



Seminararbeit

Thema: Sojasaucenoptik – der thermische Linseneffekt

Zusätzlich Kurztitel (Nur falls das Thema mehr als 3 Zeilen zu je 44 Zeichen lang ist):

Verfasser/in: Miriam Mosbach
Leitfach: Physik
Seminar­kürzel: 2Ph_W
Lehrkraft: Dr. Thomas Grillenbeck

Abgabe der schriftlichen Arbeit am:

[Datumsstempel Sekretariat]

Präsentation mit Prüfungsgespräch am:

____.____. 20____

Bewertung	Note	in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe					
Gesamtleistung nach § 29 (7) GSO = Summe : 2 (gerundet)					

Seminararbeit

Erklärung der eigenständigen Erstellung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassers/der Verfasserin

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung	S.3
2. Einführung	S.4
3. Versuche 1	S.4-8
3.1 Versuchsaufbau, -ablauf	S.4-6
3.2 Observation des thermischen Linseneffekts	S.6-7
3.3 Auftretende Nebeneffekt	S.8
4. Erklärung des Phänomen	S.9-10
5. Versuche 2	S.11-19
5.1 Flüssigkeit	S.11-15
5.1.1 Variation der Flüssigkeit	S.11-12
5.1.2 Variation der Laserfarbe	S.13-14
5.1.3 Absorptionskoeffizient	S.14
5.1.4 Temperatur in der Flüssigkeit	S.15
5.2 Z-scan	S.16-19
5.2.1 Variation der Laserleistung	S.17
5.2.2 Variation der Schichtdicke	S.18-19
6. Theorie der thermischen Linse: Brennweit	S.19-22
6.1 Formel zur Berechnung	S.20-22
7. Bezug zu Gravitationslinsen	S.22
8. Danksagung	S.23
9. Literaturverzeichnis	S.23

1.Kurzfassung

Im Feld der linearen Optik wird angenommen, dass Licht nicht die optischen Eigenschaften eines Mediums verändert. Wenn dies jedoch der Fall ist und Licht die optischen Eigenschaften des Mediums verändert, tritt ein Phänomen auf, das wir einen nichtlinearen optischen Effekt nennen. Solch ein nichtlineares optisches Phänomen ist auch der thermische Linseneffekt. Dieser entsteht, wenn ein einfallender Laserstrahl über die Absorption einen Dichtegradienten und damit eine Linse erzeugt. Mit diesem Effekt habe ich mich im Folgenden auseinandergesetzt, und zwar so, dass ich einen Laser auf eine dünne Schicht Sojasauce gerichtet habe und so den thermischen Linseneffekt untersuchen konnte.

2. Einführung

Zum Thema meiner Arbeit bin ich durch den Physikwettbewerb GYPT - German Young Physicists' Tournament, gekommen. Dort war eine der zu bearbeitenden Aufgaben, einen Laserstrahl auf eine sehr dünne Schicht Sojasauce zu richten und den dabei auftretenden sogenannten thermischen Linseneffekt zu beobachten. Nach den Wettbewerben war dieses Thema trotz der vielen Schwierigkeiten für mich noch nicht beendet. Beim Aufbau des Experiments ergaben sich große, teils sehr zeitraubende Probleme. Dennoch war es mit Geduld und Systematik möglich, diese zu lösen. Ich führte Experimente durch, bei denen ich den thermischen Linseneffekt beobachten und Berechnung anstellen konnte. In meiner Arbeit habe ich mich mit dem Auftreten des Effektes und den relevanten Parametern beschäftigt. Zudem kam mir bei meinen Experimenten der Gedanke, Bezüge zu Gravitationslinsen herzustellen.

3. Versuche 1

3.1 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Bevor ich Versuche anstellen konnte, musste ich zunächst eine reproduzierbar dünne Schicht Sojasauce erzeugen. Dafür habe ich eine Konstruktion aus zwei Mikroskop Trägern von einer Größe von $2,5\text{cm} \times 2\text{cm}$ gebaut, zwischen die ich einen $400\mu\text{m}$ dicken U-förmigen Rahmen aus Teflon geklebt habe.

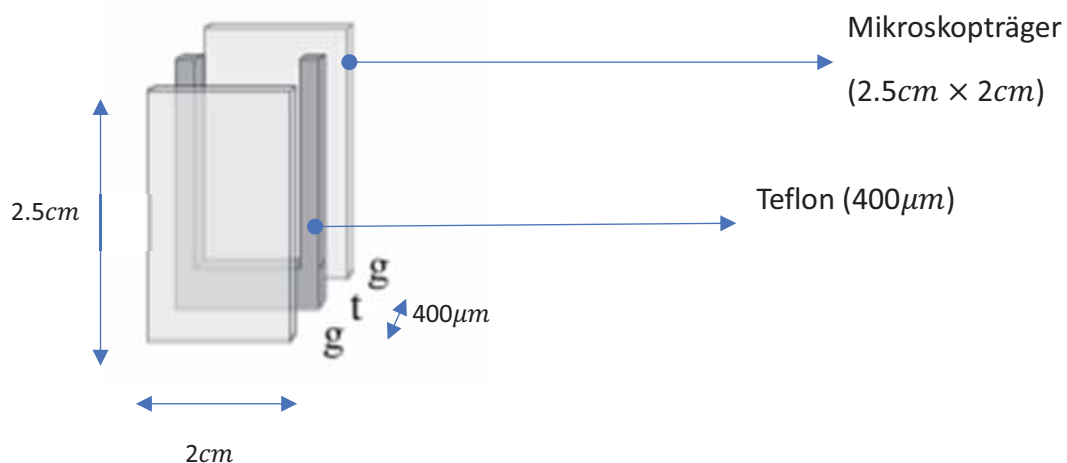
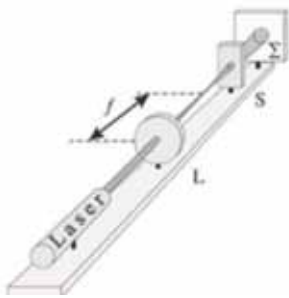


