten erhöht [20 s. 759, 22 s. 150].

Bei der Therapie der Periimplantitis steht die Stabilisierung des progressiven Knochenabbaus durch Plaquekontrolle und Tascheneliminierung im Vordergrund. Die Behandlung wird, wie bei parodontalen Behandlungen üblich, in zwei Phasen eingeteilt. Die erste Phase besteht in der Entfernung der Plaque und der Kontrolle der Entzündung, sowie - falls notwendig - der Beseitigung biomechanischer Fehlbelastungen

durch Korrektur der Suprakonstruktion. Nach erfolgreich durchgeführter Initialbehandlung wird die zweite (chirurgische) Phase durchgeführt. Zur Verhinderung eines weiteren Knochenabbaus wird die kontaminierte Implantatoberfläche während des chirurgischen Eingriffs gereinigt [32 s. 321].

In der Literatur werden viele verschiedene konventionelle Therapiemöglichkeiten der Periimplantitis erörtert. So wurden systemische Antibiotikagabe [21 s. 163], lokale Applikation von Chlorhexidindigluconat [8 s. 64], Kunststoffküretten, Metallküretten [7 s. 486], Ultraschallinstrumente, Pulver-Wasserstrahlgeräte [6 s. 945, 37 s. 155], wöchentliches Polieren mit einem Gumminapf, eine konventionelle Zahnbürste [30 s. 121], eine elektrische Zahnbürste [34 s. 303], und Pulver-Wasser-Strahlgeräte in Verbindung mit Detoxifikation durch Zitronensäurelösung [32 s. 322] zur Periimplantitistherapie getestet.

Chemische antibakterielle Mittel werden immer häufiger zur Prophylaxe und Therapie mit Plaque assoziierten Erkrankungen verwendet. Jedoch verlieren diese Mittel durch die allmählich resistent werdenden Zielorganismen ihre Wirkung. Zudem sind diese Verfahren, nach experimentellen und klinischen Studien, nur bedingt geeignet den Knochenverlust zu stoppen. Es besteht demnach ein Bedarf an alternativen Therapien [36 s. 187].

Ein neuer Therapieansatz könnte in der Anwendung von Laserstrahlen bestehen.

Bei der Periimplantitistherapie mit einem Dioden-Halbleiterlaser, eine Studie der Universität Freiburg, sind die Ergebnisse eher enttäuschend, da nach eigenen Angaben schon bei einer Leistung von einem Watt die Gefahr der Überhitzung des Implantates droht [1 s. 317].

Auch Nd:YAG Laser scheinen sich nicht für den Einsatz am Implantat zu eignen, da sie ein Schmelzen der Implantatoberfläche, Porositätsverlust und andere Oberflächenveränderungen auslösen. Zusätzlich sind sie nicht in der Lage kontaminierte Implantate zu sterilisieren [3 s. 443, 9 s. 165, 35 s. 335].

Bei kritischer Würdigung der in der Literatur angegebenen Therapieempfehlungen ist festzustellen, dass die Methode der Wahl für eine alternative Behandlung der Periimplantitis noch nicht gefunden ist.

## 1.2 Fragestellung

In der Parodontologie werden seit langer Zeit Anstrengungen unternommen, konventionelle Behandlungsmethoden durch den Einsatz neuer Technologien zu verbessern. Der Einsatz von CO<sub>2</sub>-Lasern in der Schleimhautchirurgie hat sich bewährt, auch zur Implantatfreilegung wird er akzeptiert [23 s. 220, 35 s. 336], während die Therapie der Periimplantitis bislang noch nicht realisiert wurde. Sie stellt aber in der Theorie eine sehr erfolgversprechende Behandlungsmöglichkeit dar.

CO<sub>2</sub>-Laser besitzen gegenüber anderen Lasern den erheblichen Vorteil, dass sie nicht signifikant von dunklem Metall absorbiert werden [10 s. 27, 35 s. 336]. Dies reduziert das Potential für thermische Schäden, sowie für Schäden auf der Metalloberfläche. Zudem sind sie bakterizid wirksam [36 s. 187].

Für die Osseointegration von Titanimplantaten ist die physikalische Oberflächenstruktur von entscheidender Bedeutung [11 s. 693]. Morphologische Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop ergaben sowohl für den kontinuierlichen, als auch für den gepulsten CO<sub>2</sub>-Laserstrahl unterschiedlicher Pulsdauer keine Strukturschädigung der Implantatoberfläche (Titan gestrahlt, Titan TPS-beschichtet und Titan HP-beschichtet), unabhängig vom Energieniveau [28 s. 1]. Für CO<sub>2</sub>-Laseranwendungen auf metallischen Implantaten bedeutet dies einen erheblichen Vorteil. Somit erscheint der CO<sub>2</sub>-Laser geeignet für die Implantatfreilegung, sowie für die Periimplantitistherapie [35 s. 336]. CO<sub>2</sub>-Laser besitzen zudem das Potential keimbesiedelte, feuchte Metalloberflächen zu sterilisieren [24 s. 184]. Sie sind effektiv gegen Organismen einsetzbar, die mit parodontalen Erkrankungen assoziiert werden [36 s. 187].

Um die Gefahr thermischer Nebenwirkungen des CO<sub>2</sub>-Lasers zu minimieren, bietet sich der Gebrauch eines Zusatzgerätes an. Das von der Firma Sharplan vertriebene Gerät Silk Touch<sup>TM</sup> Flashscanner verwendet einen hochfokussierten Laserstrahl in einem spiralförmigen Muster, um auch bei Laserabtragung von großen Hautflächen z.B. im Gesicht gleichmäßige Gewebefeffekte zu erzielen. Der Laserstrahl fährt ein kreisförmiges Gebiet mit den Durchmesser von 0,9 – 10 mm ab. Das Gerät liefert die Energie in so kurzer Zeit über die Fläche verteilt, dass das Gewebe verdampft, bevor thermische Schäden oder Karbonisation entstehen. Der Silk Touch<sup>TM</sup> Flashscanner wird seit ca. fünf Jahren von dermatologischen Instituten erfolgreich eingesetzt und empfohlen [5 s. 97, 18 s. 1021].

Um den CO<sub>2</sub>-Laser nun in Verbindung mit dem Silk Touch™ Flashscanner für die Periimplantitistherapie einsetzen zu können, muss vorab geklärt werden, ob eine thermale Überhitzung des knöchernen Implantatlagers durch geeignete Laserbetriebseinstellungen verhindert werden kann. Erleidet der periimplantäre Knochen durch die direkte thermische Einwirkung des Laserstrahles bei der Entfernung des Granulationsgewebes eine Nekrotisierung, kommt es zu einem stark verlängerten Wundheilungsverlauf bei erhöhtem Infektionsrisiko.

Es ist nachgewiesen, dass Wärme Knochenabbau induzieren und die regenerative Kapazität des Knochens minimieren kann [33 s. 410]. Ebenso wird durch unphysiologisch hohe Temperaturen die optimale Osseointegration von Implantaten behindert [25 s. 1018]. Bis etwa 40°C sind keine irreversiblen Gewebeschäden zu erwarten, es kommt jedoch zu einem erhöhten Stoffwechsel auf Grund der Gewebeerwärmung. Zwischen 40°C und 46°C kommt es zu Wassereinlagerungen (Ödemisierung) der Gewebes und zu enzymatischen Änderungen. Bei längeren Bestrahlungen kann es schon jetzt zu Membranauflockerungen kommen [16 s. 102]. Zwischen 47°C und 50°C wird die Knochenneubildung beeinträchtigt [28 s. 1]. Temperaturen darüberhinaus führen zu Koagulation, d.h. Denaturierung von Proteinen und Kollagen, und zu Nekrosen [16 s. 102]. Daraus lässt sich schließen, dass Temperaturerhöhungen von max 10°K toleriert werden könnten [10 s. 28, 25 s. 1018].

Zu der Thematik der Temperaturerhöhungen am Zahnimplantat durch CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung liegen in der Literatur die in vitro Studien von C.H. Ganz [10 s. 27], Swift [33 s. 410] und Oyster [25 s.1017] mit erfolgversprechenden Ergebnissen vor. Sie konnten zeigen, dass der CO<sub>2</sub>-Laserstrahl bei kurzen Expositionszeiten und geringen Leistungsstärken zur Anwendung an dentalen Implantaten geeignet ist. Da jedoch in diesen Studien die CO<sub>2</sub>-Laser ohne Zusatzgerät verwendet wurden, ist eine Überprüfung des Temperaturanstiegs sinnvoll, da bei der Verwendung des Silk Touch™ Flashscanners eine weniger starke Temperaturerhöhung bei gleicher Leistungsstärke erwartet werden kann.

### 1.3 Aufgabenstellung

Der CO<sub>2</sub>-Laser soll in Verbindung mit dem Sharplan Silk Touch™ Flashscanner zur Periimplantitistherapie in einen später folgenden Tierversuch eingesetzt werden. Um dies zu ermöglichen, mussten die Betriebseinstellungen gefunden werden, die das Implantat und das umgebene Gewebe nicht zu stark erwärmen.

Da das an den CO<sub>2</sub>-Laser gekoppelte Zusatzgerät Silk Touch™ Flashscanner eine sich kontinuierlich bewegende Spirale beschreibt, ist nur die Einstellung „continuous wave“ (cw) am CO<sub>2</sub>-Laser sinnvoll. Die Betriebsart „Superpuls“ würde die vom Silk Touch™ erstellte Figur nur punktuell erfassen und somit eine flächendeckende Sterilisation des Implantates nicht gewährleisten.

Es wurden folgende Einstellungen überprüft:

1. continuous wave in kontinuierlicher Bestrahlungsart für jeweils 5 und 10 Sekunden
2. continuous wave in Wiederholungspuls- (WHP) Bestrahlungsart für jeweils 5 und 10 Sekunden

Im WHP wurden nach den Methoden der statistischen Versuchsplanung folgende Kombinationen ausgewählt:

Relaxationszeit (in Sekunden)	Puls (in Sekunden)				
0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,5	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,7	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
1,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0

Tabelle 1: ausgewählte Kombinationen im WHP

Bei allen Einstellungen unter 1. und 2. wurde mit einer Leistung von 1 Watt begonnen. Die Leistung wurde mit 0,5 Watt Schritten, soweit am CO<sub>2</sub>-Laser möglich, bis zu der Leistung gesteigert, bei der der Temperaturanstieg den biologisch vertretbaren Bereich deutlich überschritten hatte.

Am CO<sub>2</sub>-Laser sind jedoch weit mehr Einstellungen als die getesteten Relaxationszeit/Puls-Kombinationen möglich. Es sollte zusätzlich eine auf den empirisch gewonnenen Werten basierende Methode gefunden werden, mit deren Hilfe es möglich ist, für andere, nicht getestete Einstellungen am CO<sub>2</sub>-Laser, die zu erwartende Temperaturerhöhung zu prognostizieren.

## 2 Materialien und Methode

### 2.1 Material

Die durch CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung (Sharplan 20C, Sharplan Lasers GmbH, Freising, Deutschland) verursachten Temperaturerhöhungen an einem Frialit 2 Implantat (D3,8 L11, Fa. Friadent GmbH, Mannheim, Deutschland), das in den Unterkieferknochen eines frisch geschlachteten Schweines implantiert wurde, wurden mit einem Digitalthermometer (GTH 1200A, NiCr-Ni, Fa. Greisinger electronic, Deutschland) gemessen. Diese Daten wurden an das Computerprogramm „Tooth Temp“ (Computerprogramm für Windows 3.1; entwickelt am Lehrstuhl für Elektrische Messtechnik der Technischen Universität München) weitergeleitet und ausgewertet.

#### 2.1.1 Der Sharplan Silk Touch™ Flashscanner

Von der Firma Sharplan wird ein Zusatzgerät, der Sharplan Silk Touch™ Flashscanner für CO<sub>2</sub> - Laser vertrieben. Es wird am Ende des freidrehbaren Gelenkarms des Lasers aufgeschraubt, und mit einem Handstück gekoppelt.

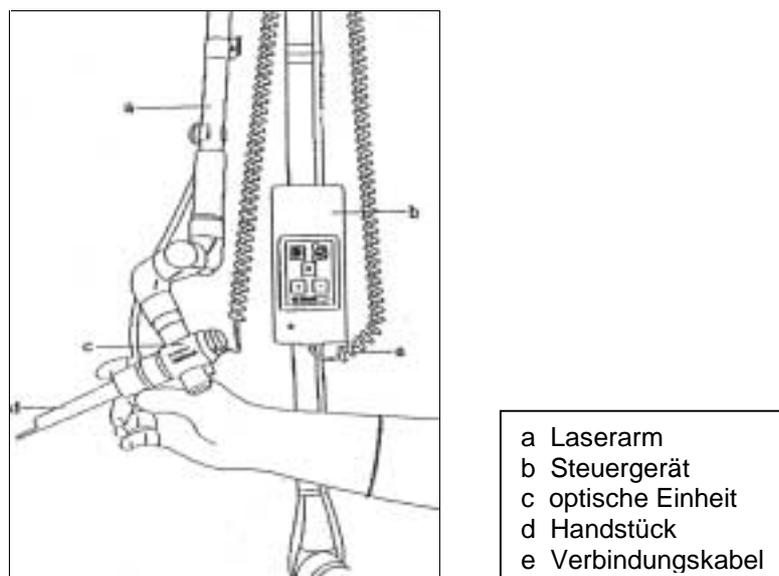


Abb. 1: Sharplan Silk Touch™ Flashscanner befestigt am Laserarm

Die mikroprozessor-gesteuerte Silk Touch™ Scan Technologie bestrahlt eine Oberfläche mit einem hochfokussierten Laserstrahl auf einem spiralförmigen Weg, und erreicht so einen homogenen Gewebeeffekt. Der auf der Oberfläche auftreffende Laserstrahl verweilt jeweils nur für eine Millisekunde an einem Punkt, so dass die bei der Abtragung des Gewebes entstehende Wärme über das Gewebe abfließen kann, ohne dass ein nekrotisierender Wärmestau oder eine Karbonisation entsteht. Durch Karbonisierung würde sich das Absorptionsverhalten in Richtung erhöhte Absorption ändern, so dass sehr schnell höhere Temperaturen erreicht würden [16 s. 102].

Der Silk Touch™ Flashscanner enthält zwei orthogonal schwingende, durch Mikroprozessoren gesteuerte Spiegel, sowie eine fokussierende Linse.

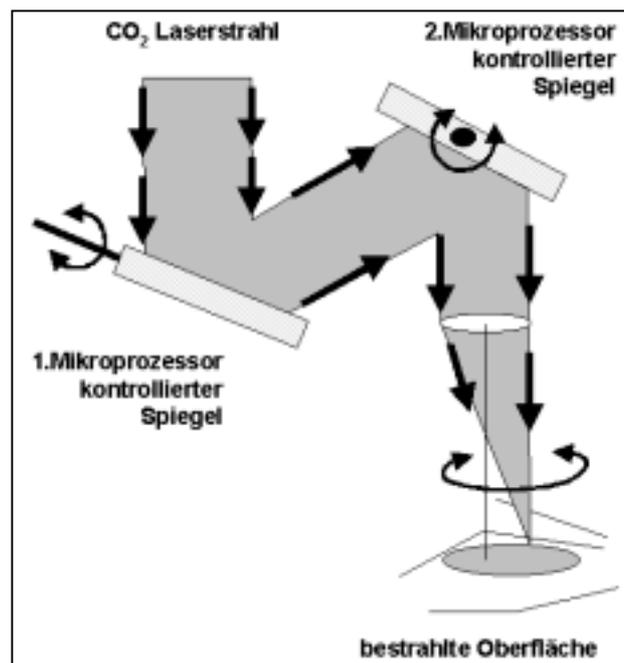


Abb. 2: Mikroprozessor-gesteuerte Spiegel (Schema)

Die Spiegel lenken den Fokus des Laserstrahls (Durchmesser  $d=0,2$  mm) ab, so dass eine in 0,1 Sekunden kollabierende Spiralkurve mit konstanter Geschwindigkeit entsteht [18 s. 1021].

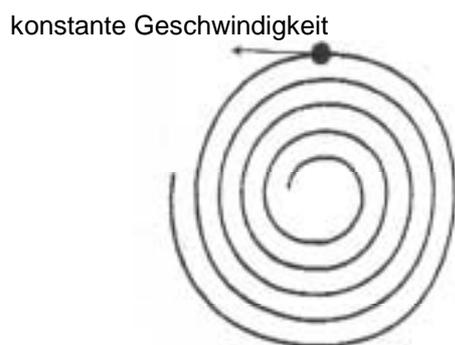


Abb. 3: Spiralförmiger Verlauf des Laserstrahls mit konstanter Geschwindigkeit,  
Dauer eines Durchlaufs: 0,1 Sekunden

Die konstante Geschwindigkeit des Lasers in dem Spiralmuster ist die Grundlage zur homogenen Verdampfung der Oberfläche [5 S. 97].

Für den Silk Touch™ Flashscanner gibt es zwei Einstellungsmöglichkeiten: Im „CUT“ Modus (schneiden) ist der Scanner ausgeschaltet und der Laserstrahl kann zum Schneiden verwendet werden. Die „ABL“ Einstellung (Ablation) ermöglicht die spiralförmige Führung des Laserstrahls auf der entsprechenden Oberfläche.

Das Sharplan Silk Touch™ Flashscanner System beinhaltet vier Handstücke mit den Brennweiten 50 mm, 80 mm, 125 mm und 200 mm.

Handstück	Verwendung
50 mm	nur für Inzision, das Handstück sollte direkt am Laserarm angeschlossen sein
80 mm	nur für Bohrungen an der Kopfhaut bei Haartransplantation
125 mm	für Inzision oder Hautabtrag
200 mm	nur für Hautabtrag

Tabelle 2: Vom Hersteller empfohlene Verwendungsmöglichkeiten der unterschiedlichen Handstücke des Sharplan Silk Touch™ Flashscanner Systems

Zusätzlich kann man am SHARPLAN Silk Touch™ Flashscanner den Durchmesser der Spirale mit den Tasten „+“, „M“ und „-“ verändern.

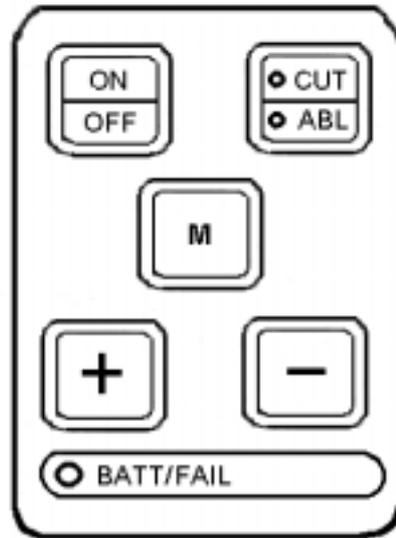


Abb. 4: Steuergerät der Silk Touch™ Flashscanners

In Abhängigkeit vom Handstück kann die Spirale einen Durchmesser von 0,9 mm - 10 mm erreichen. Eine optimale Größenanpassung der Spirale an die zu bearbeitende Fläche ist also gut möglich. Auch größere Flächen können demnach gleichmäßig bearbeitet werden.

### 2.1.2 Frialit 2 - Implantat

Für diese Studie wurde das Frialit 2 Implantatsystem (D3,8 L11) verwendet.



Abb. 5: Frialit 2 - Implantat

Die Indikationen für das Frialit 2 Implantatsystem sind der Einzelzahnersatz, rein implantatgetragene Brücken und die Versorgung des zahnlosen Kiefers [13 s. 1075].

Das Implantat ist aus medizinischem Reintitan gefertigt. Titan bildet innerhalb von ca.  $10^{-9}$  Sekunden eine Oxidschicht. Diese Oxidschicht unterbindet bei Gebrauchstemperatur die weitere Zufuhr von Sauerstoff. Dadurch gewinnt Titan zwei Eigenschaften, wodurch es als zahnärztlicher Werkstoff in besonderer Weise interessant ist. Titan ist korrosionsfest und biokompatibel [12 s. 687, 14 s. 573].

Frialit 2 Implantate besitzen die Form eines Stufenzylinders. Diese Form ermöglicht die horizontale und vertikale Verteilung von Kaukräften auf verschiedene Bereiche der Grenzfläche zwischen Knochen und Implantat. Für eine optimale Anlagerung der Weichgewebe ist der zervikale Implantatrand hochglanzpoliert. Ein Sechskant im Inneren des Implantats sorgt für die rotationssichere und passgenaue Fixierung aller Aufbauteile.

Im enossalen Bereich ist die Implantatoberfläche angerauht. Eine rauhe Implantatoberfläche verbessert durch ihre mikroretentive Wirkung die Osseointegration der Implantate [11 s. 691] und verringert durch sechsfache Vergrößerung der Implantatoberfläche den in den Kiefer eingeleiteten Kaudruck.

Für diese Studie wurde ein Implantat mit Titanplasma-Spritzbeschichtung gewählt.

## **2.2 Versuchsaufbau**

Der von uns verwendete CO<sub>2</sub>-Laser (Sharplan 20 C, Sharplan Lasers GmbH, Freising, Deutschland) hat eine Wellenlänge von 10,6 µm und liegt damit im fernen Infrarotbereich [16 s. 100]. Da der Laserstrahl unsichtbar ist, wird zur Erleichterung einer gezielten Applikation ein roter HeNe-Laser-Pilotstrahl koaxial in das System integriert [17 s. 694].

Um den Laser in Verbindung mit dem Sharplan Silk Touch™ Flash-scanner (Sharplan Lasers GmbH, Freising, Deutschland) zur Periimplantitistherapie einsetzen zu können, müssen Betriebseinstellungen gefunden werden, die eine Implantatbestrahlung erlauben, bei denen es weder zu Implantatoberflächenveränderungen noch zu Gewebeschäden kommt.

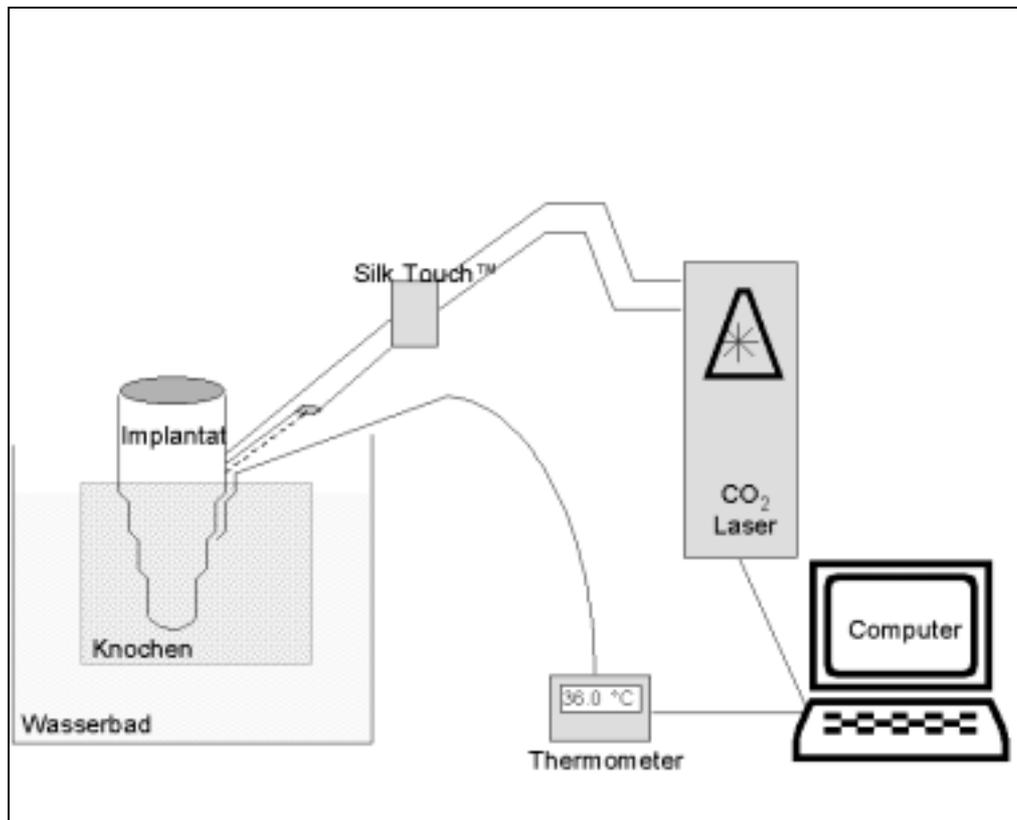


Abb. 6: Schematischer Versuchsaufbau

Für diese Studie wurde in einen frischen Schweineunterkieferknochen ein Frialit 2 Implantat (D3,8 L11, Fa. Friadent GmbH, Mannheim, Deutschland) so implantiert, dass der Temperaturfühler des Digitalthermometers (GTH 1200A, NiCr-Ni, Greisinger electronic, Deutschland) flächig zwischen dem Implantat und dem Knochen lag. Der Temperaturfühler lag marginal im Knochen, ca. 1 mm unterhalb der Stelle, an der der Laserstrahl auftraf.

Das Thermometer gab die Temperaturen auf zehntel Grad genau an. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Blutzirkulation keine signifikante Rolle bei Temperaturmessungen in vitalem oder devitem Gewebe spielt [25 s. 1022].

Das Digitalthermometer wurde an einen Computer gekoppelt, der die Temperaturänderungen anzeigte. Über eine verbindende Schalteinheit war auch der CO<sub>2</sub>-Laser, gekoppelt mit dem Silk Touch™ Flashscanner, an dem Computer angeschlossen. Durch das Computerprogramm „tooth temp“ konnte man die Laserbestrahlung und den Messbeginn synchronisieren.

In einem Wasserbad von ca. 37°C, das mit einem Tauchsieder immer auf konstantem Wert gehalten wurde, befestigte man nun den Knochen in einer speziell angefertigten Halterung so, dass die Knochen-Implantat-Grenze gerade nicht mehr von Wasser umspült wurde, der Temperaturfühler jedoch 36°C angab. Das Wasserbad ist geeignet in einer in vitro Simulation eine ähnliche Wärmeleitfähigkeit und -diffusion der entstehenden Wärme wie in vivo zu simulieren [33 S. 412].

Das Handstück mit der Brennweite von 125 mm des Sharplan Silk Touch™ Flashscanners wurde ebenfalls in der Halterung fixiert, um immer die gleiche Position zum Implantat gewährleisten zu können. Dieses Handstück ermöglicht einen Spot-Durchmesser von 260 µm im CUT Modus [17 S. 694] und einen Scan-Durchmesser von 2 mm, 3 mm und 3,7 mm im ABL Modus [5 S. 97]. Somit war es für die Implantatoberfläche am besten geeignet. Um die Scan-Größe dem Implantat optimal anzupassen, wurde die „Minus“ Tasteneinstellung gewählt. Man erhielt dadurch einen Durchmesser von 2 mm.

Zwischen Implantat und Handstück wurde ein Winkel von 45° eingestellt, um der Arbeitsweise im Mund gerecht zu werden. Der am Laser befindliche flexible Pressluftschlauch wurde mit dem Handstück verbunden, um eine Beschädigung der fokussierenden Linse durch Spritzwasser oder Schmauch zu vermeiden. Dies bewirkt eine zusätzliche Kühlung des Gewebes, deren Effizienz vor allem durch eine Benetzung des Gewebes mit Flüssigkeit steigt [27 S. 108]. Dies zeigte sich auch ganz deutlich bei den Versuchen mit geringer Leistung. Bei den Leistungen von 1 Watt - 2,5 Watt zeigten sich, bei kurzen Bestrahlungszeiten, statt Temperaturerhöhungen deutliche Abkühlungen um 0,9°K bis 0,3°K von der Ausgangstemperatur [Anhang, S. 73, Tabelle 36a].

## 2.3 Mathematische Grundlagen

Um die speziellen mathematischen Berechnungen verständlicher zu gestalten, sollen im Anschluss die später verwendeten Begriffe aus der Statistik erklärt werden [29 S. 497].

### a) **Arithmetischer Mittelwert**

Der Mittelwert aus zwei oder mehreren Zahlen wird durch die Formel

$$M = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

bestimmt.  $x_1$  bis  $x_n$  sind dabei die Zahlen,  $n$  gibt die Anzahl der Zahlen an.

### b) **Lineare Regression**

In der Statistik nennt man eine Gerade mit der Gleichung

$$y = b \cdot x + a$$

Regressionsgerade für die Messpunkte

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n).$$

### c) **Regressionskoeffizient**

Der Regressionskoeffizient entspricht der Steigung einer Geraden.

### d) **Varianz**

Die Varianz einer Zufallsgröße  $X$  ist die Zahl

$$\text{Var}X = \varepsilon(X - \varepsilon X)^2.$$

**e) Kovarianz**

Ist ein Maß für den wechselseitigen linearen Zusammenhang zweier Zufallsvariablen  $x$  und  $y$ . Die Kovarianz zweier Zufallsgrößen  $X$  und  $Y$  ist die Zahl

$$\text{Cov}(X, Y) = \varepsilon[(X - \varepsilon X)(Y - \varepsilon Y)] = \varepsilon(X \cdot Y) - \varepsilon X \cdot \varepsilon Y .$$

**f) Achsenabschnitt**

Ordinatenabschnitt an der Stelle  $x = 0$

**g) Matrix**

Mehrzahl: Matrizen; Rechteckiges Schema der Form:

$$A = (a_{ik}) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Ein mit  $a_{ik}$  bezeichnetes Element steht in der  $i$ -ten Zeile und in der  $k$ -ten Spalte (Kolonne). Die Anzahl  $m$  der Zeilen und  $n$  der Spalten definiert den Typ einer Matrix; man sagt, sie ist von der Ordnung  $m \times n$  oder eine  $(m \times n)$ -Matrix. Existieren viele Daten, faßt man sie bevorzugt in Matrizen zusammen. An  $m$  Objekten seien jeweils  $n$  Variablen gemessen worden. Diese Daten lassen sich dann als Datenmatrix schreiben.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Mittelwertbildung

Um aus den gewonnenen Temperaturerhöhungen für die ermittelten Laser-Kombinationen einen Mittelwert bilden zu können, wurde jede Einstellung dreimal getestet.

Bei den in Kapitel 7.1 (Anhang, S. 69ff) vorliegenden Tabellen (Tabellen 33a bis 41e) handelt es sich um die bei den Versuchen gewonnenen Temperaturerhöhungen. Es wurde der arithmetische Mittelwert [4 S. 16] aus drei Temperaturerhöhungen in einer Einstellung durch die Formel

$$\bar{T} = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3) + (T_6 - T_5)}{3}$$

ermittelt.

$\bar{T}$  entspricht dem arithmetischen Mittel,  $T_1, T_3, T_5$  geben die Ausgangstemperatur und  $T_2, T_4, T_6$  die Temperatur nach Laserbestrahlung an.

#### 3.2 Arithmetische Mittelwerte der Temperaturerhöhungen

##### 3.2.1. Continuous wave in kontinuierlicher Bestrahlungsart

Die durchschnittlichen Temperaturerhöhungen (in °K ± der maximalen Abweichung) für continuous wave mit kontinuierlicher Bestrahlungsart bei 5 und 10 Sekunden Expositionszeit zeigen mit steigender Leistung einen deutlichen Anstieg (Tabelle 3).

**Betriebsart: cw**  
**Bestrahlungsart: kontinuierlich**

Watt	5 Sekunden Ø Temp.	10 Sekunden Ø Temp.
1	1,30°K ±0,30	2,80°K ±0,20
1,5	2,70°K ±0,10	5,13°K ±0,30
2	4,10°K ±0,10	7,90°K ±0,20
2,5	5,73°K ±0,37	10,13°K ±0,20
3	7,90°K ±0,10	13,23°K ±0,50
3,5	9,23°K ±0,07	
4	11,10°K ±0,00	17,00°K ±0,20
4,5	12,40°K ±0,30	

Tabelle 3: Durchschnittliche Temperaturerhöhungen bei 5 bzw. 10s Expositionszeit im cw-Modus mit kontinuierlicher Bestrahlungsart.

Die Temperaturerhöhungen können auch in einem Koordinatensystem dargestellt werden. Auf der Abszisse werden die Leistungen und auf der

Ordinate die durchschnittlichen Temperaturerhöhungen aufgetragen. Dabei läßt sich durch die Trendlinie (gestrichelte Linie) deutlich ein linear ansteigender Verlauf der Temperaturerhöhungen zeigen (Abb. 7).

