

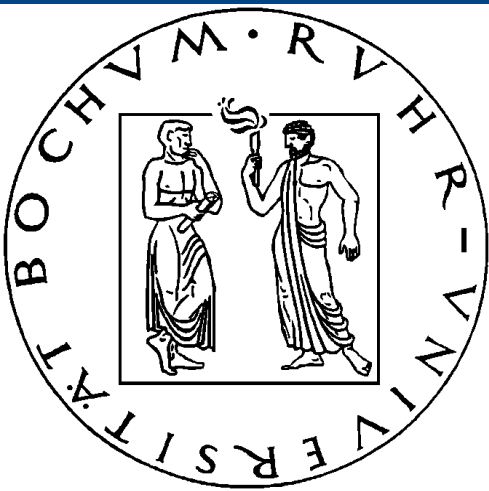
Vortrag zum SOWAS-Projekt

Intrakavitäre Frequenzverdopplung am ND:Yag-Laser



Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser

17.11.2010 Alexander Kanitz, Andrea Bischooping, Sandra Schröter



Übersicht

I. Motivation

II. Grundlagen

- i. Funktionsweise des ND-YAG-Lasers
- ii. Physikalische Grundlagen der Frequenzverdopplung

III. Versuchsaufbau

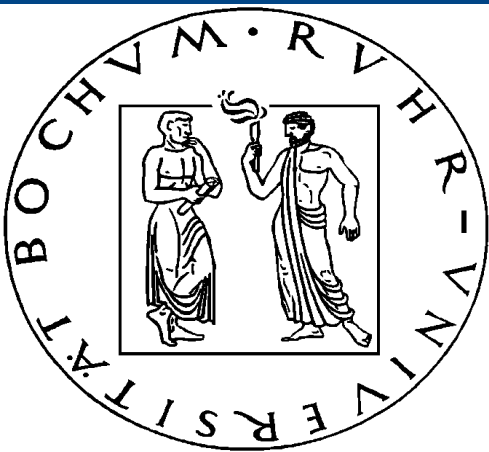
IV. Messungen

- i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
- ii. Konversionseffizienz
- iii. Cavity Ringdown
- iv. Vergleich: Eigenschaften verschiedener Kristalle

V. Fazit/ Ausblick



Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



I. Motivation

heute:

Abdeckung eines großen Laserlichtspektralbereichs mit Halbleiterlasern

Problem:

Für Laserlicht im grünen/tiefen UV Bereich keine geeigneten Halbleiter
→ grünes Licht benötigt für Laserpointer (max. Empf. des Auges)

Lösung:

Frequenzverdopplung von infrarotem zu grünem Laserlicht

Ziele

- physikalische Kenntnisse im Bereich der Frequenzverdopplung vertiefen
- besseres Verständnis für die Funktionsweise des Lasers entwickeln
- Beobachtung von Auswirkungen auf die Frequenzverdopplung bei starken Temperaturschwankungen

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



II. Funktionsweise des ND-Yag-Lasers und physikalische Grundlagen

Motivation

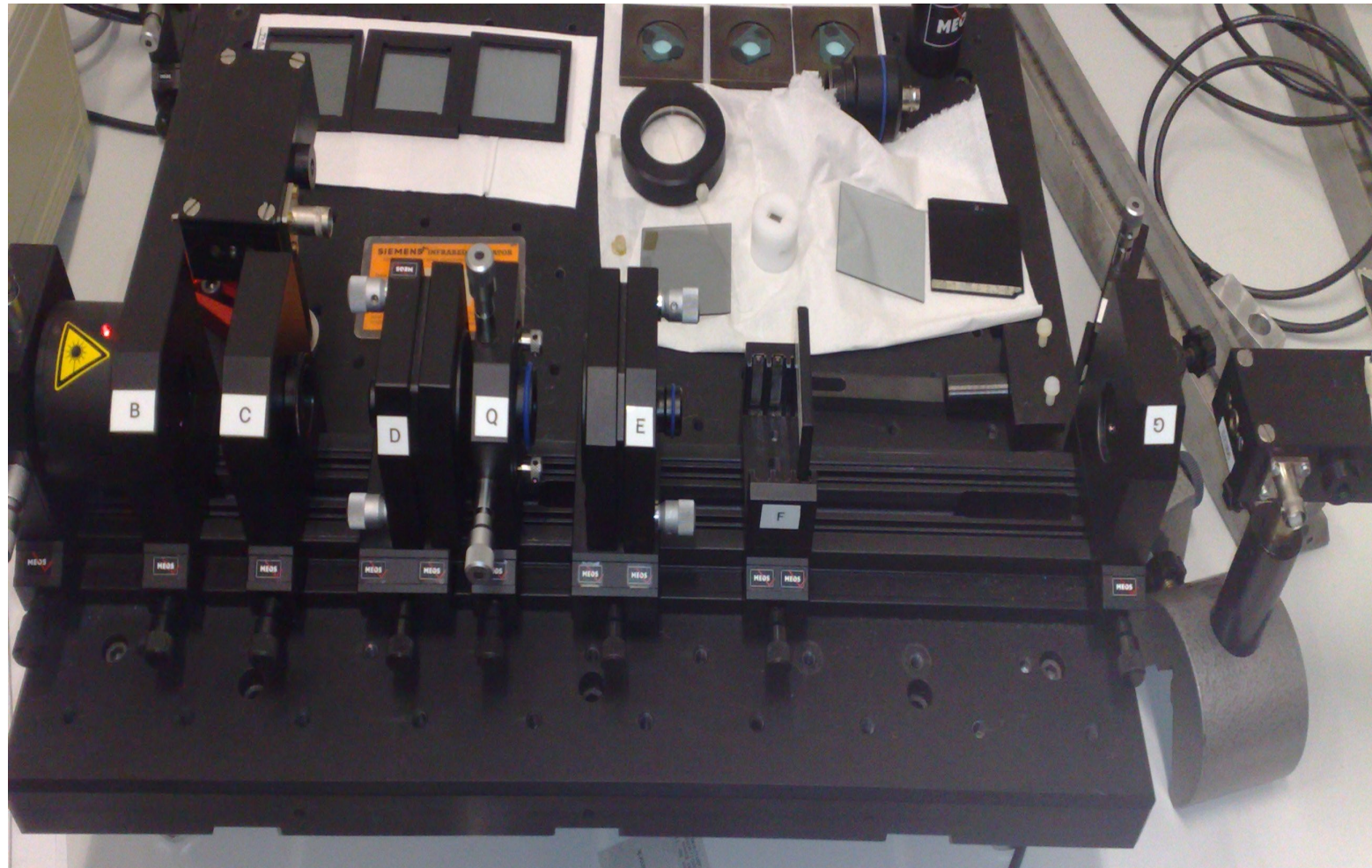
Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

- i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
- ii. Konversionseffizienz
- iii. Cavity Ringdown
- iv. Kristallvergleich

Ausblick



Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



II.1 Funktionsweise des ND-Yag-Lasers

II.1.1 Elemente des Lasers

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

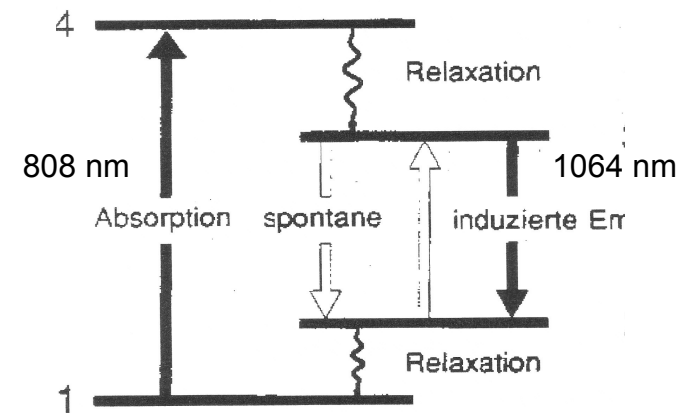
iv. Kristallvergleich

Ausblick

Wellenlängenverstellbarer Diodenlaser pumpt ND-YAG-Kristall

YAG-Kristall als aktives Pumpmedium (Vier-Niveau-Laser)

→ Besetzungsinversion



→ Ergebnis: Licht mit der Wellenlänge 1064 nm

→ Verstärkung und Erzeugung von kohärentem Licht durch Resonator

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



II.1.2 Vorbereitende Messung: Aufnahme der Arbeitsgeraden

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

- Wellenlänge des Laserdiodenlichtes variabel über Strom und Temperatur
- Arbeitsgerade: T über I auftragen für $\lambda = \text{const.}$
- Maximale Absorption des YAG-Kristalls bei 808,4 nm
- Bestimmung der Wellenlänge mittels USB-Spektrograph
 - Bestimmung der Arbeitsgeraden der Laserdiode für 808,4 nm

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Arbeitsgerade für 808,4 nm

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

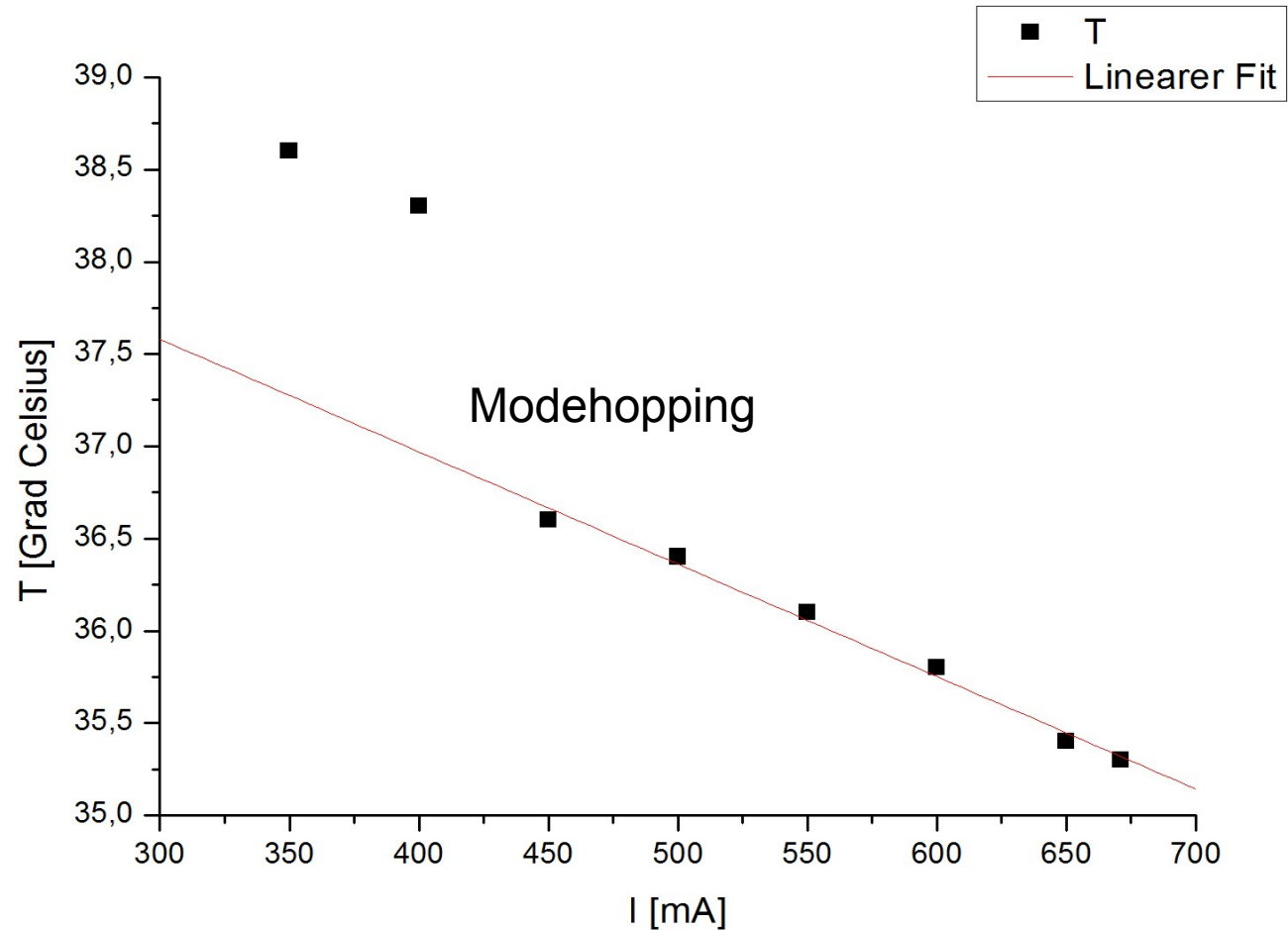
i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick



Ergebnis: bei maximaler Leistung Laserdioden-Betriebstemperatur von 35,3°C notwendig



II.2 Physikalische Grundlagen der Frequenzverdopplung

Motivation

**Funktionsweise des
ND-YAG-Lasers und
physikalische
Grundlagen**

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit
der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

- in Medium einfallendes Licht erzeugt als eine elektromagnetische Welle Polarisationschwingungen im Kristall

$$P = \epsilon_0 \sum_{n=0}^{\infty} \chi^{(n)} E^n \quad \chi \text{ Suszeptibilität/} \\ \text{Materialkonstante}$$

- Frequenzverdopplung: 2. Ordnung des Terms bei $E = E_0 \sin(\omega t)$

$$|P|^{(2)} = \epsilon_0 E_0^2 \chi^{(2)} \sin^2(\omega t) = \frac{\epsilon_0 E_0^2 \chi^{(2)}}{2} \cdot (1 - \cos(2\omega t))$$

→ Neben der Grundschiwingung entsteht Welle
mit doppelter Frequenz (**S**econd **H**armonic **G**eneration)