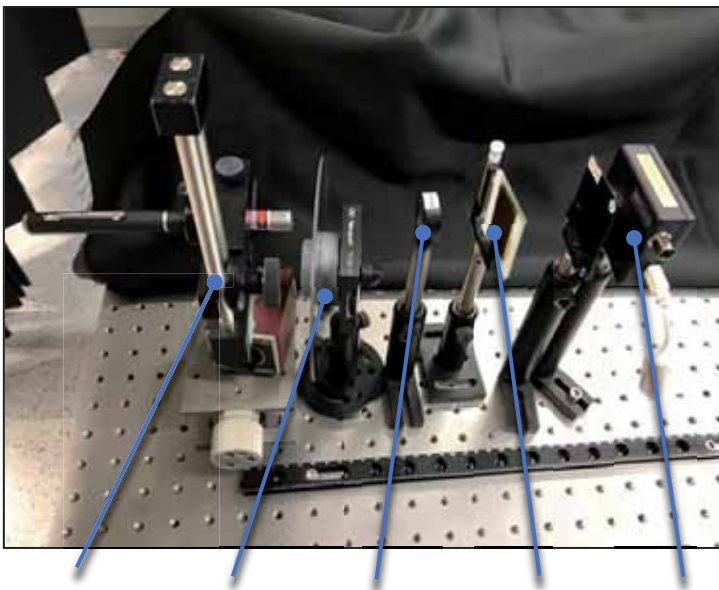
Abbildung 1 : Quelle: *Low-cost nonlinear optics experiment for undergraduate instructional laboratory and lecture demonstration*



- L Konvergierende Linse
- f Brennweite der Linse L
- S Träger mit Sojasauce
- Σ Screen oder beam profiler

Abbildung 2: Quelle: *Low-cost nonlinear optics experiment for undergraduate instructional laboratory and lecture demonstration*

Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus einem Laser, dessen Strahl zunächst auf eine konvergierende Linse trifft. Diese ist nötig, um den Laserstrahl zu bündeln und die Intensität des Lichtes zu erhöhen, die auf die Sojasauce trifft. Hinter die Sammellinse wird nun die Sojasauce platziert und ganz am Ende des gesamten Aufbaus ein Bildschirm oder auch eine Kamera, um den Effekt sichtbar zu machen.



- Laser
- Filterrad
- Sammellinse
- Sojasauce
- Kamera

Abbildung 3: Versuchsaufbau Foto: *Miriam Mosbach am MPQ*

Für den Versuch habe ich einen grünen Laser mit einer maximalen Leistung von 80mW gewählt.. Allerdings haben Versuche dazu gezeigt, dass bereits 7mW ausreichen, um mit diesem Versuchsaufbau eine thermische Linse zu erzeugen. Zusätzlich ist hinter dem Laser ein Filterrad platziert, um die einfallende Leistung regulieren zu können. Dahinter steht eine konvergierende Linse mit einer Brennweite von 5cm. Anschließend der Träger mit Sojasauce und eine Kamera. Am

Zunächst war das Ziel, den Effekt überhaupt zu erzeugen und dann zu erkennen.

Das experimentelle Verfahren besteht darin, die optische Reaktion der Probe an verschiedenen Stellen in der Nähe des Fokus der Linse zu untersuchen, indem der Laserpunkt auf einem Bildschirm im Fernfeldbereich beobachtet wird. Also habe ich den Träger mit Sojasauce im vorwärts und rückwärts geschoben, und den Laserspot nach der Transmission durch die Sojasauce auf dem Schirm beobachtet.

3.2 Observation des thermischen Linseneffekts

Laserstrahl ohne Sojasauce



Abbildung 4: Foto: Miriam Mosbach am MPQ

Laserstrahl mit Sojasauce

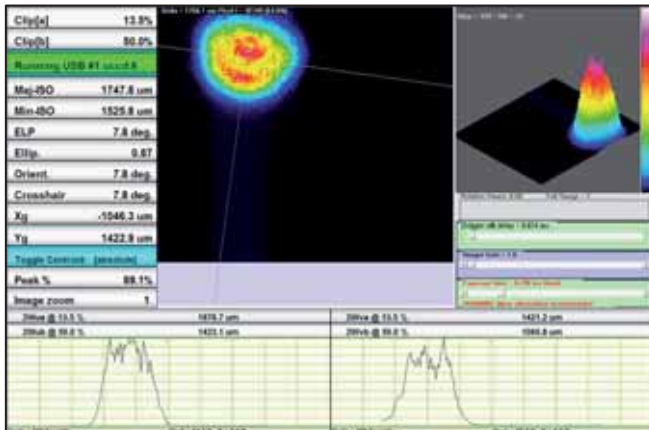


Abbildung 5: Foto: Miriam Mosbach am MPQ

Man sieht deutlich eine Vergrößerung des Strahlprofils nahe am Fokus. Das scheinbare Das Flackern des Laserspots entsteht hierbei durch Konvektion, also Wärmeausbreitung im Medium. Die inhomogene Erwärmung durch den Laserstrahl kann zur Ausbildung von Konvektionsrollen führen, welche die Flüssigkeit vermischen. Allerdings war es mir bei meinen Versuchen nicht möglich, die Konvektionsgeschwindigkeit und somit die Verfälschung der Messung abzuschätzen.