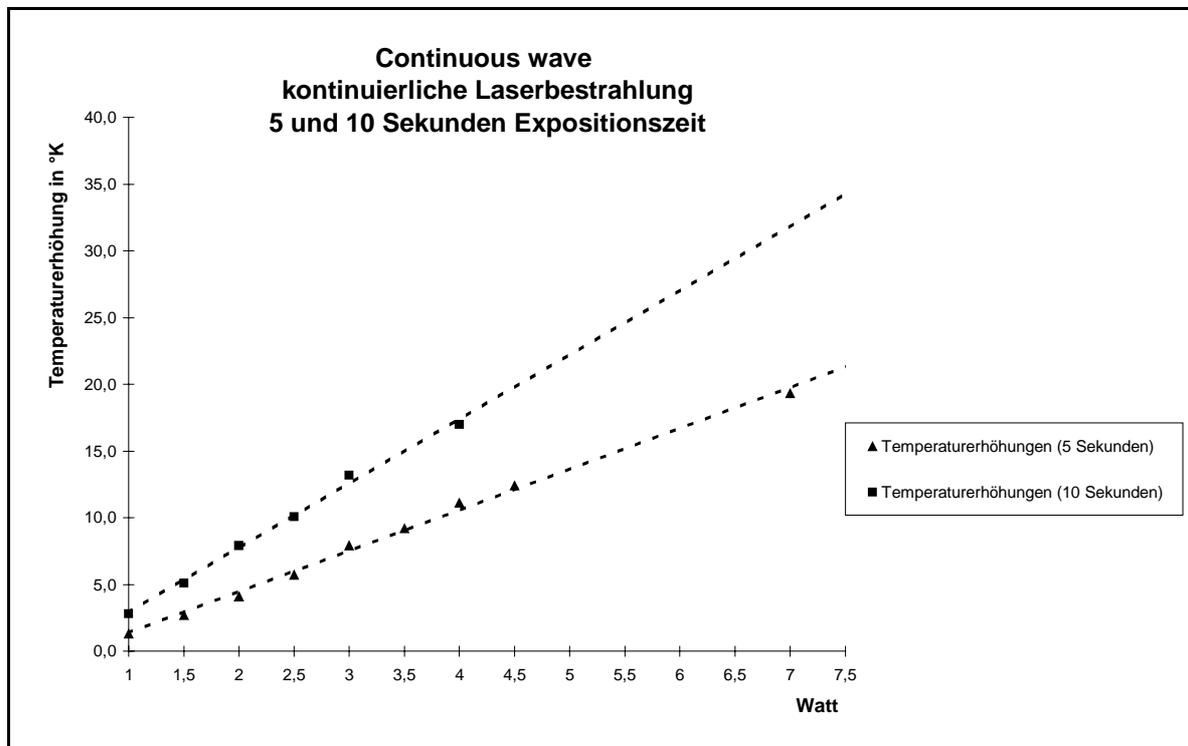


Abb. 7: Temperaturerhöhungen in cw, Bestrahlungsart kontinuierlich, 5 und 10 Sekunden Expositionszeit

Der P-Wert beträgt bei 5 Sekunden Expositionszeit  $8,16 \cdot 10^{-9}$  und bei 10 Sekunden Expositionszeit  $6,15 \cdot 10^{-5}$ , die Steigungen beider Geraden sind positiv. Daraus ergibt sich bei einem Signifikanzniveau von 5% eine positive Signifikanz, d.h. es kann angenommen werden, dass die Temperaturerhöhung auf die steigende Leistung zurückgeführt werden kann.

### 3.2.2 Continuous wave im Wiederholungspuls (WHP)

Um die Temperaturerhöhungen in der Wiederholungspulsbetriebsart vergleichen zu können, wurden die Einstellungen nach Relaxationszeiten sortiert zusammengefasst. Es sind also alle getesteten Pulse (0.2s, 0.4s, 0.6s, 0.8s und 1.0s) der jeweils gleichen Relaxationszeit zugeordnet. Zudem wird zwischen 5 und 10 Sekunden Expositionszeit unterschieden. Mit steigender Leistung, sowie bei längerer Pulsdauer, zeigen die Temperaturen sowohl bei 5 Sekunden, als auch bei 10 Sekunden Expositionszeit, im Wiederholungspuls einen stetigen Anstieg (S. 20 und 21, Tabellen 4a-d und 5a-d).

∅ **Temperaturerhöhungen bei 5 Sekunden Expositionszeit**  
(alle Werte in °K)

**Relaxationszeit 0.1 Sekunden**

Watt	Puls 0.2s	Puls 0.4s	Puls 0.6s	Puls 0.8s	Puls 1.0s
1	0,73	1,10	0,93	1,60	1,37
1,5	1,67	1,97	2,50	2,83	2,87
2	2,73	3,37	3,83	4,10	4,20
2,5	3,87	4,67	4,87	5,37	5,63
3	5,40	6,27	5,83	6,87	6,97
3,5	6,13	7,07	7,63	8,47	8,90
4	7,23	8,73	8,37	9,77	9,70
4,5	8,23	9,87	9,03	11,30	11,37
5	8,83	10,60	11,47		
5,5	10,40		13,07		
6	11,27	13,07		14,97	15,67
6,5					
7	13,13	15,53	16,83		
7,5					
8	14,10				

Tabelle 4a: Temperaturerhöhungen bei 5s Expositionszeit der Relaxationszeit 0.1 s und den Pulsen von 0.2 bis 1.0 s.

**Relaxationszeit 0.5 Sekunden**

Watt	Puls 0.2s	Puls 0.4s	Puls 0.6s	Puls 0.8s	Puls 1.0s
1	0,07	0,70	1,20	1,33	1,20
1,5	0,57	1,63	2,23	2,87	2,60
2	1,03	2,70	3,63	4,17	3,93
2,5	1,57	3,47	5,07	5,43	5,33
3	2,43	4,60	6,50	7,27	6,60
3,5	3,13	5,53	7,17	8,20	7,70
4	3,40	6,47	8,53	9,40	8,83
4,5	4,03	7,43	9,73	10,20	10,07
5	4,47	8,03	10,33	10,93	11,37
5,5	4,83	8,90			
6	5,43	10,30	12,63	14,30	13,67
6,5	5,87	11,03			
7	6,50				
7,5	6,67				
8	6,80	14,27			
8,5	8,50				
9	8,83				
9,5	10,10				
10	10,93				
11	11,67				
12					
13	13,87				

Tabelle 4b: Temperaturerhöhungen bei 5s Expositionszeit der Relaxationszeit 0.5s und den Pulsen 0.2 bis 1.0s.

**Relaxationszeit 0.7 Sekunden**

Watt	Puls 0.2s	Puls 0.4s	Puls 0.6s	Puls 0.8s	Puls 1.0s
1	-0,93	-0,33	-0,03	0,10	0,23
1,5	-0,60	0,37	0,73	0,70	1,10
2	-0,37	0,97	1,43	1,47	2,13
2,5	-0,30	1,63	1,97	2,33	2,87
3	0,57	2,13	2,73	2,97	3,53
3,5	1,00	2,53	3,43	3,97	4,30
4	1,17	3,17	4,00	4,80	5,13
4,5	1,57	3,80	4,77	5,03	6,00
5	2,03	4,70	5,30	6,23	6,83
5,5	2,27	5,53	6,17	6,67	7,53
6	2,57	5,70	6,77	7,30	8,43
6,5	3,03	6,43	7,83	7,73	9,37
7	3,47	7,17	8,33	8,70	10,30
7,5	3,90	7,73	9,13	9,73	10,97
8	4,30	7,70	9,80	10,60	12,27
8,5	4,80	8,20	10,37	11,37	
9	5,07	8,63	10,57	12,03	
9,5	5,47	8,97			
10	6,00	10,10	12,40		
11	6,47	10,83			
12	7,03	11,80			
13	7,80				
14	8,47				
15	9,00				
16	9,70				
17	10,30				
18	10,93				

Tabelle 4c: Temperaturerhöhungen bei 5s Expositionszeit der Relaxationszeit 0.7s und den Pulsen 0.2 bis 1.0s.

**Relaxationszeit 1.0 Sekunden**

Watt	Puls 0.2s	Puls 0.4s	Puls 0.6s	Puls 0.8s	Puls 1.0s
1	-0,73	-0,30	-0,67	-0,43	-0,53
1,5	-0,33	-0,50	1,17	1,90	0,97
2	0,13	1,13	1,97	2,93	1,90
2,5	0,53	1,87	2,83	3,70	2,73
3	0,73	2,47	3,50	4,80	3,53
3,5	1,13	3,43	4,27	6,03	4,27
4	1,47	3,87	4,73	6,67	5,20
4,5	1,53	4,23	5,37	7,47	5,90
5	2,13	4,50	6,03	8,23	7,20
5,5	2,47	5,03	6,80	9,20	8,83
6	2,90	5,73	7,77	10,20	9,10
6,5	3,20	6,43	8,47	11,10	9,97
7	3,77	7,17	9,07		11,37
7,5	4,07	7,93	9,90		
8	4,73	8,90	10,67		12,97
8,5	4,97	9,20	11,37		
9	5,47	9,73	11,87		
9,5	5,77	10,47			
10	6,43	11,40			
11	6,97	12,40			
12	7,63				
13	8,07				
14	8,60				
15	9,57				
16	9,90				
17	10,33				
18	11,57				

Tabelle 4d: Temperaturerhöhungen bei 5s Expositionszeit der Relaxationszeit 1.0s und den Pulsen 0.2 bis 1.0s.

∅ **Temperaturerhöhungen bei 10 Sekunden Expositionszeit**  
(alle Werte in °K)

**Relaxationszeit 0.1 Sekunden**

Watt	Puls 0.2s	Puls 0.4s	Puls 0.6s	Puls 0.8s	Puls 1.0s
1	0,73	1,43	1,17	1,33	1,67
1,5	2,07	3,03	3,03	3,17	3,67
2	3,37	4,67	4,53	5,17	5,30
2,5	4,53	5,90	6,10	7,20	7,83
3	6,20	7,57	7,80	8,53	9,30
3,5	7,47	9,23	9,20	10,03	11,13
4	8,80	10,97	10,83	11,90	12,30
4,5	9,87	12,17	12,10		
5	11,43				
5,5	13,03				

Tabelle 5a: Temperaturerhöhungen bei 10s Expositionszeit der Relaxationszeit 0.1s und den Pulsen 0.2 bis 1.0s.

**Relaxationszeit 0.5 Sekunden**

Watt	Puls 0.2s	Puls 0.4s	Puls 0.6s	Puls 0.8s	Puls 1.0s
1	-0,97	0,60	0,73	1,10	1,10
1,5	0,10	1,87	2,13	2,97	2,93
2	0,83	3,17	3,60	4,57	5,00
2,5	1,40	4,50	5,23	5,80	6,37
3	2,27	5,43	6,53	7,57	8,57
3,5	3,20	6,30	8,40	9,57	9,67
4	3,90	7,40	9,53	10,57	11,90
4,5	4,53	8,53	10,83	12,50	
5	5,40	10,77	12,37		
5,5	6,47	11,80			
6	6,87				
6,5	7,87				
7	8,53				
7,5	9,20				
8	10,37				
8,5	10,93				
9	11,47				

Tabelle 5b: Temperaturerhöhungen bei 10s Expositionszeit der Relaxationszeit 0.5s und den Pulsen 0.2 bis 1.0s.

**Relaxationszeit 0.7 Sekunden**

Watt	Puls 0.2s	Puls 0.4s	Puls 0.6s	Puls 0.8s	Puls 1.0s
1	-0,93	-1,00	0,13	0,27	0,60
1,5	-0,33	0,17	1,23	2,17	2,40
2	0,43	1,17	2,27	3,37	3,83
2,5	0,87	2,10	3,70	4,83	5,33
3	1,80	2,60	4,70	6,23	6,90
3,5	2,17	3,67	5,83	7,50	8,30
4	2,87	4,67	6,80	8,57	9,60
4,5	3,37	5,37	7,60	9,77	11,20
5	4,00	6,27	8,73	10,73	12,53
5,5	4,43	7,17	10,20	12,07	
6	5,20	8,20	11,10		
6,5	5,67	8,97	12,03		
7	6,30	10,00			
7,5	6,60	11,13			
8	7,27	12,90			
8,5	8,07				
9	8,80				
9,5	9,37				
10	9,63				
11	10,60				
12	11,97				

Tabelle 5c: Temperaturerhöhungen bei 10s Expositionszeit der Relaxationszeit 0.7s und den Pulsen 0.2 bis 1.0s.

**Relaxationszeit 1.0 Sekunden**

Watt	Puls 0.2s	Puls 0.4s	Puls 0.6s	Puls 0.8s	Puls 1.0s
1	-2,17	-0,90	-1,30	-0,17	-0,23
1,5	-1,30	0,20	0,37	0,83	1,00
2	0,17	0,47	1,20	1,67	1,97
2,5	0,17	1,33	1,87	2,27	2,87
3	0,60	1,57	2,27	3,27	3,63
3,5	1,37	2,23	3,00	4,03	4,13
4	1,67	2,80	3,63	4,83	5,13
4,5	1,90	3,03	4,03	5,73	6,07
5	2,33	4,20	4,70	6,47	7,00
5,5	2,90	4,27	5,47	7,30	7,97
6	3,20	4,97	6,40	8,47	9,07
6,5	3,53	5,73	7,00	9,03	10,27
7	3,90	5,97	7,70	10,17	11,10
7,5	4,33	6,70	8,47	10,87	12,30
8	4,87	7,53	9,07	11,90	
8,5	5,50	7,80	10,13		
9	6,00	8,60	10,37		
9,5	6,43	8,97			
10	7,07	9,90	11,87		
11	7,67	11,07			
12	8,50	10,90			
13	9,03				
14	9,57				
15	10,13				
16	10,97				
17	11,77				

Tabelle 5d: Temperaturerhöhungen bei 10s Expositionszeit der Relaxationszeit 1.0s und den Pulsen 0.2 bis 1.0s.

### 3.3 Lineare Regression der empirisch ermittelten Temperaturerhöhungen

Alle Temperaturerhöhungen einer Relaxationszeit/Puls-Kombination stellen in einem Koordinatensystem, mit der Leistung als unabhängige Variable, eine Punktwolke dar.

$$(x, y) = ((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n))$$

mit:

$x$  = Leistung

$y$  = durchschnittliche Temperaturerhöhung.

Mit Hilfe der linearen Regression [4 s. 70] wird versucht eine Gerade so durch die Punktwolke zu legen, dass die Summen der Abstandsquadrate minimal wird. Die jeweilige lineare Funktion wird dabei durch einen Regressionskoeffizienten (Steigung) und einen Achsenabschnitt charakterisiert. Dies erfolgt nach dem Prinzip „der Summe der vertikalen Abstandsquadrate“ von C. F. Gauß (1777-1855).

#### 3.3.1 Ermittlung der Regressionskoeffizienten (Steigung) $b_1$

Für alle getesteten Relaxationszeit/Puls-Kombinationen mit 5 bzw 10 Sekunden Expositionszeit werden nachfolgend die Regressionskoeffizienten  $b_1$  der Regressionsgeraden berechnet [29 s. 497].

Der Regressionskoeffizient  $b_1$  berechnet sich nach:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{s_{xy}}{s_x^2}$$

mit:

$x_i$  = Leistung

$y_i$  = Temperaturerhöhung (Mittelwert aus drei Messungen, vgl. S. 18)

$\bar{x}$  = arithmetischer Mittelwert der Leistung

$\bar{y}$  = arithmetischer Mittelwert aller ermittelten Temperaturerhöhungen einer Relaxationszeit/Puls-Kombination

$s_{xy}$  = Kovarianz

$s_x^2$  = Varianz

Mit zunehmender Pulsdauer steigen die Werte für den Regressionskoeffizienten  $b_1$ , d.h. je länger die Pulsdauer, desto steiler die Gerade (Tabelle 6 und 7).

### Regressionskoeffizienten $b_1$ bei 5 Sekunden Expositionszeit

	Puls 0,2	Puls 0,4	Puls 0,6	Puls 0,8	Puls 1,0
Relaxationszeit 0.1	2,12	2,49	2,55	2,79	2,85
Relaxationszeit 0.5	1,14	1,87	2,36	2,45	2,51
Relaxationszeit 0.7	0,72	1,11	1,38	1,48	1,67
Relaxationszeit 1.0	0,72	1,27	1,48	1,94	1,90

Tabelle 6: Regressionskoeffizienten  $b_1$  bei 5 Sekunden Expositionszeit

### Regressionskoeffizienten $b_1$ bei 10 Sekunden Expositionszeit

	Puls 0,2	Puls 0,4	Puls 0,6	Puls 0,8	Puls 1,0
Relaxationszeit 0.1	2,70	3,10	3,12	3,49	3,63
Relaxationszeit 0.5	1,56	2,42	2,92	3,20	3,53
Relaxationszeit 0.7	1,16	1,86	2,17	2,55	2,95
Relaxationszeit 1.0	0,83	1,10	1,39	1,69	1,84

Tabelle 7: Regressionskoeffizienten  $b_1$  bei 10 Sekunden Expositionszeit

### 3.3.2 Ermittlung der Achsenabschnitte

Nachstehend werden für die getesteten Relaxationszeit/Puls-Kombinationen die Achsenabschnitte der Regressionsgeraden berechnet.

Der Achsenabschnitt  $a_1$  kann durch die Formel

$$a_1 = \bar{y} - b_1 \cdot \bar{x}$$

bestimmt werden.

mit:

$b_1$  = Regressionskoeffizient

$\bar{x}$  = arithmetischer Mittelwert der Leistungen

$\bar{y}$  = arithmetischer Mittelwert aller ermittelten Temperaturerhöhungen einer Relaxationszeit/Puls-Kombination

Die errechneten Achsenabschnitte  $a_1$  zeigen die Tendenz, innerhalb einer der vier Relaxationszeiten, um einen Mittelwert zu schwanken (Tabellen 8 und 9).

#### Achsenabschnitte $a_1$ bei 5 Sekunden Expositionszeit

	Puls 0,2	Puls 0,4	Puls 0,6	Puls 0,8	Puls 1,0
Relaxationszeit 0.1	-1,37	-1,52	-1,53	-1,38	-1,46
Relaxationszeit 0.5	-1,23	-1,11	-1,05	-0,72	-1,12
Relaxationszeit 0.7	-1,60	-1,11	-1,39	-1,44	-1,43
Relaxationszeit 1.0	-1,33	-1,60	-1,21	-1,27	-2,16

Tabelle 8: Achsenabschnitte  $a_1$  bei 5 Sekunden Expositionszeit

#### Achsenabschnitte $a_1$ bei 10 Sekunden Expositionszeit

	Puls 0,2	Puls 0,4	Puls 0,6	Puls 0,8	Puls 1,0
Relaxationszeit 0.1	-2,03	-1,65	-1,75	-1,95	-1,76
Relaxationszeit 0.5	-2,37	-1,82	-2,17	-1,98	-2,32
Relaxationszeit 0.7	-1,91	-2,80	-1,94	-1,75	-2,12
Relaxationszeit 1.0	-1,86	-1,52	-1,96	-1,78	-1,91

Tabelle 9: Achsenabschnitte  $a_1$  bei 10 Sekunden Expositionszeit

Die negativen Werte für die Achsenabschnitte kommen durch die Luftkühlung am CO<sub>2</sub>-Laser zustande. Diese Luftkühlung ist installiert, um eine Beschädigung der fokussierenden Linse durch Spritzwasser oder Schmauch zu vermeiden. Jedoch gerade bei geringen Leistungen überwiegt der Kühleffekt die Erwärmung durch die Laserbestrahlung, so dass keine Temperaturerhöhung, sondern eine Abkühlung zu verzeichnen war. Diese Temperaturabkühlungen sind im Anhang (Kapitel 7.1, Seite 69) dargestellt.

### 3.3.3 Regressionsgerade

Durch die oben gewonnenen Werte für die Regressionskoeffizienten  $b_1$  und die Achsenabschnitte  $a_1$  kann mit der Funktion

$$f_1(x) = a_1 + b_1 \cdot x$$

mit:

$f_1(x)$  = errechnete Temperaturerhöhung

$a_1$  = Achsenabschnitt

$b_1$  = Regressionskoeffizient

$x$  = Leistung

der Punktwolke (bestehend aus Wattstärke und Temperaturerhöhung) eine Gerade angepasst werden. Die Temperaturerhöhungen können somit durch eine Gerade näherungsweise dargestellt werden.

In den folgenden Abbildungen sind die Geraden, entsprechend den Tabellen 4a-d und 5a-d (S. 20 und 21), nach Relaxationszeiten sortiert zusammengefasst.

Dabei lässt sich aus den Abb. 8a-d und 9a-d folgendes erkennen:

- ♦ Mit steigender Leistung steigt die Temperatur proportional an.
- ♦ Mit längerer Pulsdauer werden die Geraden zunehmend steiler.
- ♦ Bei gleicher Leistung aber längerer Pulsdauer sind die Temperaturerhöhungen stärker.

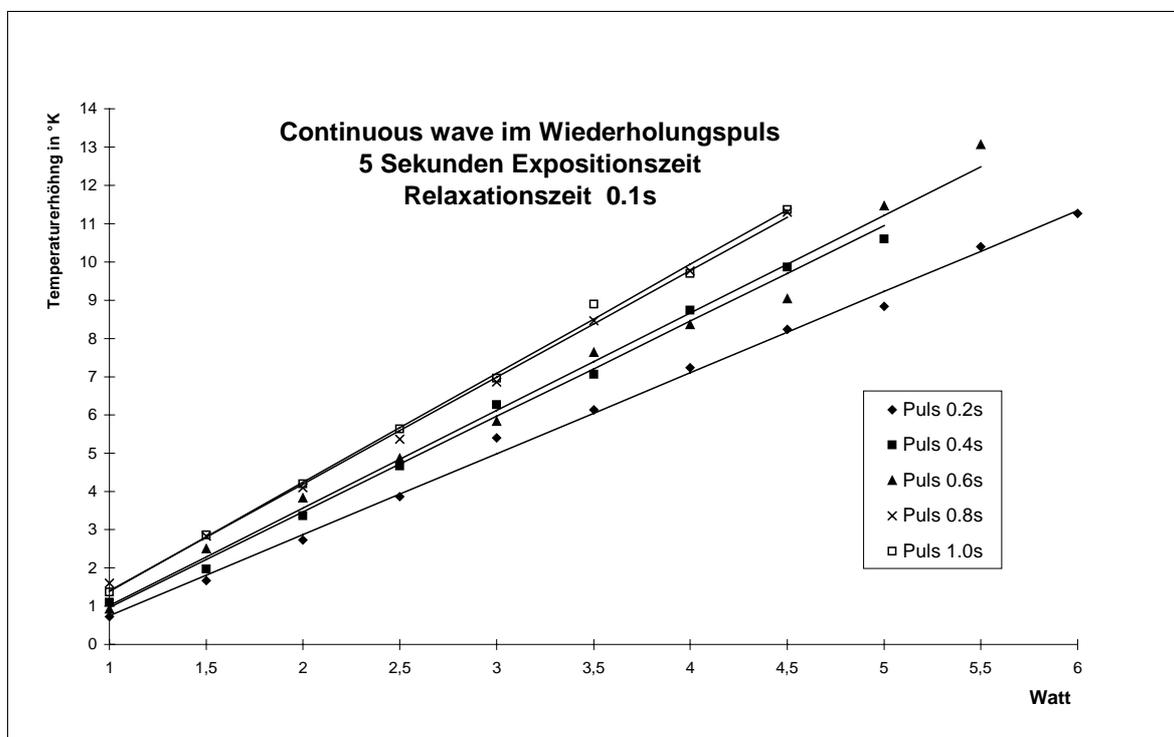


Abb. 8a: Continuous wave im WHP, 5 Sekunden Expositionszeit, Relaxationszeit 0.1s

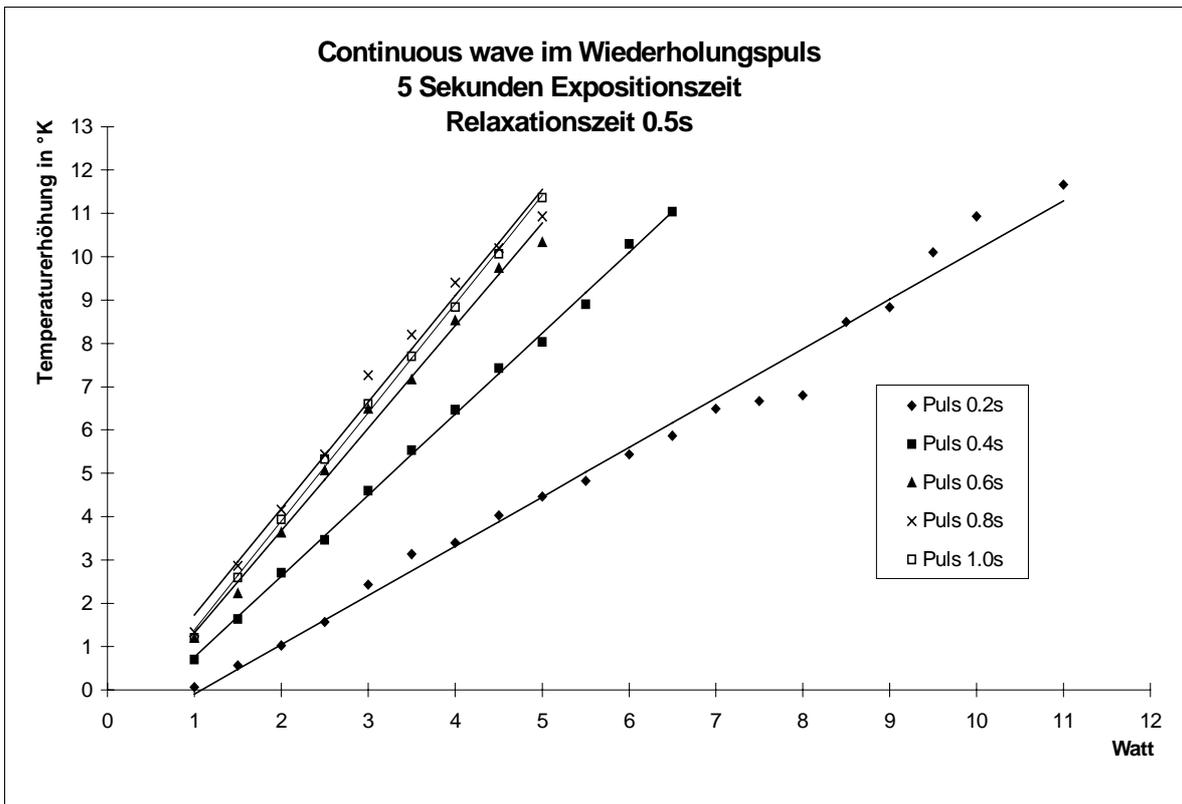


Abb. 8b: Continuous wave im WHP, 5 Sekunden Expositionszeit, Relaxationszeit 0.5s

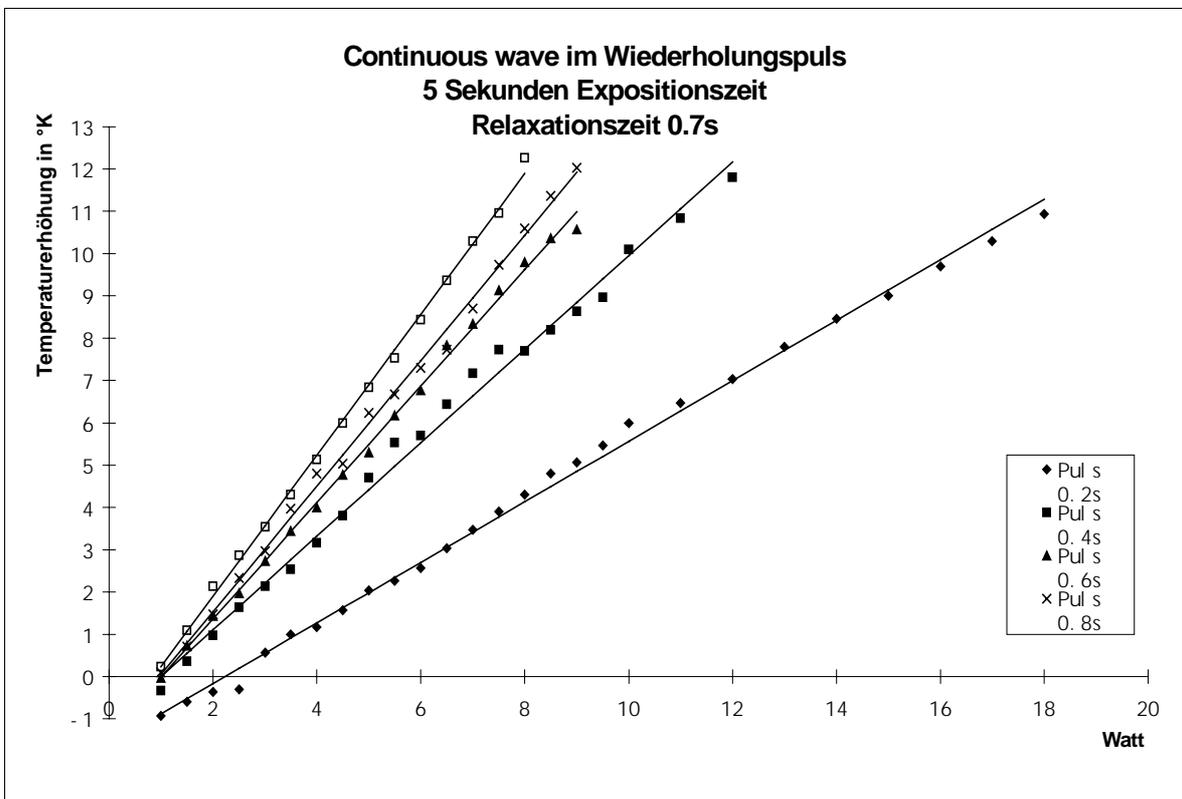


Abb. 8c: Continuous wave im WHP, 5 Sekunden Expositionszeit, Relaxationszeit 0.7s

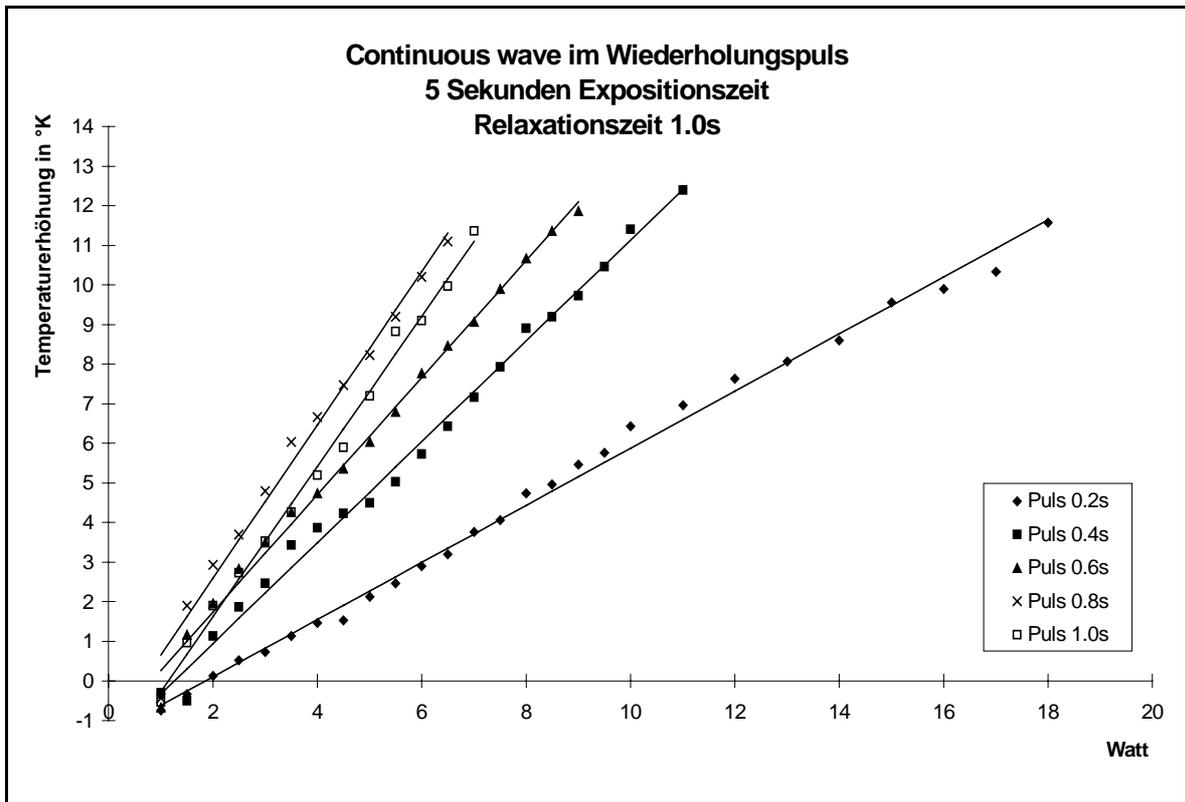


Abb. 8d: Continuous wave im WHP, 5 Sekunden Expositionszeit, Relaxationszeit 1.0s

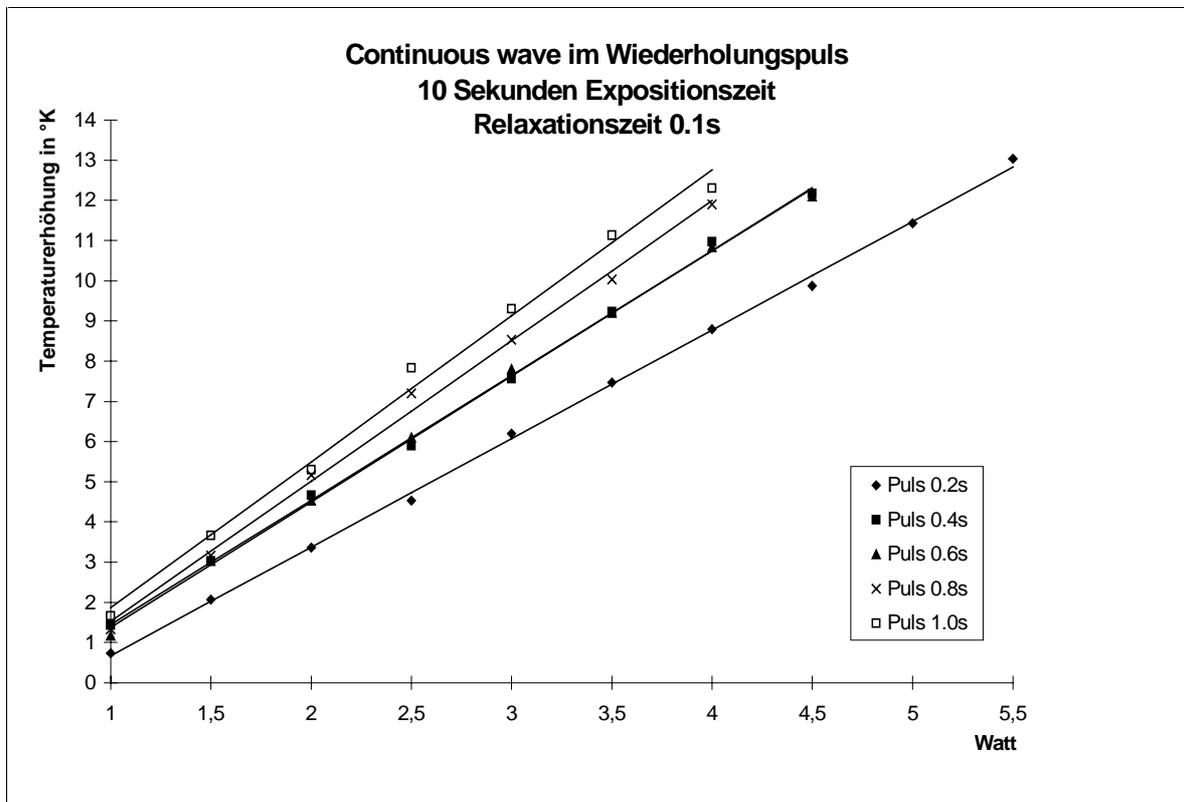


Abb. 9a: Continuous wave im WHP, 10 Sekunden Expositionszeit, Relaxationszeit 0.1s