- Oberwellen-Intensität für schwache Konversion:

Maxwell+Annahmen+
Mathematik

$$\longrightarrow I_{SHG} = \Gamma^2 l^2 I_{FUN}^2 \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)^2}$$

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung ND-YAG-Laser

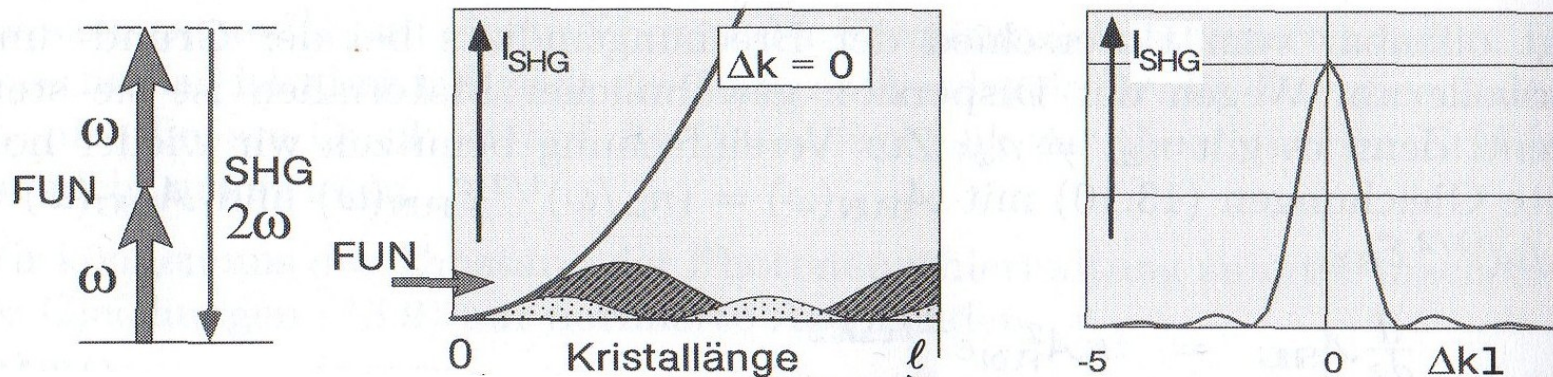
Oberwellenintensität:

$$I_{SHG} = \Gamma^2 l^2 I_{FUN}^2 \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)^2}$$

- Länge des Kristalls l
- Intensität der Grundwelle I_{FUN}
- Materialkoeffizient $\Gamma^2 = \frac{4 d_{eff}^2 \omega^2}{c^3 \epsilon_0 n_\omega^2 n_{2\omega}}$
- Phasenfehlanpassung: $\Delta k = \frac{2\omega}{c} (n_{2\omega} - n_\omega)$

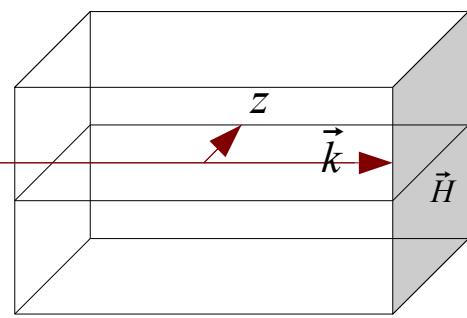
→ Max. Oberwellenintensität bei (Phasematching)

$$\Delta k = 0 \rightarrow n_{2\omega} = n_\omega$$





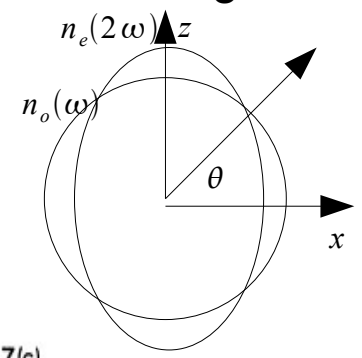
uniaxiale Kristalle



$\vec{E} \perp \vec{H} \Rightarrow n_o$ ist unabhängig von der Ausbreitungsrichtung

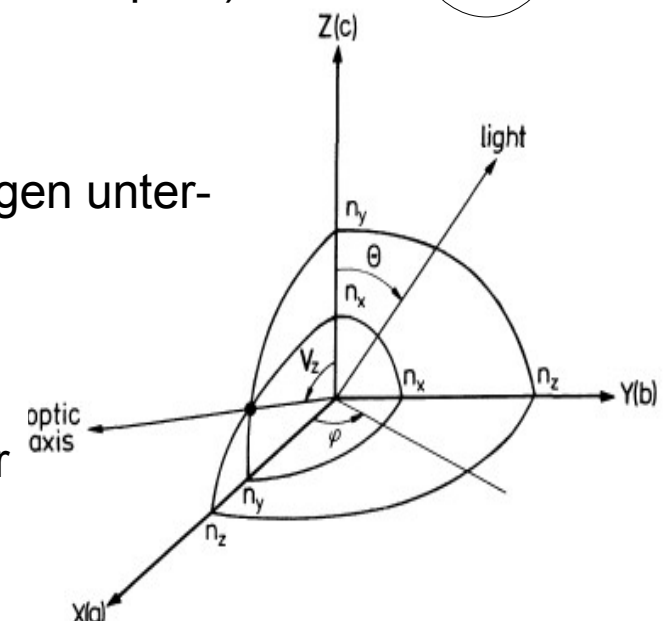
$\vec{E} \parallel \vec{H} \Rightarrow n_e$ ist abhängig von der Ausbreitungsrichtung

Phasematching unter Winkel θ



biaxiale Kristalle (KTP = Potassium Titanyl Phosphat)

- zwei optische Achsen
- Brechungsindex in allen Raumrichtungen unterschiedlich
- aber: in jeder kristallographischen Hauptebene existieren je ein ordentlicher und ein außerordentlicher Index



- Motivation
- ### Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen
- Aufbau
- Messungen
- Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
 - Konversionseffizienz
 - Cavity Ringdown
 - Kristallvergleich
- Ausblick

Frequenzverdopplung ND-YAG-Laser



III. Versuchsaufbau

Motivation

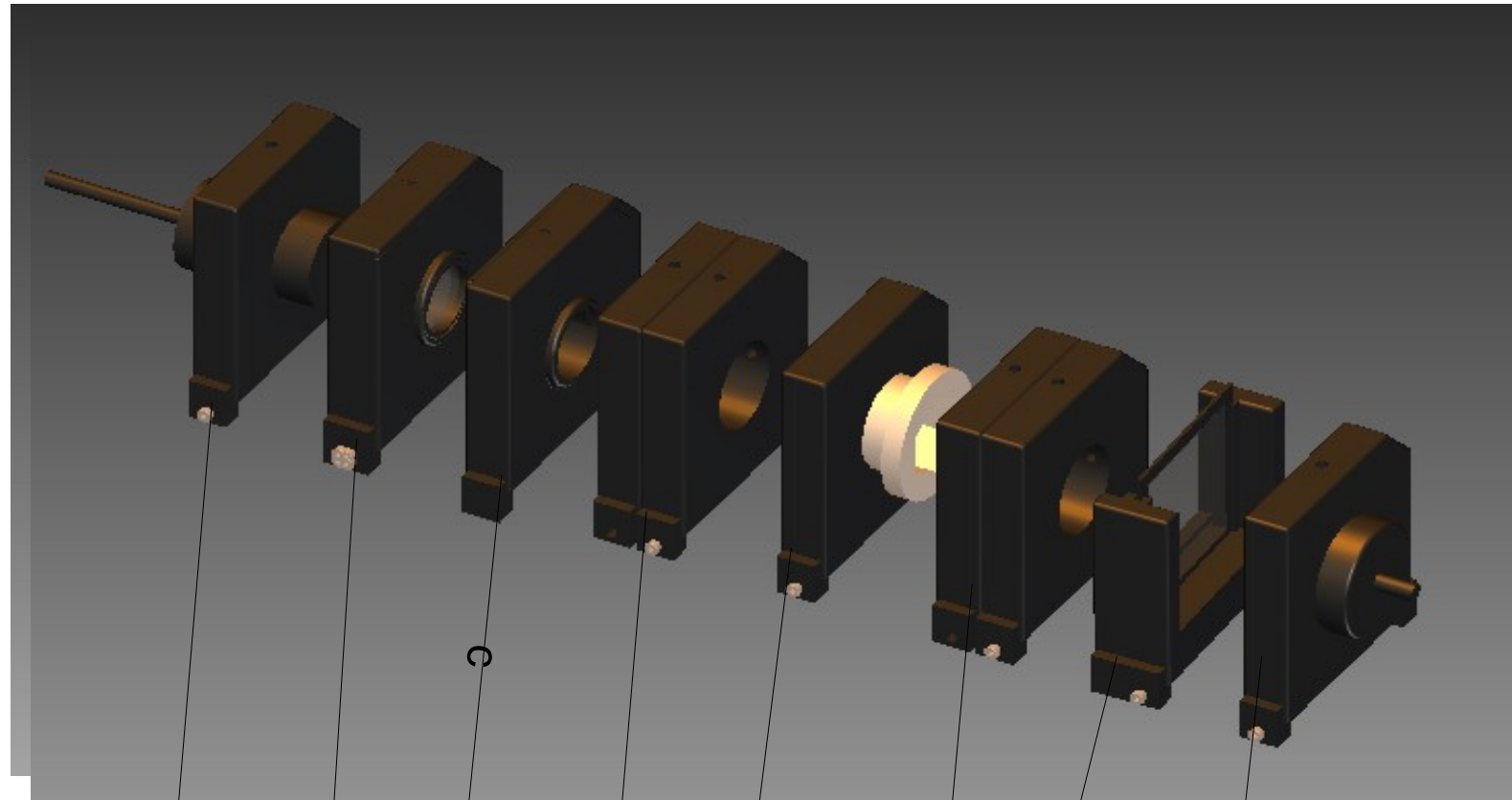
Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

- i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
- ii. Konversionseffizienz
- iii. Cavity Ringdown
- iv. Kristallvergleich

Ausblick



Laserdiode

Fokussier-
linse

KTP-
Kristall

Filter

Kollimator

YAG-
Kristall

Auskoppel-
spiegel

Diode/
Powermeter

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



IV.1 Untersuchung zur Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

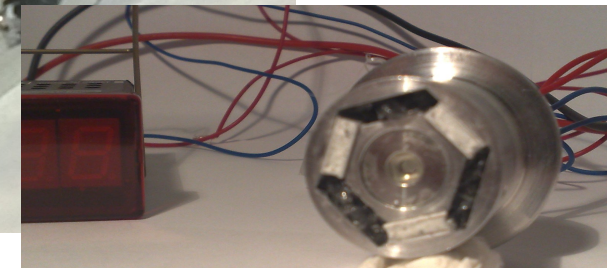
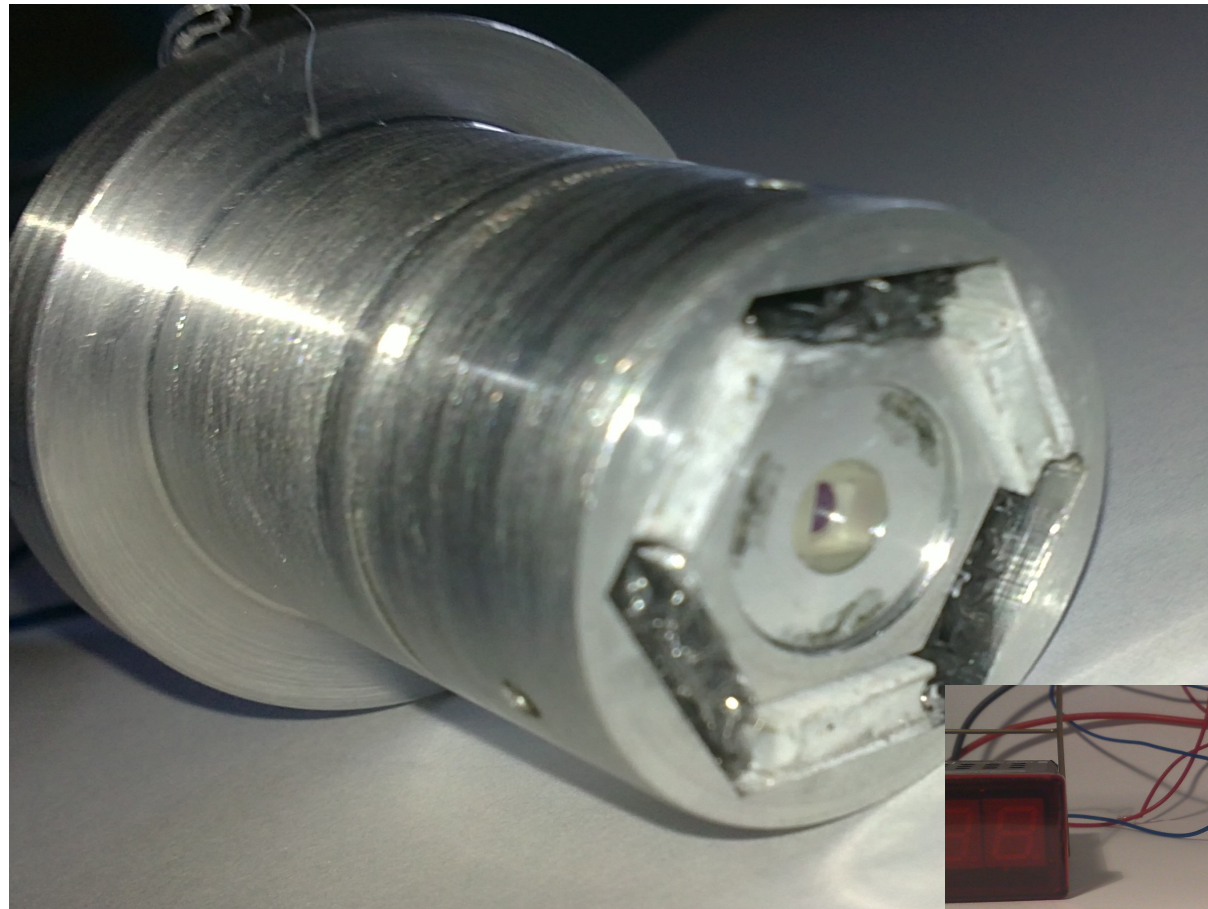
i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