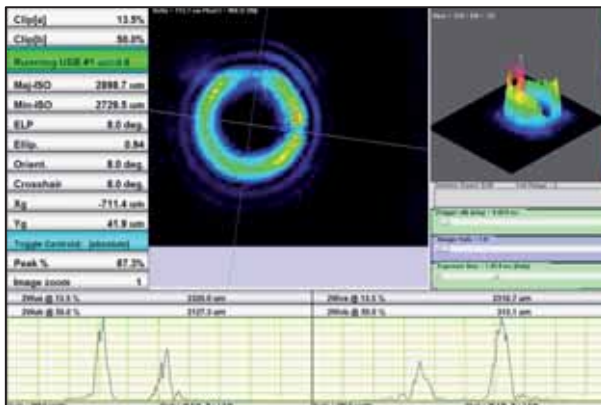
Zusätzlich wurde mit dem beam profiler das Strahl- und Intensitätsprofil mit und ohne Sojasauce aufgenommen, um einen quantitativen Beweis für die thermische Linse zu erhalten.

Ohne Sojasauce



Hier sieht man den Strahlquerschnitt ohne Transmission durch die Sojasauce. Hier sollte also keine thermische Linse entstanden sein. Der Strahldurchmesser beträgt $1421\mu\text{m}$.

Mit Sojasauce



Auf diesem Bild ist das Strahlprofil des Lasers nach der Transmission durch die Sojasauce zu sehen. Es sollte also eine thermische Linse entstanden sein. Der Strahldurchmesser ist in diesem Fall mit $w = 2329\mu\text{m}$ viel größer als auf der Aufnahme ohne Sojasauce. Der Strahldurchmesser vergrößert sich also, was daraufhin deutet, dass sich die Sojasauce wie eine divergierende Linse verhält, die zu einer Aufweitung des Strahls und einem Verlust seiner Intensität führt. Außerdem ist in der Mitte des Laserstrahls ein Abfallen der Intensität zu erkennen. Hierbei handelt es sich um sphärische Aberration, einen weiteren auftretenden Nebeneffekt. Hierbei treten Ringe auf, die durch Selbstphasenmodulation des Laserstrahls erklärt werden¹. Es handelt sich somit um keine ideale Linse, da ansonsten das Gaußprofil des Strahles erhalten bleiben würde.

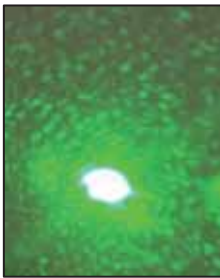
¹ Diplomarbeit v. Dr. Albert Voit: Untersuchung von Transportprozessen in binären Flüssigkeiten mit Hilfe thermischer Linsen

3.3 Auftretende Nebeneffekte

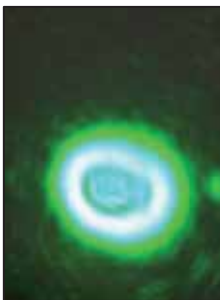
Im folgenden Abschnitt sollen nun die auftretenden Nebeneffekte untersucht werden. Dieser Versuch wurde sowohl mit einem grünen als auch mit einem roten Laser durchgeführt.

In einer Distanz von 17cm zum Laser sind folgende Nebeneffekte zu beobachten, wenn der Träger millimeterweise vorwärts- und rückwärts geschoben wird:

Grüner Laser

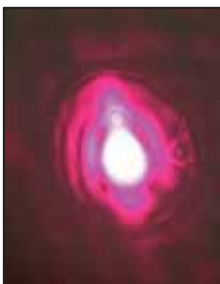


Ein nicht aufgeweiteter Strahl mit einem eher chaotischen Interferenzmuster: Laser-Speckles, welche durch die Dichteungleichheiten im Medium zu erklären sind.



Ein aufgeweiteter Strahl mit sphärischer Aberration und Aberrationsringen.

Roter Laser



Zunächst waren vier dunkle Punkte zu erkennen, die ich mir erst nicht erklären konnte, da sie mit dem grünen Laser nicht aufgetreten sind und in keiner Quelle Erwähnung fanden.

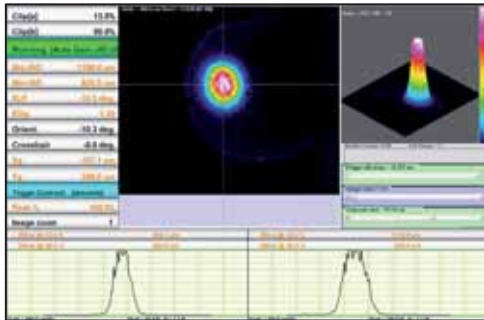


Aufgeweiteter Strahl mit sphärischer Aberration

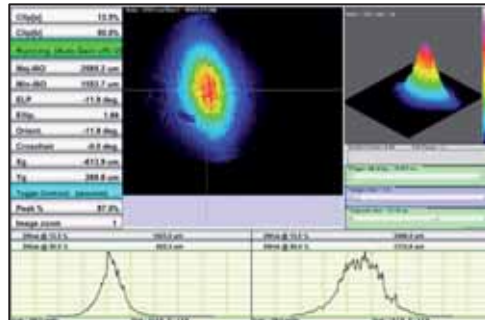
Erklärung der vier Punkte

Meine Erklärung für die vier dunklen Punkte, die wir im Labor „Supermario“ genannt haben, ist die Form des roten Lasers.