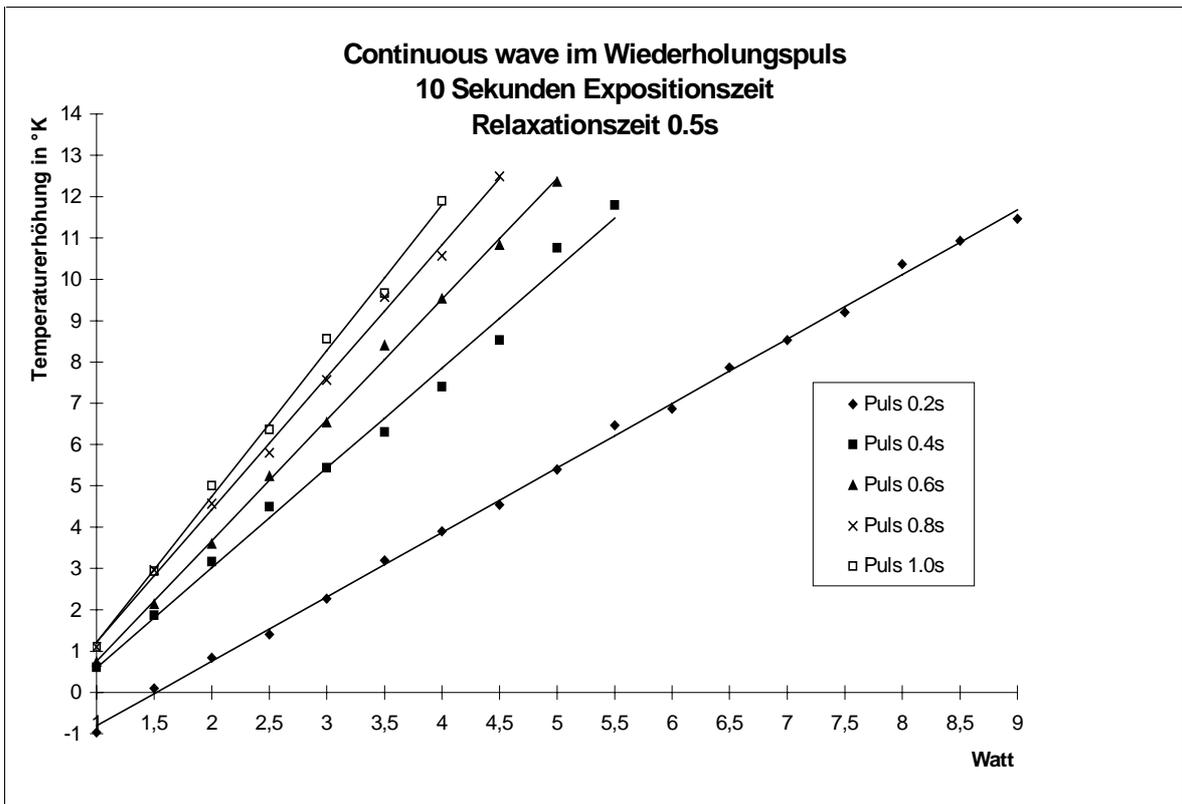


Abb. 9b: Continuous wave im WHP, 10 Sekunden Expositionszeit, Relaxationszeit 0.5s

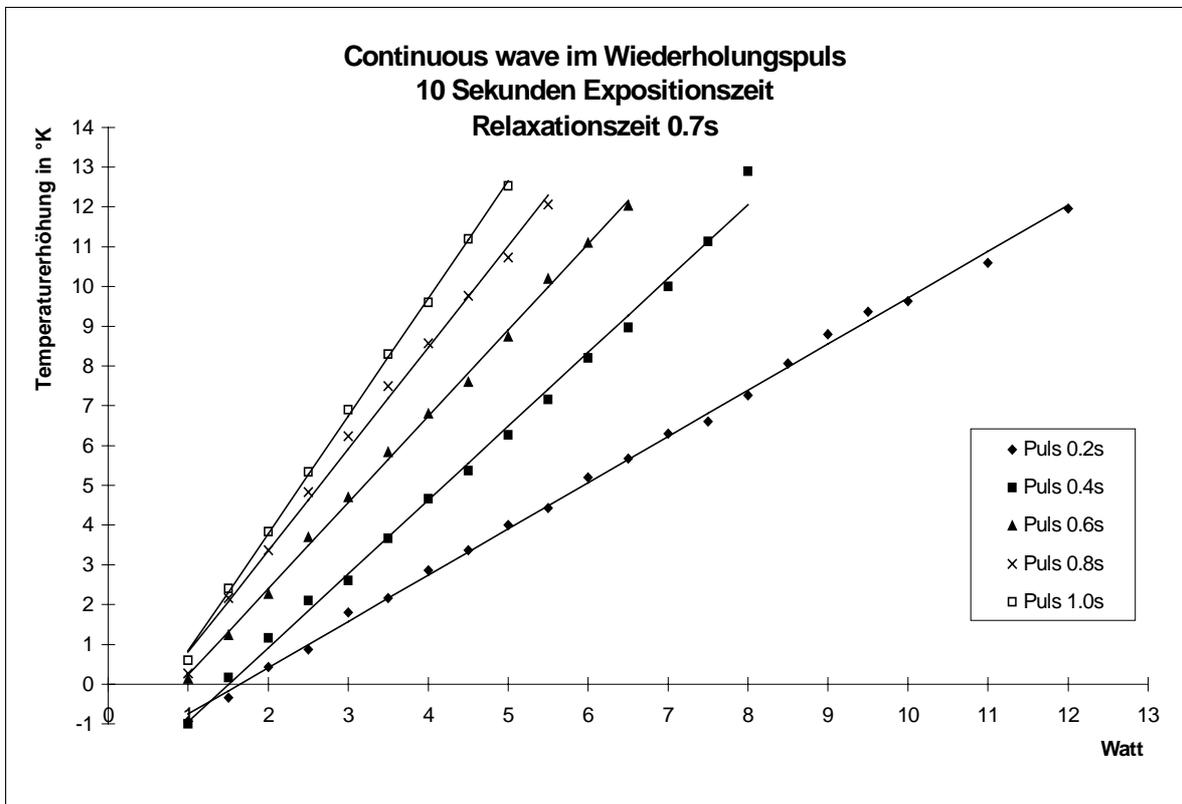


Abb. 9c: Continuous wave im WHP, 10 Sekunden Expositionszeit, Relaxationszeit 0.7s

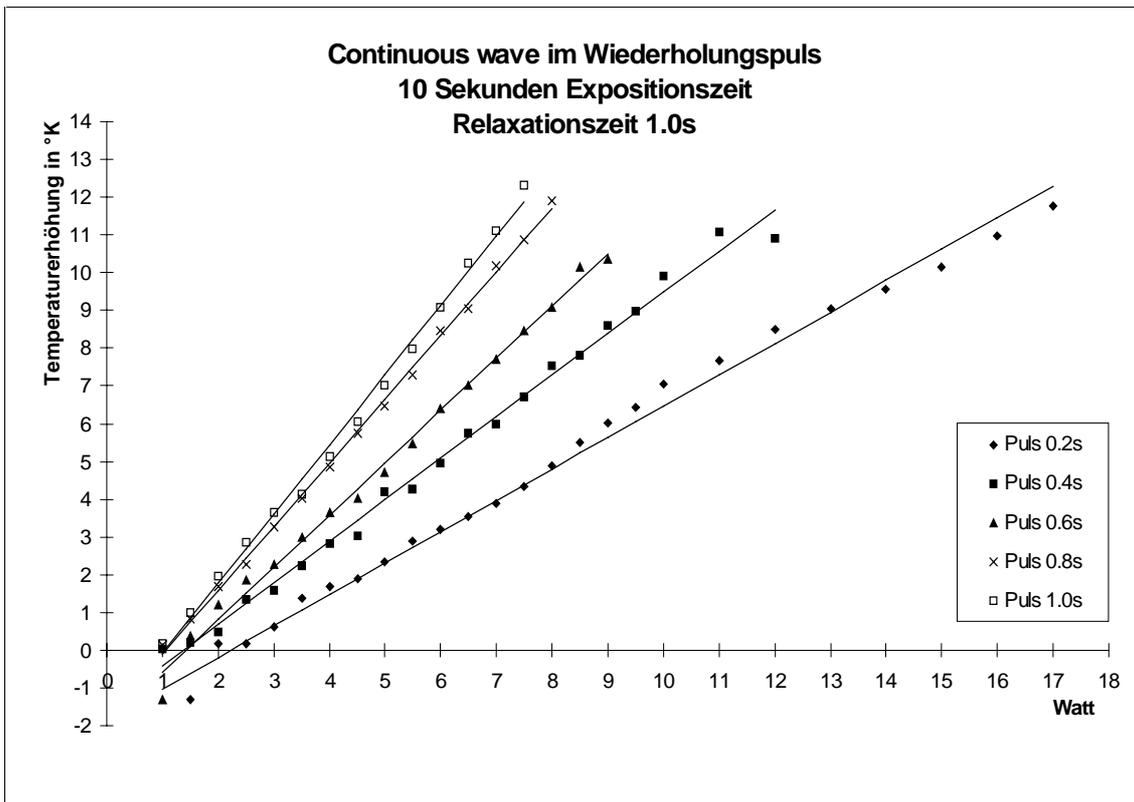


Abb. 9d: Continuous wave im WHP, 10 Sekunden Expositionszeit, Relaxationszeit 1.0s

Die P-Werte der Regressionsgeraden (Abb. 8a-d und 9a-d) sind kleiner als  $1,27 \cdot 10^{-6}$  (vgl. hierzu Tabelle 42a-d und 43a-d, S. 84f), die Steigungen aller Geraden sind positiv (vgl. hierzu Tabelle 6 und 7, S. 23). Daraus ergibt sich, bei einem Signifikanzniveau von 5%, eine positive Signifikanz, d.h. die Leistung (Watt) hat einen signifikant positiven Einfluss auf die Temperaturerhöhung.

#### 4. Prognose der Temperaturerhöhung

Am CO<sub>2</sub>-Laser sind weit mehr Einstellungen als die getesteten Relaxationszeit/Puls – Kombinationen möglich.

Nachfolgend wird eine Methode dargestellt, welche auf den empirisch gewonnenen Werten basiert (Kapitel 3) und mit deren Hilfe es nun möglich ist, auch für andere, nicht getestete Einstellungen am CO<sub>2</sub>-Laser die zu erwartende Temperaturerhöhung zu prognostizieren.

In Kapitel 4.1 werden die Prognoseparameter berechnet, die man benötigt, um einen beliebigen Puls wählen zu können. In einem zweiten Schritt (Kapitel 4.2) folgen die Berechnungen, die zum freien Wählen der Relaxationszeit benötigt werden.

## 4.1 Ermittlung der Prognoseparameter für alle Pulse einer getesteten Relaxationszeit

Bislang liegen nur für die getesteten Relaxationszeiten mit den Pulsen 0.2s, 0.4s, 0.6s, 0.8s und 1.0s die Regressionskoeffizienten  $b_1$  und Achsenabschnitte  $a_1$  vor. Im Folgenden wird dargestellt, wie man die Regressionskoeffizienten und Achsenabschnitte von anderen, dazwischenliegenden Pulsen berechnen kann.

### 4.1.1 Lineare Regression der Regressionskoeffizienten $b_1$

In den Tabellen 6 und 7 (Seite 23) wurden die Werte der Regressionskoeffizienten  $b_1$  für jede getestete Relaxationszeit/Puls-Kombination zusammengefasst.

Alle Regressionskoeffizienten  $b_1$  einer Relaxationszeit stellen in einem Koordinatensystem, mit dem Puls als unabhängige Variable, eine Punktwolke dar.

$$(x, y) = ((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n))$$

mit

$x$  = Puls

$y$  = Regressionskoeffizient  $b_1$

Die nachstehenden Abb. 10 und 11 zeigen einen linearen Zusammenhang (gestrichelte Trendlinie) zwischen den einzelnen Regressionskoeffizienten  $b_1$  einer Relaxationszeit. Auf der x-Achse sind die Pulse, und auf der y-Achse die Regressionskoeffizienten  $b_1$  einer Relaxationszeit eingetragen. Die einzelnen gleichgestalteten Punkte bzw. die gestrichelten Geraden beziehen sich auf jeweils eine Relaxationszeit.

Mit längerem Puls steigen die Werte für die Regressionskoeffizienten  $b_1$  an, d.h. je länger die Pulsdauer bei gleicher Relaxationszeit war, desto steiler wird die Gerade, also desto höher waren die gemessenen Temperaturerhöhungen.

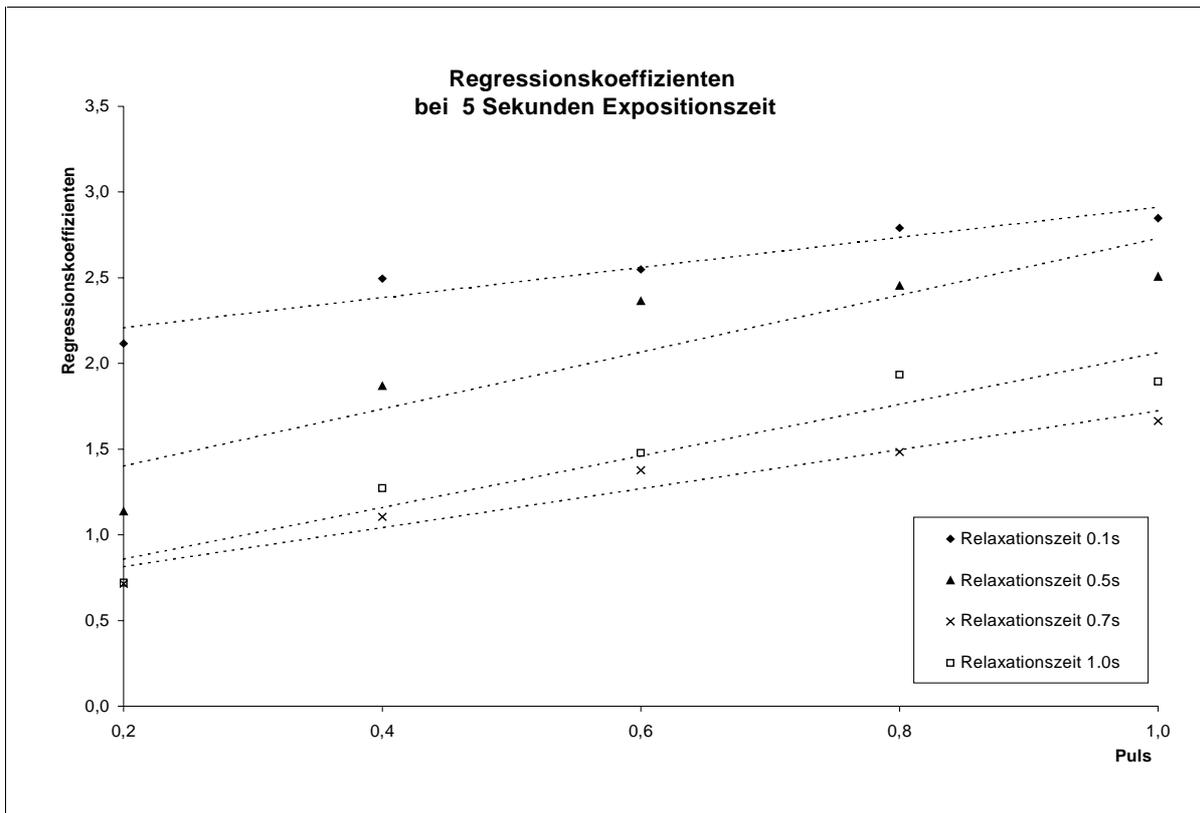


Abb. 10: Regressionskoeffizienten  $b_1$  bei 5 Sekunden Expositionszeit

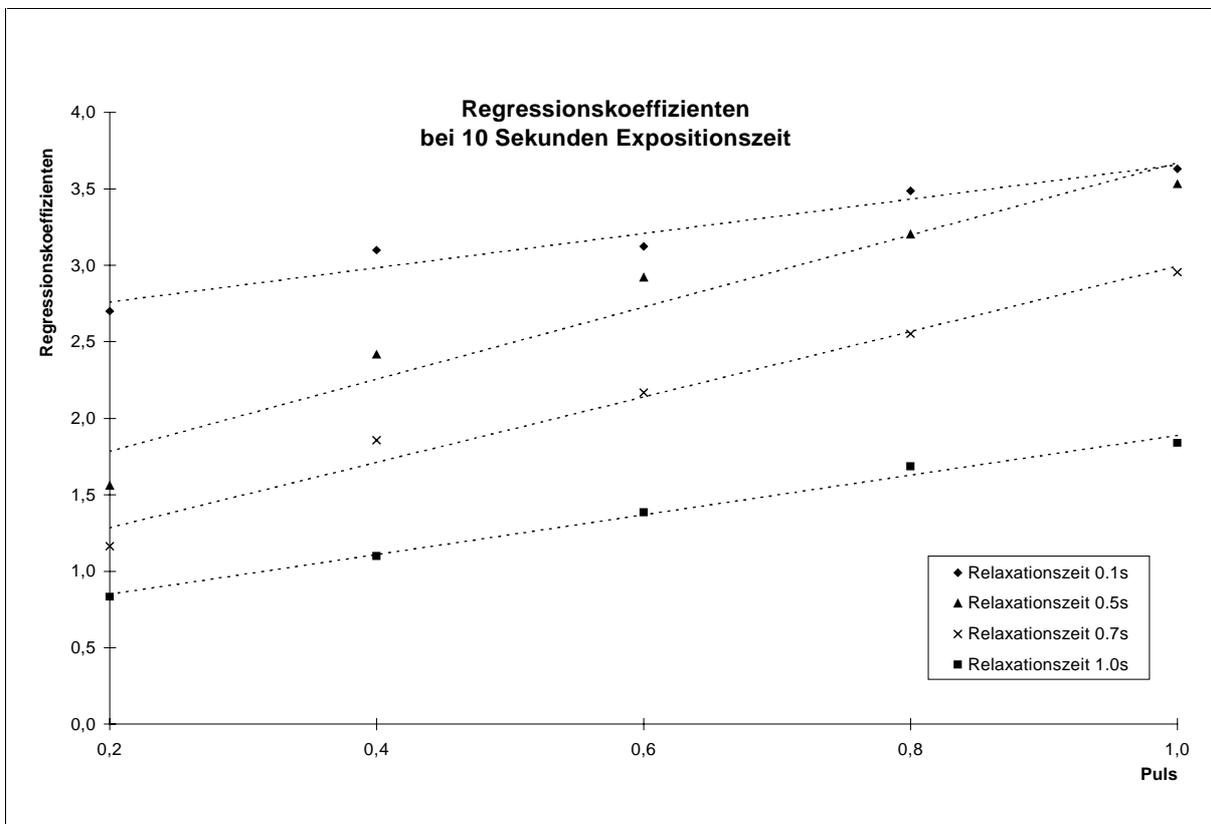


Abb. 11: Regressionskoeffizienten  $b_1$  bei 10 Sekunden Expositionszeit

Analog der bereits im Abschnitt 3.3 verwendeten Formeln kann hier ebenfalls mit Hilfe der Geradengleichung

$$f_2(x) = a_2 + b_2 \cdot x$$

mit:

$a_2$  = Achsenabschnitt

$b_2$  = Steigungsparameter

$x$  = Puls

jeweils eine Regressionsgerade (Abb.10 und 11, gestrichelte Linien) der Punktwolke aus Puls und Regressionskoeffizient  $b_1$  aus Tabelle 6 und Tabelle 7 angepasst werden. Hierfür sind der Steigungsparameter  $b_2$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{s_{xy}}{s_x^2}$$

mit:

$x_i$  = Puls

$y_i$  = Regressionskoeffizienten  $b_1$

$\bar{x}$  = arithmetischer Mittelwert der Pulse

$\bar{y}$  = arithmetischer Mittelwert der Regressionskoeffizienten  $b_1$

$s_{xy}$  = Kovarianz

$s_x^2$  = Varianz

und der Achsenabschnitt  $a_2$

$$a_2 = \bar{y} - b_2 \cdot \bar{x}$$

mit:

$b_2$  = Regressionskoeffizient

$\bar{x}$  = arithmetischer Mittelwert der Pulse

$\bar{y}$  = arithmetischer Mittelwert der Regressionskoeffizienten  $b_1$

notwendig.

Die nachfolgenden Tabellen 11 und 12 geben jeweils den Steigungsparameter  $b_2$  und den Achsenabschnitt  $a_2$  zu einer Relaxationszeit an. Aus diesen Parametern wird die Regressionsgerade  $f_2(x)$  (vgl. Abb. 10 und 11, gestrichelte Linien) definiert.

### Parameter bei 5 Sekunden Expositionszeit

	Regressionskoeffizient $b_2$	Achsenabschnitt $a_2$
Relaxationszeit 0.1s	2,033	0,878
Relaxationszeit 0.5s	1,069	1,662
Relaxationszeit 0.7s	0,587	1,138
Relaxationszeit 1.0s	0,557	1,505

Tabelle 11: Regressionskoeffizient  $b_2$  und Achsenabschnitt  $a_2$  bei 5s Expositionszeit

### Parameter bei 10 Sekunden Expositionszeit

	Regressionskoeffizient $b_2$	Achsenabschnitt $a_2$
Relaxationszeit 0.1s	1,123	2,534
Relaxationszeit 0.5s	2,363	1,310
Relaxationszeit 0.7s	2,139	0,856
Relaxationszeit 1.0s	1,299	0,589

Tabelle 12: Regressionskoeffizient  $b_2$  und Achsenabschnitt  $a_2$  bei 10s Expositionszeit

Die P-Werte der Regressionsgeraden (Abb. 10 und 11, S. 31) sind kleiner als  $3,2 \cdot 10^{-2}$  (vgl. hierzu Tabelle 44a und 44b, S. 85), die Steigungen aller Geraden sind positiv (vgl. hierzu Tabelle 11 und 12). Bei einem Signifikanzniveau von 5% ergibt sich somit eine positive Signifikanz, d.h. der Puls hat einen signifikant positiven Einfluss auf die Regressionskoeffizienten.

Mit Hilfe der Parameter (Tabelle 11 und 12) ist es nun möglich, innerhalb der getesteten Relaxationszeiten 0.1s, 0.5s, 0.7s und 1.0s, die Regressionskoeffizienten  $b_1$  für nicht empirisch getestete Pulse, z.B. Puls 0.3s einer getesteten Relaxationszeit, zu errechnen.

Die nachfolgenden Tabellen 13 und 14 zeigen die mit Hilfe von  $f_2(x)$  berechneten Regressionskoeffizienten  $b_1$ . Zusätzlich zu den Regressionskoeffizienten von getesteten Pulsen ist nun auch die Angabe der Regressionskoeffizienten von neuen, nicht getesteten Pulsen möglich. Die Pulse in den Tabellen 13 und 14 sind frei gewählt und exemplarisch für alle am CO<sub>2</sub>-Laser möglichen Pulse.

**Regressionskoeffizienten  $b_1$  bei 5 Sekunden Expositionszeit**

<b>Puls</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>
<b>Relaxationszeit 0.1s</b>	2,121	2,209	2,296	2,384	2,472	2,560	2,647	2,735	2,823	2,911
<b>Relaxationszeit 0.5s</b>	1,236	1,402	1,568	1,734	1,901	2,067	2,233	2,399	2,566	2,732
<b>Relaxationszeit 0.7s</b>	0,700	0,814	0,928	1,042	1,156	1,270	1,384	1,497	1,611	1,725
<b>Relaxationszeit 1.0s</b>	0,708	0,858	1,009	1,160	1,310	1,461	1,611	1,762	1,912	2,063

Tabelle 13: Regressionskoeffizienten  $b_1$  der Kombinationen aus Relaxationszeit 0.1 bis 1.0s und Puls 0.1 bis 1.0 (bei 5 Sekunden Expositionszeit)

**Regressionskoeffizienten  $b_1$  bei 10 Sekunden Expositionszeit**

<b>Puls</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>
<b>Relaxationszeit 0.1s</b>	2,647	2,759	2,871	2,984	3,096	3,208	3,321	3,433	3,545	3,658
<b>Relaxationszeit 0.5s</b>	1,546	1,782	2,018	2,255	2,491	2,727	2,964	3,200	3,436	3,672
<b>Relaxationszeit 0.7s</b>	1,070	1,284	1,498	1,712	1,926	2,139	2,353	2,567	2,781	2,995
<b>Relaxationszeit 1.0s</b>	0,719	0,848	0,978	1,108	1,238	1,368	1,498	1,628	1,758	1,887

Tabelle 14: Regressionskoeffizienten  $b_1$  der Kombinationen aus Relaxationszeit 0.1 bis 1.0s und Puls 0.1 bis 1.0 (bei 10 Sekunden Expositionszeit)

Durch die Anpassung einer Geraden an die Punktwolke (Regressionskoeffizient  $b_1$  und Puls) jeweils einer Relaxationszeit, ergeben sich auch für die im Abschnitt 3.3 errechneten Regressionskoeffizienten  $b_1$  neue Werte, da sie nun alle auf der errechneten Geraden  $f_2(x)$  liegen. Diese Regressionskoeffizienten  $b_1$  liegen mit einer maximalen Abweichung von +/-0,297 bei den Werten für 5 Sekunden Expositionszeit und +/- 0,221 bei den Werten für 10 Sekunden Expositionszeit um die Originalwerte.

#### 4.1.2 Lineare Regression der Achsenabschnitte $a_1$

Bislang stehen nur die Achsenabschnitte  $a_1$  der getesteten Relaxationszeit/Puls-Kombinationen zur Verfügung. Möchte man nun jedoch für dazwischen liegende Kombinationen ebenfalls eine Temperaturerhöhung prognostizieren, z.B. für Puls 0.3s einer getesteten Relaxationszeit, benötigt man nicht nur den in 4.1.1 berechneten Regressionskoeffizienten  $b_1$ , sondern auch den entsprechenden Achsenabschnitt  $a_1$  dieser neuen Geraden.

In den Tabellen 8 und 9 (Seite 24) wurden die Werte der Achsenabschnitte  $a_1$  jeder getesteten Relaxationszeit/Puls-Kombination dargestellt. Die Werte waren alle negativ und scheinen auf einer annähernd waagrechten Geraden zu liegen.

Ebenso wie die Regressionskoeffizienten  $b_1$  stellen die Achsenabschnitte  $a_1$  in einem Koordinatensystem, mit dem Puls als unabhängige Variable, eine Punktwolke dar.

$$(x, y) = ((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n))$$

mit

$x$  = Puls

$y$  = Achsenabschnitt  $a_1$

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen den nahezu waagrechten, linearen Zusammenhang (gestrichelte Trendlinie) zwischen den einzelnen Achsenabschnitten  $a_1$  einer Relaxationszeit. Auf der x-Achse sind die Pulse, und auf der y-Achse die Achsenabschnitte  $a_1$  einer Relaxationszeit aufgetragen.

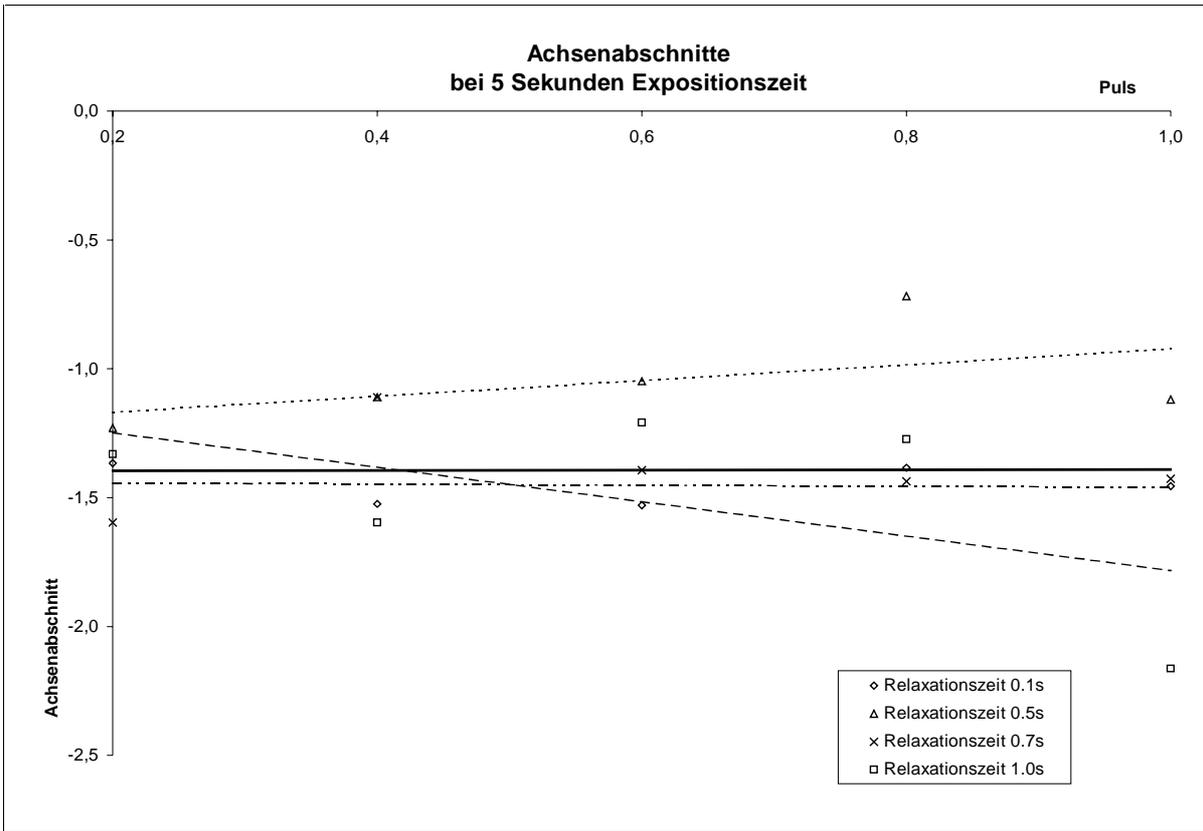


Abb. 12: Achsenabschnitte  $a_1$  bei 5 Sekunden Expositionszeit

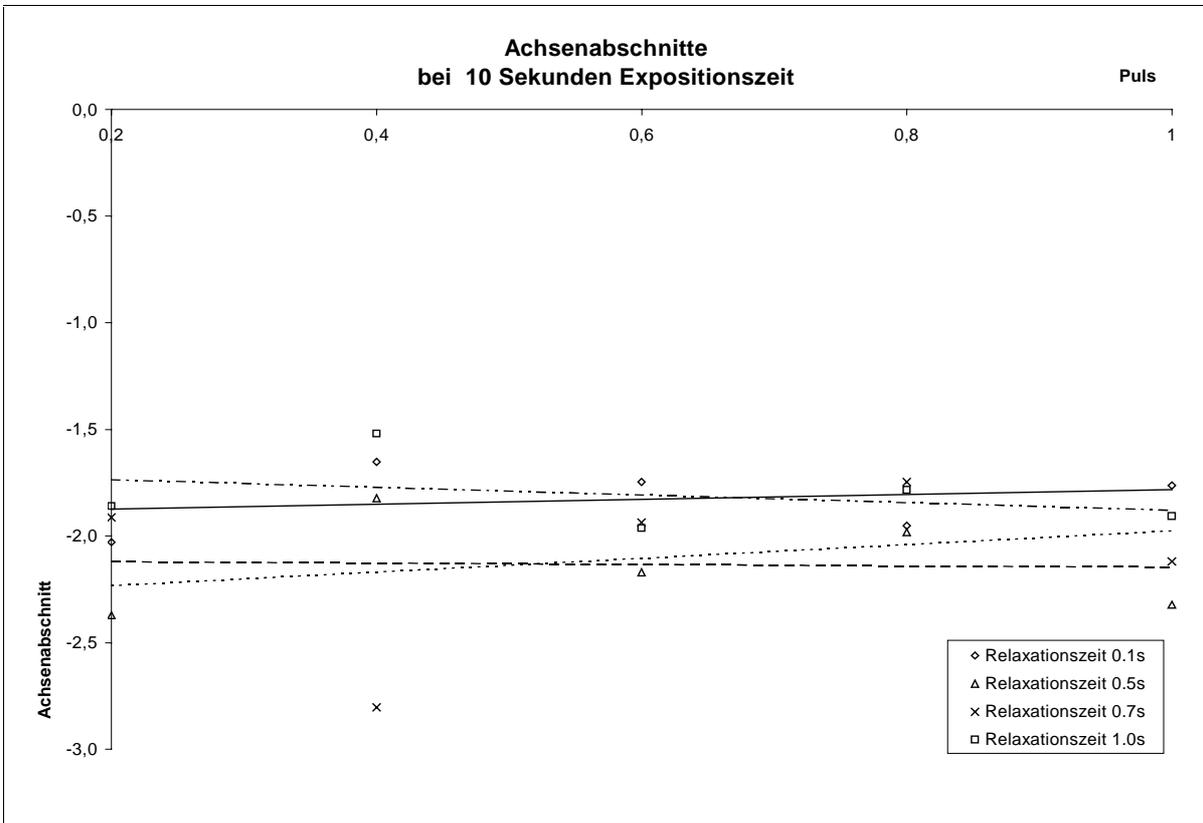


Abb. 13: Achsenabschnitte  $a_1$  bei 10 Sekunden Expositionszeit

Mit dem gleichen Verfahren (lineare Regression) mit dem unter 4.1.1 die Regressionskoeffizienten  $b_1$  interpoliert wurden, können hier auch die Achsenabschnitte  $a_1$  interpoliert werden. Für die Funktion

$$f_3(x) = a_3 + b_3 \cdot x$$

mit:

$a_3$  = Achsenabschnitt  $a_1$

$b_3$  = Steigungsparameter

$x$  = Puls

werden wie unter 4.1.1 der entsprechende Regressionskoeffizient  $b_3$  und Achsenabschnitt  $a_3$  errechnet. Im Unterschied zu 4.1.1 werden hier jedoch statt der Regressionskoeffizienten  $b_1$  die Achsenabschnitte  $a_1$  verwendet.