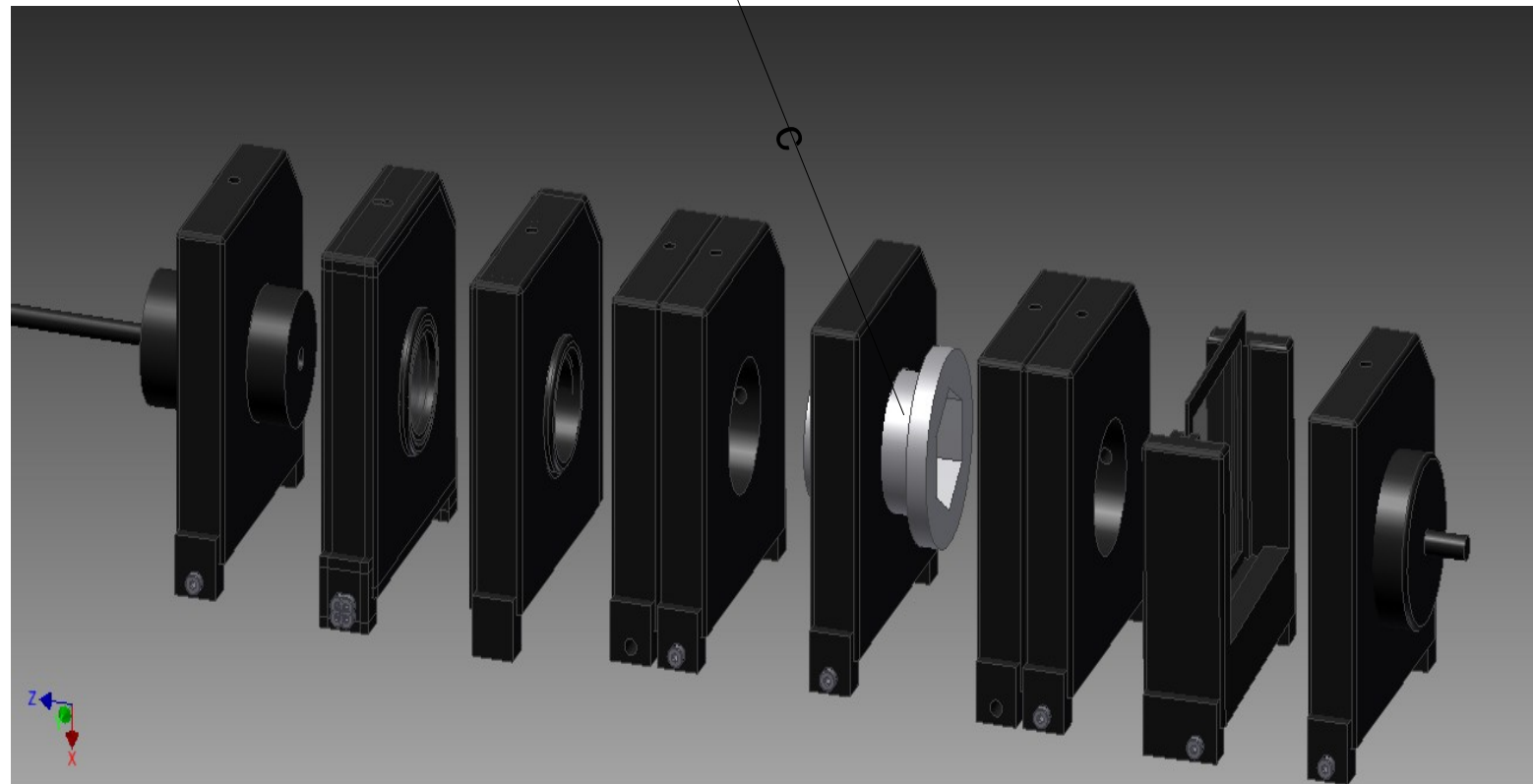


Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



IV.1.1 Kristallheizung

Kristallheizung



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperatur-abhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

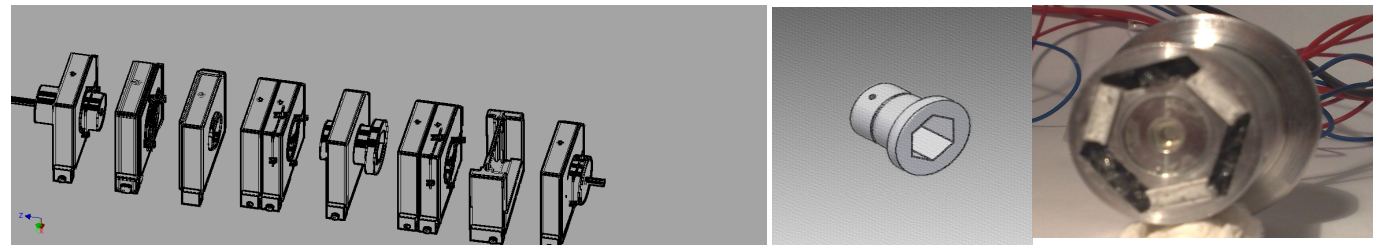
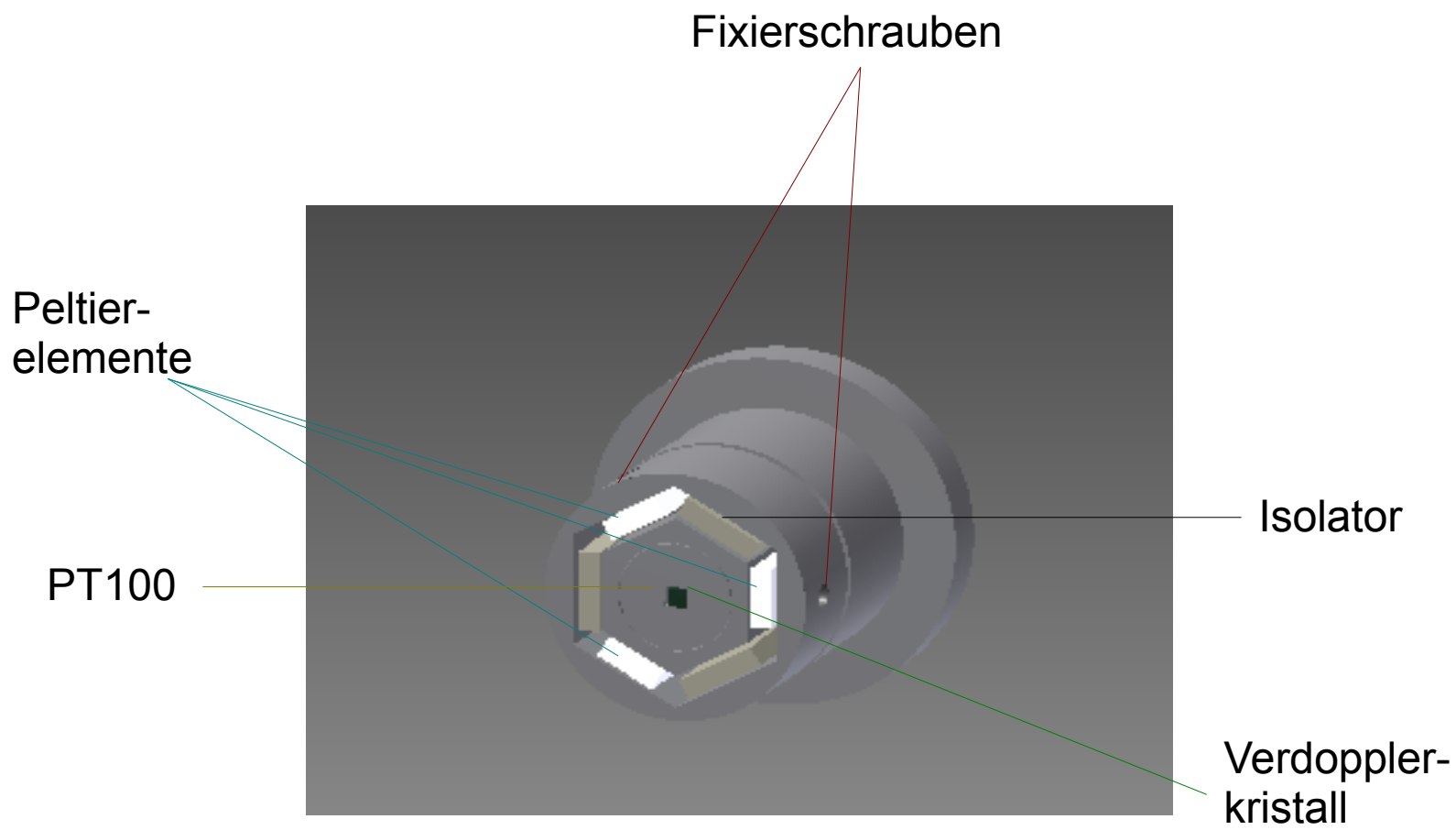
Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Kristallheizung:

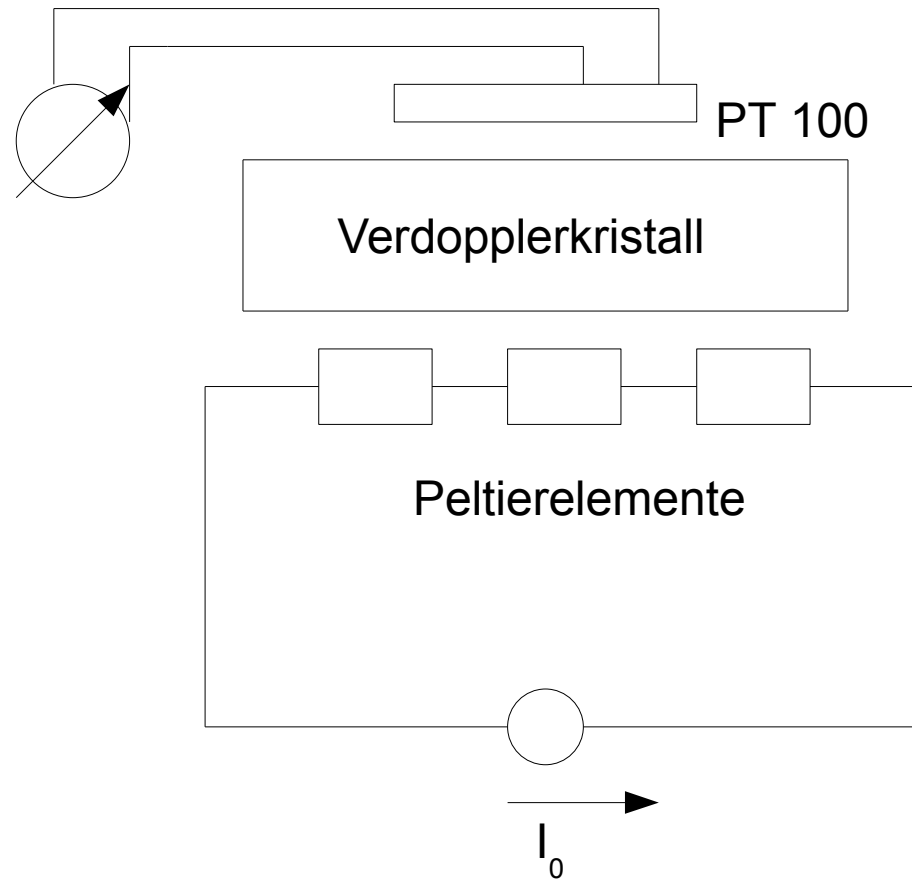
- Motivation
- Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen
- Aufbau
- Messungen
 - i. Temperatur-abhängigkeit der Frequenzverdopplung**
 - ii. Konversionseffizienz
 - iii. Cavity Ringdown
 - iv. Kristallvergleich
- Ausblick



Frequenzverdopplung ND-YAG-Laser



Blockschaltbild der Kristallheizung



- einstufige Mikropeltierelemente $I_{\max} = 1,2 \text{ A}$ $U_{\max} = 3,9 \text{ V}$
- Messfühler PT100
- Digitalanzeige für PT100

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperatur-abhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Simulation Temperaturverteilung im Kristall

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperatur-abhängigkeit der Frequenzverdopplung