Grüner Laser



Roter Laser



Die Form des roten Lasers ist nämlich elliptisch, wohingegen der grüne Laser rund ist. Eine genauere Erklärung ist mir mithilfe der Gravitationslinsensysteme gelungen, was im Folgenden noch Erwähnung findet.

4. Erklärung des Phänomens

Der Effekt der thermischen Linse wurde 1965 zum ersten Mal von J.P Gordon beschrieben.² In einer Probe, die durch einen Laserstrahl inhomogen erwärmt wird, ändert sich aufgrund des Temperaturgradienten der Brechungsindex.

Der Laserstrahl trifft zunächst auf das Medium. Ein Teil des Lichts transmittiert nun, wird reflektiert oder absorbiert. Bei der Absorption durch die Sojasauce wird ein Teil der elektromagnetischen Energie des Strahles in thermische Energie umgewandelt. Durch diesen Wärmeeintrag steigt die Temperatur im Medium an und die Dichte nimmt dementsprechend ab.

Damit verbunden ist eine höhere Phasengeschwindigkeit des Lichts im Medium. Durch diesen Vorgang ändert sich aber auch der Brechungsindex $n = \frac{c_0}{c_M}$.

Mit einer steigenden Geschwindigkeit c_M wird dieser nämlich kleiner.

Der Brechungsindex ändert sich mit der Temperatur um den Faktor $\frac{\delta n}{\delta T}$.

Mit steigender Temperatur und sinkender Brechzahl ist die relative Änderung des Brechungsindex mit der Temperatur, gegeben durch $\frac{\delta n}{\delta T}$, negativ. Somit ist die thermische Linse negativ, also divergierend.

² J. Gordon, C. C. Leite, R. S. Moore, S.P.S Porto, and J. R Whinnery. Long-transient effects in lasers with inserted liquid samples. J. of Appl. Physics, January 1965.

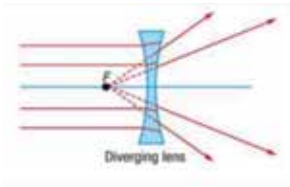


Abbildung 6

Der Prozess endet, wenn sich ein thermisches Gleichgewicht zwischen der einfallenden und der durch Wärmeleitung abtransportierten Energie eingestellt hat.

Um noch einmal deutlicher zu machen, warum die Änderung des Brechungsindex zu einer Ausbildung einer Linse führt, ist folgendes Modell sehr nützlich.

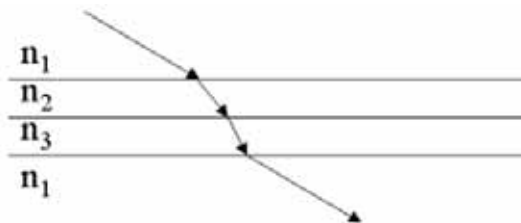
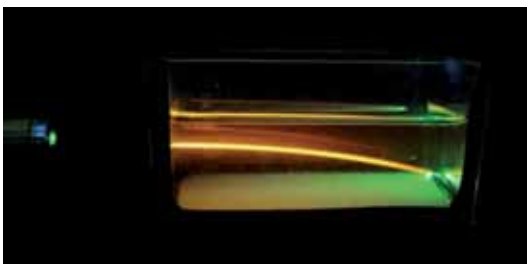


Abbildung 7

In der Sojasauce liegt ein temperaturbedingter Dichtegradient vor. Dadurch, dass sich die Flüssigkeit unterschiedlich stark erwärmt, ist die Dichte im Medium nicht einheitlich. Man kann sich also vorstellen, dass die Sojasauce aus vielen dünnen Schichten aufgebaut ist, die alle eine unterschiedliche Dichte und einen unterschiedlichen Brechungsindex besitzen. Der Lichtstrahl wird also von jeder einzelnen der Brechungsindexschichten von der optisch dünneren zur dichteren hin gebrochen und nach außen hin aufgeweitet.



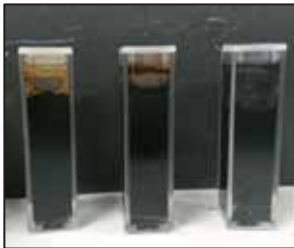
Um dieses Prinzip besser zu zeigen, habe ich einen Laser auf eine Zuckerlösung gerichtet. Hier liegt kein temperaturbedingter Dichtegradient vor. In diesem Fall kommt letzterer durch eine unterschiedlich starke Konzentration des Zuckers zustande. Der Laserstrahl wird auch hier durch die verschiedenen dichten Schichten abgelenkt.

5. Versuche 2

5.1 Flüssigkeit

5.1.1 Variation der Flüssigkeit

Zunächst stellt sich die Frage, warum als Medium Sojasauce gewählt wurde. Diese befindet sich nämlich im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Um die Frage zu klären, ob dies die einzige Voraussetzung ist, damit der Effekt funktioniert oder ob die genaue Zusammensetzung von Sojasauce eine Rolle spielt, habe ich das Absorptionsspektrum von Sojasauce mit dem Absorptionsspektrum von anderen Flüssigkeiten verglichen.