Die nachfolgenden Tabellen 15 und 16 geben die Parameter für die Funktion  $f_3(x)$  an.

#### Parameter bei 5 Sekunden Expositionszeit

	Steigungsparameter $b_3$	Achsenabschnitt $a_3$
Relaxationszeit 0.1s	-1,440	-0,020
Relaxationszeit 0.5s	-1,230	0,307
Relaxationszeit 0.7s	-1,397	0,007
Relaxationszeit 1.0s	-1,114	-0,669

Tabelle 15: Steigungsparameter  $b_3$  und Achsenabschnitt  $a_3$  der Relaxationszeiten 0.1 bis 1.0s bei 5 Sekunden Expositionszeit

#### Parameter bei 10 Sekunden Expositionszeit

	Steigungsparameter $b_3$	Achsenabschnitt $a_3$
Relaxationszeit 0.1s	0,115	-1,898
Relaxationszeit 0.5s	-0,031	-2,115
Relaxationszeit 0.7s	0,322	-2,297
Relaxationszeit 1.0s	-0,179	-1,700

Tabelle 16: Steigungsparameter  $b_3$  und Achsenabschnitt  $a_3$  der Relaxationszeiten 0.1 bis 1.0s bei 10 Sekunden Expositionszeit

Die P-Werte der Regressionsgeraden (Abb. 12 und 13, S. 36) liegen zwischen 0,984 und 0,347 (vgl. hierzu Tabelle 45a+b, S. 86). Daraus ergibt sich bei einem Signifikanzniveau von 5% keine Signifikanz, d.h. der Puls hat keinen signifikanten Einfluss auf den Achsenabschnitt.

Mit Hilfe der Parameter (Tabelle 15 und 16, S. 37) ist es nun möglich, innerhalb der getesteten Relaxationszeiten 0.1s, 0.5s, 0.7s und 1.0s, die Achsenabschnitte  $a_1$  für nicht empirisch getestete Pulse, z.B. Puls 0.3s einer getesteten Relaxationszeit, zu errechnen.

In den folgenden zwei Tabellen sind nun diese neu errechneten Achsenabschnitte  $a_1$  für exemplarisch ausgewählte Pulse wiedergegeben.

#### Achsenabschnitte $a_1$ bei 5 Sekunden Expositionszeit

Puls	0.1s	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s	0.6s	0.7s	0.8s	0.9s	1.0s
<b>Relaxationszeit 0.1s</b>	-1,442	-1,444	-1,446	-1,448	-1,450	-1,452	-1,454	-1,456	-1,458	-1,460
<b>Relaxationszeit 0.5s</b>	-1,199	-1,168	-1,138	-1,107	-1,076	-1,046	-1,015	-0,984	-0,954	-0,923
<b>Relaxationszeit 0.7s</b>	-1,397	-1,396	-1,395	-1,395	-1,394	-1,393	-1,393	-1,392	-1,391	-1,390
<b>Relaxationszeit 1.0s</b>	-1,181	-1,248	-1,314	-1,381	-1,448	-1,515	-1,582	-1,649	-1,716	-1,783

Tabelle 17: Achsenabschnitte  $a_1$  der Kombinationen aus Relaxationszeit 0.1 bis 1.0 und den Pulsen 0.1 bis 1.0s bei 5 Sekunden Expositionszeit

#### Achsenabschnitte $a_1$ bei 10 Sekunden Expositionszeit

Puls	0.1s	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s	0.6s	0.7s	0.8s	0.9s	1.0s
<b>Relaxationszeit 0.1s</b>	-1,886	-1,875	-1,863	-1,852	-1,840	-1,829	-1,817	-1,806	-1,794	-1,783
<b>Relaxationszeit 0.5s</b>	-2,118	-2,121	-2,124	-2,128	-2,131	-2,134	-2,137	-2,140	-2,143	-2,146
<b>Relaxationszeit 0.7s</b>	-2,265	-2,233	-2,201	-2,168	-2,136	-2,104	-2,072	-2,040	-2,007	-1,975
<b>Relaxationszeit 1.0s</b>	-1,718	-1,736	-1,753	-1,771	-1,789	-1,807	-1,825	-1,843	-1,861	-1,879

Tabelle 18: Achsenabschnitte  $a_1$  der Kombinationen aus Relaxationszeit 0.1 bis 1.0 und den Pulsen 0.1 bis 1.0s bei 10 Sekunden Expositionszeit

Durch die Anpassung einer Geraden an die Punktwolke (Achsenabschnitte  $a_1$  und Puls) ergeben sich neue Werte für die ursprünglich vorhandenen Pulse 0.2s, 0.4s, 0.6s, 0.8s und 1.0s. Die maximale Abweichung von den Originalwerten liegt für die Werte bei 5 Sekunden bei +/- 0,380, und für die Werte bei 10 Sekunden Expositionszeit bei +/-0,636.

Für die getesteten Relaxationszeiten ist nun die Angabe der Achsenabschnitte  $a_1$  von getesteten und von neuen, nicht getesteten Pulsen möglich.

### Ergebnis:

Durch die Berechnungen in den vorangegangenen Abschnitten (4.1.1 Bestimmung der Regressionskoeffizienten  $b_1$  und 4.1.2 Bestimmung der Achsenabschnitte  $a_1$ .) ist es nun möglich für **jeden** Puls einer getesteten Relaxationszeit die entsprechende Regressionsgerade zu erstellen.

## 4.2 Ermittlung der Prognoseparameter für alle Relaxationszeiten eines Pulses

Durch die Berechnungen in dem Abschnitt 4.1 ist es nun möglich, zu den vorhandenen Relaxationszeiten jede beliebige Pulsdauer frei zu wählen. Jedoch ist man immer noch an die vier getesteten Relaxationszeiten (0.1s, 0.5s, 0.7s und 1.0s) gebunden. Die folgenden mathematischen Berechnungen dienen nun dazu, die Relaxationszeit ebenfalls frei wählen zu können. Dann wäre für jede Relaxationszeit/Puls-Einstellung am CO<sub>2</sub>-Laser die Darstellung der Prognosegeraden  $f_{ij}(x)$  möglich, welche die mit steigender Leistung  $x$  ansteigenden Temperaturerhöhungen prognostiziert.

Die Gleichung der Geraden zur Prognose von Temperaturerhöhungen lautet:

$$f_{ij}(x) = s_{ij} \cdot x + t_{ij}$$

mit

$f_{ij}(x)$  = Temperaturerhöhung

$x$  = Leistung

$s_{ij}$  = Steigung  $s$  der Kombination Relaxationszeit  $i$  und Puls  $j$

$t_{ij}$  = Achsenabschnitt  $t$  der Kombination Relaxationszeit  $i$  und Puls  $j$

#### 4.2.1 Polynomiale Regression der Regressionskoeffizienten $b_1$

Basierend auf den in 4.1.1 berechneten Werten für die Regressionskoeffizienten  $b_1$ , soll in diesem Abschnitt gezeigt werden, wie auch für eine Relaxationszeit, die nicht getestet worden ist, die Werte für die entsprechende Steigung  $s$  gewonnen werden kann.

Alle Regressionskoeffizienten  $b_1$  eines Pulses stellen in einem Koordinatensystem, mit den Relaxationszeiten als unabhängige Variable, eine Punktwolke dar.

$$(x, y) = ((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n))$$

mit:

x = Relaxationszeiten

y = Regressionskoeffizienten  $b_1$ .

Den nachstehenden Abbildungen 14 und 15 ist zu entnehmen, dass zwischen den einzelnen Regressionskoeffizienten  $b_1$  eines Pulses kein linearer Zusammenhang mehr besteht, sondern vielmehr ein polynomialer (gestrichelte Trendlinie).

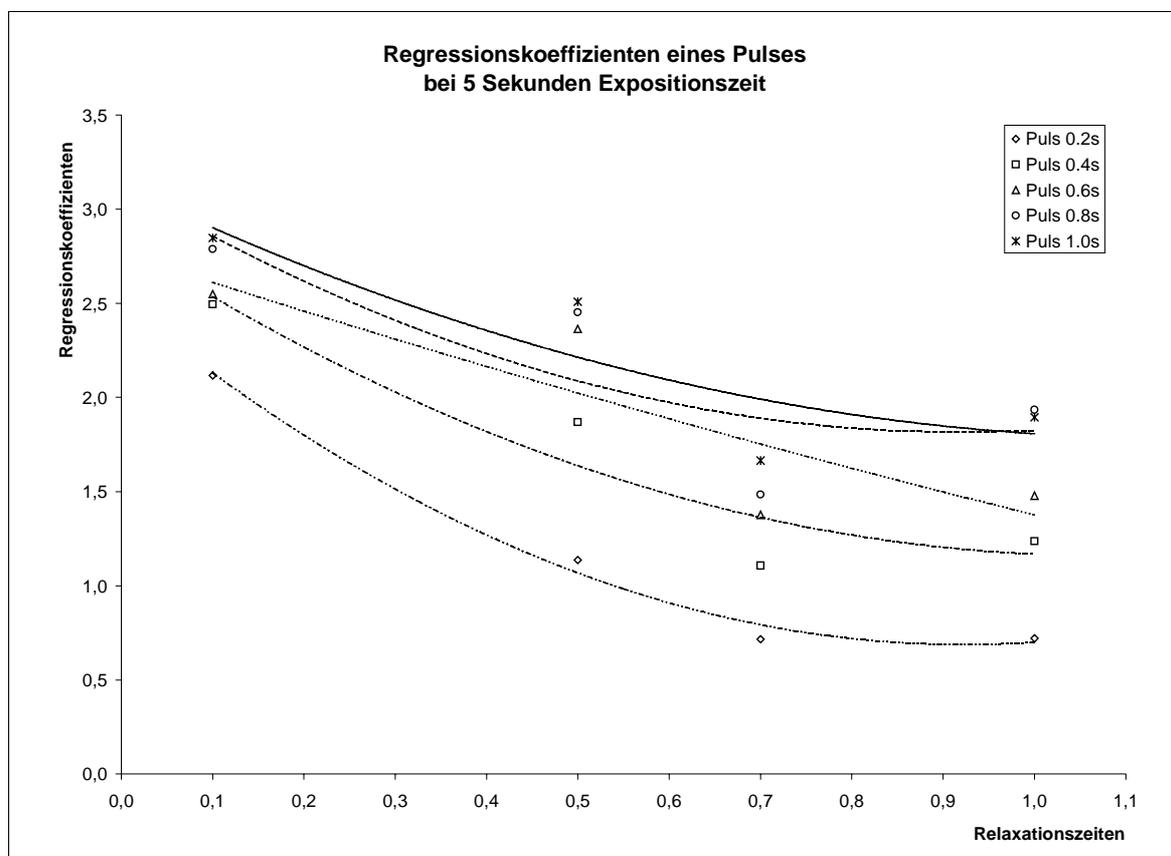


Abb. 14 Polynomialer Zusammenhang der Regressionskoeffizienten  $b_1$  bei 5 Sekunden Expositionszeit

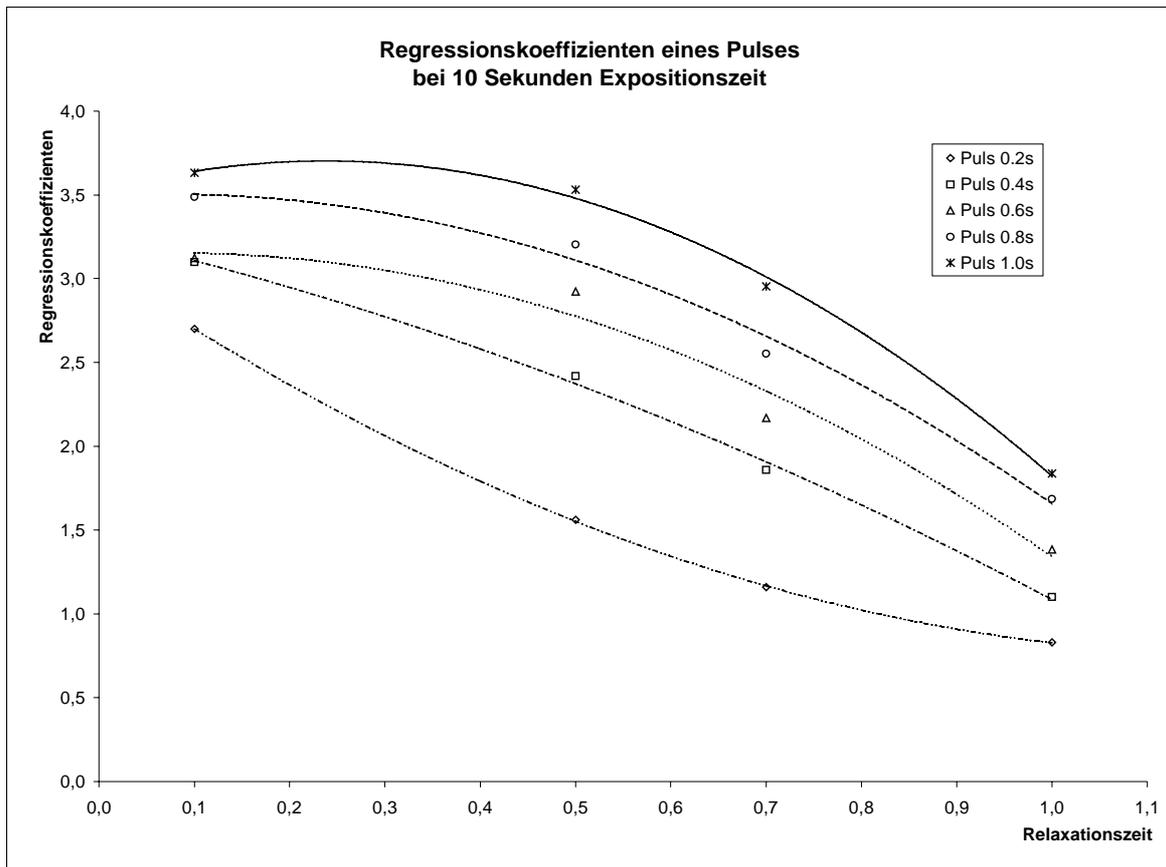


Abb. 15 Polynomialer Zusammenhang der Regressionskoeffizienten  $b_1$  eines Pulses bei 10 Sekunden Expositionszeit

Um die Steigung  $s$  für die Prognosegerade  $f_{ij}(x)$  mit einer beliebigen Relaxationszeit/Puls-Kombination, bei der die Relaxationszeit nicht getestet worden ist, berechnen zu können, wird die polynomiale Regression verwendet. Die Ausführung der Matrixoperationen für den Fall der Einfachregression ist im Anhang (S.87) allgemein gültig beschrieben.

Mit Hilfe der Matrizenrechnung ist es also möglich, zu *jedem* am CO<sub>2</sub>-Laser einstellbaren Puls, eine Funktion anzugeben, die nur noch von der Relaxationszeit als unabhängige Variable abhängt.

Für exemplarisch ausgewählte Pulse aus Punkt 4.1 und 4.2 zeigen die folgenden zwei Tabellen jeweils die entsprechenden Funktionen an, wobei  $s$  der Steigung der Prognosefunktion  $f_{ij}(x)$  und  $x$  der frei ausgewählten Relaxationszeit entspricht.

Puls	Funktion zur Bestimmung der Steigung $s$ bei 5 Sekunden Expositionszeit
0.1s	$s = 1,851x^2 - 3,668x + 2,490$
0.2s	$s = 1,739x^2 - 3,490x + 2,567$
0.3s	$s = 1,626x^2 - 3,312x + 2,644$
0.4s	$s = 1,514x^2 - 3,134x + 2,720$
0.5s	$s = 1,401x^2 - 2,956x + 2,796$
0.6s	$s = 1,289x^2 - 2,778x + 2,873$
0.7s	$s = 1,176x^2 - 2,600x + 2,949$
0.8s	$s = 1,063x^2 - 2,422x + 3,026$
0.9s	$s = 0,951x^2 - 2,244x + 3,102$
1.0s	$s = 0,838x^2 - 2,066x + 3,179$

Tabelle 19: Funktionen zur Bestimmung der Steigungen  $s$  der Pulse von 0.1 bis 1.0s bei 5 Sekunden Expositionszeit

Puls	Funktion zur Bestimmung der Steigung $s$ bei 10 Sekunden Expositionszeit
0.1s	$s = 1,384x^2 - 3,683x + 3,007$
0.2s	$s = 0,837x^2 - 3,065x + 3,065$
0.3s	$s = 0,289x^2 - 2,447x + 3,122$
0.4s	$s = -0,258x^2 - 1,830x + 3,179$
0.5s	$s = -0,805x^2 - 1,212x + 3,237$
0.6s	$s = -1,352x^2 - 0,594x + 3,294$
0.7s	$s = -1,899x^2 + 0,024x + 3,351$
0.8s	$s = -2,447x^2 + 0,641x + 3,409$
0.9s	$s = -2,994x^2 + 1,259x + 3,466$
1.0s	$s = -3,541x^2 + 1,877x + 3,523$

Tabelle 20: Funktionen zur Bestimmung der Steigungen  $s$  der Pulse von 0.1 bis 1.0s bei 10 Sekunden Expositionszeit

Die P-Werte (der Variablen  $X$  und  $X^2$ ) der Polynomfunktionen (Abb. 14 und 15, S. 41-42) liegen zwischen 0,955 und 0,081 (vgl. hierzu Tabelle 46a+b, S. 87). Daraus ergibt sich bei einem Signifikanzniveau von 5% keine Signifikanz, d.h. es kann angenommen werden, dass die Regressionskoeffizienten auf andere Ursachen aber nicht allein auf die längere Relaxationszeit zurückgeführt werden kann.

Einzige Ausnahme bildet die Polynomfunktion mit 10 Sekunden Expositionszeit bei einem Puls von 0,2 Sekunden. Hier beträgt der P-Wert des Effektes zur  $X$ -Variablen 0,009 und zur  $X^2$ -Variablen 0,020. Bei

dieser Funktion sind die Regressionskoeffizienten und die Relaxationszeit signifikant assoziiert.

Es ist anzunehmen, dass durch die geringe Anzahl der Messpunkte (vier Messpunkte pro Gerade) die Signifikanz deshalb auf dieser Ebene zum größten Teil nicht gegeben ist.

Um nun die Steigung einer willkürlich ausgewählten Relaxationszeit/Puls-Kombination zu erhalten, ist lediglich in der Funktion des gewünschten Pulses der x-Wert einer frei auswählbaren Relaxationszeit gleichzusetzen. Es sind nun auch Relaxationszeiten wie z. B. 0.3s oder 0.9s möglich. Somit ist man nicht mehr an die vier getesteten Relaxationszeiten 0.1s, 0.5s, 0.7s und 1.0s gebunden.

Die nachfolgenden zwei Tabellen (21 und 22) geben nun für frei ausgewählte am CO<sub>2</sub>-Laser mögliche Relaxationszeit/Puls-Kombinationen den Wert für die Steigung  $s$  an. In den Tabellen wurde die Relaxationszeit mit Relax. abgekürzt.

**Steigung  $s$  bei 5 Sekunden Expositionszeit**

<b>Puls Relax.</b>	<b>0.1s</b>	<b>0.2s</b>	<b>0.3s</b>	<b>0.4s</b>	<b>0.5s</b>	<b>0.6s</b>	<b>0.7s</b>	<b>0.8s</b>	<b>0.9s</b>	<b>1.0s</b>
<b>0.1s</b>	2,142	2,235	2,329	2,422	2,515	2,608	2,701	2,794	2,887	2,980
<b>0.2s</b>	1,831	1,939	2,046	2,154	2,261	2,369	2,476	2,584	2,691	2,799
<b>0.3s</b>	1,557	1,676	1,796	1,916	2,036	2,155	2,275	2,395	2,515	2,634
<b>0.4s</b>	1,320	1,449	1,579	1,708	1,838	1,968	2,097	2,227	2,357	2,486
<b>0.5s</b>	1,119	1,257	1,394	1,531	1,669	1,806	1,943	2,081	2,218	2,355
<b>0.6s</b>	0,956	1,099	1,242	1,384	1,527	1,670	1,813	1,955	2,098	2,241
<b>0.7s</b>	0,830	0,976	1,122	1,268	1,414	1,560	1,705	1,851	1,997	2,143
<b>0.8s</b>	0,741	0,888	1,034	1,181	1,328	1,475	1,622	1,769	1,916	2,062
<b>0.9s</b>	0,689	0,834	0,980	1,125	1,271	1,416	1,562	1,707	1,853	1,998
<b>1.0s</b>	0,673	0,815	0,957	1,099	1,241	1,383	1,525	1,667	1,809	1,951

Tabelle 21: Steigungen  $s$  der Kombinationen aus den Relaxationszeiten von 0.1-1.0s und den Pulsen von 0.1-1.0s bei 5s Expositionszeit

### Steigung $s$ bei 10 Sekunden Expositionszeit

Puls Relax.	0.1s	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s	0.6s	0.7s	0.8s	0.9s	1.0s
0.1s	2,653	2,767	2,880	2,994	3,107	3,221	3,335	3,448	3,562	3,675
0.2s	2,326	2,485	2,644	2,803	2,962	3,121	3,280	3,439	3,598	3,757
0.3s	2,027	2,221	2,414	2,607	2,801	2,994	3,187	3,381	3,574	3,767
0.4s	1,756	1,973	2,189	2,406	2,623	2,840	3,057	3,274	3,490	3,707
0.5s	1,512	1,741	1,971	2,200	2,429	2,659	2,888	3,118	3,347	3,576
0.6s	1,296	1,527	1,758	1,989	2,220	2,451	2,682	2,913	3,143	3,374
0.7s	1,108	1,329	1,551	1,772	1,994	2,215	2,437	2,659	2,880	3,102
0.8s	0,947	1,148	1,349	1,551	1,752	1,953	2,155	2,356	2,557	2,758
0.9s	0,814	0,984	1,154	1,324	1,494	1,664	1,834	2,004	2,174	2,344
1.0s	0,709	0,836	0,964	1,092	1,220	1,348	1,475	1,603	1,731	1,859

Tabelle 22: Steigungen  $s$  der Kombinationen aus den Relaxationszeiten von 0.1-1.0s und den Pulsen von 0.1-1.0s bei 10s Expositionszeit

#### 4.2.2 Polynomiale Regression der Achsenabschnitte $a_1$

Da die Prognosegerade einer willkürlich gewählten Relaxationszeit/Puls-Kombination, nicht allein durch die Steigung  $s$  (Punkt 4.2.1) definiert werden kann, benötigt man zu ihrer Darstellung noch den Achsenabschnitt  $t$ .

Alle Achsenabschnitte  $a_1$  eines Pulses stellen in einem Koordinatensystem, mit den Relaxationszeiten als unabhängige Variable, eine Punktwolke dar.

$$(x, y) = ((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n))$$

mit:

x = Relaxationszeiten

y = Achsenabschnitt  $a_1$ ,

Den nachstehenden Abb. 16 und 17 ist zu entnehmen, dass zwischen den einzelnen Achsenabschnitten  $a_1$  eines Pulses kein linearer Zusammenhang mehr besteht, sondern vielmehr ein polynomialer (gestrichelte Trendlinie).

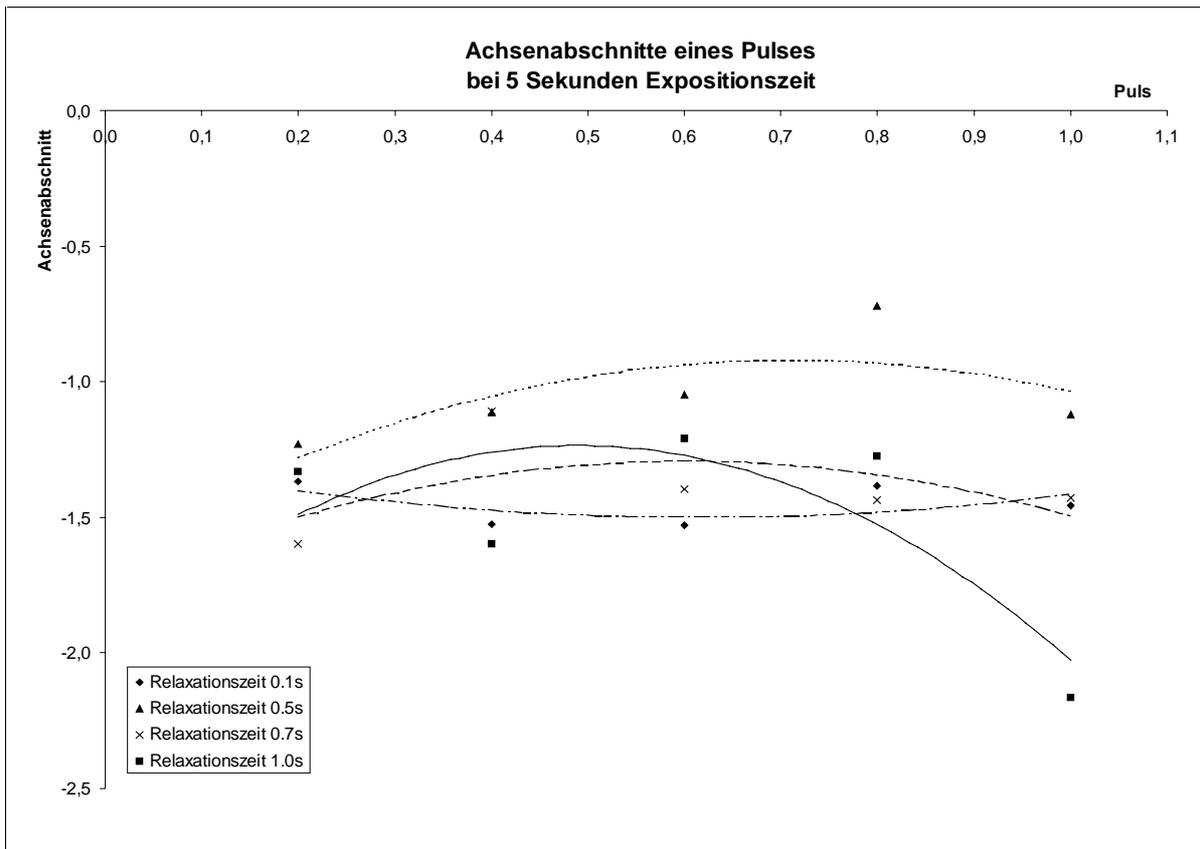


Abb. 16: Polynomialer Verlauf der Achsenabschnitte  $a_1$  eines Pulses bei 5 Sekunden Expositionszeit

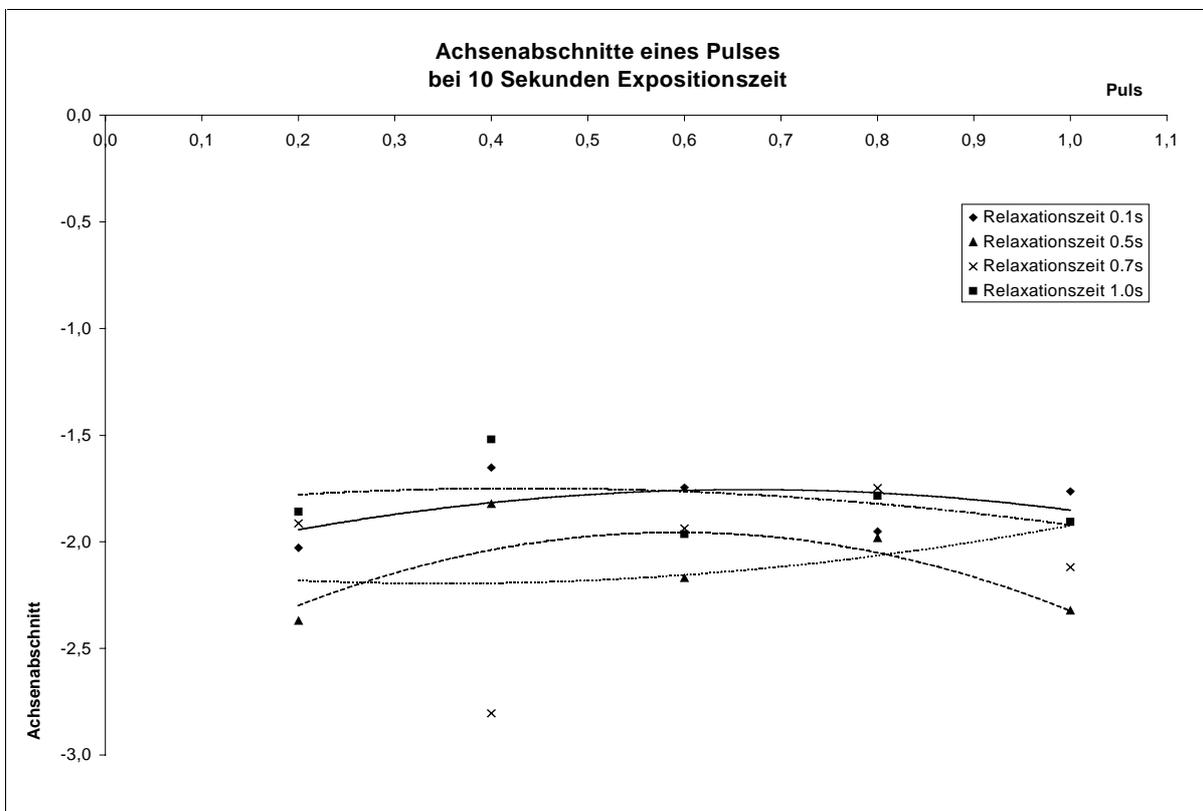


Abb.17: Polynomialer Verlauf der Achsenabschnitte  $a_1$  eines Pulses bei 10 Sekunden Expositionszeit

Die Matrizenrechnung (Anhang, S. 87f), mit der im Abschnitt 4.2.1 (S. 41) die Steigungen  $s$  ermittelt worden sind, wird nun auch hier verwendet. Schritt 1 bis Schritt 6 werden nun ebenfalls für die Achsenabschnitte  $a_1$  angewandt. Auf diesem Weg erhält man die Funktionen, die es im Weiteren ermöglichen für jede frei wählbare Relaxationszeit den dazugehörigen Achsenabschnitt  $t$  zu bestimmen.

Die folgenden zwei Tabellen (23 und 24) zeigen die Funktionen zur Bestimmung des Achsenabschnitts  $t$  zu den ausgewählten Pulsen.

Puls	Funktion zur Bestimmung des Achsenabschnitts $t$ bei 5 Sekunden Expositionszeit
0.1s	$t = -0,078x^2 + 0,315x - 1,452$
0.2s	$t = -0,364x^2 + 0,555x - 1,474$
0.3s	$t = -0,650x^2 + 0,795x - 1,496$
0.4s	$t = -0,936x^2 + 1,035x - 1,519$
0.5s	$t = -1,222x^2 + 1,275x - 1,541$
0.6s	$t = -1,508x^2 + 1,515x - 1,563$
0.7s	$t = -1,794x^2 + 1,755x - 1,586$
0.8s	$t = -2,080x^2 + 1,996x - 1,608$
0.9s	$t = -2,366x^2 + 2,236x - 1,630$
1.0s	$t = -2,652x^2 + 2,476x - 1,652$

Tabelle 23: Funktionen zur Bestimmung der Achsenabschnitte  $t$  eines ausgewählten Pulses bei 5 Sekunden Expositionszeit

Puls	Funktion zur Bestimmung des Achsenabschnitts $t$ bei 10 Sekunden Expositionszeit
0.1s	$t = 2,028x^2 - 2,097x - 1,678$
0.2s	$t = 1,940x^2 - 2,023x - 1,677$
0.3s	$t = 1,852x^2 - 1,949x - 1,675$
0.4s	$t = 1,764x^2 - 1,874x - 1,674$
0.5s	$t = 1,676x^2 - 1,800x - 1,673$
0.6s	$t = 1,589x^2 - 1,725x - 1,671$
0.7s	$t = 1,501x^2 - 1,651x - 1,670$
0.8s	$t = 1,413x^2 - 1,576x - 1,669$
0.9s	$t = 1,325x^2 - 1,502x - 1,667$
1.0s	$t = 1,238x^2 - 1,428x - 1,666$

Tabelle 24: Funktionen zur Bestimmung der Achsenabschnitte  $t$  eines ausgewählten Pulses bei 10 Sekunden Expositionszeit

Die P-Werte (der Effekte zu den Variablen  $X$  und  $X^2$ ) der Polynomfunktionen (Abb. 16 und 17, S. 46) liegen zwischen 0,917 und 0,067 (vgl. hierzu Tabelle 47a+b, S. 87). Daraus ergibt sich auf dem 5%

Signifikanzniveau keine Signifikanz, d.h. es kann angenommen werden, dass die Achsenabschnitte auf andere Ursachen aber nicht allein auf den längeren Puls zurückgeführt werden können.