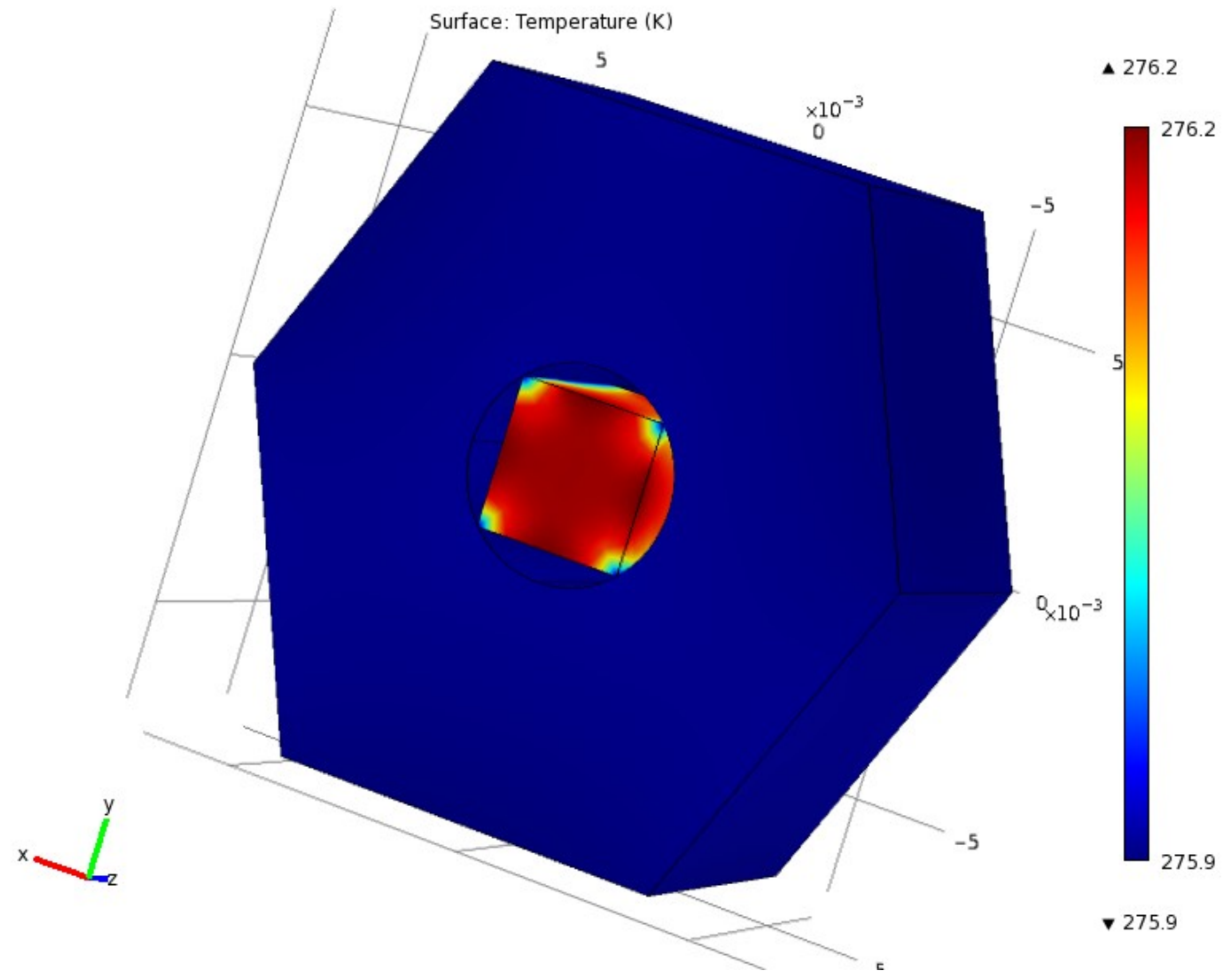
ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser





Simulation Temperaturverteilung im Kristall

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

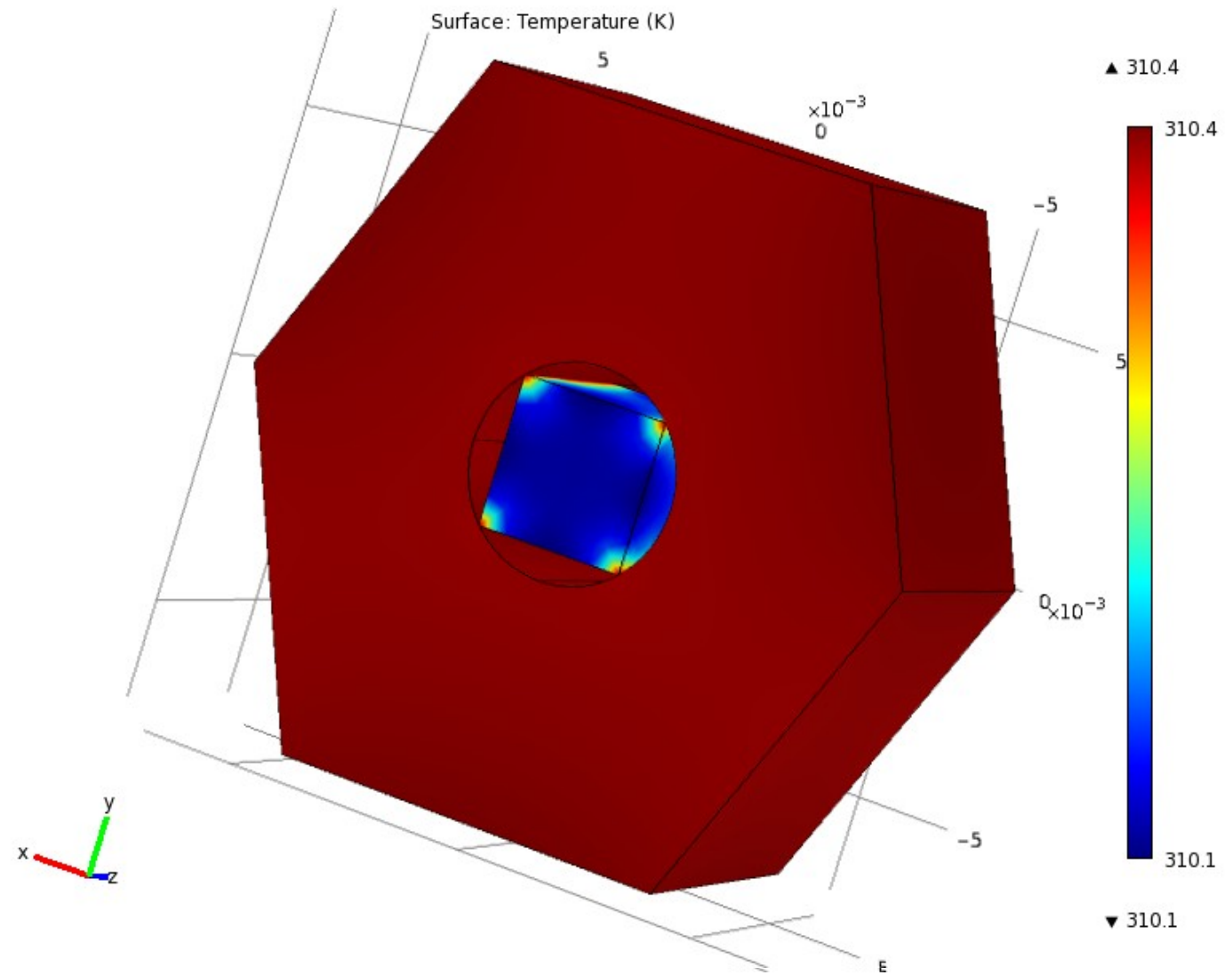
ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser





IV.1.2 Messungen

Justage des Kristalls auf bestmögliche Phasenanpassung zur Erzeugung maximaler Oberwellenleistung

Vorgehensweise:

- Regulierung des Stroms an den Peltierelementen bei konstanter Spannung $U = 6 \text{ V}$
- Warten (i.d.R. 8-10 Min.), bis die Temperaturverteilung konstant ist
- Ablesen der Kristalltemperatur sowie der Leistung des grünen Laserlichts
 - Messinstrument: Photodiode ($I \sim$ Intensität)
 - Messgröße: Spannung
- regelmäßiges Überprüfen der Raumtemperatur

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperatur-abhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Messkurve: Leistung der SHG in Abhängigkeit von der Kristalltemperatur

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

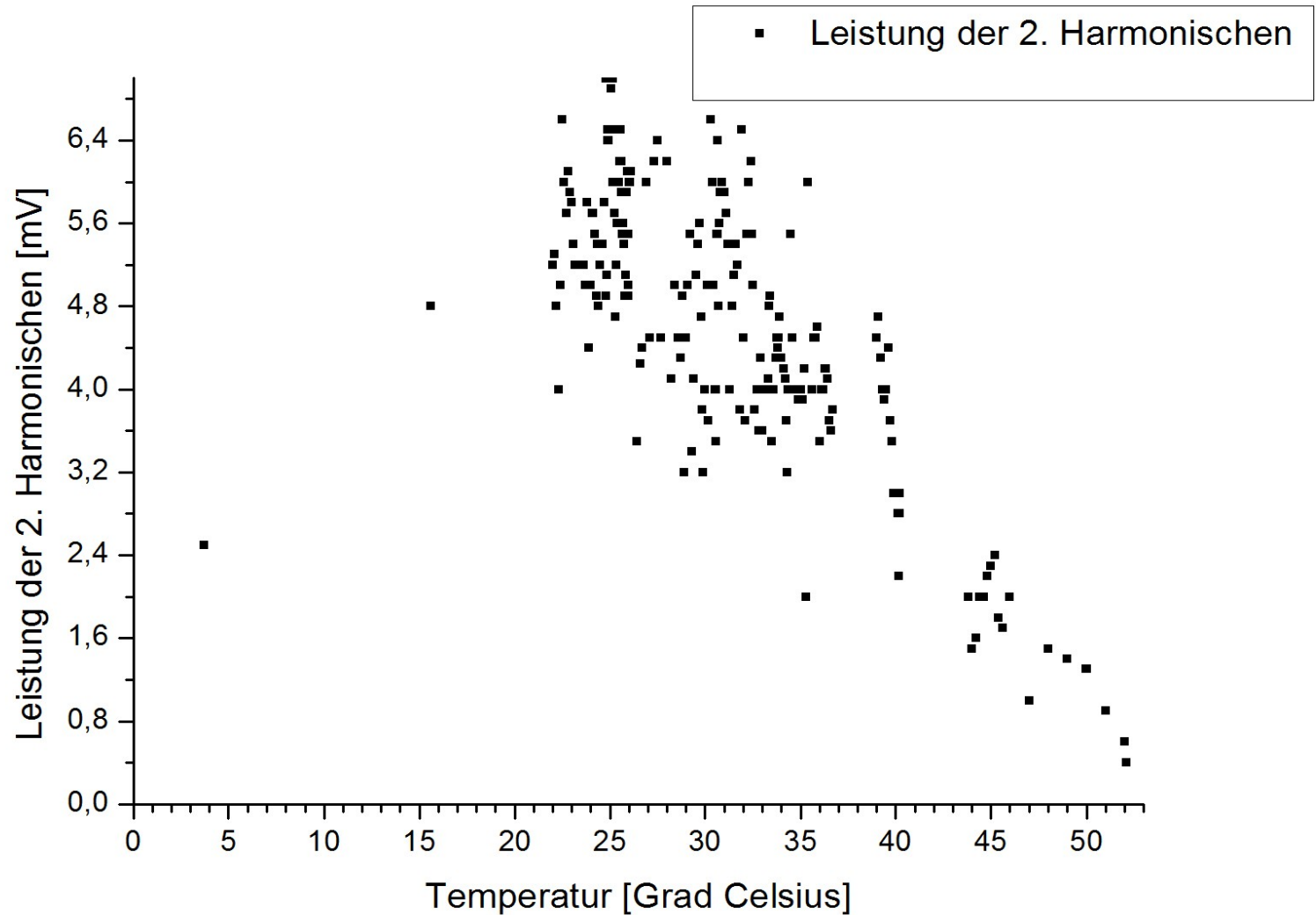
i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

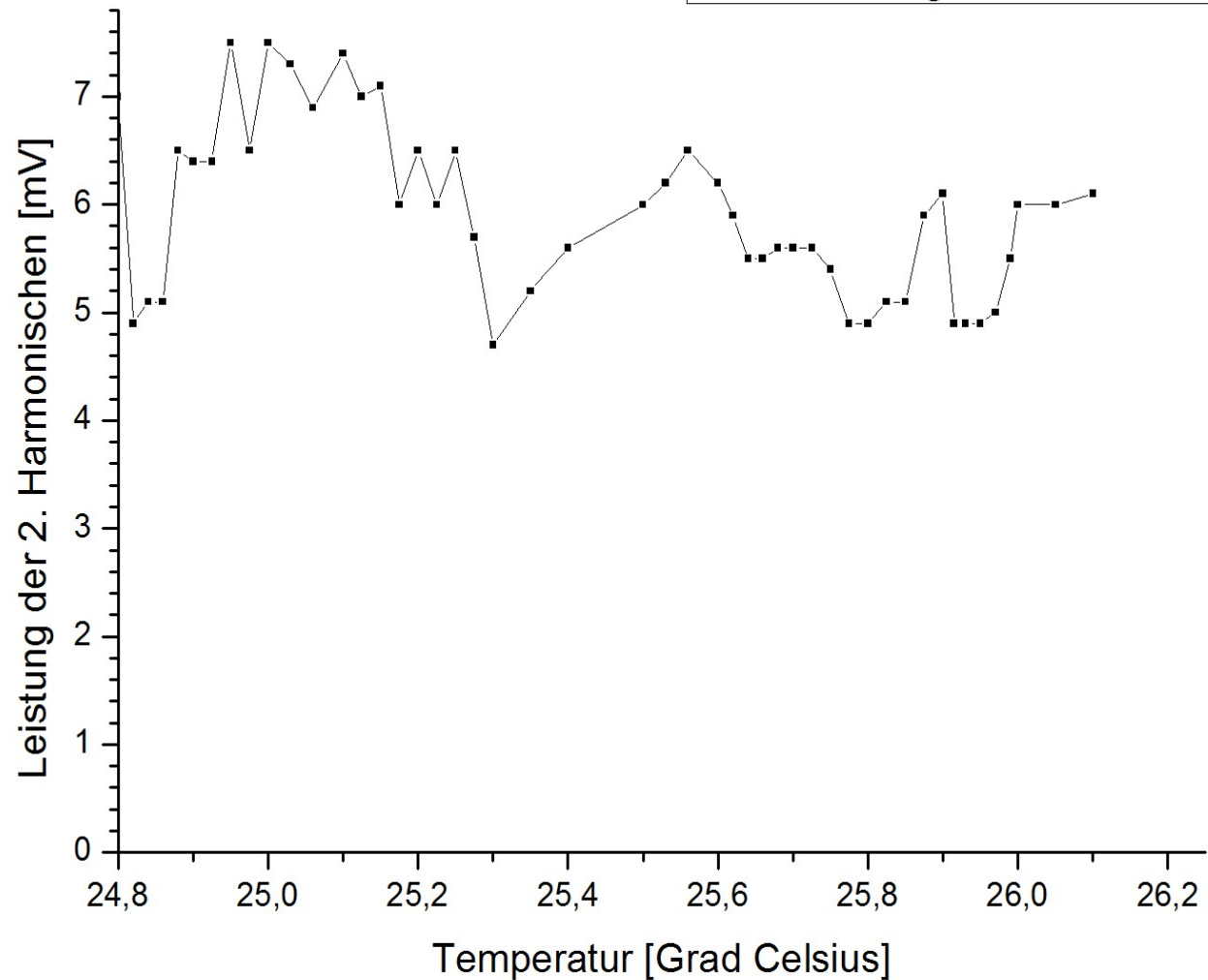
Ausblick





Datenausschnitt

— ■ — Leistung der 2. Harmonischen



- Motivation
- Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen
- Aufbau
- Messungen
 - i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung**
 - ii. Konversionseffizienz
 - iii. Cavity Ringdown
 - iv. Kristallvergleich
- Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Idee: Daten mitteln und quadratischer Fit