- ① Dittmann Sojasauce
- ② Kikkoman Sojasauce
- ③ Tinte mit Wasser

1.

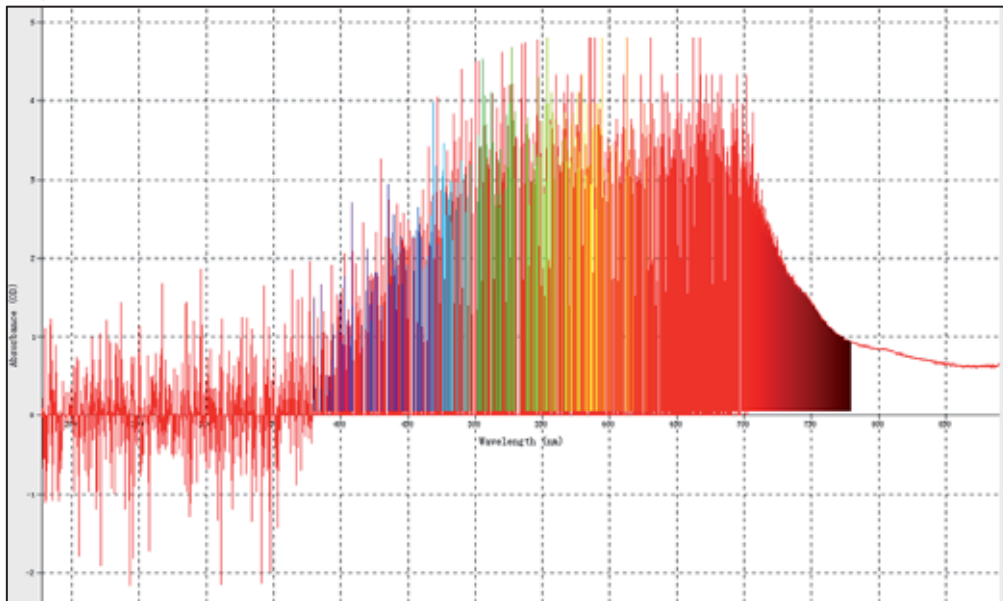
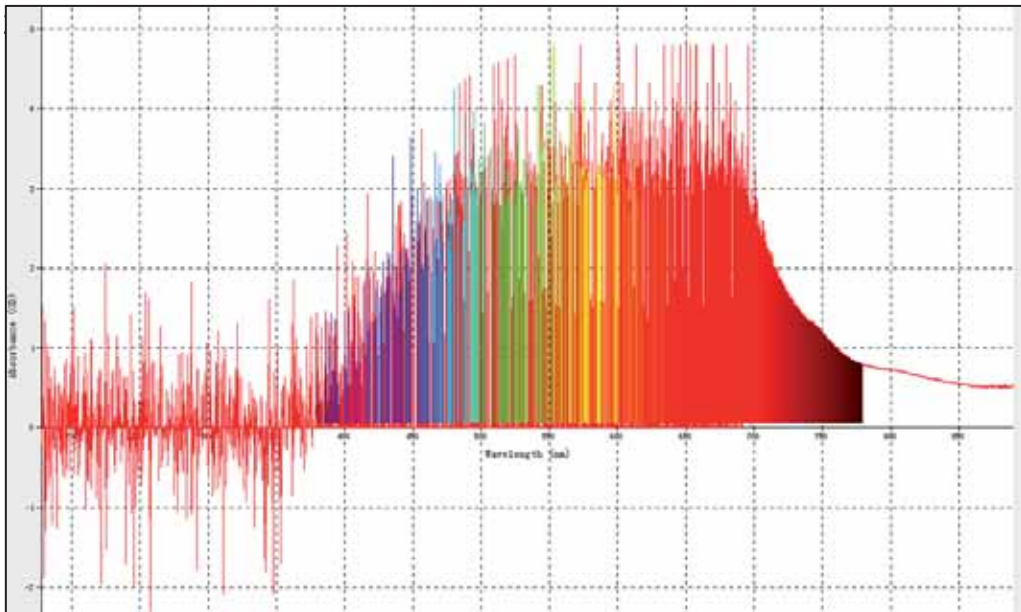
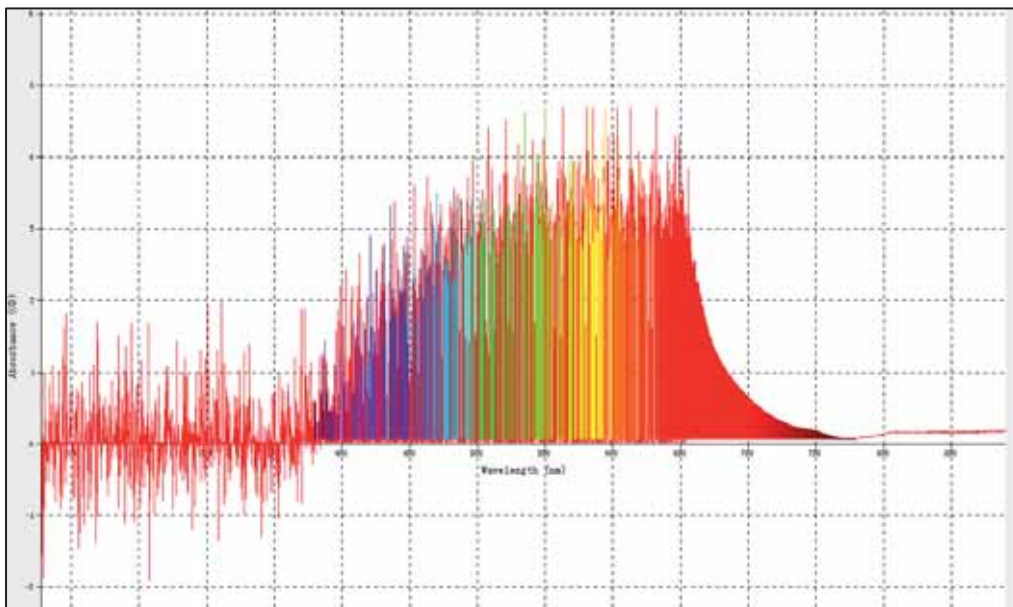