Ersetzt man nun in den Tabellen 23 und 24 den x-Wert durch eine frei wählbare Relaxationszeit, erhält man den Wert des Achsenabschnitts  $t$ .

In den nachfolgenden zwei Tabellen (25 und 26) werden die Werte der Achsenabschnitte  $t$  für zehn verschiedene Relaxationszeiten und Pulse wiedergegeben. Um im nächsten Abschnitt aus den gewonnenen Werten für Steigung  $s$  und Achsenabschnitt  $t$  Geraden bilden zu können, wurden die gleichen Relaxationszeit/Puls-Kombinationen wie schon unter 4.2.1 gewählt. In beiden Tabellen wurde die Relaxationszeit jeweils mit Relax. abgekürzt.

**Achsenabschnitte  $t$  bei 5 Sekunden Expositionszeit**

Puls Relax.	0.1s	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s	0.6s	0.7s	0.8s	0.9s	1.0s
0.1s	-1,421	-1,422	-1,423	-1,424	-1,426	-1,427	-1,428	-1,429	-1,430	-1,431
0.2s	-1,392	-1,377	-1,363	-1,349	-1,335	-1,320	-1,306	-1,292	-1,278	-1,263
0.3s	-1,364	-1,340	-1,316	-1,292	-1,268	-1,244	-1,220	-1,196	-1,172	-1,148
0.4s	-1,338	-1,310	-1,282	-1,254	-1,226	-1,198	-1,170	-1,142	-1,114	-1,086
0.5s	-1,314	-1,287	-1,261	-1,235	-1,209	-1,182	-1,156	-1,130	-1,104	-1,078
0.6s	-1,291	-1,272	-1,253	-1,234	-1,216	-1,197	-1,178	-1,159	-1,140	-1,122
0.7s	-1,269	-1,264	-1,258	-1,252	-1,247	-1,241	-1,236	-1,230	-1,224	-1,219
0.8s	-1,250	-1,263	-1,276	-1,289	-1,303	-1,316	-1,329	-1,342	-1,356	-1,369
0.9s	-1,231	-1,269	-1,307	-1,345	-1,383	-1,421	-1,459	-1,496	-1,534	-1,572
1.0s	-1,215	-1,283	-1,351	-1,419	-1,487	-1,556	-1,624	-1,692	-1,760	-1,828

Tabelle 25: Achsenabschnitte  $t$  der Kombinationen aus den Relaxationszeiten 0.1-1.0s und den Pulsen 0.1-1.0s bei 5 Sekunden Expositionszeit

**Achsenabschnitte  $t$  bei 10 Sekunden Expositionszeit**

Puls Relax.	0.1s	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s	0.6s	0.7s	0.8s	0.9s	1.0s
0.1s	-1,867	-1,859	-1,852	-1,844	-1,836	-1,828	-1,820	-1,812	-1,804	-1,797
0.2s	-2,016	-2,003	-1,991	-1,978	-1,965	-1,953	-1,940	-1,927	-1,915	-1,902
0.3s	-2,125	-2,109	-2,093	-2,077	-2,062	-2,046	-2,030	-2,014	-1,999	-1,983
0.4s	-2,192	-2,175	-2,158	-2,141	-2,124	-2,107	-2,090	-2,073	-2,056	-2,039
0.5s	-2,220	-2,203	-2,186	-2,170	-2,153	-2,137	-2,120	-2,104	-2,087	-2,071
0.6s	-2,206	-2,192	-2,178	-2,163	-2,149	-2,135	-2,120	-2,106	-2,092	-2,077
0.7s	-2,152	-2,142	-2,132	-2,121	-2,111	-2,101	-2,090	-2,080	-2,069	-2,059
0.8s	-2,058	-2,053	-2,049	-2,044	-2,039	-2,035	-2,030	-2,025	-2,021	-2,016
0.9s	-1,923	-1,926	-1,929	-1,932	-1,934	-1,937	-1,940	-1,943	-1,946	-1,949
1.0s	-1,748	-1,760	-1,772	-1,784	-1,796	-1,808	-1,820	-1,832	-1,844	-1,856

Tabelle 26: Achsenabschnitte  $t$  der Kombinationen aus den Relaxationszeiten 0.1-1.0s und den Pulsen 0.1-1.0s bei 10 Sekunden Expositionszeit

Durch die Berechnungen unter 4.2.1 erhielt man die Ergebnisse für die Steigungen  $s_{ij}$ . Zusammen mit den Ergebnissen für die Achsenabschnitte  $t_{ij}$  können nun Prognosegeraden zu den *getesteten* und zu *neuen* Relaxationszeit/Puls-Kombinationen am CO<sub>2</sub>-Laser gebildet werden.

An Hand zweier Beispiele für jeweils 5 und 10 Sekunden Expositionszeit soll dargestellt werden, wie gut die berechneten Regressionsgeraden den Originalwerten angepasst werden konnten.

Für 5 Sekunden Expositionszeit wurden die Kombinationen Relaxationszeit 0.1s/Puls 0.6s und Relaxationszeit 0.1s/Puls 0.8s ausgewählt.

Bei 10 Sekunden Expositionszeit wählte man die Kombinationen Relaxationszeit 0.7s/Puls 0.4s und Relaxationszeit 0.7s/Puls 0.6s.

Die gestrichelten Linien in den Abb. 18a und b stellen die Verbindungslinien zu den im Versuch erhaltenen Temperaturerhöhungen dar. Die jeweils, durch die vorangegangenen Berechnungen, entsprechende Prognosegerade wird durch die durchgezogene Linie dargestellt. Mit leichten Schwankungen liegen die gemessenen Temperaturerhöhungen um die berechnete Regressionsgerade.

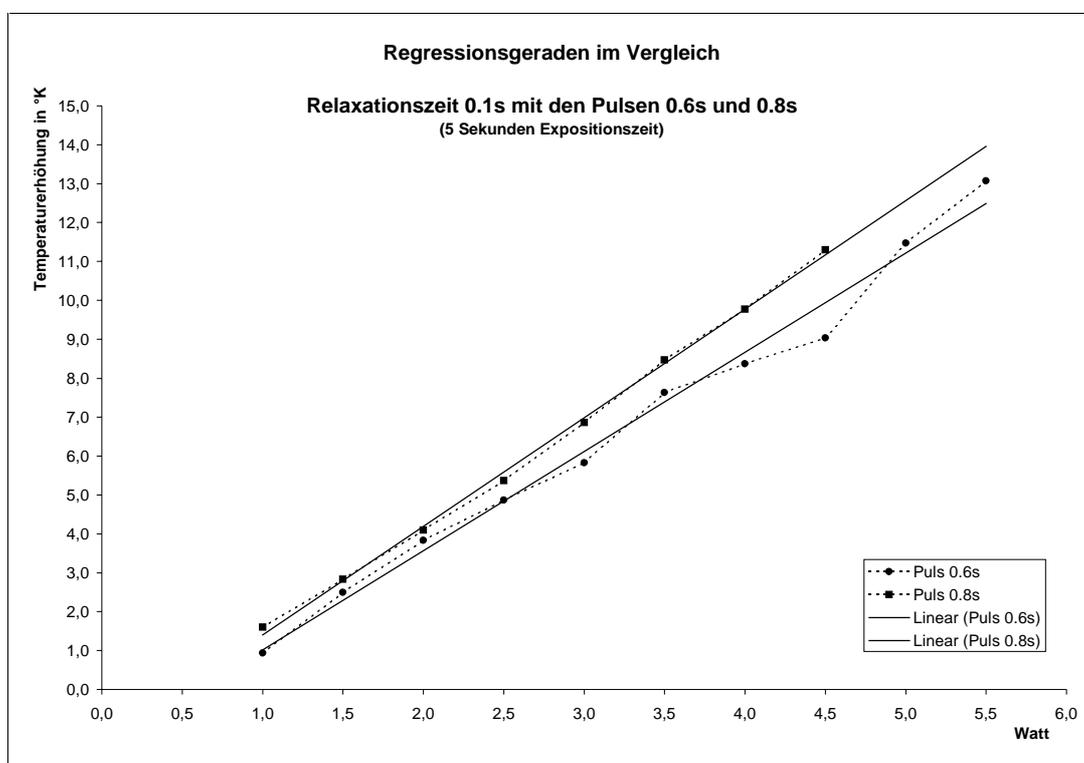


Abb. 18a Temperaturanstieg der Kombinationen Relaxationszeit 0.1s mit Puls 0.6s und Relaxationszeit 0.1s mit Puls 0.8s (5 Sekunden Expositionszeit)

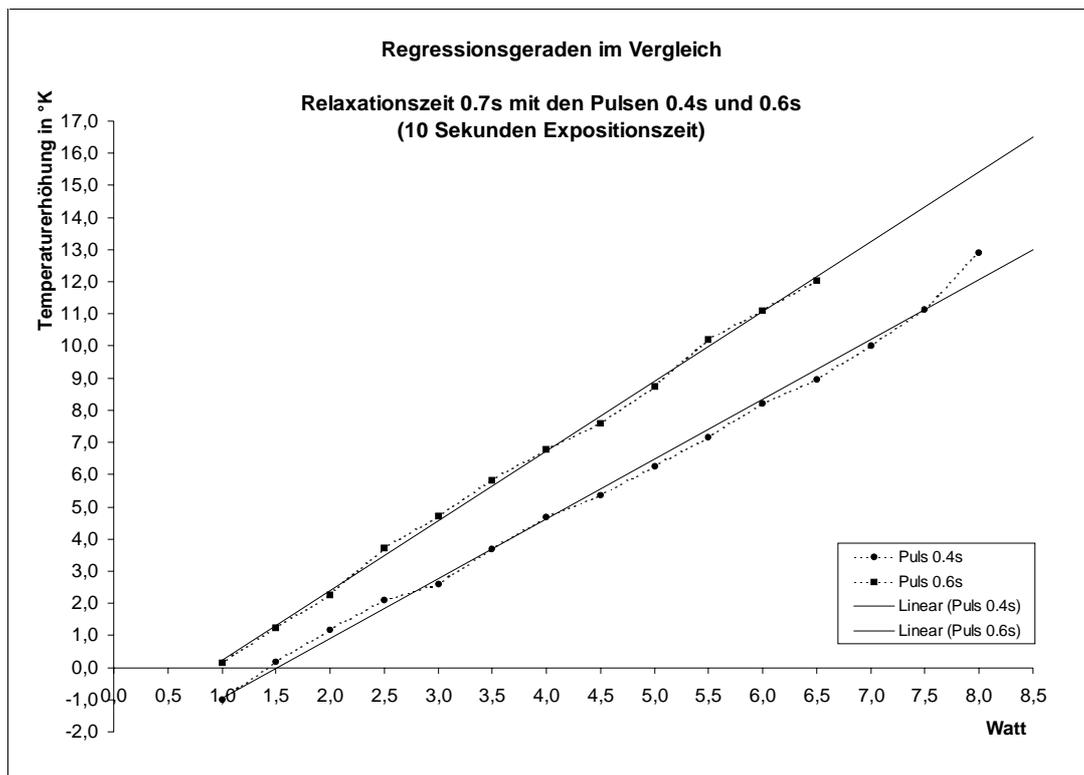


Abb. 18b Temperaturanstieg der Kombinationen Relaxationszeit 0.7s mit Puls 0.4s und Relaxationszeit 0.7s mit Puls 0.6s (10 Sekunden Expositionszeit)

### 4.3 Prognose der Temperaturerhöhung

Jede Temperaturerhöhung einer Relaxationszeit/Puls-Kombination, in Abhängigkeit einer frei wählbaren Wattstärke, kann mit Hilfe der hergeleiteten Geraden prognostiziert werden.

$$f_{ij}(x) = s_{ij} \cdot x + t_{ij}$$

mit

$f_{ij}(x)$  = Temperaturerhöhung

$x$  = Leistung

$s_{ij}$  = Steigung der Kombination Relaxationszeit  $i$  und Puls  $j$

$t_{ij}$  = Achsenabschnitt der Kombination Relaxationszeit  $i$  und Puls  $j$

Durch die Berechnungen unter 4.2 hat man für jede mögliche Gerade einer Relaxationszeit/Puls-Kombination die Werte für die Steigung  $s_{ij}$  und den Achsenabschnitt  $t_{ij}$  erhalten. Ziel der Arbeit war es, für eine beliebige Relaxationszeit/Pause-Kombination bei frei wählbarer Leistung,

den Einstellungsmöglichkeiten am CO<sub>2</sub>-Laser entsprechend, prognostizieren zu können, wie groß die Temperaturerhöhung am Interface voraussichtlich sein wird.

Um das Ergebnis besser darzustellen, wird dies anhand einiger Beispiele erläutert:

Es wurden die gleichen Kombinationen wie in 4.2.2 ausgewählt: Bei 5 Sekunden Expositionszeit sind es die Kombinationen Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.6s, 0.1s/0.8s und zusätzlich die Kombination Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.7s.

Für 10 Sekunden Expositionszeit sollen die Kombinationen Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.4s, 0.7s/0.6s und die zusätzliche Kombination Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.5s ausgewählt werden.

Bei 5 Sekunden Expositionszeit liegt die Kombination Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.7s zwischen den zwei getesteten Kombinationen Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.6s und Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.8s.

Im Beispiel für 10 Sekunden Expositionszeit liegt die Kombination Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.5s zwischen den beiden Kombinationen Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.4s und Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.6s.

Für die beiden in der Mitte liegenden Kombinationen existieren keine empirisch gewonnenen Werte für Temperaturerhöhungen. Ihre Prognosegeraden ergeben sich ausschließlich durch die Berechnungen in den vorangegangenen Abschnitten.

Die Funktionen der Prognosegeraden zu den obengenannten Kombinationen sind für 5 Sekunden Expositionszeit in der Tabelle 27, für 10 Sekunden Expositionszeit der Tabelle 28 dargestellt.

### 5 Sekunden Expositionszeit

Relaxationszeit / Puls	Funktion der Geraden
0.1s / 0.6s	$f_{0.1/0.6}(x) = 20608 \cdot x - 1,427$
0.1s / 0.7s	$f_{0.1/0.7}(x) = 2,701 \cdot x - 1,428$
0.1s / 0.8s	$f_{0.1/0.8}(x) = 2,794 \cdot x - 1,429$

Tabelle 27: Funktionen der Regressionsgeraden für die Kombinationen Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.6s; 0.1s/0.7s und 0.1s/0.8s bei 5 Sekunden Expositionszeit

## 10 Sekunden Expositionszeit

Relaxationszeit / Puls	Funktion der Geraden
0.7s / 0.4s	$f_{0.7/0.4}(x) = 1,772 \cdot x - 2,121$
0.7s / 0.5s	$f_{0.7/0.5}(x) = 1,994 \cdot x - 2,111$
0.7s / 0.6s	$f_{0.7/0.6}(x) = 2,215 \cdot x - 2,101$

Tabelle 28: Funktionen der Regressionsgeraden für die Kombinationen Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.4s; 0.7s/0.5s und 0.7s/0.6s bei 10 Sekunden Expositionszeit

Die verwendeten Werte für die Steigungen  $s_{ij}$  sind der Tabelle 21 (S. 43) bzw. 22 (S. 44), die für die Achsenabschnitte  $t_{ij}$  der Tabelle 25 (S. 47) bzw. 26 (S. 47) entnommen.

In den Abb. 19a und b sind alle drei Geraden einer Expositionszeit in einem Koordinatensystem eingetragen. Die durch die Berechnungen in den vorangegangenen Teilen nun mögliche Darstellung der Geraden der Relaxationszeit/Puls-Kombination 0.1s/0.7s bei 5 Sekunden Expositionszeit liegt zwischen den Geraden der Relaxationszeit/Puls-Kombination 0.1s/0.6s und der Relaxationszeit/Puls-Kombination 0.1s/0.8s. Auch bei 10 Sekunden Expositionszeit liegt die Gerade der Relaxationszeit/Puls-Kombination 0.7s/0.5s zwischen den Geraden der Relaxationszeit/Puls-Kombinationen 0.7s/0.4s und 0.7s/0.6s.

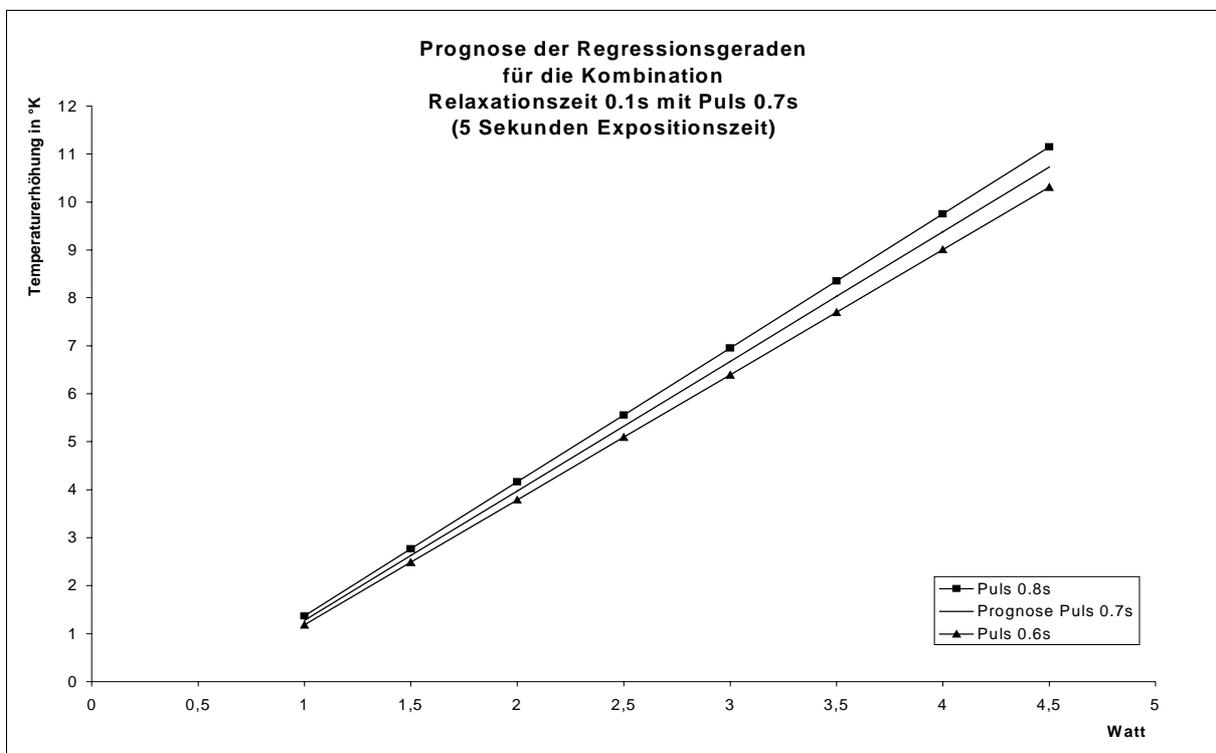


Abb. 19a: Regressionsgeraden bei 5 Sekunden Expositionszeit für die Relaxationszeit/Puls-Kombinationen 0.1s/0.6s, 0.1s/0.7s, 0.1s/0.8s

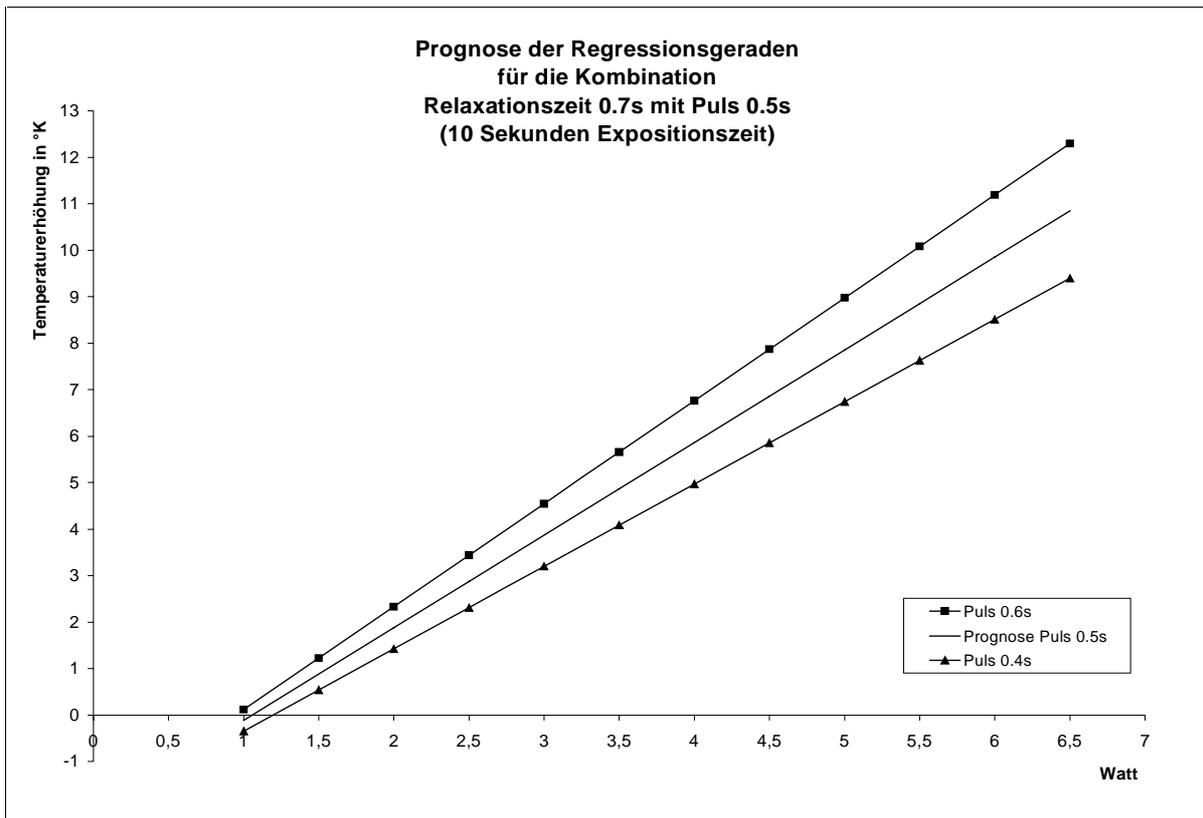


Abb. 19b: Regressionsgeraden bei 10 Sekunden Expositionszeit für die Relaxationszeit/Puls-Kombinationen 0.7s/0.4s, 0.7s/0.5s, 0.7s/0.6s

In den Abb. 19a und b kann man nun für die gewünschte Leistung der entsprechenden Relaxationszeit/Puls-Kombination die dazugehörige Temperaturerhöhung ablesen.

Die folgenden sechs Tabellen 29a-c und 30a-c zeigen für jede Gerade aus der Abb. 19a bzw 19b die Temperaturerhöhung bei entsprechender Leistung.

In den Tabellen 29a-c und 30a-c sind die Temperaturerhöhungen in °K angegeben und durch Temp. abgekürzt. Wie auch in den Versuchen steigt hier mit zunehmender Leistung, sowie mit längerer Pulsdauer die Temperaturerhöhung.

### 5 Sekunden Expositionszeit

#### Relaxationszeit 0.1s / Puls 0.6s

Watt	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Temp.	1,181	2,485	3,789	5,093	6,397	7,701	9,005	10,309	11,613

Tabelle 29a: Errechnete Temperaturerhöhungen der Kombination Relaxationszeit 0.1s/Puls 0.6s

### Relaxationszeit 0.1s / Puls 0.7s

Watt	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Temp.	1,273	2,624	3,974	5,325	6,675	8,026	9,376	10,727	12,077

Tabelle 29b: Errechnete Temperaturerhöhungen der Kombination Relaxationszeit 0.1s/Puls 0.7s

### Relaxationszeit 0.1s / Puls 0.8s

Watt	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Temp.	1,365	2,762	4,159	5,556	6,953	8,350	9,747	11,144	12,541

Tabelle 29c: Errechnete Temperaturerhöhungen der Kombination Relaxationszeit 0.1s/Puls 0.8s

## 10 Sekunden Expositionszeit

### Relaxationszeit 0.7s / Puls 0.4s

Watt	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Temp.	-0,349	0,537	1,423	2,309	3,195	4,081	4,967	5,853	6,739

Tabelle 30a: Errechnete Temperaturerhöhungen der Kombination Relaxationszeit 0.7s/Puls 0.4s

### Relaxationszeit 0.7s / Puls 0.5s

Watt	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Temp.	-0,117	0,880	1,877	2,874	3,871	4,868	5,865	6,862	7,859

Tabelle 30b: Errechnete Temperaturerhöhungen der Kombination Relaxationszeit 0.7s/Puls 0.5s

### Relaxationszeit 0.7s / Puls 0.6s

Watt	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Temp.	0,114	1,222	2,329	3,4365	4,544	5,6515	6,759	7,867	8,974

Tabelle 30c: Errechnete Temperaturerhöhungen der Kombination Relaxationszeit 0.7s/Puls 0.6s

Um die Temperaturerhöhung einer bestimmten Leistung in einer gewünschten Relaxationszeit/Puls-Kombination zu erhalten, ist es nicht zwingend nötig, die entsprechende Grafik zu erstellen und den Wert für die Temperaturerhöhung darin abzulesen. Dies wurde im vorangegangenen Abschnitt nur der besseren Veranschaulichung halber gemacht. Schneller erhält man die gesuchte Temperaturerhöhung, indem man in die Funktion

$$f_{ij}(x) = s_{ij} \cdot x + t_{ij}$$

den Wert für die Steigung  $s_{ij}$ , die gewünschte Leistung  $x$  und den Wert für den Achsenabschnitt  $t_{ij}$  einsetzt. So ist man in der Lage vorherzusagen, um wieviele °K sich das Interface bei der gewünschten Einstellung erwärmen wird.

Durch die Berechnungen kommt es zu unterschiedlichen Werten zwischen den gemessenen Temperaturerhöhungen und den entsprechenden errechneten Temperaturerhöhungen.

Es gibt zwei Möglichkeiten für die Lage der Abweichung:

Im für die Anwendung günstigen Fall liegt die errechnete Temperaturerhöhung über der wirklichen. Würde man eine Kombination mit dieser Voraussetzung anwenden, wäre die tatsächliche Temperaturerhöhung auf jeden Fall geringer als die errechnete, und das periimplantäre Gewebe könnte nicht geschädigt werden.

Bei der zweiten Möglichkeit liegt der Wert für die errechnete Temperaturerhöhung unter dem für die tatsächliche. Das periimplantäre Gewebe würde Schaden nehmen, wenn mit hohen Temperaturen gearbeitet würde, da die tatsächliche Temperaturerhöhung noch höher läge.

Die Tabellen 31 und 32 geben die Werte für die Abweichungen (in °K) der Regressionsgeraden von den getesteten Temperaturerhöhungen wieder. Für jede Leistung jeder Relaxationszeit/Puls-Kombination, deren Temperaturerhöhung den Wert von 10°K nicht überschritten hatte, wurde der Wert der Abweichung ermittelt, wobei nur die höchsten Werte in den Tabellen 31 und 32 erfasst sind. Negative Werte stellen die Fälle dar, bei denen die errechnete Temperaturerhöhung über der tatsächlichen liegt, also nicht die Gefahr der unbeabsichtigten Überhitzung besteht. Anders liegt dies bei den positiven Werten. Sie symbolisieren den Wert, den die errechnete Temperaturerhöhung maximal unter der tatsächlichen liegt. Die jeweilige höchste Abweichung wurde durch Fettdruck hervorgehoben.

### Abweichungen bei 5 Sekunden Expositionszeit

	<b>Puls 0.2s</b>	<b>Puls 0.4s</b>	<b>Puls 0.6s</b>	<b>Puls 0.8s</b>	<b>Puls 1.0s</b>
<b>Relaxationszeit 0.1s</b>	0,116	0,471	0,044	0,235	-0,543
<b>Relaxationszeit 0.5s</b>	0,097	2,347	<b>2,789</b>	2,208	0,612
<b>Relaxationszeit 0.7s</b>	-0,645	-0,186	-1,349	-2,579	-2,664
<b>Relaxationszeit 1.0s</b>	-0,215	1,826	1,156	1,955	-1,052

Tabelle 31: Abweichungen (in °K) der Regressionsgeraden von den getesteten Temperaturerhöhungen (5s Expositionszeit)

### Abweichungen bei 10 Sekunden Expositionszeit

	<b>Puls 0.2s</b>	<b>Puls 0.4s</b>	<b>Puls 0.6s</b>	<b>Puls 0.8s</b>	<b>Puls 1.0s</b>
<b>Relaxationszeit 0.1s</b>	-0,524	0,599	0,030	0,392	0,441
<b>Relaxationszeit 0.5s</b>	-1,453	<b>1,936</b>	1,231	0,759	-0,503
<b>Relaxationszeit 0.7s</b>	-0,045	-0,651	0,262	0,337	-0,497
<b>Relaxationszeit 1.0s</b>	0,463	0,764	0,486	0,776	0,164

Tabelle 32: Abweichungen (in °K) der Regressionsgeraden von den getesteten Temperaturerhöhungen (5s Expositionszeit)

Um eine Schädigung des periimplantären Gewebes zu vermeiden, sollten bei 5 Sekunden Expositionszeit die CO<sub>2</sub>-Lasereinstellungen generell so gewählt werden, dass die maximale Abweichung von 2,789°K zu der errechneten Temperaturerhöhung addiert werden kann. So wird die kritische 10°K Marke, ab welcher irreversible Gewebeschäden auftreten können [16 s. 102], nicht überschritten.

Für Einstellungen mit 10 Sekunden Expositionszeit reicht eine Addition von 1,936°k zu der errechneten Temperaturerhöhung aus, um eine Traumatisierung des Gewebes zu vermeiden.

Berücksichtigt man die Abweichungen und bleibt die so gewonnene Temperaturerhöhung noch innerhalb biologisch vertretbarer Grenzen, kann davon ausgegangen werden, dass dem periimplantären Gewebe bzw. dem Implantat kein Schaden zugefügt wird [25 s. 1018].

Somit lauten die Prognosefunktionen  
(die in der Anwendung sicherer sind)

für **5 Sekunden Expositionszeit**

$$f_{ij}(x) = s_{ij} \cdot x - t_{ij} + 2,789^\circ K$$

und für **10 Sekunde Expositionszeit**

$$f_{ij}(x) = s_{ij} \cdot x - t_{ij} + 1,936^\circ K .$$

mit

$f_{ij}(x)$  = Temperaturerhöhung

$x$  = Leistung

$s_{ij}$  = Steigung der Kombination Relaxationszeit  $i$  und Puls  $j$

$t_{ij}$  = Achsenabschnitt der Kombination Relaxationszeit  $i$  und Puls  $j$

## 5 Diskussion

### 5.1 Vergleich der Messmethodik

In der vorliegenden Arbeit sollten die Betriebseinstellungen eines CO<sub>2</sub>-Lasers gefunden werden, die sich zur direkten Anwendung auf einem kontaminierten Implantat eignen. Der CO<sub>2</sub>-Laser sollte zu einem späteren Zeitpunkt zur Therapie von erkrankten Implantaten eingesetzt werden.

In der Literatur finden sich mehrere Studien zur konventionellen Periimplantitistherapie. Alle verwendeten eine oder mehrere der folgenden Methoden: Kunststoffküretten [7 s. 486], Metallküretten [7 s. 486], systemische Antibiotikagabe [21 s. 163], lokale Applikation von Chlorhexidindigluconat [8 s. 64], Ultraschallinstrumente [6 s. 943], Pulver-Wasserstrahlgeräte [37 s. 155], konventionelle Zahnbürsten [30 s. 121], elektrische Zahnbürsten [34 s. 303] und Detoxifikation mit Zitronensäurelösung [32 s.322].

Bach und Krekeler (1996) verwendeten einen Dioden-Halbleiterlaser zur Periimplantitistherapie. Sie empfehlen 1 Watt als Leistung, sowie eine Applikationsdauer von maximal 20 Sekunden mit anschließender Pause, um eine Überhitzung des umgebenden Gewebes zu vermeiden. Die mit Laserlicht bestrahlten Flächen zeigen eine Verminderung des Keimpektrums, jedoch keine Sterilisation [1 s. 318].

Nammour und Majerus untersuchten 1991 das Sterilisationspotential des CO<sub>2</sub>-Lasers auf feuchten, kontaminierten Metalloberflächen. Sie kamen zu dem Schluss, dass CO<sub>2</sub>-Laser in der Lage seien, feuchte Metalloberflächen komplett zu sterilisieren [24 s. 184]. Diese Erkenntnis war die Voraussetzung, um den CO<sub>2</sub>-Laser überhaupt auf kontaminierten Flächen einzusetzen. Aus diesem Grund wurde für diese Studie der CO<sub>2</sub>-Laser gewählt.

In der Literatur fanden sich die Studien von Ganz (1994), Swift (1995) und Oyster (1995), die sich ebenfalls mit der Anwendung des CO<sub>2</sub>-Lasers auf Implantatoberflächen befassten.

Ganz testete 1994 die durch CO<sub>2</sub>-Laserbeschuss ausgelösten Temperaturerhöhungen an Implantaten bei der Implantatfreilegung. Er richtete den Laserstrahl auf die Deckschraube und maß die Temperaturerhöhung

an fünf verschiedenen Stellen (an zwei Seiten lateral des Implantates im Knochen, am Alveolarknochen, am Implantat access hole, und an der Seite der Deckschraube, welche dem Laserbeschuss gegenüber lag).