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperatur-abhängigkeit der Frequenzverdopplung

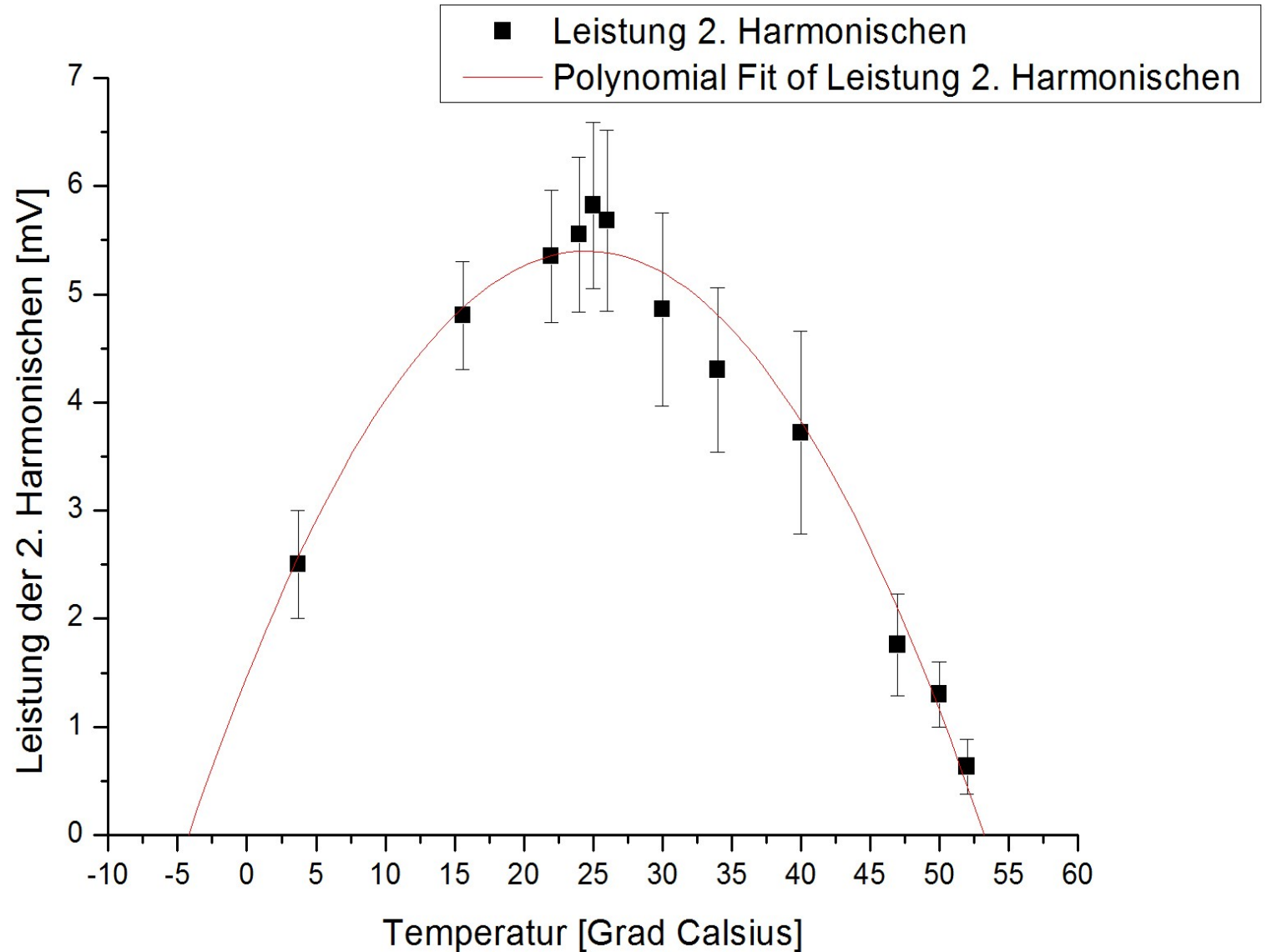
ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser





IV.1.3 Theorie

Phasenanpassung: nur Δk ist abhängig von der Kristalltemperatur, da
 δl im Bereich μm
 δn im Bereich 10^{-5}

$$P_{2\omega} = P_{2\omega, \max} \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)^2}$$

$$P_{2\omega} = P_{2\omega, \max} \left(1 - \frac{1}{12} \Delta k^2 l^2\right)$$

$$NR: \frac{\sin^2(x)}{x^2} \approx \frac{\left(x - \frac{1}{6}x^3\right)^2}{x^2} = 1 - \frac{1}{3}x^2 \text{ (Sinc-F.)}$$

quadratischer Fit für $P_{2\omega}$

$$P_{2\omega} = A + B_1 T + B_2 T^2 = C_1 + C_2 (T - T_0)^2$$

Koeffizientenvergleich liefert

$$\Delta k = \sqrt{\frac{12C_2}{l^2}} (T - T_0)$$

$$\rightarrow \frac{\partial \Delta k}{\partial T} = \sqrt{\frac{12C_2}{l^2}} = \frac{2\omega}{c} \frac{\partial}{\partial T} (n_{2\omega} - n_\omega)$$

→ Änderungen von Δk und Δn abschätzbar

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



IV.1.4. Auswertung

gemittelte Daten mit quadratischem Fit und sinc-Funktion

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperatur-abhängigkeit der Frequenzverdopplung

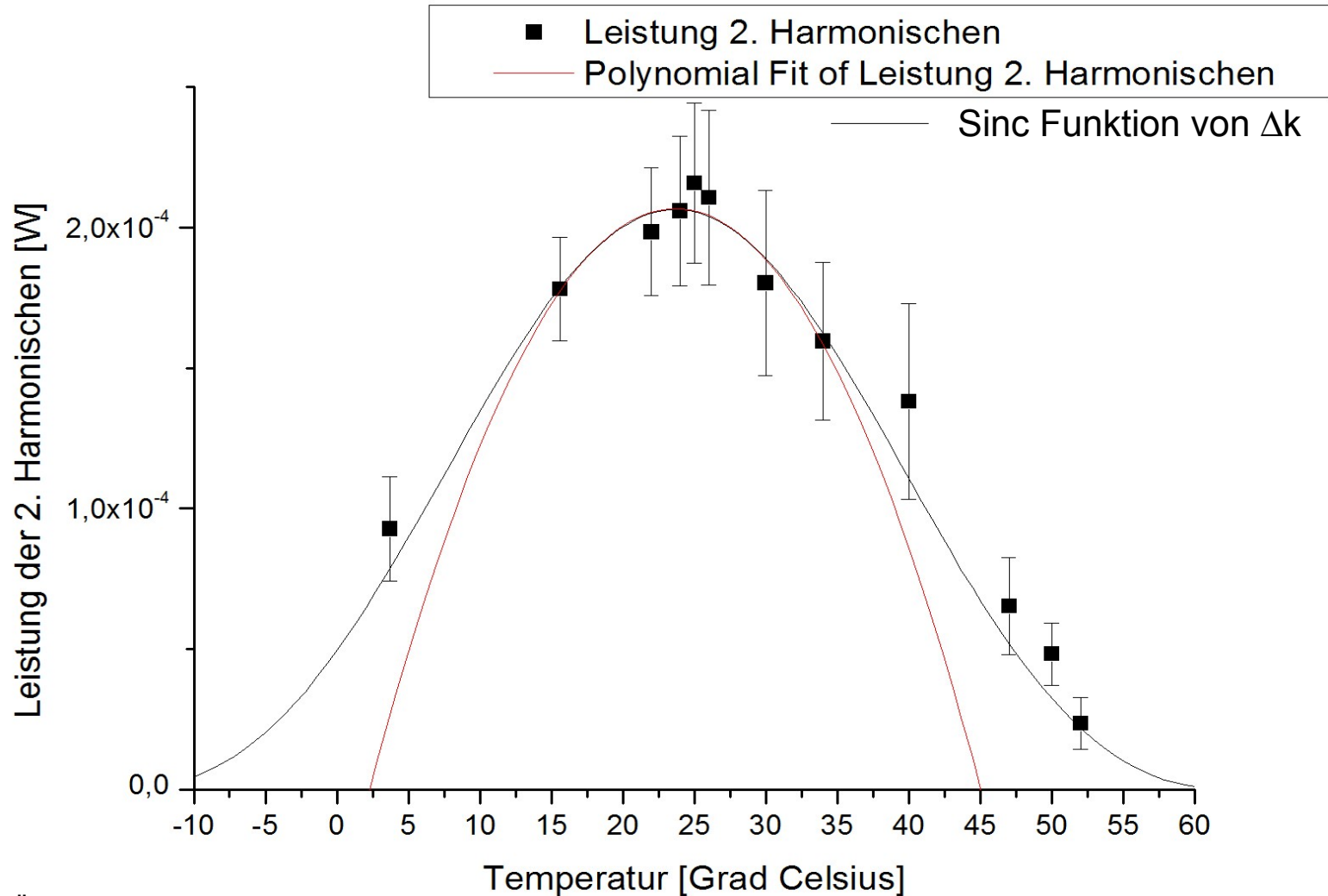
ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Änderung im quadratischen Fit



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

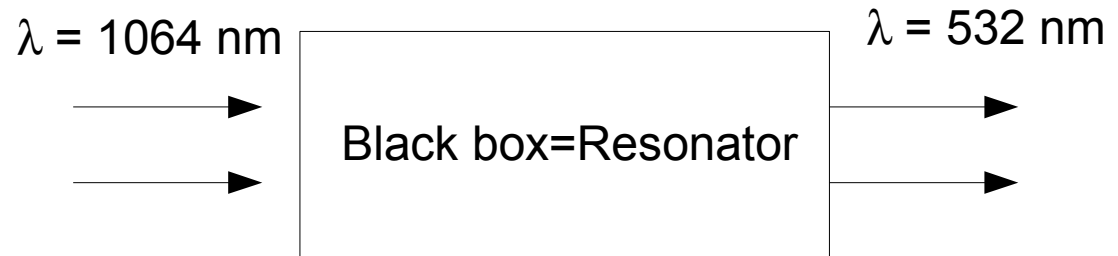
Ausblick

- Messwerte schwanken deutlich um den angelegten quadratischen Fit
→ Modensprünge
- Während der Temperaturänderung nach der Leistungseingabe ist ein Pendeln der Intensität erkennbar
→ Modensprünge, inhomogene Temperaturverteilung
- Berechnete Werte: $\frac{\partial \Delta k}{\partial T} = 56 \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $\frac{\partial (n_{2\omega} - n_{\omega})}{\partial T} \sim 10^{-7} \text{ K}^{-1}$
keine Literaturwerte gefunden
- Charakteristische Temperatur $\Delta T = 1,772 \frac{\pi}{L} \left(\frac{\partial \Delta k}{\partial T} \right)^{-1} = 33 \text{ K}$
weist nach Literatur auf einen KTP-Kristall mit Lichteinfall durch die XY-Ebene („Handbook of Nonlinear Crystals“ Dmitriev et al.)
 $\Delta T_L = 25 \text{ K}$
→ Stimmt überein mit unseren gemessenen $\Delta T = 33 \text{ K}$



IV.2 Konversionseffizienz

Fragestellung: Wie effizient wandelt ein Kristall eingehendes Laserlicht in frequenzverdoppeltes um?