Abbildung 8: Absorptionsspektrum (gemessen mit USB 4000 ocean optics)

2.



3.



Die Absorptionsspektren der drei verschiedenen Flüssigkeiten unterscheiden sich kaum voneinander. Außerdem hat der Versuch mit allen drei Flüssigkeiten funktioniert. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich mit jeder Art von Flüssigkeit eine thermische Linse bilden kann. Sie darf nur weder zu viel noch zu wenig absorbieren.

5.1.2 Variation der Laserfarbe

Aus dem Diagramm lassen sich zudem auch Rückschlüsse über den Einfluss der verwendeten Laserfarbe ziehen. Der Effekt funktioniert sowohl mit grünen als auch roten Lasern, wie ich durch meine Experimente selbst herausgefunden habe. Jedoch absorbiert Sojasauce grünes Licht besonders stark, weshalb der Effekt besser mit einem grünen als mit einem roten Laser (bei gleicher Leistung) funktioniert.

5.1.3 Absorptionskoeffizient

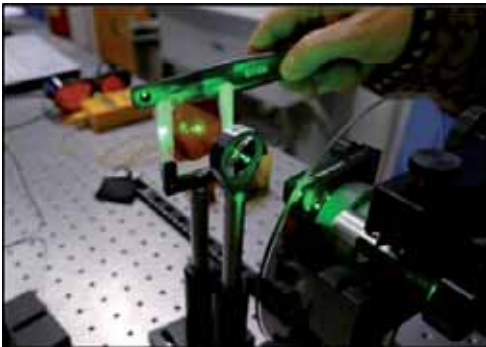
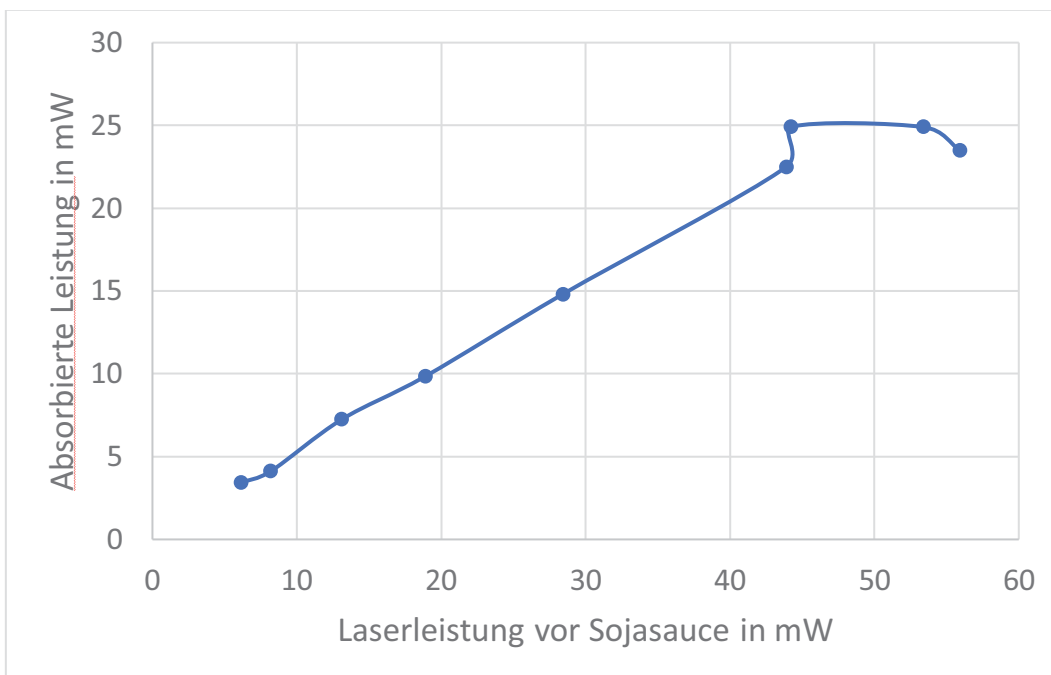