In der kontinuierlichen Betriebsart benutzte er die Leistungen von 2, 4 und 6 Watt bei einer Beschussdauer von 1, 2, 4 und 8 Sekunden. Für die Tests im gepulsten Modus (20 Pulse/s, Pulsdauer 0,01 s) wählte er 5 und 6 Watt bei 1, 2, 4 und 8 Sekunden Expositionszeit [10 s. 28].

Die höchsten Temperaturerhöhungen erhielt er an dem Messpunkt, welcher dem auftreffenden Laserstrahl gegenüber lag. In der kontinuierlichen Betriebsart erhielt er dort nur bei den Einstellungen von 4 und 6 Watt bei jeweils 8 Sekunden Bestrahlungszeit Temperaturveränderungen von über 10°K. Die Kombination von 6 Watt mit 8 Sekunden Expositionszeit ergab zusätzlich am Messpunkt „Alveolarknochen“ einen Wert über 10°K. Bei allen anderen Einstellungen erhielt er an seinen Messpunkten Temperaturerhöhungen von weniger als 10°K.

Im gepulsten Modus erhielt er, außer für die Kombination von 6 Watt mit 8 Sekunden Beschusszeit, Werte von bis zu 5,5°K Temperaturerhöhung.

Ganz empfiehlt für die kontinuierliche Betriebsart geringe Leistungen (2 bis 4 Watt) und für gepulste Einstellungen 5 bis 6 Watt Leistung. Bei beiden Betriebsarten rät er zu einer Expositionszeit von weniger als 8 Sekunden. Er ging jedoch davon aus, dass der Laser für die Implantatfreilegung herangezogen wird, und empfahl das Implantat nicht direkt zu bestrahlen [10 s. 28].

Auch Swift et al. (1995) überprüften die Temperaturerhöhungen, die bei der Implantatfreilegung durch CO<sub>2</sub>-Laserbeschuss entstehen. Das Implantat wurde mit einem Temperaturfühler im Knochen fixiert und in einem 37°C warmen Wasserbad positioniert. Sie richteten den Laserstrahl senkrecht auf eine die Deckschraube bedeckende Gelatineschicht.

Die Autoren wählten sowohl für die kontinuierliche, als auch für die gepulste Betriebsart (Luxar pulsed modus 7, Pulsdauer 0,02 s) die Leistungen 4, 8 und 15 Watt für 1, 5 und 15 Sekunden Expositionszeit [39 s. 411].

In der kontinuierlichen Betriebsart ergaben lange Expositionszeiten bzw. hohe Leistungen Temperaturerhöhungen außerhalb des tolerablen Bereiches (15 Watt mit 5 Sekunden Expositionszeit, 4, 8 und 15 Watt mit 15 Sekunden Expositionszeit).

Die Werte in der gepulsten Betriebsart fielen insgesamt besser aus, da hier nur die Kombinationen von 15 Sekunden Expositionszeit mit 8 bzw. 15 Watt Temperaturerhöhungen über 10°K erreichten.

Swift et al. empfehlen generell die gepulste Betriebsart zur Implantatfreilegung. Um bei der Implantatfreilegung eine Überhitzung zu vermeiden, sollten auch hier geringe Leistungen (weniger als 8 Watt) und kurze Expositionszeiten (weniger als 15 Sekunden) verwendet werden [33 S. 412].

In der Studie von Oyster (1995) wurde ein erkranktes Implantat simuliert. Sie fixierten einen Temperaturmessfühler von labial, während die Bestrahlung von lingual erfolgte, und einen weiteren Temperaturfühler am apikalen Implantatende.

In der kontinuierlichen Betriebsart wurden Leistungen von 2, 3, und 4 Watt zu einer Bestrahlungsdauer von 2, 4, 6, und 8 Sekunden getestet. Sämtliche Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt [25 S. 1019]. Hier zeigte sich ebenfalls, dass mit den höchsten Leistungen und längsten Expositionszeiten die größten Temperaturanstiege erzielt wurden. Ihr maximaler Wert lag bei 8,53°K ±1,59 bei 4 Watt mit 8 Sekunden Expositionszeit, gemessen an dem labial liegenden Temperaturfühler. Die Temperaturen am apikalen Implantatende waren alle geringer, und betragen bei der in seiner Studie höchsten Einstellung von 4 Watt mit 8 Sekunden Bestrahlung 3,24°K ±1,66 [25 S. 1020].

In der vorliegenden Studie wurde versucht, die Situation eines an Periimplantitis erkrankten Implantates möglichst exakt wiederzugeben.

Deshalb wurde ein Frialit 2-Implantat (D3,8 L11), das in einen Schweineunterkieferknochen implantiert wurde, so in einem 37°C warmen Wasserbad fixiert, dass die Implantat-Knochengrenze gerade nicht mehr von Wasser umspült wurde. Das Handstück mit der Brennweite von 125 mm wurde an das Zusatzgerät Silk Touch™ Flashscanner gekoppelt, und dieses an den CO<sub>2</sub>-Laser angeschlossen. Der flexible Pressluftschlauch des CO<sub>2</sub>-Lasers wurde mit dem Handstück verbunden. Danach wurde es so in der Halterung fixiert, dass der Laserspot das Implantat voll traf, nicht aber den Knochen oder den Temperaturfühler. Der Temperaturfühler wurde kurz unterhalb des Laserauftreffpunktes zwischen Implantat und Knochen angebracht, (vgl. Abb. 6, S. 14).

Zuerst wurde in der kontinuierlichen Laserbetriebsart das Implantat 5 bzw. 10 Sekunden lang bestrahlt. Dabei wurde mit der geringsten möglichen Leistung (1 Watt) begonnen und bis zu der Leistung gesteigert, bei der eine Temperaturerhöhung von 10°K deutlich überschritten wurde. Anschließend bestrahlte man das Implantat für jeweils 5 bzw 10 Sekunden in der Wiederholungspulsbetriebsart mit den möglichen Kombinationen, die aus Relaxationszeit von 0.1s, 0.5s, 0.7s, und 1.0s sowie den Pulsen 0.2s, 0.4s, 0.6s, 0.8s und 1.0s gebildet werden können.

Bei der kontinuierlichen Betriebsart blieb man bei 5 Sekunden Expositionszeit mit 3,5 Watt und bei 10 Sekunden Expositionszeit mit 2 Watt noch unter der kritischen Temperaturerhöhung von 10°K. In Tabelle 3 (S. 18) sind die Ergebnisse aller getesteten Leistungen aufgeführt.

In der gepulseten Betriebsart zeigte sich folgendes:

- ♦ Je länger die Relaxationszeiten und je kürzer die Pulsdauer werden, desto geringer vielen die Temperaturerhöhungen aus (vgl. Tabellen 4a-d (S. 20) und Tabellen 5a-d (S. 21)).
- ♦ Mit zunehmender Leistung wurden die Temperaturerhöhungen innerhalb einer Relaxationszeit/Puls-Kombination größer.

Die Temperaturzunahmen zeigen für die kontinuierliche und die gepulste Betriebsart immer einen linearen Anstieg (vgl. Abb. 7 (S. 19), Abb. 8a-d (S. 25ff) und Abb. 9a-d (S. 27ff)).

Basierend auf den getesteten Kombinationen in der gepulsten Betriebsart, wurde eine Formel entwickelt, die es ermöglicht, für alle am CO<sub>2</sub>-Laser (Sharplan 20C) möglichen Kombinationen von Relaxationszeit und Puls, eine Temperaturerhöhung vorherzusagen. So könnten auch Kombinationen, die nicht empirisch getestet worden sind, zur Periimplantitstherapie eingesetzt werden, ohne dass der Anwender Gefahr läuft, das periimplantäre Gewebe oder das Implantat thermisch zu schädigen.

Für 5 Sekunden Expositionszeit erhält man die Formel

$$f_{ij}(x) = s_{ij} \cdot x - t_{ij} + 2,789^{\circ}K$$

und für 10 Sekunden Expositionszeit

$$f_{ij}(x) = s_{ij} \cdot x - t_{ij} + 1,936^{\circ}K .$$

mit

$f_{ij}(x)$  = zu erwartende Temperaturerhöhung (Relaxationszeit i und Puls j)

$s_{ij}$  = Steigung

$x$  = gewünschte Leistung

$t_{ij}$  = Achsenabschnitt

Die Werte für Steigung und Achsenabschnitt sind bei 5 Sekunden Expositionszeit den Tabellen 21 (S. 43) und 25 (S. 47), bei 10 Sekunden Expositionszeit den Tabellen 22 (S. 44) und 26 (S. 47) zu entnehmen. Setzt man den Wert für die Steigung  $s_{ij}$ , die gewünschte Leistung  $x$  und den Wert für den Achsenabschnitt  $t_{ij}$  in die oben genannten Funktionen ein, erhält man den Wert, um den sich das Implantat wahrscheinlich erwärmen wird.

Durch die Berechnungen haben sich Abweichungen von den Originalwerten ergeben. Zum Schutz des Implantates vor unbeabsichtigter Überhitzung bei der Periimplantitistherapie sollten zu den Temperaturerhöhungen ein Sicherheitsfaktor von  $2,789^{\circ}K$  (bei 5 Sekunden Expositionszeit) bzw.  $1,936^{\circ}K$  (bei 10 Sekunden Expositionszeit) addiert werden.

## 5.2 Verbesserungen und Fehler

Die Studien von Ganz, Swift und Oyster dienten als Vergleich für diese Studie. Dabei wurde versucht, die als positiv zu bewertenden Kernelemente der Versuchsaufbauten in die neue Studie zu integrieren. Dadurch sollte ein für die Periimplantitistherapie möglichst realistischer Versuchsaufbau simuliert werden.

### 5.2.1 Stelle der Laserbestrahlung

Um der Situation eines erkrankten Implantates möglichst gerecht zu werden, wurde im Unterschied zu Swift [33 s. 411] ohne eine das Implantat bedeckende Gelatineschicht, welche die Schleimhaut darstellen sollte, gearbeitet. Wie bei Ganz [10 s. 28] und Oyster war das Implantat dem direkten Laserstrahl ausgesetzt. Jedoch nur Oyster bestrahlte das Implantat, so wie in dieser Studie, am Implantathals [25 s. 1019].

### 5.2.2 Stelle des Messfühlers

Swift brachte an der Implantat-Knochenkontaktstelle, also in der gleichen Lage wie in unserer Studie, den Temperaturfühler, an. Jedoch traf bei ihm der Laserstrahl senkrecht auf die Deckschraube auf [33 s. 411].

Oyster et al., die als einzige ebenfalls den Implantathals bestrahlten, massen die Temperaturerhöhungen zwar ebenfalls auf Höhe des Alveolarknochens, jedoch auf der dem Laserstrahl abgewandeten Seite [25 s. 1019].

Ganz brachte an fünf verschiedenen Punkten Temperaturfühler an und maß an der der Bestrahlung gegenübergelegenen Stelle der Deckschraube die höchsten Temperaturen. An allen anderen Temperaturfühlern fielen die gemessenen Temperaturerhöhungen in seiner Studie geringer aus [10 s. 29].

Aus den Studien von Ganz, Oyster und Swift geht hervor, dass nur die Stelle direkt unterhalb des auftreffenden Laserstrahls die höchsten Temperaturerhöhungen aufweist.

Aus der Vielzahl der möglichen Positionen für den Temperaturfühler, wählten wir die Position, die an der Stelle der höchsten Erwärmung liegt, nämlich an der Implantat-Knochenkontaktstelle direkt unterhalb des auftreffenden Laserstrahls. In keiner der vorliegenden Studien wurde so nahe am Laserstrahl gemessen.

### 5.2.3 Wasserbad

Im Unterschied zu Ganz und Oyster et al. wurde in dieser Studie das Implantat in einem 37°C warmen Wasserbad fixiert. Dies geschah auf

Grund einiger Vorversuche, die zeigten, dass die Temperaturerhöhungen, durch CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung, niedriger ausfielen, wenn das Implantat nicht Raumtemperatur, sondern eine höhere Temperatur, in diesem Falle Mundtemperatur von ca 36°C, aufweist. Oyster et al. beschrieben einen linearen Temperaturanstieg bei der Bestrahlung von Implantaten bei Raumtemperatur und übertrugen dieses Ergebnis auf Mundtemperatur [25 s. 1020]. Dieser Schlussfolgerung konnten wir uns nicht anschließen.

Auch Swift et al. positionierten ihre Implantate in einem 37°C warmen Wasserbad, da so für eine in vitro Studie eine ähnliche Wärmeleitfähigkeit und -diffusion der entstehenden Wärme wie in vivo simuliert werden kann [33 s. 412].

#### 5.2.4 Expositionszeit, Betriebsart und Leistung des CO<sub>2</sub>-Lasers

Im Gegensatz zu den anderen Studien, die nur ein geringes Spektrum der möglichen Einstellungen am CO<sub>2</sub>-Laser betrachteten, wurde in dieser Studie versucht, möglichst viele Kombinationen zu finden, bei der eine Schädigung des Gewebes durch Überhitzung ausgeschlossen werden kann.

Die gewählten Expositionszeiten von 5 und 10 Sekunden erschienen als durchaus ausreichend für eine Behandlung am Implantat. Auch wurden keine fixen Leistungen vorgegeben, wie es in den anderen Studien der Fall war, sondern es wurde immer bis zu der Leistung gesteigert, bei der die Temperaturerhöhung von 10°K überschritten wurde. Somit wäre man in der Lage bei Einstellungen, die geringe Temperaturerhöhungen zur Folge hätten, eine höhere Leistung einzusetzen.

Die Betriebsart „Superpuls“ wurde angesichts der Tatsache weggelassen, dass die von dem Zusatzgerät Silk Touch™ Flashscanner erstellte Figur nur noch punktuell erfasst werden würde. Von einer flächen-deckenden Sterilisation kann dann nicht mehr ausgegangen werden.

#### 5.2.5 Pressluftschlauch des CO<sub>2</sub>-Lasers

Ein nicht zu unterschätzender Faktor in unserer Studie ist der am CO<sub>2</sub>-Laser angebrachte flexible Pressluftschlauch. Durch ihn soll eine Beschädigung der fokussierenden Linse durch Schmauch vermieden werden. Die bei Laserbestrahlung durch den Schlauch ausströmende

Luft bewirkt eine Kühlung des Implantates. Ist ein Gewebe zusätzlich mit Flüssigkeit benetzt, wie in unserer Studie, steigt die Effektivität der Kühlung [27 S. 108].

Zu Beginn der Versuchsreihe wurde getestet, ob die Kühlung einen Einfluss auf die Temperaturzunahmen hat. Gleiche Einstellungen wurden sowohl ohne Kühlung, als auch mit angeschlossenem Pressluftschlauch getestet. Dies soll an Hand eines Beispiels demonstriert werden.

In der kontinuierlichen Betriebsart mit 5 Sekunden Expositionszeit und angeschlossenem Pressluftschlauch erhielt man bei einer Leistung von 1 Watt eine Temperaturerhöhung von 1,3°K. Ohne die Kühlung bekam man bei der gleichen Einstellung eine Temperaturerhöhung von 3,2°K, also 1,9°K (146%) mehr als mit Kühlung. Auch bei einer Leistung von 1,5 Watt war der Wert, der ohne Kühlung erhalten wurde, um 2,1°K höher als der Wert, der mit angeschlossenem Pressluftschlauch erzielt wurde. Bei allen Temperaturerhöhungen in der oben genannten Einstellung, die ohne Kühlung gemessen wurden, zeigte sich ein um ca. 2°K höheres Ergebnis. Ein angeschlossener Pressluftschlauch hat also eindeutig Einfluss auf die gewonnenen Temperaturerhöhungen.

Dieser Effekt wurde auch im gepulsten Modus sichtbar. Bei langen Relaxationszeiten mit kurzer Pulsdauer kam es bei geringen Leistungen nicht zu einer Zunahme der Temperatur, sondern zu einer Abnahme. Die Kühlung war also stärker als der Temperaturanstieg. Dies spiegelt sich in den im Anhang vorliegenden Tabellen der Grunddaten (Tabelle 36a-c, 37a-d, 39a, 40a und b, 41a-e, S. 74-84) wieder, dargestellt durch die negativen Werte.

In keiner der oben genannten Studien wird ein solcher Effekt erwähnt, bzw. eine ähnliche Beobachtung beschrieben. Ein Vergleich der Ergebnisse der Studien wird dadurch erschwert. Es bleibt die Frage offen, ob der Pressluftschlauch in den Studien von Ganz, Swift et al. und Oyster et al. berücksichtigt wurde oder welche Leistung er erbrachte und ob er somit überhaupt Einfluss auf die Ergebnisse nehmen konnte.

#### 5.2.6 Silk Touch™ Flashscanner

In der Dermatologie seit längerem bekannt [5 S. 97, 18 S. 1021], neu aber in der Zahnheilkunde ist die Verwendung des Zusatzgerätes Silk Touch™ Flashscanner. Die durch Mikroprozessoren gesteuerte Silk Touch™ Technologie bestrahlt die Oberfläche mit einem hochfokussierten

Laserstrahl auf einem spiralförmigen Weg. Das in der Größe frei wählbare kreisförmige Gebiet kann dabei einen Durchmesser von 0,9-10 mm besitzen. Die kollabierende Spirale kann also auf die Größe des Implantates angepasst werden. Die Oberfläche wird nun nicht mehr punktuell, sondern flächig bestrahlt und man erzielt so einen homogenen Effekt. Der auf der Oberfläche auftreffende Laserstrahl verweilt jeweils nur für eine Millisekunde an einem Punkt. Die bei der Bestrahlung entstehende Wärme kann so über die Umgebung abfließen.

Die Studien von Ganz, Swift et al. und Oyster et al. beinhalteten keine weiteren Zusatzgeräte. Bei ihnen traf der Laserstrahl das Implantat punktuell. Durch die Verwendung des Silk Touch™ Flashscanners in unserer Studie war es möglich, den Laserstrahl auf einer Fläche mit 2mm Durchmesser zu applizieren. Durch die kollabierende Spirale wird, im Unterschied zu dem nur punktuell auftreffenden Laserstrahl, die Sterilisation einer gesamten Fläche sichergestellt.

### **5.3 Vergleich der Ergebnisse**

Durch die in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich geschilderten Unterschiede in den Versuchsaufbauten der Autoren Ganz, Swift et al. und Oyster et al. im Unterschied zu dem Versuchsaufbau in dieser Studie wird deutlich, dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse nicht möglich ist.

Ganz machte in seiner Studie zusätzlich noch deutlich, dass trotz gleicher Lasereinstellung unterschiedliche Beschichtungen auf den Implantaten zu unterschiedlichen Erwärmungen führen. Er testete ein hydroxyapatit- und ein TPS-beschichtetes Implantat und erhielt an dem TPS-beschichteten Implantat die höheren Werte [10 s. 29]. Swift et al. benutzten hydroxyapatitbeschichtete Implantate. Oyster et al. machten keine Angaben über die Art der Beschichtung des verwendeten Implantates und in dieser Studie wurde ein TPS-beschichtetes Implantat verwendet.

Die vielen Unterschiede im Versuchsaufbau (unterschiedliche Stellen der Messfühler sowie der Stelle an der der Laserstrahl auftritt, das Wasserbad, die Implantatart, der Pressluftschlauch) dürften die Gründe dafür sein, dass die Temperaturerhöhungen in unserer Studie höher waren als die der anderen Studien.

Ganz beschrieb bei der Einstellung 4 Sekunden Expositionszeit in kontinuierlicher Betriebsart bei 4 Watt eine Erhöhung um  $7,8^{\circ}\text{K}$  [10 s. 30].

Swift et al. erhielten bei 5 Sekunden Expositionszeit in kontinuierlicher Betriebsart bei 4 Watt eine Erhöhung um ca  $7^{\circ}\text{K}$  [33 s. 412].

Oyster et al. maßen bei 6 Sekunden Expositionszeit in kontinuierlicher Betriebsart bei 4 Watt eine Erhöhung um  $6,33^{\circ}\text{K}$  [25 s. 1020].

In dieser Studie stellte man bei 5 Sekunden Expositionszeit in kontinuierlicher Betriebsart bei 4 Watt eine Erhöhung um  $11,1^{\circ}\text{K}$  (vgl. Tabelle 3, S.18) fest.

Es wird allgemein akzeptiert, dass Temperaturerhöhungen von mehr als  $10^{\circ}\text{K}$  im Knochen Schäden verursachen [10 s. 28, 16 s. 102, 25 s. 1021, 28 s. 1, 33 s. 410]. Wenn eine Laserbestrahlung erfolgt, sollte der Behandler darauf achten, dass der Knochen nicht über  $47^{\circ}\text{C}$  erhitzt wird. Dies kann durch kurze Expositionszeiten und geringe Leistung erreicht werden. Durch die geringeren Temperaturerhöhungen in der gepulsten Betriebsart ist sie der kontinuierlichen, bei gleicher Leistung, vorzuziehen. Innerhalb der gepulsten Betriebsart lösen die Relaxationszeit/Puls-Kombinationen mit langer Relaxationszeit und kurzem Puls niedrigere Temperaturerhöhungen aus [10 s. 30, 25 s. 1020, 33 s. 414].

## **5.4 Ausblick**

Für den  $\text{CO}_2$ -Laser 20C unter Benützung des Zusatzgerätes Silk Touch™ Flashscanner, beides Geräte der Firma Sharplan Lasers GmbH, wurden die Temperaturerhöhungen am Frialit 2 Implantat bei bestimmten Laserbetriebseinstellungen getestet. Die gewonnenen Daten treffen jedoch nur auf diesen speziellen Versuchsaufbau zu. Die Anwendung der Ergebnisse auf anders beschichteten Implantaten oder  $\text{CO}_2$ -Lasern anderer Firmen sollte mit äußerster Vorsicht geschehen.

Die mathematischen Berechnungen aus Abschnitt 4 sind jedoch ohne weiteres übertragbar. Misst man für den Laser, den man zur Anwendung bringen möchte, einige Relaxationszeit/Puls-Kombinationen, können diese durchaus in die bestehenden Formeln eingesetzt werden. So wäre man in der Lage für den Laser seiner Wahl eine Prognose der zuerwartenden Temperaturerhöhung abzugeben.

## 6 Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit bestand darin, für den CO<sub>2</sub>-Laser 20C der Firma Sharplan in Verbindung mit dem Zusatzgerät Silk Touch™ Flashscanner, die Laserbetriebseinstellungen zu finden, die ein Implantat und sein umgebendes Gewebe nicht über die kritische Temperatur von 47°C erwärmen.

Es wurde versucht, die periimplantäre Situation in einer in vitro Studie möglichst realitätsnah wiederzugeben. Dazu wurde ein Frialit 2 Implantat (D3,8 L11) zusammen mit einem Temperaturfühler in einen Schweineknochen implantiert und in einem 37°C warmen Wasserbad fixiert. Der CO<sub>2</sub>-Laser wurde mit dem Zusatzgerät Silk Touch™ Flashscanner gekoppelt und über das Handstück mit der Brennweite von 125 mm ebenfalls an der Halterung fixiert, um immer den gleichen Abstand und Winkel zum Implantat gewährleisten zu können. Temperaturfühler und CO<sub>2</sub>-Laser waren an einen Computer angeschlossen, über den sowohl die CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung ausgelöst als auch die Temperaturerhöhung gemessen werden konnte.

In der kontinuierlichen Betriebsart testete man die Expositionszeiten 5 und 10 Sekunden. Dabei war bei 5 Sekunden Expositionszeit bei 3,5 Watt Leistung die Temperaturerhöhung erreicht, die gerade noch unter 47°C Gesamttemperatur lag. Bei 10 Sekunden Expositionszeit war die kritische Temperatur schon bei der Leistung von 2 Watt erreicht.

In der gepulsten Betriebsart wurden ausgewählte Relaxationszeit/Puls-Kombinationen getestet. Es wurden alle Kombinationen überprüft, die sich aus den Relaxationszeiten 0.1s, 0.5s, 0.7s, und 1.0s, sowie den Pulsen 0.2s, 0.4s, 0.6s, 0.8s und 1.0s bilden lassen. Außer diesen Relaxationszeiten und Pulsen sind jedoch auch andere möglich. Deshalb sollte eine Formel gefunden werden, die es ermöglicht zu jeder denkbaren Einstellung am CO<sub>2</sub>-Laser, mit frei wählbarer Leistung, eine Prognose über die zu erwartende Temperaturerhöhung am Implantat zu erstellen.

Für 5 Sekunden Expositionszeit erhält man die Formel

$$f_{ij}(x) = s_{ij} \cdot x - t_{ij} + 2,789 \text{ °K}$$

und für 10 Sekunden Expositionszeit die Formel

$$f_{ij}(x) = s_{ij} \cdot x - t_{ij} + 1,936 \text{ °K}$$

mit

$f_{ij}(x)$  = zu erwartende Temperaturerhöhung (Relaxationszeit i und Puls j)

$s_{ij}$  = Steigung

$x$  = gewünschte Leistung

$t_{ij}$  = Achsenabschnitt

Die Werte für Steigung und Achsenabschnitt sind bei 5 Sekunden Expositionszeit den Tabellen 21 (S. 43) und 25 (S. 47), bei 10 Sekunden Laserbestrahlung den Tabellen 22 (S. 44) und 26 (S. 47) zu entnehmen.

Setzt man den Wert für die Steigung  $s_{ij}$ , die gewünschte Leistung  $x$  und den Wert für den Achsenabschnitt  $t_{ij}$  in die obengenannten Funktionen ein, erhält man den Wert (in °K), um den sich das Implantatinterface erwärmen wird.

Durch die Berechnungen (Kapitel 3 und 4) haben sich Abweichungen von den Originalwerten ergeben. Deshalb sollte man zum Schutz des Implantates und des umgebenden Gewebes vor unbeabsichtigter Überhitzung bei der Periimplantitistherapie zu den errechenbaren Temperaturerhöhungen bei 5 Sekunden Expositionszeit 2,789°K, und zu den Werten bei 10 Sekunden Expositionszeit 1,936°K addieren.

Zur Periimplantitistherapie können prinzipiell Laserbetriebseinstellungen mit kurzer Expositionszeit und geringer Leistung empfohlen werden. Da Temperaturerhöhungen bei gleicher Leistung in der gepulsten Betriebsart geringer ausfallen, wäre sie der kontinuierlichen Betriebsart vorzuziehen. Auch der Einsatz des Zusatzgerätes Silk Touch™ Flash-scanner erweist sich als sinnvoll, da der Laserstrahl auf eine größere Fläche verteilt wird, und es so der entstehenden Wärme ermöglicht wird, über das Gewebe abzufließen. Durch die kollabierende Spirale wird, im Unterschied zu dem nur punktuell auftreffenden Laserstrahl, die Sterilisation einer gesamten Fläche sichergestellt.

Die Effektivität dieser Art der Periimplantitistherapie wurde an Hand einer tierexperimentellen Studie von PD Dr. H. Deppe untersucht.

Er unterteilte die Versuchstiere in drei Gruppen. Gruppe 1 wurde konventionell mit einem Pulver-Wasserstrahlgerät behandelt, während in Gruppe 2 eine rein lasergestützte Dekontamination erfolgte. In Gruppe 3 wurde eine Kombination aus Pulver-Wasserstrahlgerät und Laserdekontamination durchgeführt. In keiner Gruppe wurden Antibiotika verabreicht.

Die radiologische und histometrische Auswertung zeigte bei beiden lasergestützten Verfahren eine statistisch signifikant größere Knochenreapposition (0,8 mm bzw. 1 mm) als nach konventioneller Therapie (0,4 mm). Der periimplantäre Knochen der lasertherapierten Implantate zeigte zum Untersuchungszeitpunkt vier Monate post operationem in keinem Fall Zeichen einer thermischen Schädigung.

Aufgrund der experimentellen Ergebnisse scheint die laserassistierte Implantatbehandlung durchaus erfolgreicher zu sein als konventionelle Verfahren. Zur Unterstützung dieser Ergebnisse sollten sich klinische Studien anschließen.

# 7 Anhang

## 7.1 Arithmetischer Mittelwert der Temperaturerhöhung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Einstellungen am CO<sub>2</sub>-Laser überprüft. Die einzelnen Temperaturerhöhungen am Implantatinterface, ausgelöst durch die Laserbestrahlung, seien im Folgenden dargestellt.

T<sub>1</sub>, T<sub>3</sub> und T<sub>5</sub> geben die Ausgangstemperatur an, T<sub>2</sub>, T<sub>4</sub> und T<sub>6</sub> die Temperatur nach Laserbestrahlung von 5 oder 10 Sekunden. Die Maßeinheit für T<sub>1</sub>–T<sub>6</sub> ist °C.

Ø T bezeichnet den arithmetischen Mittelwert der Temperaturerhöhungen aus drei Messungen. Die Ø Temperaturerhöhungen, gewonnen aus der ersten, zweiten und dritten Messung, nehmen mit zunehmender Leistung immer höhere Werte an (Tabellen 33a bis 41e). Da sich Differenzen bei °C und °K nicht unterscheiden, werden sie im Folgenden als °K gehandhabt.