IV.2.1 Theorie

$$I_{SHG} = \Gamma^2 l^2 I_{FUN}^2 \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)^2} \quad \text{Es gilt } P_{2\omega} \propto P_{\omega}^2, \Delta k = 0$$

$$\text{und } \epsilon := \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \frac{\alpha P_{\omega}}{A} \quad \left(\alpha = \Gamma^2 l^2 = \frac{4 d_{eff}^2 \omega^2}{c^3 \epsilon_0 n_{\omega}^2 n_{2\omega}} l^2 \right)$$

d_{eff} nichtlinearer Koeffizient
 A Laserquerschnitt mit $R \approx 0,5 \text{ mm}$ (Schätzwert)

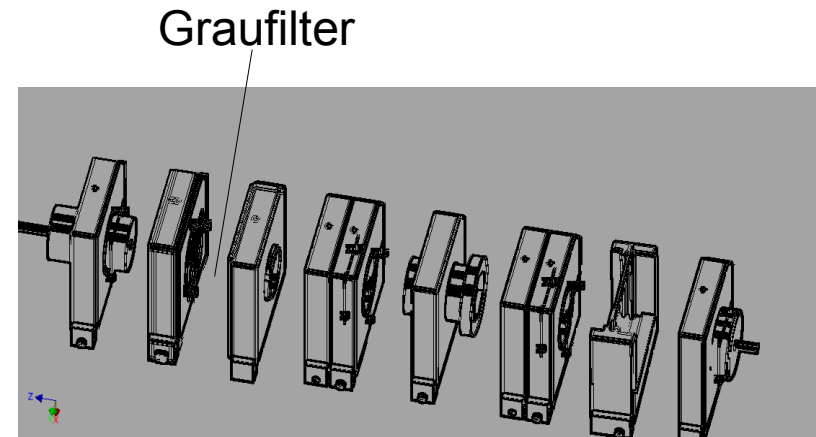
- Motivation
- Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen
- Aufbau
- Messungen
 - i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
 - ii. Konversionseffizienz**
 - iii. Cavity Ringdown
 - iv. Kristallvergleich
- Ausblick



IV.2.2 Messung

Messvorgang:

KTP-Kristall, Powermeter
(Aufnahme Ausgangsleistung)



Zwei verschiedene Messreihen:

- 1) mit Grünfilter zur Messung der Leistung des 532 nm - Lichts
- 2) mit RG850 zur Messung der Leistung des 1064 nm - Lichts

Variation der Pumpleistung des 808 nm - Lichts mit Graufiltern mit verschiedenen Transmissionskoeffizienten

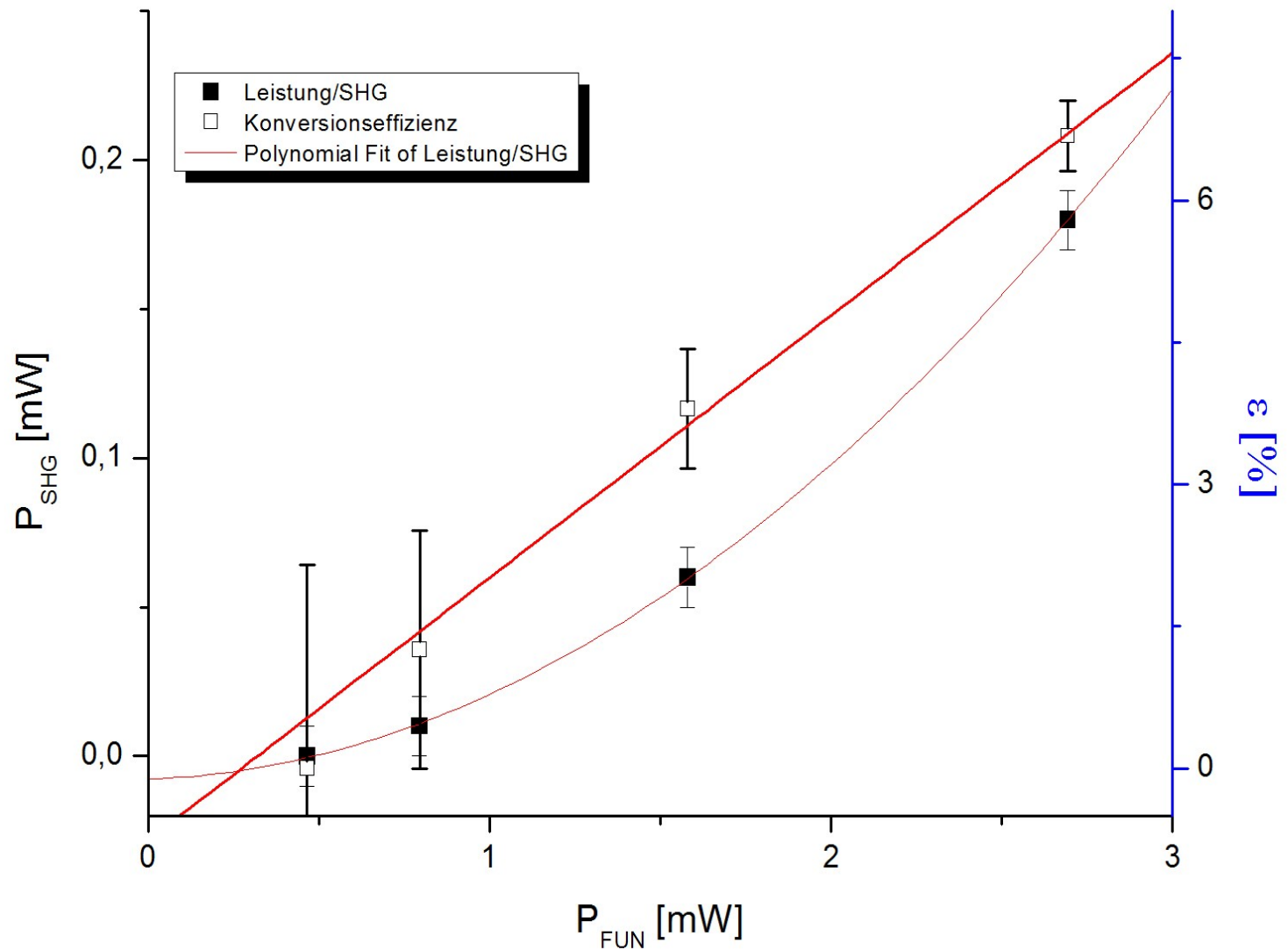
→Vorteil:

Vermeidung von Wellenlängeverschiebung der Diode durch Regelung des Diodenstromes und der Temperatur

- Motivation
- Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen
- Aufbau
- Messungen
 - i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
 - ii. Konversions-effizienz**
 - iii. Cavity Ringdown
 - iv. Kristallvergleich
- Ausblick



Graph zur Konversionseffizienz



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



IV.2.3 Auswertung:

- Bestätigung des quadratischen Zusammenhangs der verschiedenen Leistungen
- Außerhalb des Resonators ergibt sich der nicht lineare Konversionskoeffizient zu

$$\eta = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}^2} = 25 \pm 1 \left[\frac{1}{W} \right]$$

$$\text{mit } P_{\omega, \text{ext}} = 2,69 \text{ mW}$$

$$P_{2\omega, \text{max}} = 0,2 \text{ mW}$$

- Innerhalb des Resonators ist

$$\eta = (9,9 \pm 0,6) 10^{-7} \left[\frac{1}{W} \right]$$

$$P_{\omega, \text{int}} = \frac{P_{\omega, \text{ext}}}{T_F T} = 13,5 \text{ W}$$

T_F Trans. Filter

was zu einem $d_{\text{eff}} = 3 \pm 1 \left[\frac{\text{pm}}{\text{V}} \right]$ führt

→ gute Übereinstimmung mit Literaturwerten von $d_{\text{eff}} = 2-5 \text{ [pm/V]}$ (HoNC)

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversions-effizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick



IV.3 Cavity Ringdown

Ziel: Untersuchung der Ereignisse im Resonator

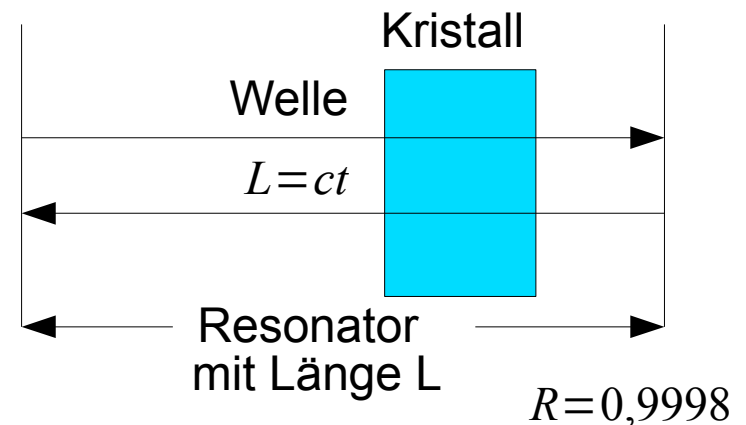
IV.3.1. Vergleich der Abfallszeiten

IV.3.1.1 Theorie

$$N(t) = N_o \exp(-Vt) = N_o \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad \rightarrow V = \frac{1}{\tau} \rightarrow V = \frac{c}{2L} (1 - R)$$

mit zusätzlichem Verlust durch Medium im Resonator $\frac{c}{2L} 2A$

$$V = \frac{c}{L} A + \frac{c}{2L} (1 - R)$$



- Motivation
- Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen
- Aufbau
- Messungen
 - i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
 - ii. Konversionseffizienz
 - iii. Cavity Ringdown**
 - iv. Kristallvergleich
- Ausblick



- Motivation
- Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen
- Aufbau
- Messungen
 - i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
 - ii. Konversionseffizienz
 - iii. Cavity Ringdown**
 - iv. Kristallvergleich
- Ausblick

Vorüberlegung:

- die Intensität der SHG-Welle wächst mit dem Quadrat der Intensität der Fundamentalwelle (hier: $\Delta k=0$)

$$I_{SHG} = \Gamma^2 l^2 I_{FUN}^2$$

$$I_{FUN} \propto e^{-t/\tau} \implies \tau_{SHG} = \frac{\tau_{FUN}}{2}$$

mit $\tau_{FUN} = \frac{2L_{RES}}{c \cdot (1-R)} \approx 2 \mu s (L_{RES} = 6 \text{ cm}, R = 0,9998)$

→ 532 nm-Licht fällt im Resonator doppelt so schnell ab wie das 1064 nm-Licht



IV.3.1.2 Messung



- Laser läuft im gepulsten Betrieb
- Spiegelreflektivität für 1064 nm $R=0,9998$
- Messung der 808,4 nm- und der 1064 nm/532 nm- Leistung
- Simultane Darstellung mit der abfallenden Flanke des Diodenstroms auf dem Oszilloskop

3 verschiedene Versuchsaufbauten mit 2 verschiedenen Kristallen:

1. Aufbau mit Verdopplerkristall und Grünfilter
→ Abfallszeit von 532 nm
2. Aufbau mit Verdopplerkristall und RG850
→ Abfallszeit von 1064 nm
3. Aufbau ohne Verdopplerkristall, mit RG850
→ Abfallszeit von 1064 nm

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

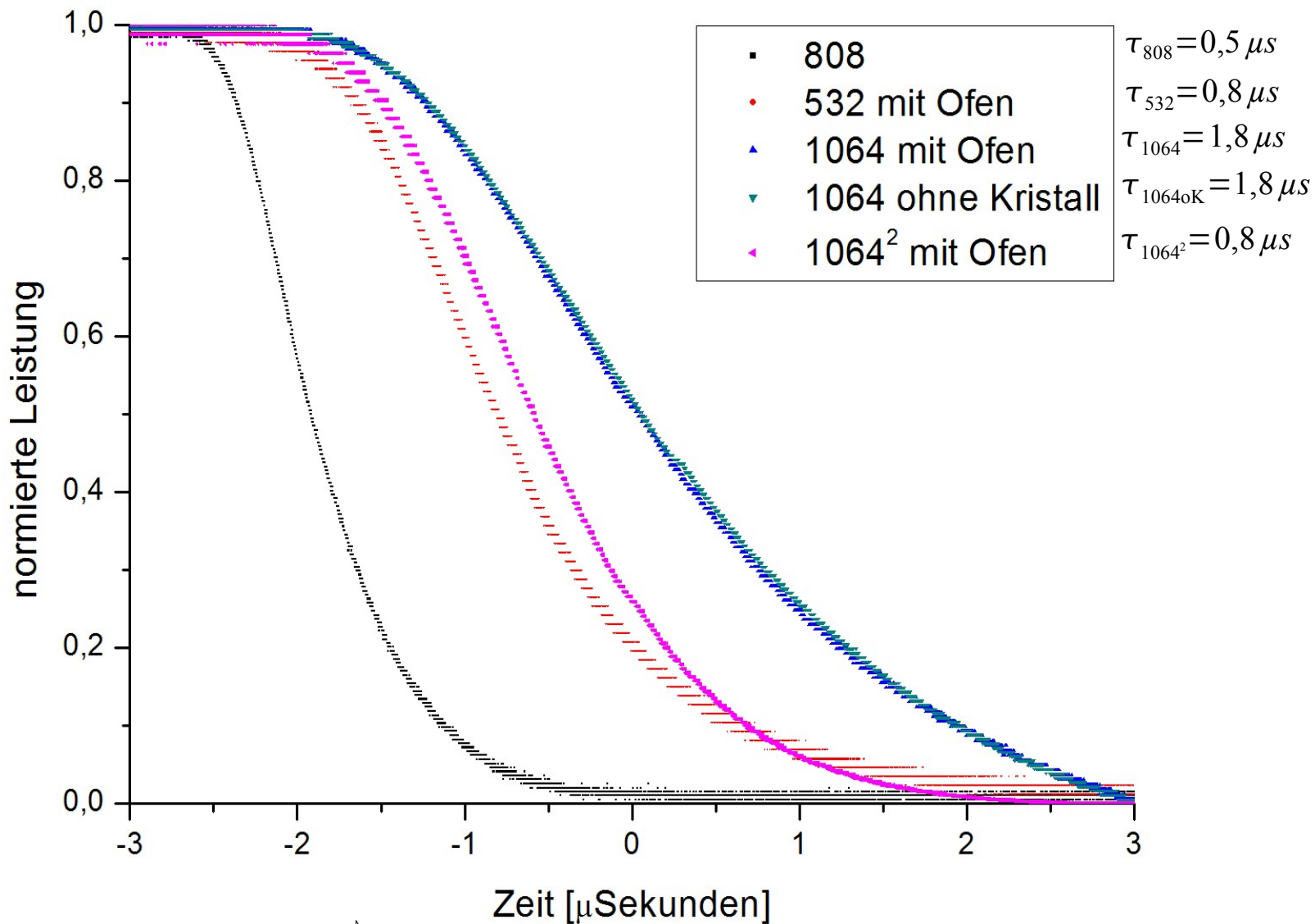
iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Aufgenommene Kurven (mit dem Kristallofen)