Abbildung 9 gemessen mit Leistungsmessgerät Lasercheck von coherent

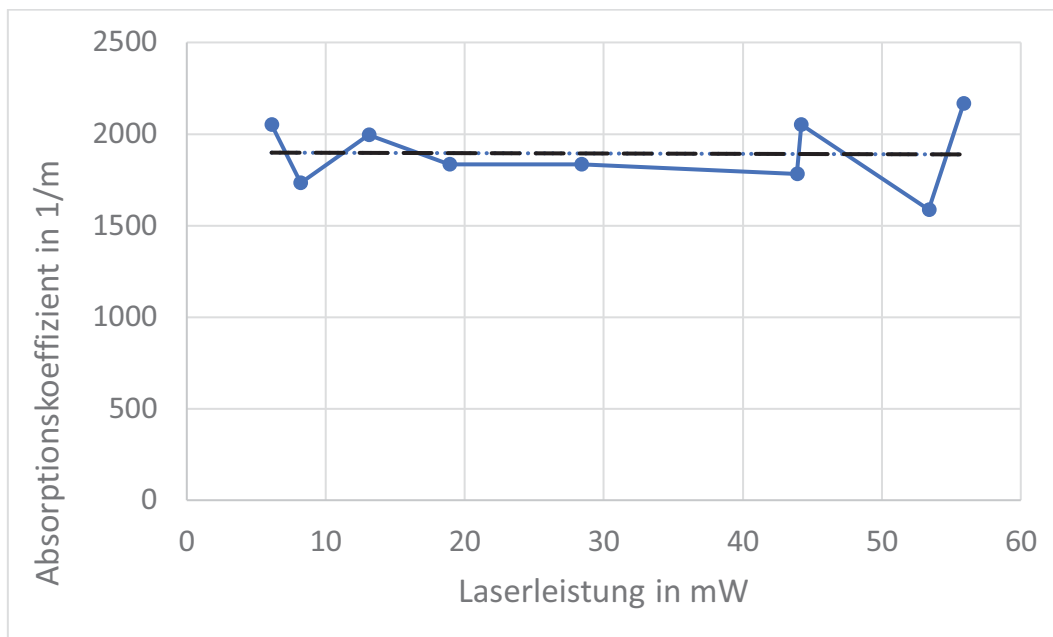
Zunächst habe ich die Leistung eines grünen Lasers (Maximum bei 80mW) variiert und die absorbierte Leistung gemessen, da die Frage offenstand, inwiefern die Anfangsleistung und die Absorption zusammenhängen.



Die Absorption durch die Sojasauce wird trotz zunehmender Leistung ab einem gewissen Punkt kleiner. Dies deutet auf einen Sättigungsprozess hin. Die Leistung

geht zunehmend durch Konvektionen verloren und es kann ab einem gewissen Punkt keine bessere thermische Linse mehr entstehen.

Mit der Annahme verbunden, dass eine höhere Leistung zu einem größeren Wärmeeintrag führen muss, hat sich die Frage gestellt, ob die Sojasauce denn unabhängig von der verwendeten Leistung immer gleich viel absorbiert. Daher habe ich den Absorptionskoeffizienten berechnet.



Berechnung des Absorptionskoeffizienten

Nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz gilt:

$$I = I_0 \cdot e^{-a \cdot b}$$

$$\alpha = \frac{-\ln(I)}{b}$$

I = absorbierte Leistung

I_0 = Anfangsleistung

b = Schichtdicke

Es ergibt sich für den Absorptionskoeffizienten ein durchschnittlicher Wert von $1800 \frac{1}{m}$.

5.1.4 Temperatur in der Flüssigkeit

Einen weiteren Schritt, um die thermische Linse besser beschreiben zu können, stellt die Berechnung der Fläche a dar, die durch den Laser direkt nach dem Anschalten erwärmt wird. Die Wärmebildkamera zeigt direkt nach dem Anschalten eine Temperaturdifferenz ΔT von etwa 3° Celsius an. Die verwendete Formel stammt von Johannes Weitenberg.

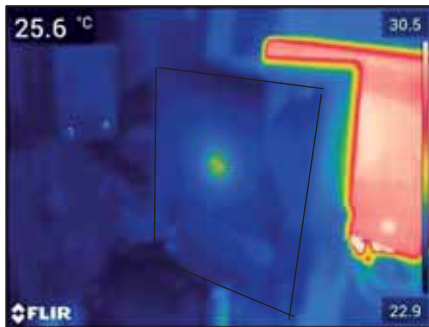


Abbildung 10: gemessen mit Thermografie Kamera E85 von Flier

$$\Delta T = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{P_{\text{absorbed}}}{k \cdot b} \cdot \left(1 + 2 \cdot \ln \frac{a}{w}\right)$$

$$a = e^{\left(\left(\frac{\Delta T \cdot 4\pi \cdot k \cdot b}{P} - 1\right) : 2\right) \cdot w} = e^{\left(\left(\frac{3^\circ\text{C} \cdot 4\pi \cdot 0,5562 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 400 \mu\text{m}}{4\text{mW}} - 1\right) : 2\right) \cdot 0,06\text{mm}} = 0,49\text{cm}^2$$

k	Thermische Konduktivität von Salzwasser = $0,5562 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$
b	Dicke des Mediums = $400 \mu\text{m}$
w	Strahlradius = $0,06\text{mm}$
a	Erwärmte Fläche
P	absorbierte Leistung = 14mW

Die berechnete Größe für $a = 0,49\text{cm}^2$ stimmt mit der optisch auf dem Wärmebild gemessenen Fläche überein. Die Seitenflächen des Spots sind nämlich in etwa 7mm auf 7mm lang.

5.2 Z-scan

Der Z-scan³ stellt eine Messung dar, bei der man die Leistung des Laserstrahls an unterschiedlichen Positionen der Sojasauce in einem bestimmten Bereich Z misst. Man verschiebt die Sojasauce, misst anschließend die Laserleistung nach Transmission durch die Sojasauce. Dabei entsteht eine Z-form. Der Punkt, an dem die Laserleistung gemessen wird, muss kleiner als der ganze Laserspot sein, da die Leistung des gesamten Spots konstant bleibt.