### continuous wave in kontinuierlicher Betriebsart

#### 5 Sekunden Expositionszeit

(T<sub>1-6</sub> in °C, ØT in °K)

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> -T <sub>5</sub>	
1	35,7	36,7	1,0	35,2	36,7	1,5	35,0	36,4	1,4	1,30
1,5	35,3	38,0	2,7	35,3	38,1	2,8	35,3	37,9	2,6	2,70
2	35,0	39,2	4,2	35,4	39,5	4,1	35,1	39,1	4,0	4,10
2,5	35,3	40,8	5,5	35,3	40,9	5,6	35,2	41,3	6,1	5,73
3	34,7	42,5	7,8	34,8	42,7	7,9	35,0	43,0	8,0	7,90
3,5	35,5	44,7	9,2	35,5	44,7	9,2	35,4	44,7	9,3	9,23
4	35,3	46,4	11,1	35,4	46,5	11,1	35,7	46,8	11,1	11,10
4,5	35,7	48,0	12,3	35,4	48,1	12,7	35,4	47,6	12,2	12,40
5										
5,5										
6										
6,5										
7	35,0	53,9	18,9	35,2	54,8	19,6	35,8	55,1	19,3	19,27

Tabelle 33a: Bildung des arithmetischen Mittels; continuous wave-Modus bei kontinuierlicher Bestrahlungsart (5s Expositionszeit)

#### 10 Sekunden Expositionszeit

(T<sub>1-6</sub> in °C, ØT in °K)

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> -T <sub>5</sub>	
1	34,0	36,9	2,9	34,0	36,6	2,6	34,0	36,9	2,9	2,80
1,5	33,8	39,2	5,4	34,6	39,6	5,0	34,0	39	5,0	5,13
2	34,1	41,9	7,8	33,4	41,5	8,1	33,9	41,7	7,8	7,90
2,5	35,9	45,9	10,0	35,5	45,8	10,3	35,6	45,7	10,1	10,13
3	34,5	48,2	13,7	35,4	48,5	13,1	35,5	48,4	12,9	13,23
3,5										
4	35,9	52,9	17,0	36,2	53	16,8	35,7	52,9	17,2	17,00

Tabelle 33b: Bildung des arithmetischen Mittels; continuous wave-Modus bei kontinuierlicher Bestrahlungsart (10s Expositionszeit)

# Relaxationszeit 0.1s

Betrieb: CW Art: WHP Zeit: 5 Sekunden  $T_{1-6}$  in °C,  $\varnothing T$  in °K

## Puls 0.2s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\varnothing T$
	$T_1$	$T_2$	$T_2-T_1$	$T_3$	$T_4$	$T_4-T_3$	$T_5$	$T_6$	$T_6-T_5$	
1	33,6	34,3	0,7	33,4	34,1	0,7	33,3	34,1	0,8	0,73
1,5	33,5	35,1	1,6	33,7	35,4	1,7	33,6	35,3	1,7	1,67
2	33,7	36,4	2,7	33,8	36,6	2,8	33,9	36,6	2,7	2,73
2,5	33,8	37,8	4,0	34,3	38,0	3,7	33,9	37,8	3,9	3,87
3	33,8	39,2	5,4	33,9	39,3	5,4	33,8	39,2	5,4	5,40
3,5	33,7	39,9	6,2	33,8	40,0	6,2	33,9	39,9	6,0	6,13
4	33,7	41,1	7,4	34,0	41,2	7,2	33,8	40,9	7,1	7,23
4,5	33,0	41,4	8,4	33,5	42,0	8,5	34,4	42,2	7,8	8,23
5	33,9	42,7	8,8	33,6	42,5	8,9	34,1	42,9	8,8	8,83
5,5	34,1	44,6	10,5	33,6	44,0	10,4	33,5	43,8	10,3	10,40
6	36,6	47,7	11,1	36,3	47,6	11,3	36,7	48,1	11,4	11,27
6,5										
7	36,4	49,7	13,3	37,2	50,0	12,8	36,5	49,8	13,3	13,13
7,5										
8	34,9	49,1	14,2	36,1	50,2	14,1	36,6	50,6	14,0	14,10

Tabelle 34a: Bildung des arithmetischen Mittels; continuous wave-Modus im WHP, Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.2s mit 5s Expositionszeit

## Puls 0.4s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\varnothing T$
	$T_1$	$T_2$	$T_2-T_1$	$T_3$	$T_4$	$T_4-T_3$	$T_5$	$T_6$	$T_6-T_5$	
1	33,8	34,9	1,1	33,7	34,8	1,1	33,9	35,0	1,1	1,10
1,5	36,5	38,5	2,0	36,5	38,5	2,0	36,3	38,2	1,9	1,97
2	36,5	39,8	3,3	36,5	39,8	3,3	36,3	39,8	3,5	3,37
2,5	36,5	41,0	4,5	36,3	41,0	4,7	36,2	41,0	4,8	4,67
3	36,2	42,5	6,3	36,3	42,5	6,2	35,9	42,2	6,3	6,27
3,5	35,8	43,2	7,4	36,1	42,9	6,8	35,7	42,7	7,0	7,07
4	35,7	44,3	8,6	35,3	44,2	8,9	35,5	44,2	8,7	8,73
4,5	35,2	45,0	9,8	35,6	45,5	9,9	35,5	45,4	9,9	9,87
5	35,7	46,2	10,5	35,4	46,0	10,6	35,4	46,1	10,7	10,60
5,5										
6	36,0	49,1	13,1	35,8	48,8	13,0	35,7	48,8	13,1	13,07
6,5										
7	35,8	51,2	15,4	35,7	51,2	15,5	35,7	51,4	15,7	15,53
7,5										

Tabelle 34b: Bildung des arithmetischen Mittels; continuous wave-Modus im WHP, Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.4s mit 5s Expositionszeit

## Puls 0.6s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\varnothing T$
	$T_1$	$T_2$	$T_2-T_1$	$T_3$	$T_4$	$T_4-T_3$	$T_5$	$T_6$	$T_6-T_5$	
1	37,2	38,0	0,8	36,8	37,7	0,9	36,4	37,5	1,1	0,93
1,5	36,4	38,9	2,5	36,4	38,8	2,4	36,3	38,9	2,6	2,50
2	35,6	39,5	3,9	36,0	39,9	3,9	35,8	39,5	3,7	3,83
2,5	35,3	40,2	4,9	35,7	40,6	4,9	35,7	40,5	4,8	4,87
3	35,2	41,1	5,9	35,9	41,6	5,7	35,1	41,0	5,9	5,83
3,5	35,6	43,1	7,5	35,8	43,4	7,6	35,4	43,2	7,8	7,63
4	35,4	43,8	8,4	35,7	44,0	8,3	35,4	43,8	8,4	8,37
4,5	36,2	45,2	9,0	36,5	45,6	9,1	36,0	45,0	9,0	9,03
5	36,5	47,8	11,3	36,2	47,8	11,6	36,3	47,8	11,5	11,47
5,5	36,2	49,3	13,1	36,7	49,7	13,0	36,4	49,5	13,1	13,07
6										
6,5										
7	36,5	53,1	16,6	36,3	53,3	17,0	36,3	53,2	16,9	16,83

Tabelle 34c: Bildung des arithmetischen Mittels; continuous wave-Modus im WHP, Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.6s mit 5s Expositionszeit

## Puls 0.8s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\varnothing T$
	$T_1$	$T_2$	$T_2-T_1$	$T_3$	$T_4$	$T_4-T_3$	$T_5$	$T_6$	$T_6-T_5$	
1	33,5	35,1	1,6	33,9	35,6	1,7	33,6	35,1	1,5	1,60
1,5	33,6	36,5	2,9	33,9	36,7	2,8	34,2	37,0	2,8	2,83
2	34,3	38,4	4,1	34,5	38,7	4,2	34,3	38,3	4,0	4,10
2,5	34,7	40,0	5,3	34,5	40,0	5,5	34,6	39,9	5,3	5,37
3	34,1	41,1	7,0	34,6	41,3	6,7	34,1	41,0	6,9	6,87
3,5	34,4	42,7	8,3	34,2	42,8	8,6	34,1	42,6	8,5	8,47
4	34,0	44,2	10,2	34,6	44,1	9,5	34,3	43,9	9,6	9,77
4,5	33,6	45,0	11,4	34,4	45,6	11,2	33,6	44,9	11,3	11,30
5										
5,5										
6	34,7	49,6	14,9	34,2	49,1	14,9	34,1	49,2	15,1	14,97
6,5										

Tabelle 34d: Bildung des arithmetischen Mittels; continuous wave-Modus im WHP, Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.8s mit 5s Expositionszeit



### Puls 0.6s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	33,7	34,8	1,1	33,7	35,0	1,3	33,8	35,0	1,2	1,20
1,5	36,5	38,7	2,2	36,1	38,4	2,3	35,6	37,8	2,2	2,23
2	35,2	39,1	3,9	35,9	39,3	3,4	35,4	39,0	3,6	3,63
2,5	34,6	39,8	5,2	35,5	40,5	5,0	35,6	40,6	5,0	5,07
3	35,3	41,9	6,6	35,6	42,0	6,4	35,4	41,9	6,5	6,50
3,5	35,4	42,6	7,2	35,4	42,5	7,1	35,0	42,2	7,2	7,17
4	35,0	43,7	8,7	35,4	43,8	8,4	35,2	43,7	8,5	8,53
4,5	34,9	44,6	9,7	34,6	44,4	9,8	34,8	44,5	9,7	9,73
5	34,9	45,3	10,4	35,4	45,6	10,2	35,1	45,5	10,4	10,33
5,5										
6	34,6	47,7	13,1	35,7	48,2	12,5	35,6	47,9	12,3	12,63

Tabelle 35c: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.5s/0.6s  
mit 5s Expositionszeit

### Puls 0.8s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	36,4	37,8	1,4	36,0	37,3	1,3	35,6	36,9	1,3	1,33
1,5	35,2	38,1	2,9	35,3	38,3	3,0	35,5	38,2	2,7	2,87
2	35,3	39,6	4,3	35,7	39,7	4,0	35,6	39,8	4,2	4,17
2,5	35,5	40,9	5,4	35,5	41,1	5,6	35,7	41,0	5,3	5,43
3	34,8	42,1	7,3	35,5	42,7	7,2	35,4	42,7	7,3	7,27
3,5	35,5	43,9	8,4	35,1	43,3	8,2	35,2	43,2	8,0	8,20
4	34,8	44,3	9,5	35,0	44,4	9,4	35,0	44,3	9,3	9,40
4,5	35,1	45,3	10,2	34,8	45,0	10,2	35,0	45,2	10,2	10,20
5	35,2	46,2	11,0	35,7	46,5	10,8	35,5	46,5	11,0	10,93
5,5										
6	34,4	48,8	14,4	35,3	49,4	14,1	35,1	49,5	14,4	14,30

Tabelle 35d: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.5s/0.8s  
mit 5s Expositionszeit

### Puls 1.0s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,7	36,7	1,0	34,6	35,9	1,3	34,6	35,9	1,3	1,20
1,5	34,5	37,1	2,6	34,7	37,3	2,6	34,7	37,3	2,6	2,60
2	34,6	38,7	4,1	35,1	38,9	3,8	34,9	38,8	3,9	3,93
2,5	34,9	40,1	5,2	34,8	40,2	5,4	35,0	40,4	5,4	5,33
3	34,9	41,7	6,8	35,2	41,6	6,4	34,7	41,3	6,6	6,60
3,5	34,8	42,7	7,9	34,8	42,3	7,5	34,6	42,3	7,7	7,70
4	34,7	43,6	8,9	34,6	43,5	8,9	35,2	43,9	8,7	8,83
4,5	34,5	44,5	10,0	34,7	44,7	10,0	33,9	44,1	10,2	10,07
5	34,1	45,5	11,4	35,2	46,6	11,4	34,9	46,2	11,3	11,37
5,5										
6	34,9	48,8	13,9	35,7	48,9	13,2	34,8	48,7	13,9	13,67

Tabelle 35e: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.5s/0.6s  
mit 5s Expositionszeit



### Puls 0.6s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	34,4	34,5	0,1	34,5	34,4	-0,1	34,1	34,0	-0,1	<b>-0,03</b>
1,5	34,2	34,8	0,6	34,3	35,2	0,9	34,5	35,2	0,7	<b>0,73</b>
2	34,2	35,7	1,5	34,6	35,9	1,3	34,3	35,8	1,5	<b>1,43</b>
2,5	34,4	36,3	1,9	34,6	36,5	1,9	34,6	36,7	2,1	<b>1,97</b>
3	34,2	37,1	2,9	34,8	37,4	2,6	34,7	37,4	2,7	<b>2,73</b>
3,5	34,3	37,8	3,5	34,6	38,0	3,4	34,7	38,1	3,4	<b>3,43</b>
4	34,5	38,6	4,1	34,7	38,7	4,0	34,9	38,8	3,9	<b>4,00</b>
4,5	34,5	39,3	4,8	34,9	39,6	4,7	34,6	39,4	4,8	<b>4,77</b>
5	34,5	39,9	5,4	34,9	40,1	5,2	35,0	40,3	5,3	<b>5,30</b>
5,5	34,8	41,0	6,2	35,3	41,3	6,0	34,6	40,9	6,3	<b>6,17</b>
6	34,5	41,3	6,8	34,7	41,4	6,7	34,8	41,6	6,8	<b>6,77</b>
6,5	34,3	42,2	7,9	34,7	42,5	7,8	34,6	42,4	7,8	<b>7,83</b>
7	34,3	42,7	8,4	34,6	42,9	8,3	34,4	42,7	8,3	<b>8,33</b>
7,5	34,2	43,3	9,1	34,2	43,4	9,2	34,8	43,9	9,1	<b>9,13</b>
8	34,5	44,3	9,8	34,7	44,5	9,8	34,3	44,1	9,8	<b>9,80</b>
8,5	34,4	44,8	10,4	34,3	44,8	10,5	34,8	45,0	10,2	<b>10,37</b>
9	35,4	46,1	10,7	35,8	46,3	10,5	35,8	46,3	10,5	<b>10,57</b>
9,5										
10	35,7	48,2	12,5	35,9	48,2	12,3	35,7	48,1	12,4	<b>12,40</b>

Tabelle 36c: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.6s  
mit 5s Expositionszeit

### Puls 0.8s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	34,0	34,1	0,1	35,1	35,2	0,1	34,5	34,6	0,1	<b>0,10</b>
1,5	34,6	35,2	0,6	34,4	35,2	0,8	34,3	35,0	0,7	<b>0,70</b>
2	34,2	36,1	1,9	34,8	36,0	1,2	34,6	35,9	1,3	<b>1,47</b>
2,5	34,4	37,0	2,6	34,7	37,0	2,3	34,7	36,8	2,1	<b>2,33</b>
3	34,6	37,8	3,2	34,9	37,8	2,9	34,7	37,5	2,8	<b>2,97</b>
3,5	34,8	38,9	4,1	34,7	38,7	4,0	34,9	38,7	3,8	<b>3,97</b>
4	34,6	39,5	4,9	34,5	39,1	4,6	34,7	39,6	4,9	<b>4,80</b>
4,5	34,5	39,6	5,1	34,6	39,4	4,8	34,7	39,9	5,2	<b>5,03</b>
5	34,5	41,0	6,5	34,6	40,6	6,0	34,4	40,6	6,2	<b>6,23</b>
5,5	34,4	41,2	6,8	34,5	41,2	6,7	34,8	41,3	6,5	<b>6,67</b>
6	35,7	43,0	7,3	35,9	43,4	7,5	35,8	42,9	7,1	<b>7,30</b>
6,5	35,6	43,5	7,9	35,7	43,4	7,7	35,7	43,3	7,6	<b>7,73</b>
7	35,8	44,3	8,5	35,7	44,8	9,1	35,6	44,1	8,5	<b>8,70</b>
7,5	35,7	45,4	9,7	35,6	45,2	9,6	35,5	45,4	9,9	<b>9,73</b>
8	35,5	46,1	10,6	34,8	45,2	10,4	35,5	46,3	10,8	<b>10,60</b>
8,5	35,2	46,5	11,3	35,2	46,4	11,2	35,3	46,9	11,6	<b>11,37</b>
9	35,1	47,0	11,9	35,2	47,0	11,8	35,5	47,9	12,4	<b>12,03</b>

Tabelle 36d: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.8s  
mit 5s Expositionszeit

### Puls 1.0s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	34,1	34,3	0,2	34,2	34,4	0,2	34,1	34,4	0,3	<b>0,23</b>
1,5	34,3	35,4	1,1	34,1	35,2	1,1	34,4	35,5	1,1	<b>1,10</b>
2	34,1	36,2	2,1	34,2	36,3	2,1	34,1	36,3	2,2	<b>2,13</b>
2,5	34,0	36,8	2,8	34,0	36,8	2,8	34,1	37,1	3,0	<b>2,87</b>
3	34,6	38,2	3,6	34,6	38,1	3,5	34,5	38,0	3,5	<b>3,53</b>
3,5	34,3	38,7	4,4	34,6	39,0	4,4	34,9	39,0	4,1	<b>4,30</b>
4	34,4	39,6	5,2	34,5	39,6	5,1	34,4	39,5	5,1	<b>5,13</b>
4,5	34,3	40,4	6,1	34,6	40,6	6,0	34,6	40,5	5,9	<b>6,00</b>
5	34,6	41,5	6,9	34,7	41,4	6,7	34,5	41,4	6,9	<b>6,83</b>
5,5	34,4	41,9	7,5	34,6	42,1	7,5	34,4	42,0	7,6	<b>7,53</b>
6	34,5	42,9	8,4	34,8	43,2	8,4	34,6	43,1	8,5	<b>8,43</b>
6,5	34,4	43,8	9,4	34,2	43,5	9,3	34,1	43,5	9,4	<b>9,37</b>
7	36,0	46,1	10,1	35,8	46,3	10,5	35,8	46,1	10,3	<b>10,30</b>
7,5	35,7	46,7	11,0	35,8	46,8	11,0	35,7	46,6	10,9	<b>10,97</b>
8	35,8	48,1	12,3	35,7	48,0	12,3	35,7	47,9	12,2	<b>12,27</b>

Tabelle 36e: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.7s/1.0s  
mit 5s Expositionszeit



Puls 0.6s

Puls 0.8s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,1	33,9	-1,2	34,6	34,2	-0,4	34,8	34,4	-0,4	<b>-0,67</b>
1,5	34,2	35,4	1,2	34,0	35,2	1,2	34,0	35,1	1,1	<b>1,17</b>
2	33,9	35,8	1,9	34,0	36,2	2,2	34,5	36,3	1,8	<b>1,97</b>
2,5	34,2	37,0	2,8	34,3	37,2	2,9	34,3	37,1	2,8	<b>2,83</b>
3	34,1	37,7	3,6	34,6	38,0	3,4	34,6	38,1	3,5	<b>3,50</b>
3,5	34,6	39,0	4,4	34,4	38,7	4,3	34,9	39,0	4,1	<b>4,27</b>
4	34,5	39,3	4,8	34,5	39,2	4,7	34,6	39,3	4,7	<b>4,73</b>
4,5	34,5	39,8	5,3	34,4	39,8	5,4	34,2	39,6	5,4	<b>5,37</b>
5	34,2	40,3	6,1	34,8	40,7	5,9	34,2	40,3	6,1	<b>6,03</b>
5,5	34,3	41,1	6,8	34,4	41,2	6,8	34,3	41,1	6,8	<b>6,80</b>
6	34,1	41,9	7,8	34,4	42,1	7,7	34,2	42,0	7,8	<b>7,77</b>
6,5	34,1	42,6	8,5	34,2	42,6	8,4	34,1	42,6	8,5	<b>8,47</b>
7	35,7	44,7	9,0	36,1	45,3	9,2	36,1	45,1	9,0	<b>9,07</b>
7,5	36,0	45,8	9,8	36,0	46,0	10,0	35,9	45,8	9,9	<b>9,90</b>
8	35,9	46,6	10,7	35,9	46,5	10,6	35,5	46,2	10,7	<b>10,67</b>
8,5	35,5	46,9	11,4	36,5	47,7	11,2	35,0	46,5	11,5	<b>11,37</b>
9	35,6	47,5	11,9	35,7	47,5	11,8	35,6	47,5	11,9	<b>11,87</b>

Tabelle 37c: Bildung des arithmetischen Mittels; continuous wave-Modus im WHP, Relaxationszeit/Puls 1.0s/0.6s mit 5s Expositionszeit

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	36,1	36,0	-0,1	35,6	35,1	-0,5	35,3	34,6	-0,7	<b>-0,43</b>
1,5	34,2	36,2	2,0	34,3	36,1	1,8	34,3	36,2	1,9	<b>1,90</b>
2	34,3	37,3	3,0	34,7	37,6	2,9	34,4	37,3	2,9	<b>2,93</b>
2,5	34,5	38,3	3,8	35,1	38,7	3,6	35,0	38,7	3,7	<b>3,70</b>
3	34,7	39,7	5,0	35,6	40,1	4,5	35,0	39,9	4,9	<b>4,80</b>
3,5	34,7	41,0	6,3	35,4	41,3	5,9	35,2	41,1	5,9	<b>6,03</b>
4	35,2	41,9	6,7	35,0	41,7	6,7	34,7	41,3	6,6	<b>6,67</b>
4,5	34,4	41,9	7,5	34,8	42,3	7,5	34,8	42,2	7,4	<b>7,47</b>
5	34,9	43,2	8,3	35,0	43,2	8,2	34,8	43,0	8,2	<b>8,23</b>
5,5	34,8	43,9	9,1	33,6	43,0	9,4	34,8	43,9	9,1	<b>9,20</b>
6	34,6	44,7	10,1	34,8	45,0	10,2	34,3	44,6	10,3	<b>10,20</b>
6,5	34,6	45,8	11,2	34,8	45,9	11,1	34,9	45,9	11,0	<b>11,10</b>

Tabelle 37d: Bildung des arithmetischen Mittels; continuous wave-Modus im WHP, Relaxationszeit/Puls 1.0s/0.8s mit 5s Expositionszeit

Puls 1.0s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,9	35,3	-0,6	35,9	35,4	-0,5	35,9	35,4	-0,5	<b>-0,53</b>
1,5	35,7	36,8	1,1	35,7	36,6	0,9	35,6	36,5	0,9	<b>0,97</b>
2	35,6	37,6	2,0	35,8	37,7	1,9	35,9	37,7	1,8	<b>1,90</b>
2,5	35,7	38,4	2,7	36,0	38,7	2,7	35,8	38,6	2,8	<b>2,73</b>
3	35,8	39,4	3,6	35,6	39,1	3,5	35,8	39,3	3,5	<b>3,53</b>
3,5	35,4	39,8	4,4	35,8	39,9	4,1	35,7	40,0	4,3	<b>4,27</b>
4	35,6	40,8	5,2	35,5	40,6	5,1	35,4	40,7	5,3	<b>5,20</b>
4,5	35,5	41,3	5,8	35,6	41,6	6,0	35,6	41,5	5,9	<b>5,90</b>
5	35,3	42,5	7,2	35,2	42,5	7,3	35,6	42,7	7,1	<b>7,20</b>
5,5	34,8	43,5	8,7	34,4	43,5	9,1	35,3	44,0	8,7	<b>8,83</b>
6	35,0	44,2	9,2	35,4	44,6	9,2	35,6	44,5	8,9	<b>9,10</b>
6,5	34,9	45,0	10,1	35,5	45,5	10,0	35,2	45,0	9,8	<b>9,97</b>
7	35,2	46,7	11,5	35,2	46,5	11,3	35,4	46,7	11,3	<b>11,37</b>
7,5										
8	35,6	48,5	12,9	35,3	48,6	13,3	35,7	48,4	12,7	<b>12,97</b>

Tabelle 37e: Bildung des arithmetischen Mittels; continuous wave-Modus im WHP, Relaxationszeit/Puls 1.0s/1.0s mit 5s Expositionszeit

## Relaxationszeit 0.1s

Betrieb: CW Art: WHP Zeit: 10 Sekunden  $T_{1-6}$  in °C,  $\bar{\theta T}$  in °K

### Puls 0.2s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\bar{\theta T}$
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
<b>1</b>	34,0	34,5	0,5	34,0	34,7	0,7	34,1	35,1	1,0	<b>0,73</b>
<b>1,5</b>	34,0	36,3	2,3	34,3	36,3	2,0	34,3	36,2	1,9	<b>2,07</b>
<b>2</b>	34,2	37,7	3,5	34,6	38,1	3,5	35,0	38,1	3,1	<b>3,37</b>
<b>2,5</b>	34,6	39,3	4,7	34,9	39,3	4,4	34,6	39,1	4,5	<b>4,53</b>
<b>3</b>	34,7	41,0	6,3	34,5	40,8	6,3	34,8	40,8	6,0	<b>6,20</b>
<b>3,5</b>	34,7	42,4	7,7	34,7	42,2	7,5	35,3	42,5	7,2	<b>7,47</b>
<b>4</b>	34,4	43,4	9,0	35,3	43,9	8,6	34,7	43,5	8,8	<b>8,80</b>
<b>4,5</b>	34,7	44,9	10,2	35,2	44,9	9,7	35,2	44,9	9,7	<b>9,87</b>
<b>5</b>	34,6	46,0	11,4	34,8	46,2	11,4	34,7	46,2	11,5	<b>11,43</b>
<b>5,5</b>	34,6	47,8	13,2	35,1	48,0	12,9	35,0	48,0	13,0	<b>13,03</b>

Tabelle 38a: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.2s  
mit 10s Expositionszeit

### Puls 0.4s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\bar{\theta T}$
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
<b>1</b>	34,7	36,0	1,3	34,7	36,3	1,6	34,8	36,2	1,4	<b>1,43</b>
<b>1,5</b>	34,8	38,0	3,2	35,5	38,3	2,8	35,1	38,2	3,1	<b>3,03</b>
<b>2</b>	35,2	40,0	4,8	35,8	40,3	4,5	35,2	39,9	4,7	<b>4,67</b>
<b>2,5</b>	35,7	41,3	5,6	35,4	41,5	6,1	35,4	41,4	6,0	<b>5,90</b>
<b>3</b>	35,7	43,4	7,7	35,8	43,5	7,7	35,8	43,1	7,3	<b>7,57</b>
<b>3,5</b>	35,7	44,9	9,2	35,6	44,8	9,2	35,5	44,8	9,3	<b>9,23</b>
<b>4</b>	35,4	46,3	10,9	35,4	46,4	11,0	35,1	46,1	11,0	<b>10,97</b>
<b>4,5</b>	35,4	47,4	12,0	34,8	47,2	12,4	35,5	47,6	12,1	<b>12,17</b>

Tabelle 38b: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.4s  
mit 10s Expositionszeit

### Puls 0.6s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\bar{\theta T}$
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
<b>1</b>	35,9	36,9	1,0	35,3	36,6	1,3	35,3	36,5	1,2	<b>1,17</b>
<b>1,5</b>	34,8	38,2	3,4	34,9	37,9	3,0	34,9	37,6	2,7	<b>3,03</b>
<b>2</b>	34,6	39,5	4,9	35,6	40,2	4,6	35,6	39,7	4,1	<b>4,53</b>
<b>2,5</b>	35,5	41,7	6,2	35,5	41,5	6,0	34,7	40,8	6,1	<b>6,10</b>
<b>3</b>	34,9	42,8	7,9	35,6	43,4	7,8	35,5	43,2	7,7	<b>7,80</b>
<b>3,5</b>	35,4	44,7	9,3	35,3	44,6	9,3	35,7	44,7	9,0	<b>9,20</b>
<b>4</b>	35,3	46,1	10,8	35,3	46,2	10,9	35,4	46,2	10,8	<b>10,83</b>
<b>4,5</b>	35,7	47,7	12,0	35,8	47,9	12,1	35,5	47,7	12,2	<b>12,10</b>

Tabelle 38c: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.6s  
mit 10s Expositionszeit

### Puls 0.8s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\bar{\theta T}$
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
<b>1</b>	35,8	36,9	1,1	34,9	36,2	1,3	34,8	36,4	1,6	<b>1,33</b>
<b>1,5</b>	34,8	38,0	3,2	35,1	38,3	3,2	35,0	38,1	3,1	<b>3,17</b>
<b>2</b>	34,6	39,9	5,3	35,4	40,4	5,0	35,2	40,4	5,2	<b>5,17</b>
<b>2,5</b>	35,5	42,6	7,1	35,6	42,7	7,1	35,6	43,0	7,4	<b>7,20</b>
<b>3</b>	34,9	43,5	8,6	35,4	43,8	8,4	35,1	43,7	8,6	<b>8,53</b>
<b>3,5</b>	35,1	45,4	10,3	35,6	45,5	9,9	35,8	45,7	9,9	<b>10,03</b>
<b>4</b>	34,9	47,0	12,1	35,4	47,2	11,8	35,5	47,3	11,8	<b>11,90</b>

Tabelle 38d: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.1s/0.8s  
mit 10s Expositionszeit



### Puls 0.6s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,9	36,5	0,6	35,8	36,6	0,8	35,5	36,3	0,8	<b>0,73</b>
1,5	35,4	37,6	2,2	35,5	37,5	2,0	35,3	37,5	2,2	<b>2,13</b>
2	35,3	38,9	3,6	35,2	38,9	3,7	35,6	39,1	3,5	<b>3,60</b>
2,5	35,1	40,5	5,4	35,5	40,6	5,1	35,3	40,5	5,2	<b>5,23</b>
3	35,5	41,9	6,4	34,9	41,5	6,6	34,8	41,4	6,6	<b>6,53</b>
3,5	34,8	43,3	8,5	35,5	43,7	8,2	35,4	43,9	8,5	<b>8,40</b>
4	35,3	44,9	9,6	35,7	45,0	9,3	34,7	44,4	9,7	<b>9,53</b>
4,5	34,8	45,9	11,1	35,0	45,8	10,8	35,6	46,2	10,6	<b>10,83</b>
5	35,3	47,7	12,4	35,5	47,8	12,3	35,4	47,8	12,4	<b>12,37</b>

Tabelle 39c: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.5s/0.6s  
mit 10s Expositionszeit

### Puls 0.8s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,9	36,8	0,9	35,4	36,6	1,2	35,0	36,2	1,2	<b>1,10</b>
1,5	34,6	37,7	3,1	35,0	37,9	2,9	34,9	37,8	2,9	<b>2,97</b>
2	34,6	39,5	4,9	35,4	39,9	4,5	35,7	40,0	4,3	<b>4,57</b>
2,5	35,2	41,0	5,8	35,5	41,2	5,7	35,2	41,1	5,9	<b>5,80</b>
3	35,5	43,2	7,7	34,7	42,6	7,9	35,6	42,7	7,1	<b>7,57</b>
3,5	35,7	45,3	9,6	35,2	45,0	9,8	35,7	45,0	9,3	<b>9,57</b>
4	35,6	46,2	10,6	35,7	46,2	10,5	35,5	46,1	10,6	<b>10,57</b>
4,5	35,3	47,7	12,4	35,6	47,8	12,2	34,3	47,2	12,9	<b>12,50</b>
5										

Tabelle 39d: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.5s/0.8s  
mit 10s Expositionszeit

### Puls 1.0s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,7	36,7	1,0	34,9	36,1	1,2	34,4	35,5	1,1	<b>1,10</b>
1,5	34,0	37,2	3,2	34,6	37,4	2,8	34,6	37,4	2,8	<b>2,93</b>
2	34,8	40,2	5,4	35,7	40,6	4,9	35,8	40,5	4,7	<b>5,00</b>
2,5	35,8	42,1	6,3	35,8	42,1	6,3	35,5	42,0	6,5	<b>6,37</b>
3	35,3	44,1	8,8	35,7	44,3	8,6	35,7	44,0	8,3	<b>8,57</b>
3,5	35,9	45,5	9,6	35,7	45,4	9,7	35,8	45,5	9,7	<b>9,67</b>
4	35,8	47,8	12,0	35,6	47,6	12,0	35,8	47,5	11,7	<b>11,90</b>

Tabelle 39e: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.5s/1.0s  
mit 10s Expositionszeit

## Relaxationszeit 0.7s

Betrieb: CW Art: WHP Zeit: 10 Sekunden  $T_{1-6}$  in °C,  $\bar{\Delta}T$  in °K

### Puls 0.2s

### Puls 0.4s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\bar{\Delta}T$
	$T_1$	$T_2$	$T_2 - T_1$	$T_3$	$T_4$	$T_4 - T_3$	$T_5$	$T_6$	$T_6 - T_5$	
1	35,9	34,9	-1,0	35,6	34,6	-1,0	35,3	34,5	-0,8	<b>-0,93</b>
1,5	35,2	34,7	-0,5	34,7	34,4	-0,3	34,4	34,2	-0,2	<b>-0,33</b>
2	34,4	34,8	0,4	34,3	34,8	0,5	34,4	34,8	0,4	<b>0,43</b>
2,5	34,6	35,4	0,8	34,8	35,7	0,9	34,7	35,6	0,9	<b>0,87</b>
3	34,6	36,6	2,0	34,9	36,6	1,7	35,1	36,8	1,7	<b>1,80</b>
3,5	34,6	36,9	2,3	35,0	37,0	2,0	34,9	37,1	2,2	<b>2,17</b>
4	34,4	37,5	3,1	34,9	37,7	2,8	34,9	37,6	2,7	<b>2,87</b>
4,5	34,6	38,0	3,4	34,8	38,2	3,4	35,1	38,4	3,3	<b>3,37</b>
5	34,7	38,9	4,2	35,0	39,0	4,0	35,1	38,9	3,8	<b>4,00</b>
5,5	34,4	39,1	4,7	35,2	39,4	4,2	34,8	39,2	4,4	<b>4,43</b>
6	34,3	39,6	5,3	35,1	40,2	5,1	34,4	39,6	5,2	<b>5,20</b>
6,5	34,3	40,2	5,9	35,2	40,7	5,5	34,8	40,4	5,6	<b>5,67</b>
7	34,9	41,5	6,6	35,3	41,3	6,0	35,3	41,6	6,3	<b>6,30</b>
7,5	34,5	41,3	6,8	35,3	41,6	6,3	35,2	41,9	6,7	<b>6,60</b>
8	34,5	41,9	7,4	35,1	42,4	7,3	35,5	42,6	7,1	<b>7,27</b>
8,5	36,0	43,8	7,8	35,6	43,9	8,3	35,7	43,8	8,1	<b>8,07</b>
9	35,7	44,6	8,9	35,7	44,4	8,7	35,6	44,4	8,8	<b>8,80</b>
9,5	35,5	44,9	9,4	35,7	45,1	9,4	35,5	44,8	9,3	<b>9,37</b>
10	35,6	45,4	9,8	35,7	45,2	9,5	35,3	44,9	9,6	<b>9,63</b>
11	35,6	46,2	10,6	35,6	46,0	10,4	35,7	46,5	10,8	<b>10,60</b>
12	35,3	47,4	12,1	35,3	47,5	12,2	35,5	47,1	11,6	<b>11,97</b>

Tabelle 40a: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.2s  
mit 10s Expositionszeit

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\bar{\Delta}T$
	$T_1$	$T_2$	$T_2 - T_1$	$T_3$	$T_4$	$T_4 - T_3$	$T_5$	$T_6$	$T_6 - T_5$	
1	34,1	33,0	-1,1	34,8	33,7	-1,1	34,4	33,6	-0,8	<b>-1,00</b>
1,5	34,2	34,4	0,2	34,2	34,4	0,2	34,2	34,3	0,1	<b>0,17</b>
2	34,1	35,3	1,2	34,0	35,2	1,2	34,1	35,2	1,1	<b>1,17</b>
2,5	34,1	36,2	2,1	34,1	36,3	2,2	34,3	36,3	2,0	<b>2,10</b>
3	34,0	36,9	2,9	34,6	37,0	2,4	34,5	37,0	2,5	<b>2,60</b>
3,5	34,5	38,2	3,7	34,8	38,5	3,7	34,7	38,3	3,6	<b>3,67</b>
4	34,7	39,5	4,8	34,8	39,4	4,6	34,8	39,4	4,6	<b>4,67</b>
4,5	34,7	40,2	5,5	35,1	40,3	5,2	34,8	40,2	5,4	<b>5,37</b>
5	34,8	41,1	6,3	34,6	40,9	6,3	34,8	41,0	6,2	<b>6,27</b>
5,5	34,7	42,0	7,3	34,9	42,0	7,1	34,8	41,9	7,1	<b>7,17</b>
6	35,6	44,1	8,5	35,3	43,3	8,0	35,3	43,4	8,1	<b>8,20</b>
6,5	35,4	44,5	9,1	35,9	44,7	8,8	35,6	44,6	9,0	<b>8,97</b>
7	35,6	45,6	10,0	35,4	45,5	10,1	35,6	45,5	9,9	<b>10,00</b>
7,5	35,5	46,6	11,1	35,7	46,9	11,2	35,5	46,6	11,1	<b>11,13</b>
8	35,6	48,3	12,7	35,3	48,2	12,9	34,5	47,6	13,1	<b>12,90</b>

Tabelle 40b: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.4s  
mit 10s Expositionszeit

### Puls 0.6s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	34,6	34,8	0,2	34,3	34,6	0,3	34,2	34,1	-0,1	<b>0,13</b>
1,5	34,2	35,6	1,4	34,2	35,4	1,2	34,2	35,3	1,1	<b>1,23</b>
2	34,2	36,6	2,4	34,4	36,7	2,3	34,4	36,5	2,1	<b>2,27</b>
2,5	34,0	37,8	3,8	34,4	38,0	3,6	34,5	38,2	3,7	<b>3,70</b>
3	34,2	39,1	4,9	34,6	39,3	4,7	34,6	39,1	4,5	<b>4,70</b>
3,5	36,0	41,8	5,8	35,6	41,5	5,9	35,3	41,1	5,8	<b>5,83</b>
4	35,3	42,4	7,1	35,7	42,4	6,7	35,6	42,2	6,6	<b>6,80</b>
4,5	35,5	43,2	7,7	35,7	43,2	7,5	35,7	43,3	7,6	<b>7,60</b>
5	35,8	44,4	8,6	35,5	44,3	8,8	35,5	44,3	8,8	<b>8,73</b>
5,5	35,5	45,6	10,1	35,4	45,7	10,3	35,4	45,6	10,2	<b>10,20</b>
6	35,5	46,6	11,1	35,4	46,4	11,0	35,3	46,5	11,2	<b>11,10</b>
6,5	35,3	47,2	11,9	35,0	47,1	12,1	34,9	47,0	12,1	<b>12,03</b>

Tabelle 40c: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.6s  
mit 10s Expositionszeit