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

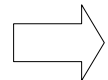
i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick



I² Gesetz bestätigt sich

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Detailansicht und Vergleich von 1064nm Abfall

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

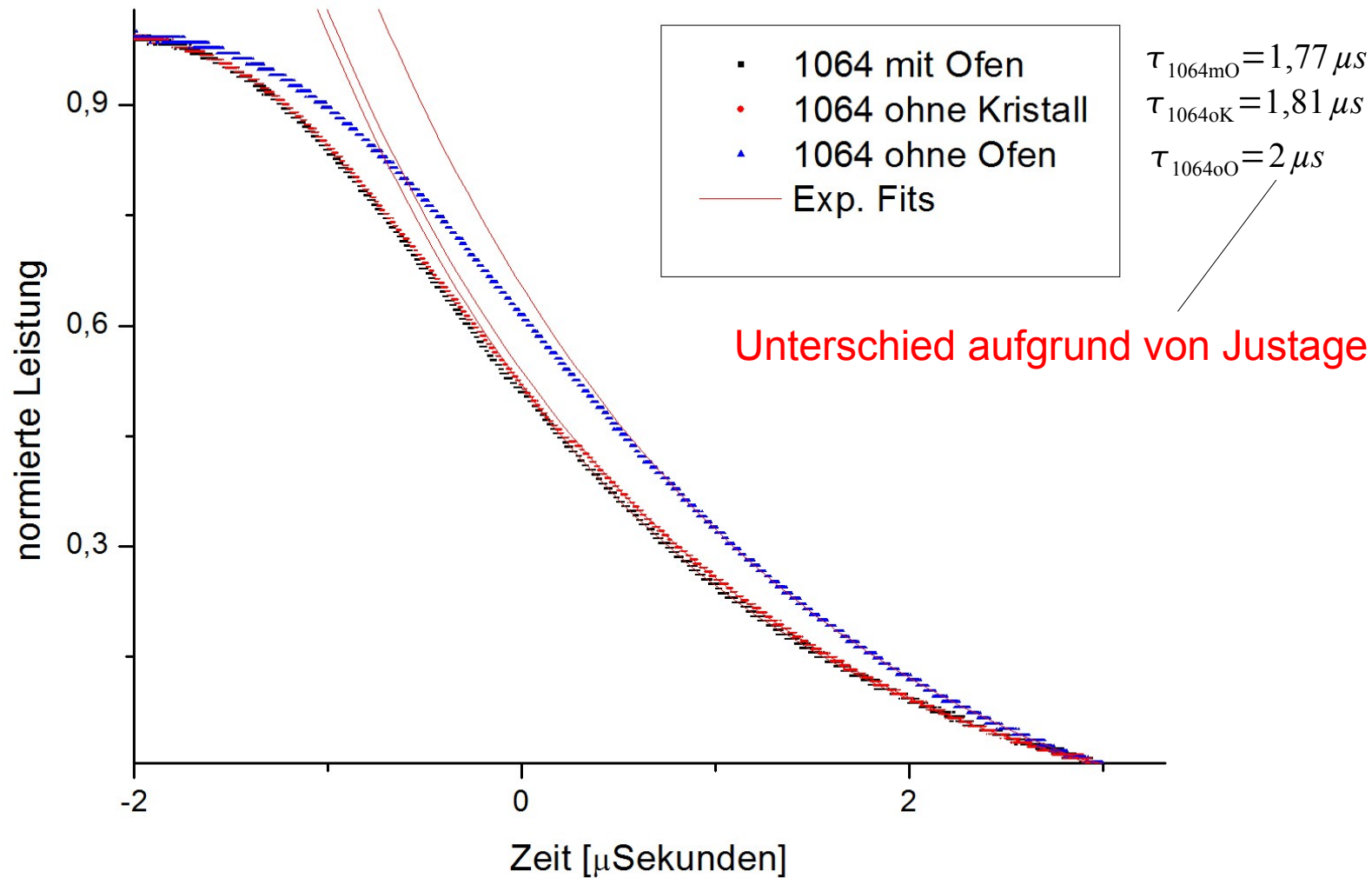
ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

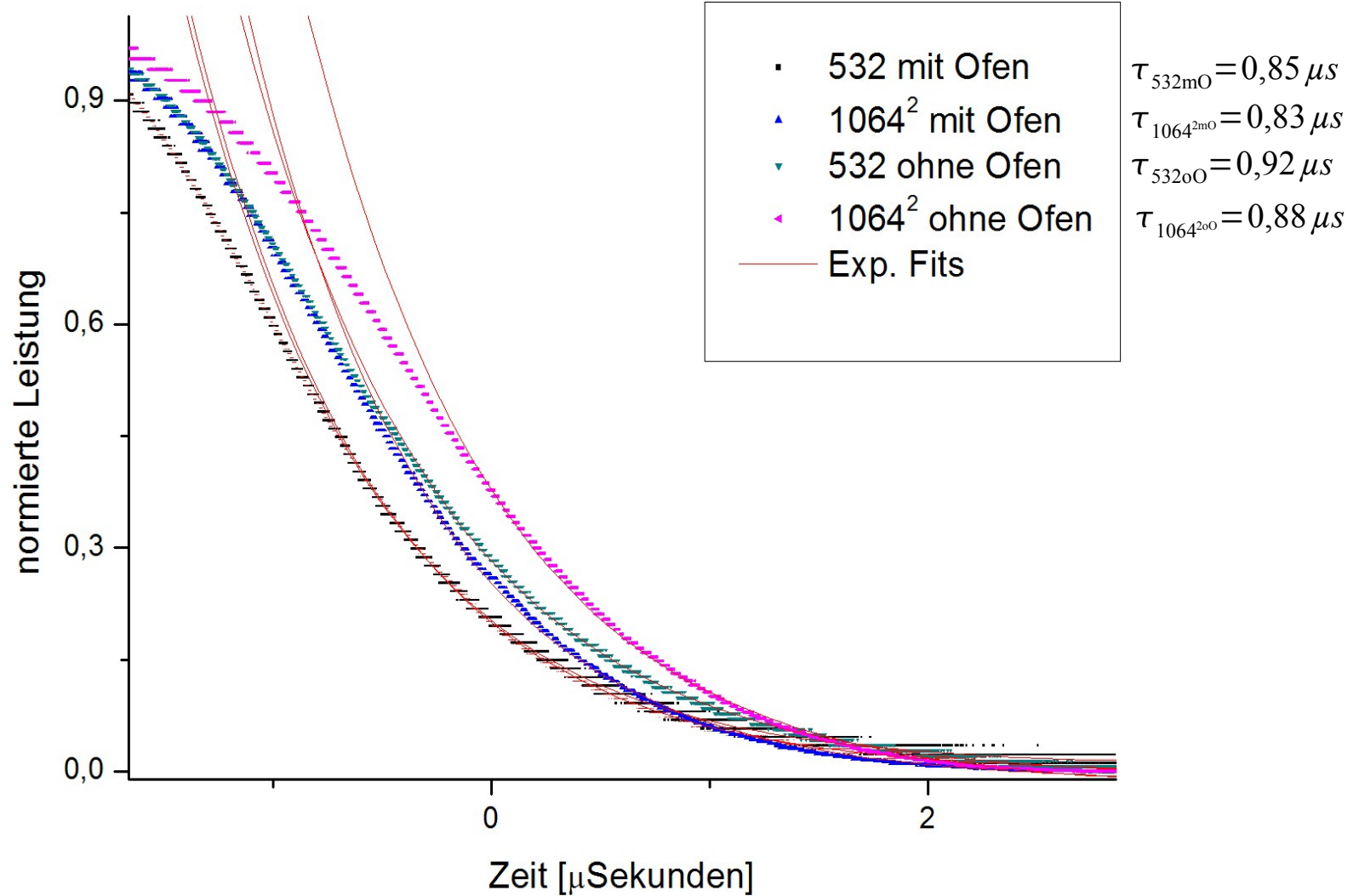
Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser





Detailansicht und Vergleich von 532nm Abfall



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick



IV.3.2 Absorptionsverhalten

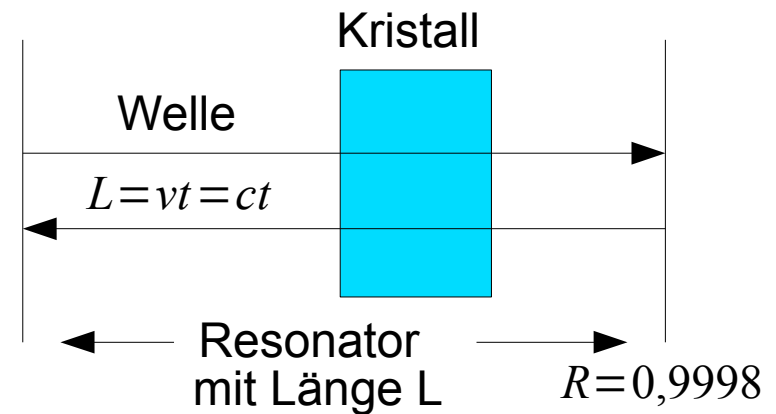
IV.3.2.1 Theorie

Messung der Absorption durch den Kristall bei verschiedenem Phasematching durch Drehen des Kristalls.

→ *Leistungsverlust i. Kristall durch Konversion* $\langle A_\epsilon \rangle = \langle \frac{P_{2\omega}}{P_\omega} \rangle$
→ *Leistungsverlust i. Kristall durch Absorption* $\langle A_k \rangle$

$$V = \frac{c}{L} A + \frac{c}{2L} (1 - R)$$

$$\Delta A = \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) \frac{L}{c}$$



Änderung der Resonatorlänge auf 5,5 cm → $\tau_{res} = 1,83 \mu s$

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

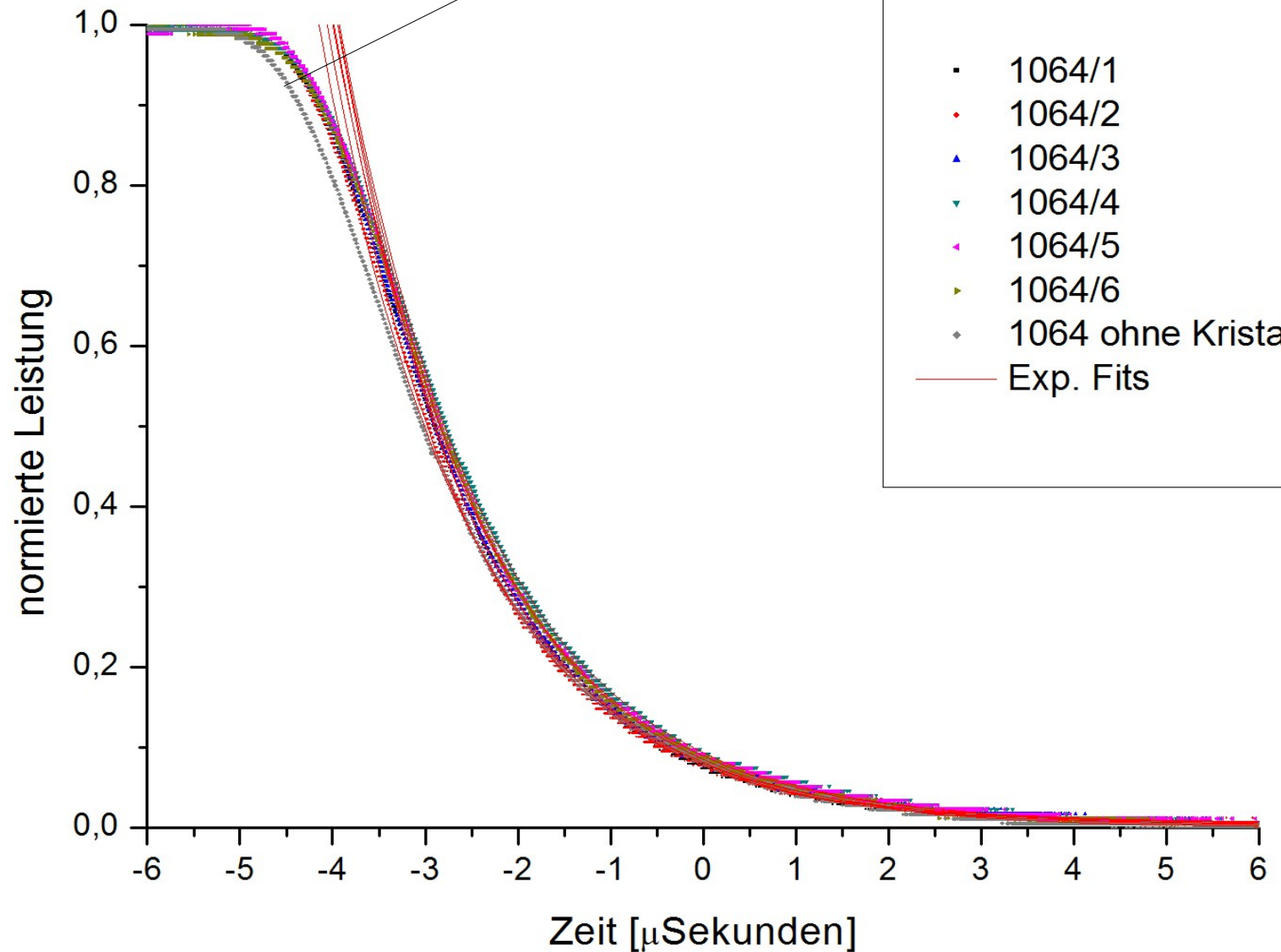
Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



IV.3.2.2 Messung

Bemerkung: 1064 ohne Kristall wurde zu einem anderen Zeitpunkt aufgenommen, daher Verschiebung in der Zeitachse



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

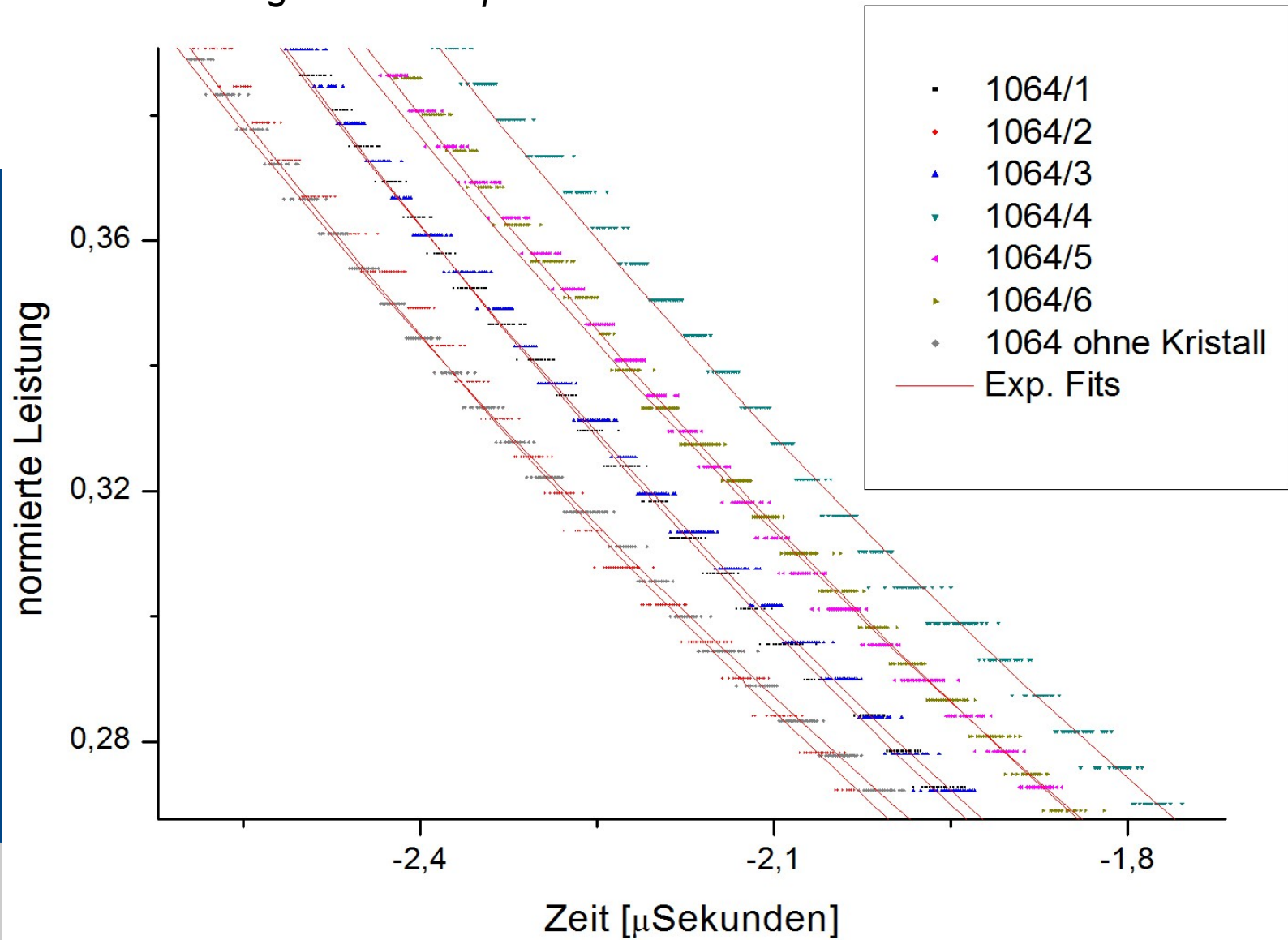
iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Untersuchung zum Absorptionsverhalten



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

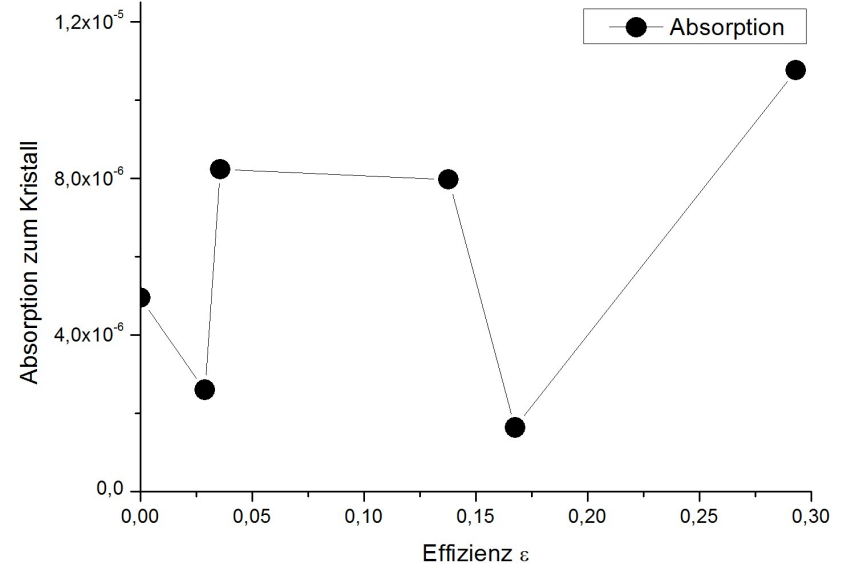
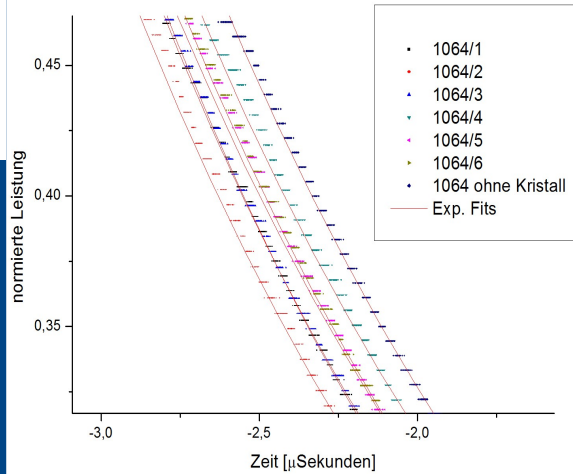
Messungen

- i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
- ii. Konversionseffizienz
- iii. Cavity Ringdown**
- iv. Kristallvergleich

Ausblick



Untersuchung zum Absorptionsverhalten



$$\epsilon = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}}$$

Kurve	τ [µs]	ϵ	ΔA E-6
1064/1	1,5	0,29	10,7
1064/2	1,53	0,04	8,2
1064/3	1,54	0,14	8,0
1064/4	1,62	0,17	1,63
1064/5	1,61	0,03	2,6
1064/6	1,58	0	4,9
1064 ohne Kristall	1,65	-	0

- Motivation
- Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen
- Aufbau
- Messungen
 - i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung
 - ii. Konversionseffizienz
 - iii. Cavity Ringdown**
 - iv. Kristallvergleich
- Ausblick

Frequenzverdopplung ND-YAG-Laser



IV.3.3 Auswertung:

Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser

Absorption 1064 zu 532

$$\tau_{min} = 1,50 * 10^{-6} s$$

$$\tau_{base} = 1,62 * 10^{-6} s$$

Absorption 1064 durch Kristall

$$\tau_{base} = 1,62 * 10^{-6} s$$

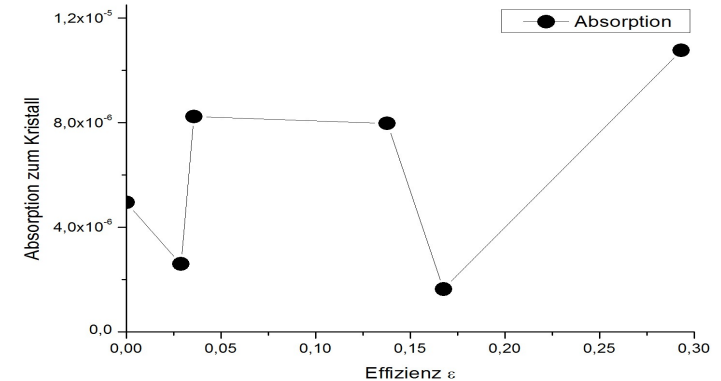
$$\tau_{oK} = 1,65 * 10^{-6} s$$

*Keine gute Übereinstimmung mit Literaturwert $A_{Lit} = 6 * 10^{-5}$*

Diskussion: - Literaturwert „alt“ → bessere Synthetisierung heute?

- Instabilitäten in der Kavität

- Absorption passt größenordnungsmäßig



$$\rightarrow A_{\epsilon} = 9,13 * 10^{-6}$$

$$\rightarrow A_{\epsilon} P_{\omega, int.} \approx 0,12 mW$$



V Kristallvergleich

Frequenzkonversion mit weiteren Kristallen

→ keine Frequenzverdopplung möglich

Vermutung: Kristall hat zu große Abmessungen für den leistungsschwachen Laser



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

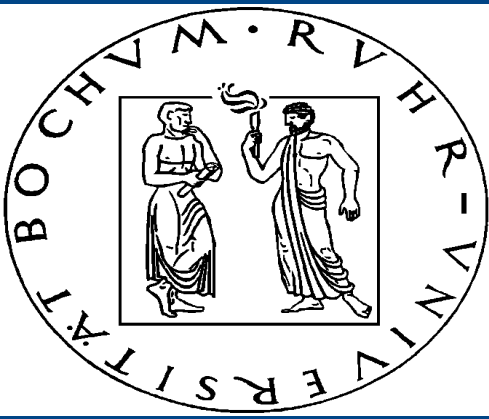
ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



VI Fazit/ Ausblick

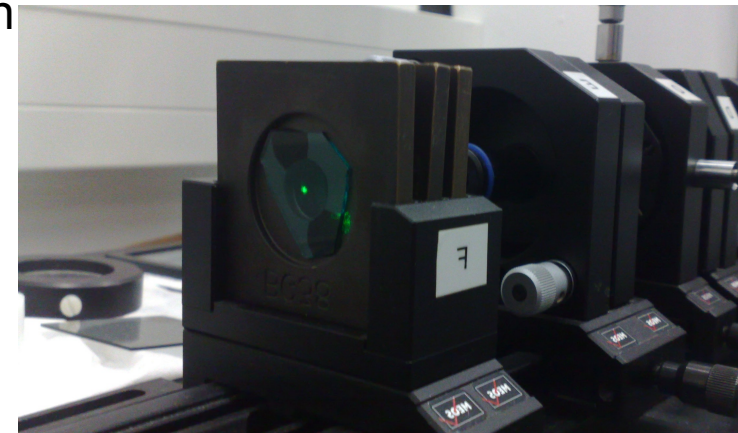
Bestätigung der Theorie ist durch das Experiment gewährleistet

Messaufbau für die von uns durchgeführten Messungen nicht genau

- Laserdiode zu instabil
- Ungenauigkeiten durch zu viele Moden im Resonator
- Reproduzierbare Justage des Aufbaus ist nicht gewährleistet
- Äußere Einflüsse sind groß (z.B. Temperaturschwankungen, Schall, Vibrationen)

Mögliche weitere Experimente:

- Vergleich von nichtlinearen Eigenschaften verschiedener bekannter Kristalle mit gleichen Abmessungen
- Temperatur-Phasematching
- Untersuchung der Instabilitäten



Motivation

Funktionsweise des ND-YAG-Lasers und physikalische Grundlagen

Aufbau

Messungen

i. Temperaturabhängigkeit der Frequenzverdopplung

ii. Konversionseffizienz

iii. Cavity Ringdown

iv. Kristallvergleich

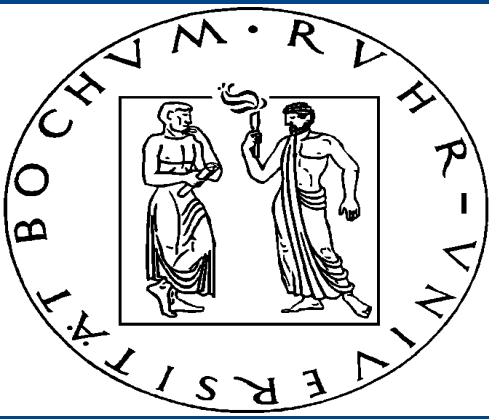
Ausblick

Frequenzverdopplung
ND-YAG-Laser



Quellen

- Meschede, Dieter 2008: Optik, Licht und Laser (Vieweg+Teubner(3.Auflage))
- Dimitriev, Valentin G. et al 1997: Handbook of nonlinear crystals(Springer Verlag Berlin)
- Ashkin, A. et al 1966: Resonant optical second harmonic generation and mixing (erschienen in Quantum Electronics Ed. 2 (Seiten 109-124))
- www.lc-solutions.com/product/ktp.php
- QuantumTechnology.Inc. Data Sheet 705



*Vielen Dank
an das Team von EP5
für die super Betreuung!*