### Puls 0.8s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,7	35,9	0,2	35,0	35,2	0,2	34,5	34,9	0,4	<b>0,27</b>
1,5	34,3	36,6	2,3	34,5	36,6	2,1	34,5	36,6	2,1	<b>2,17</b>
2	34,1	37,7	3,6	34,8	38,1	3,3	34,9	38,1	3,2	<b>3,37</b>
2,5	34,9	39,8	4,9	35,5	40,2	4,7	34,8	39,7	4,9	<b>4,83</b>
3	34,8	41,1	6,3	34,9	41,2	6,3	35,4	41,5	6,1	<b>6,23</b>
3,5	35,4	42,9	7,5	35,1	42,8	7,7	35,5	42,8	7,3	<b>7,50</b>
4	35,6	44,3	8,7	35,6	44,1	8,5	35,5	44,0	8,5	<b>8,57</b>
4,5	35,2	45,2	10,0	35,6	45,2	9,6	35,4	45,1	9,7	<b>9,77</b>
5	34,8	45,8	11,0	35,4	46,0	10,6	35,5	46,1	10,6	<b>10,73</b>
5,5	35,7	47,7	12,0	35,2	47,4	12,2	35,6	47,6	12,0	<b>12,07</b>

Tabelle 40d: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.7s/0.8s  
mit 10s Expositionszeit

### Puls 1.0s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,8	36,0	0,2	34,2	34,6	0,4	34,4	35,6	1,2	<b>0,60</b>
1,5	34,7	37,1	2,4	34,5	37,0	2,5	34,8	37,1	2,3	<b>2,40</b>
2	34,6	38,7	4,1	35,3	39,0	3,7	35,4	39,1	3,7	<b>3,83</b>
2,5	34,6	40,3	5,7	35,5	40,5	5,0	34,8	40,1	5,3	<b>5,33</b>
3	34,7	41,9	7,2	35,1	42,0	6,9	35,5	42,1	6,6	<b>6,90</b>
3,5	34,7	43,2	8,5	35,4	43,6	8,2	34,9	43,1	8,2	<b>8,30</b>
4	34,7	44,7	10,0	35,8	45,1	9,3	35,4	44,9	9,5	<b>9,60</b>
4,5	34,9	46,1	11,2	35,6	46,6	11,0	34,9	46,3	11,4	<b>11,20</b>
5	35,3	47,6	12,3	35,0	47,5	12,5	34,5	47,3	12,8	<b>12,53</b>

Tabelle 40e: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 0.7s/1.0s  
mit 10s Expositionszeit

## Relaxationszeit 1.0s

Betrieb: CW Art: WHP Zeit: 10 Sekunden  $T_{1-6}$  in °C,  $\Delta T$  in °K

### Puls 0.2s

### Puls 0.4s

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\Delta T$
	$T_1$	$T_2$	$T_2 - T_1$	$T_3$	$T_4$	$T_4 - T_3$	$T_5$	$T_6$	$T_6 - T_5$	
1	34,7	32,4	-2,3	34,3	32,2	-2,1	34,5	32,4	-2,1	<b>-2,17</b>
1,5	34,1	32,5	-1,6	34,5	33,3	-1,2	34,3	33,2	-1,1	<b>-1,30</b>
2	34,4	34,5	0,1	34,3	34,5	0,2	34,2	34,4	0,2	<b>0,17</b>
2,5	34,3	34,5	0,2	34,1	34,2	0,1	34,2	34,4	0,2	<b>0,17</b>
3	34,2	34,9	0,7	34,0	34,6	0,6	34,1	34,6	0,5	<b>0,60</b>
3,5	34,0	35,0	1,0	34,6	36,2	1,6	34,8	36,3	1,5	<b>1,37</b>
4	34,9	36,7	1,8	34,8	36,4	1,6	34,6	36,2	1,6	<b>1,67</b>
4,5	34,3	36,3	2,0	34,3	36,2	1,9	34,5	36,3	1,8	<b>1,90</b>
5	34,4	36,9	2,5	34,9	37,1	2,2	34,8	37,1	2,3	<b>2,33</b>
5,5	34,5	37,3	2,8	34,4	37,3	2,9	34,4	37,4	3,0	<b>2,90</b>
6	34,2	37,5	3,3	34,4	37,6	3,2	34,5	37,6	3,1	<b>3,20</b>
6,5	34,3	38,0	3,7	34,6	38,1	3,5	34,9	38,3	3,4	<b>3,53</b>
7	34,2	38,2	4,0	34,3	38,3	4,0	34,9	38,6	3,7	<b>3,90</b>
7,5	34,1	38,7	4,6	34,6	38,8	4,2	34,9	39,1	4,2	<b>4,33</b>
8	34,5	39,5	5,0	35,2	39,8	4,6	34,6	39,6	5,0	<b>4,87</b>
8,5	34,8	40,2	5,4	34,6	40,1	5,5	34,4	40,0	5,6	<b>5,50</b>
9	34,4	40,5	6,1	34,9	40,7	5,8	34,4	40,5	6,1	<b>6,00</b>
9,5	34,5	41,0	6,5	34,5	40,9	6,4	34,4	40,8	6,4	<b>6,43</b>
10	35,7	42,8	7,1	35,8	43,0	7,2	35,8	42,7	6,9	<b>7,07</b>
11	35,3	43,2	7,9	35,4	43,1	7,7	35,9	43,3	7,4	<b>7,67</b>
12	35,3	43,8	8,5	35,6	44,1	8,5	35,6	44,1	8,5	<b>8,50</b>
13	35,2	44,4	9,2	35,6	44,5	8,9	35,4	44,4	9,0	<b>9,03</b>
14	35,6	45,3	9,7	35,8	45,3	9,5	35,7	45,2	9,5	<b>9,57</b>
15	35,5	45,7	10,2	35,6	45,7	10,1	35,4	45,5	10,1	<b>10,13</b>
16	35,6	46,5	10,9	35,7	46,6	10,9	35,4	46,5	11,1	<b>10,97</b>
17	35,2	47,0	11,8	34,9	46,7	11,8	35,4	47,1	11,7	<b>11,77</b>

Tabelle 41a: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 1.0s/0.2s  
mit 10s Expositionszeit

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			$\Delta T$
	$T_1$	$T_2$	$T_2 - T_1$	$T_3$	$T_4$	$T_4 - T_3$	$T_5$	$T_6$	$T_6 - T_5$	
1	35,4	34,6	-0,8	35,2	34,3	-0,9	35,2	34,2	-1,0	<b>-0,90</b>
1,5	34,7	34,8	0,1	34,6	34,8	0,2	34,3	34,6	0,3	<b>0,20</b>
2	34,8	35,3	0,5	34,9	35,4	0,5	34,8	35,2	0,4	<b>0,47</b>
2,5	34,5	35,9	1,4	34,8	36,2	1,4	34,7	35,9	1,2	<b>1,33</b>
3	35,1	36,6	1,5	34,1	35,8	1,7	34,5	36,0	1,5	<b>1,57</b>
3,5	34,3	36,6	2,3	34,7	36,9	2,2	34,7	36,9	2,2	<b>2,23</b>
4	34,1	37,2	3,1	34,8	37,5	2,7	35,0	37,6	2,6	<b>2,80</b>
4,5	34,7	37,8	3,1	34,6	37,7	3,1	34,9	37,8	2,9	<b>3,03</b>
5	34,2	38,5	4,3	34,2	38,5	4,3	35,0	39,0	4,0	<b>4,20</b>
5,5	34,8	39,5	4,7	35,3	39,2	3,9	34,7	38,9	4,2	<b>4,27</b>
6	34,5	39,6	5,1	35,3	40,1	4,8	34,8	39,8	5,0	<b>4,97</b>
6,5	34,8	40,5	5,7	34,9	40,7	5,8	34,8	40,5	5,7	<b>5,73</b>
7	35,0	41,0	6,0	35,5	41,3	5,8	34,7	40,8	6,1	<b>5,97</b>
7,5	34,5	41,2	6,7	34,4	41,3	6,9	35,2	41,7	6,5	<b>6,70</b>
8	34,5	42,4	7,9	34,8	42,1	7,3	34,7	42,1	7,4	<b>7,53</b>
8,5	34,6	42,6	8,0	34,8	42,6	7,8	35,2	42,8	7,6	<b>7,80</b>
9	34,8	44,0	9,2	35,4	43,6	8,2	35,2	43,6	8,4	<b>8,60</b>
9,5	34,4	43,6	9,2	35,2	44,0	8,8	35,3	44,2	8,9	<b>8,97</b>
10	34,6	44,6	10,0	34,9	44,8	9,9	35,2	45,0	9,8	<b>9,90</b>
11	34,4	45,7	11,3	35,3	46,1	10,8	34,4	45,5	11,1	<b>11,07</b>
12	34,6	46,8	12,2	35,7	45,5	9,8	34,1	44,8	10,7	<b>10,90</b>

Tabelle 41b: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 1.0s/0.4s  
mit 10s Expositionszeit

**Puls 0.6s**

**Puls 0.8s**

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,0	33,6	-1,4	34,3	32,9	-1,4	34,1	33,0	-1,1	<b>-1,30</b>
1,5	34,6	34,7	0,1	34,8	35,3	0,5	34,6	35,1	0,5	<b>0,37</b>
2	34,5	35,7	1,2	34,5	35,7	1,2	34,6	35,8	1,2	<b>1,20</b>
2,5	34,5	36,6	2,1	34,9	36,6	1,7	34,7	36,5	1,8	<b>1,87</b>
3	34,5	36,9	2,4	35,0	37,2	2,2	34,7	36,9	2,2	<b>2,27</b>
3,5	34,4	37,6	3,2	34,7	37,9	3,2	35,0	37,6	2,6	<b>3,00</b>
4	34,5	38,4	3,9	34,9	38,4	3,5	34,7	38,2	3,5	<b>3,63</b>
4,5	34,6	38,7	4,1	34,9	38,9	4,0	35,1	39,1	4,0	<b>4,03</b>
5	36,0	40,7	4,7	35,9	40,7	4,8	35,8	40,4	4,6	<b>4,70</b>
5,5	35,7	41,4	5,7	35,7	41,1	5,4	35,8	41,1	5,3	<b>5,47</b>
6	35,3	41,8	6,5	35,7	42,0	6,3	35,6	42,0	6,4	<b>6,40</b>
6,5	35,5	42,5	7,0	35,5	42,7	7,2	35,6	42,4	6,8	<b>7,00</b>
7	35,3	43,0	7,7	35,4	43,1	7,7	35,6	43,3	7,7	<b>7,70</b>
7,5	35,1	43,6	8,5	35,6	43,8	8,2	35,5	44,2	8,7	<b>8,47</b>
8	35,2	44,3	9,1	35,4	44,4	9,0	35,3	44,4	9,1	<b>9,07</b>
8,5	35,1	45,6	10,5	35,1	45,1	10,0	35,1	45,0	9,9	<b>10,13</b>
9	35,3	45,5	10,2	34,9	45,4	10,5	35,2	45,6	10,4	<b>10,37</b>
9,5										
10	35,4	47,3	11,9	35,3	47,2	11,9	35,5	47,3	11,8	<b>11,87</b>

Tabelle 41c: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 1.0s/0.6s  
mit 10s Expositionszeit

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	36,0	35,7	-0,3	35,4	35,1	-0,3	34,9	35,0	0,1	<b>-0,17</b>
1,5	35,4	36,1	0,7	34,9	35,8	0,9	35,1	36,0	0,9	<b>0,83</b>
2	34,7	36,6	1,9	35,3	36,9	1,6	35,5	37,0	1,5	<b>1,67</b>
2,5	35,5	38,0	2,5	35,7	37,9	2,2	35,8	37,9	2,1	<b>2,27</b>
3	35,4	38,8	3,4	35,5	38,8	3,3	35,9	39,0	3,1	<b>3,27</b>
3,5	35,5	39,6	4,1	35,6	39,5	3,9	35,0	39,1	4,1	<b>4,03</b>
4	35,5	40,2	4,7	35,4	40,3	4,9	35,3	40,2	4,9	<b>4,83</b>
4,5	34,8	40,7	5,9	35,4	41,0	5,6	35,4	41,1	5,7	<b>5,73</b>
5	35,5	42,1	6,6	35,8	42,3	6,5	35,8	42,1	6,3	<b>6,47</b>
5,5	35,6	42,8	7,2	35,7	43,0	7,3	35,4	42,8	7,4	<b>7,30</b>
6	35,5	43,8	8,3	35,1	43,5	8,4	35,1	43,8	8,7	<b>8,47</b>
6,5	35,6	44,7	9,1	35,8	44,7	8,9	35,4	44,5	9,1	<b>9,03</b>
7	35,4	45,6	10,2	35,6	45,7	10,1	35,3	45,5	10,2	<b>10,17</b>
7,5	35,1	46,2	11,1	35,4	46,3	10,9	35,7	46,3	10,6	<b>10,87</b>
8	35,4	47,1	11,7	34,6	46,7	12,1	35,1	47,0	11,9	<b>11,90</b>

Tabelle 41d: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 1.0s/0.8s  
mit 10s Expositionszeit

**Puls 1.0s**

Watt	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ø T
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>4</sub> - T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>6</sub> - T <sub>5</sub>	
1	35,8	35,4	-0,4	35,5	35,2	-0,3	34,4	34,4	0,0	<b>-0,23</b>
1,5	35,0	35,8	0,8	34,7	35,8	1,1	34,6	35,7	1,1	<b>1,00</b>
2	34,3	36,3	2,0	34,3	36,3	2,0	34,6	36,5	1,9	<b>1,97</b>
2,5	34,2	37,3	3,1	34,9	37,6	2,7	35,0	37,8	2,8	<b>2,87</b>
3	35,1	38,8	3,7	35,1	38,7	3,6	35,3	38,9	3,6	<b>3,63</b>
3,5	35,0	39,4	4,4	35,3	39,3	4,0	35,2	39,2	4,0	<b>4,13</b>
4	34,5	39,7	5,2	35,2	40,1	4,9	35,0	40,3	5,3	<b>5,13</b>
4,5	34,8	40,8	6,0	34,5	40,9	6,4	35,2	41,0	5,8	<b>6,07</b>
5	35,6	42,4	6,8	35,3	42,3	7,0	35,2	42,4	7,2	<b>7,00</b>
5,5	35,0	43,0	8,0	35,5	43,4	7,9	35,3	43,3	8,0	<b>7,97</b>
6	35,2	44,1	8,9	34,8	43,9	9,1	34,9	44,1	9,2	<b>9,07</b>
6,5	35,5	45,5	10,0	34,6	45,2	10,6	35,2	45,4	10,2	<b>10,27</b>
7	34,9	45,9	11,0	34,6	45,8	11,2	34,9	46,0	11,1	<b>11,10</b>
7,5	35,3	47,4	12,1	34,7	47,1	12,4	34,7	47,1	12,4	<b>12,30</b>

Tabelle 41e: Bildung des arithmetischen Mittels;  
continuous wave-Modus im WHP,  
Relaxationszeit/Puls 1.0s/1.0s  
mit 10s Expositionszeit

## 7.2 P-Werte

### 7.2.1 P-Werte zu den Abb. 8a-d und 9a-d (S. 25-29)

#### 5 Sekunden Expositionszeit

##### Relaxationszeit 0.1 Sekunde

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$1,87 \cdot 10^{-12}$	$1,94 \cdot 10^{-9}$	$4,93 \cdot 10^{-9}$	$1,45 \cdot 10^{-9}$	$5,86 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 42a: P-Werte zum Einfluss der Leistung (Watt) auf die Temperaturerhöhung bei der Relaxationszeit 0.1s mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 5 Sekunden Expositionszeit

##### Relaxationszeit 0.5 Sekunde

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$3,38 \cdot 10^{-18}$	$4,32 \cdot 10^{-15}$	$7,27 \cdot 10^{-9}$	$6,66 \cdot 10^{-8}$	$2,91 \cdot 10^{-11}$

Tabelle 42b: P-Werte zum Einfluss der Leistung (Watt) auf die Temperaturerhöhung bei der Relaxationszeit 0.5s mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 5 Sekunden Expositionszeit

##### Relaxationszeit 0.7 Sekunde

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$1,54 \cdot 10^{-32}$	$6,95 \cdot 10^{-22}$	$2,26 \cdot 10^{-21}$	$2,02 \cdot 10^{-20}$	$5,86 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 42c: P-Werte zum Einfluss der Leistung (Watt) auf die Temperaturerhöhung bei der Relaxationszeit 0.7s mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 5 Sekunden Expositionszeit

##### Relaxationszeit 1.0 Sekunde

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$1,27 \cdot 10^{-30}$	$5,38 \cdot 10^{-21}$	$4,65 \cdot 10^{-18}$	$1,40 \cdot 10^{-10}$	$1,66 \cdot 10^{-13}$

Tabelle 42d: P-Werte zum Einfluss der Leistung (Watt) auf die Temperaturerhöhung bei der Relaxationszeit 1.0s mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 5 Sekunden Expositionszeit

#### 10 Sekunden Expositionszeit

##### Relaxationszeit 0.1 Sekunde

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$4,63 \cdot 10^{-13}$	$6,31 \cdot 10^{-10}$	$7,59 \cdot 10^{-10}$	$2,94 \cdot 10^{-7}$	$1,27 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 43a: P-Werte zum Einfluss der Leistung (Watt) auf die Temperaturerhöhung bei der Relaxationszeit 0.1s mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 10 Sekunden Expositionszeit

### Relaxationszeit 0.5 Sekunde

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$3,42 \cdot 10^{-23}$	$1,53 \cdot 10^{-9}$	$2,48 \cdot 10^{-11}$	$6,59 \cdot 10^{-9}$	$3,06 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 43b: P-Werte zum Einfluss der Leistung (Watt) auf die Temperaturerhöhung bei der Relaxationszeit 0.5s mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 10 Sekunden Expositionszeit

### Relaxationszeit 0.7 Sekunde

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$5,43 \cdot 10^{-28}$	$2,31 \cdot 10^{-16}$	$2,80 \cdot 10^{-15}$	$1,77 \cdot 10^{-10}$	$7,68 \cdot 10^{-12}$

Tabelle 43c: P-Werte zum Einfluss der Leistung (Watt) auf die Temperaturerhöhung bei der Relaxationszeit 0.7s mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 10 Sekunden Expositionszeit

### Relaxationszeit 1.0 Sekunde

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$2,48 \cdot 10^{-25}$	$7,36 \cdot 10^{-22}$	$4,61 \cdot 10^{-18}$	$7,69 \cdot 10^{-20}$	$1,99 \cdot 10^{-15}$

Tabelle 43d: P-Werte zum Einfluss der Leistung (Watt) auf die Temperaturerhöhung bei der Relaxationszeit 1.0s mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 10 Sekunden Expositionszeit

## 7.2.2 P-Werte zu den Abb. 10 und 11 (S. 31)

### Regressionskoeffizienten $b_1$ bei 5 Sekunden Expositionszeit

Relax.	0.1s	0.5s	0.7s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$3,20 \cdot 10^{-2}$	$5,27 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$

Tabelle 44a: P-Werte zum Einfluss des Pulses auf den Regressionskoeffizienten  $b_1$  der Relaxationszeiten 0.1s-1.0s (abgekürzt durch Relax.) bei 5 Sekunden Expositionszeit

### Regressionskoeffizienten $b_1$ bei 10 Sekunden Expositionszeit

Relax.	0.1s	0.5s	0.7s	1.0s
<b>P-Wert</b>	$4,99 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 44b: P-Werte zum Einfluss des Pulses auf den Regressionskoeffizienten  $b_1$  der Relaxationszeiten 0.1s-1.0s (abgekürzt durch Relax.) bei 10 Sekunden Expositionszeit

### 7.2.3 P-Werte zu den Abb.12 und 13 (S. 36)

#### Achsenabschnitte $a_1$ bei 5 Sekunden Expositionszeit

Relax.	0.1s	0.5s	0.7s	1.0s
<b>P-Wert</b>	0,895	0,391	0,984	0,347

Tabelle 45a: P-Werte zum Einfluss des Pulses auf den Achsenabschnitte  $a_1$  der Relaxationszeiten 0.1s-1.0s (abgekürzt durch Relax.) bei 5 Sekunden Expositionszeit

#### Achsenabschnitte $a_1$ bei 10 Sekunden Expositionszeit

Relax.	0.1s	0.5s	0.7s	1.0s
<b>P-Wert</b>	0,706	0,946	0,689	0,592

Tabelle 45b: P-Werte zum Einfluss des Pulses auf den Achsenabschnitte  $a_1$  der Relaxationszeiten 0.1s-1.0s (abgekürzt durch Relax.) bei 10 Sekunden Expositionszeit

### 7.2.4 P-Werte zu den Abb.14 und 15 (S. 40/41)

#### Regressionskoeffizienten $b_1$ bei 5 Sekunden Expositionszeit

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert (<math>X^2</math>)</b>	0,164	0,564	0,955	0,692	0,744
<b>P-Wert (X)</b>	0,101	0,375	0,697	0,547	0,542

Tabelle 46a: P-Werte zum Einfluss der Relaxationszeit auf den Regressionskoeffizienten  $b_1$  mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 5 Sekunden Expositionszeit

#### Regressionskoeffizienten $b_1$ bei 10 Sekunden Expositionszeit

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
<b>P-Wert (<math>X^2</math>)</b>	$2,05 \cdot 10^{-2}$	0,264	0,321	0,271	0,081
<b>P-Wert (X)</b>	$9,49 \cdot 10^{-3}$	0,187	0,837	0,783	0,186

Tabelle 46b: P-Werte zum Einfluss der Relaxationszeit auf den Regressionskoeffizienten  $b_1$  mit den Pulsen 0.2s-1.0s, bei 10 Sekunden Expositionszeit

## 7.2.5 P-Werte zu den Abb.16 und 17 (S. 46)

### Achsenabschnitte $a_1$ bei 5 Sekunden Expositionszeit

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
P-Wert ( $X^2$ )	0,896	0,062	0,675	0,662	0,067
P-Wert (X)	0,877	0,065	0,607	0,676	0,089

Tabelle 47a: P-Werte zum Einfluss des Pulses auf den Achsenabschnitte  $a_1$   
mit den Pulsen 0.2s-1.0s,  
bei 5 Sekunden Expositionszeit

### Achsenabschnitte $a_1$ bei 10 Sekunden Expositionszeit

Puls	0.2s	0.4s	0.6s	0.8s	1.0s
P-Wert ( $X^2$ )	0,553	0,536	0,463	0,917	0,211
P-Wert (X)	0,630	0,533	0,425	0,896	0,206

Tabelle 47b: P-Werte zum Einfluss des Pulses auf den Achsenabschnitte  $a_1$   
mit den Pulsen 0.2s-1.0s,  
bei 10 Sekunden Expositionszeit

## 7.3 Matrizenrechnung

Die Ausführung der Matrixoperationen für den Fall der Einfachregression ist im Folgenden allgemein gültig beschrieben [26 s. 692].

### 1. Schritt: Berechnung von $X'X$

$$X'X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_1 & X_2 & \dots & X_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & X_1 \\ 1 & X_2 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 1 & X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum X_i \\ \sum X_i & \sum X_i^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 2. Schritt: Invertierung von $X'X$

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sum X_i^2}{n \sum x_i^2} & \frac{-\bar{X}}{\sum x_i^2} \\ \frac{-\bar{X}}{\sum x_i^2} & \frac{1}{\sum x_i^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 3. Schritt: Berechnung von $X'Y$

$$X'Y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_1 & X_2 & \dots & X_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum X_i Y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 4. Schritt: Berechnung von $\hat{\beta}$

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y = \begin{bmatrix} \frac{\sum X_i^2}{n \sum x_i^2} & \frac{-\bar{X}}{\sum x_i^2} \\ \frac{-\bar{X}}{\sum x_i^2} & \frac{1}{\sum x_i^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum X_i Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y} - \bar{X} \cdot \frac{\sum x_i Y_i}{\sum x_i^2} \\ \frac{\sum x_i Y_i}{\sum x_i^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 5. Schritt: Anwendung auf polynomiale Regression

Die Mehrfachregression ermöglicht nun die Behandlung einer weiteren Klasse nichtlinearer Zusammenhänge zwischen X und Y der Form (5).

$$Y_i = \sum_{j=0}^k b_j \cdot X_i^j \quad (5)$$

Substituiert man nun  $U_1 = X$ ,  $U_2 = X^2$ , ...,  $U_k = X^k$ , so erhält man das lineare, multiple Regressionsmodell (6).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 U_{i1} + \dots + \beta_k U_{ik} + \varepsilon_i; \quad 1 \leq i \leq n \quad (6)$$

## 6. Schritt: Polynomiales Modell 2. Ordnung

Das polynomiale Modell lautet:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \varepsilon_i \quad (7)$$

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] BACH G., KREKELER G. - Einsatz eines Dioden-Halbleiterlasers in der Zahnheilkunde. ZWR Das deutsche Zahnärzteblatt 6 (1996) 314-319
- [2] BERGLUNDH T., LINDHE J., MARINELLO C. - Soft tissue reaktion to the new plaque formation on implants and teeth, Clin. oral Implant. Res 3 (1992) 1-8
- [3] BLOCK C.M., MAYO J.A., EVANS G.H. - Effects of the Nd:YAG dental laser o plasma-sprayed and hydroxyapatite-coated titanium dental implants: Surface alteration and attempted sterilization. Intern. J. Oral & Maxillofacial Implants 4 (1992) 441-449
- [4] BOSCH K. - Statistiktaschenbuch, R. Oldenbourg Verlag, München (1993) 2. Auflage, 15-17, 70-75, 589-598
- [5] CHERNOFF G., SLATKINE M., ZAIR E., MEAD D. - Rapid kommunikation, Silk Touch: A new Technology for skin resurfacing in aestheic surgery. Journal of clinical laser medicine & surgery 2 (1995) 97-100
- [6] DENNISON D.K., HUERZELER M.B., QUINONES C., CAFFESSE P.G. - Contaminated implant surfaces: An in vitro comparison of implant surface coating and treatment modalities for decontamination. J. Periodontol 65 (1994) 942-948
- [7] FAX S.C., MORIARTY J.D., KUSY R.P. - The effects of scaling a titanium implant surface with metal and plastic instruments: An in vitro study. J. Periodontol 8 (1990) 485-490
- [8] GAHLERT M., PELZ K., KREKELER G. - Die Wirksamkeit von Chlorhexidin auf das Keimspektrum parodontaler Taschen, eine in vitro Studie. Parodontologie 1 (1990) 63-69
- [9] GANNOT I., CALDERON S., ERTL T., TSCHEOE J., DROR J., MUELLER G., CROITORU N. - The use of Er:YAG- und CO<sub>2</sub> laser in implant exposure - an in-vitro study. Lasermedizin 10 (1994) 165-168

- [10] GANZ C.H. - Evaluation of the safety of the carbon dioxide laser used in conjunction with root form implants: A pilot study. J prosthet dent 71 (1994) 27-30
- [11] GRÖßNER-SCHREIBER B., TUAN R.S. - Die Bedeutung der Oberfläche von Titanimplantaten im Osseointegrationsvorgang. Dtsch zahnärztl Z 46 (1991) 691-693
- [12] HRUSKA A.R. - Intraoral welding of pure titanium. Quintessence international 10 (1987) 683-688
- [13] HÜRZELER M.B., STRUB J.R., TÜRB J.C.WITKOWSKI S., KERN M: Curriculum – Prothetik Band III, Quintessenz Verlag, Berlin (1994) 1. Auflage, 1069-1082
- [14] KAPPERT H.F. - Titan als Werkstoff für die zahnärztliche Prothetik und Implantologie. Dtsch zahnärztl Z 49 (1994) 573-783
- [15] KLINGE B. - Implants in relation to natural teeth. J clin. Periodontol 18 (1991) 482-487
- [16] KOORT H.J. - Die Wirkung von Laserstrahlen auf Gewebe. Dtsch zahnärztl Z 49 (1994) 100-105
- [17] KREJCI I., SIMUNOVIC K., LUTZ F. - Substanzabtrag mit supergepulstem CO<sub>2</sub>-Laser. Schweiz Monatsschr. Zahnmed. 6 (1992) 693-699
- [18] LASK G., KELLER G., LOWE N., GORMLEY D. - Laser skin resurfacing with the SilkTouch Flashscanner for facial rhytides. Dermatol. Surgery 21 (1995) 1021-1024
- [19] LINDHE J., BERGLUNDTH T., ERICSSON I., LILJENBERG B., MARINELLO C. - Experimental breakdown of periimplant and periodontal tissues. A study in the beagle dog. Clin. oral Implant Res 3 (1992) 9-16
- [20] MOMBELLI A. - Mikrobiologie und Implantate. Dtsch zahnärztl. Zeitung 12 (1993) 756-760
- [21] MOMBELLI A., LANG N.P. - Antimicrobial treatment of periimplant infection. Clin. Oral Impl. Res. 3 (1992) 162-168

- [22] MOMBELLI A., van OOSTEN M.A.C., SCHÜRCH E., LANG N.P. - The microbiots associated with successfull or failing implants. Oral Microbiol. Immunol. 2 (1987) 145-151
- [23] MOMTAHANI M., RAUSCH R., RAPHAEL F., PRUDEN R., PIKE J. - Implantatfreilegung mit dem CO<sub>2</sub>-Laser. Phillip Journal 5 (1994) 219-221
- [24] NAMMOUR S., MAJERUS P. - Sterilization potential of the CO<sub>2</sub> - laser. Acta stomatologica belgica 4 (1991) 183-186
- [25] OYSTER D.K., PARKER W.B., GHER M. - CO<sub>2</sub> Laser and temperature changes of titanium implants. J. Periodontol 66 (1995) 1017-1023
- [26] PIRKTL L. - Mehrfachregressionen , in: Bohley P. (Hrsg): Statistik - einführendes Lehrbuch für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler, R. Oldenbourg Verlag, München (1991) 4. Auflage, 687-691
- [27] RIZOIU I.M., LEVY G.C. - The efficiency of bone ablation with a Nd:YAG laser beam delivered with a cooling spray: an in vitro study. Compendium, 15 (1994) 106-111
- [28] ROMANOS G., KOCJANCIC B., EVERTS H., RENNER P.J., NENTWIG G.-H. - Temperaturveränderungen des Implantats während Laserbestrahlung und Einwirkung des CO<sub>2</sub> - Laserstrahls auf verschiedene Implantatoberflächen. Eine in vitro Pilotstudie und REM-Untersuchung. DGL Newsletter 6 (1996) 1-2
- [29] SACHS L. - Abhängigkeitsmaße: Korrelation und Regression, in: Sachs L. (Hrsg.): Angewandte Statistik, Springer-Verlag, Berlin (1992) 7. Auflage, 497-574
- [30] SPEELMAN J.A., COLLAERT B., KLINGE B. - Evaluation of different methods to clean titanium abutments. A scanning electron microscopy study. Clin Oral Impl Res 3 (1992) 120-127
- [31] SPIEKERMANN H. – Vorwort, in: Rateitschak, K.H., Wolf, H.F.(Hrsg.): Implantologie, Farbatlant der Zahnmedizin 10, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, (1994), 5
- [32] SPIEKERMANN H., DONATH K., JOVANOVIC S., RICHTER J. - Periimplantäre Krankheiten, in: Rateitschak, K.H., Wolf,

H.F.(Hrsg.): Implantologie, Farbatlanten der Zahnmedizin 10,  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1994) 317-322

- [33] SWIFT J.Q, JENNY J.E., HARGREAVES K.M. - Heat generation in hydroxyapatite-coated implants as a result of CO<sub>2</sub>-laser application. Oral surg oral med oral pathol 79 (1995) 410-415
- [34] THOMSON-NEAL D., EVANS G.H., MEFFEERT R.M. - Die Auswirkung verschiedener Behandlungsmaßnahmen auf Titan-, monokristalline Aluminiumoxid- und hydroxylapatitbeschichtete Implantate. Intern. J. für Parodontologie & Restaurative Zahnheilkunde 4 (1989) 301-311
- [35] WALSH L.J. - The use of lasers in implantology: An overview. Journal of oral implantology 4 (1992) 335-340
- [36] WILSON M. - Bactericidal effect of laser light and ist potential use in the treatment of plaque-related diseases. Int J Dent 44 (1994) 181-189
- [37] ZABLOTSKY M.H., DIEDRICH D.L., MEFFERT R.M. - Detoxification of endotoxin contaminated titanium and hydroxyapatite-coated surfaces utilizing various chemotherapeutic and mechanical modalities. Implant Dent 1 (1992) 154-158

## 9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. Dr. Dr. h.c. H.-H. Horch für die wohlwollende Überlassung des Themas danken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn PD Dr. Herbert Deppe, der mir stets helfend zur Seite stand, sowie Herrn Prof. Ulm und Herrn Dr. Wagenpfeil.

Danken möchte ich auch Herrn Christoph Bereuter für seine freundliche Hilfe auf mathematischem Gebiet.

Des Weiteren gebührt mein Dank meinen Eltern und meiner Schwester für ihr Verständnis und ihre liebevolle Unterstützung.

## 10 Lebenslauf

### Persönliche Angaben

Name	Isabelle Melanie Mendl
Geburtsdatum	7. Mai 1974
Geburtsort	München
Eltern	Dr. Helene und Dr. Jürgen Mendl

### Schulbildung

1980-1984	Karl - Lederer Grundschule, Geretsried
1984-1993	Gymnasium Geretsried

### Studium

1993-1999	Studium der Zahnheilkunde an der Ludwig-Maximilians-Universität München
August-Oktober 1997	Famulatur in Cajamarca, Peru
Mai 2000	Famulatur in Gobabis, Namibia

### Beruf

September 1999-Juni 2000	Assistenz Zahnärztin in Geretsried
seit Juni 2000	Assistenz Zahnärztin in München