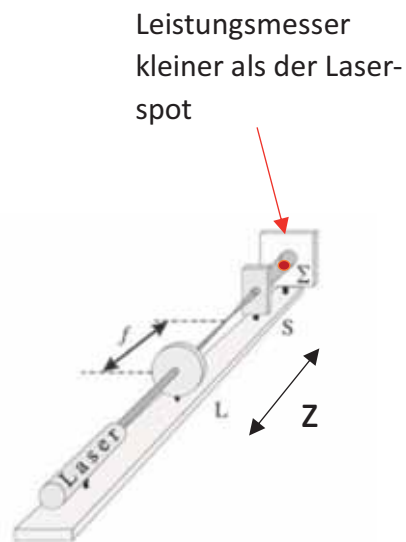
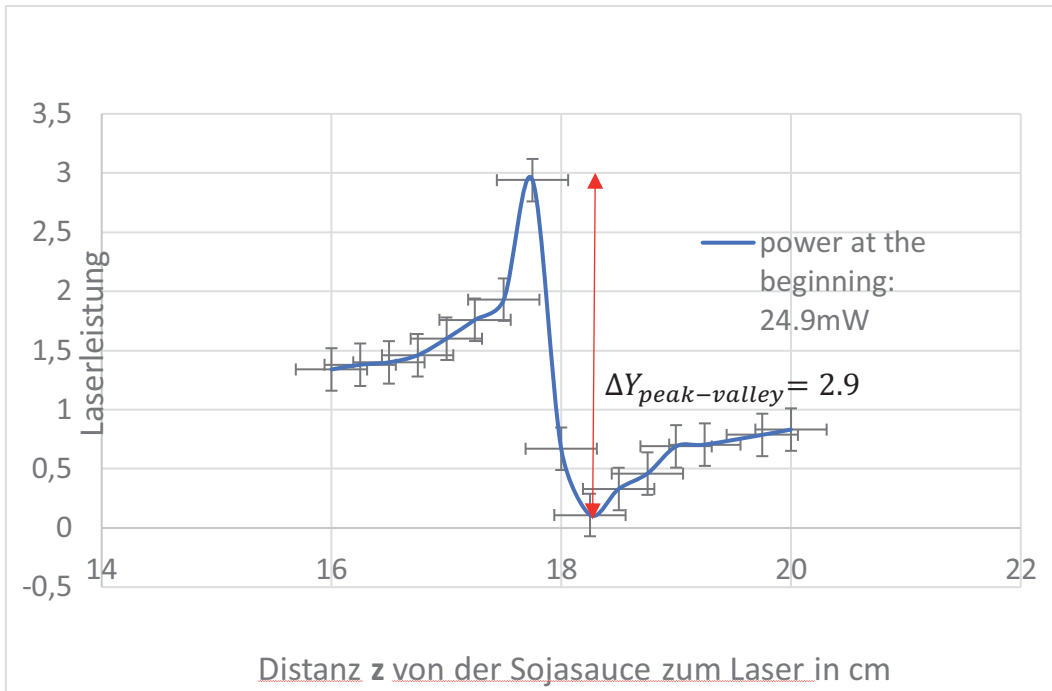


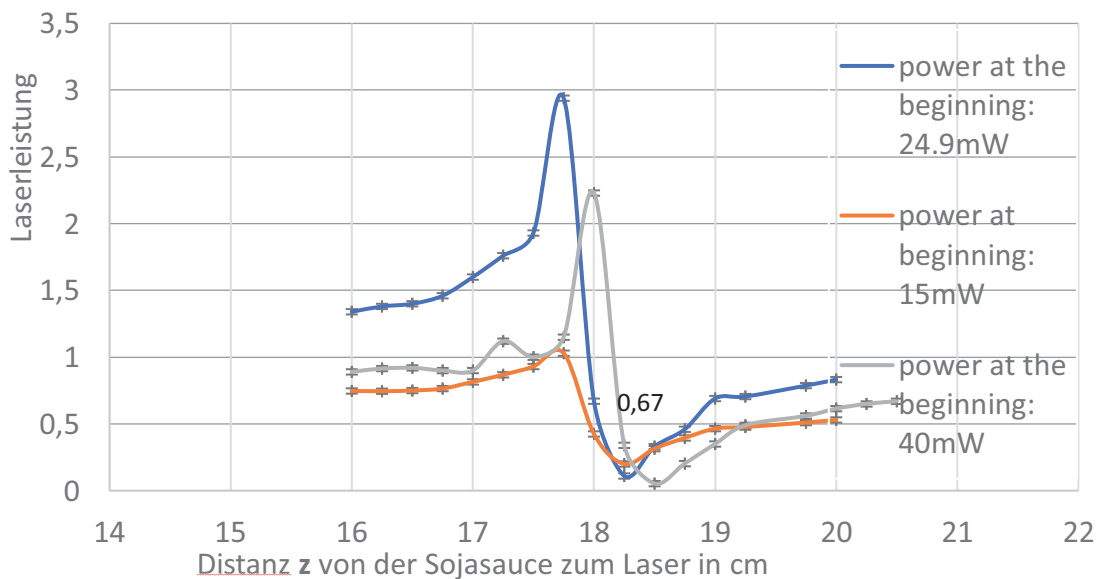
Abbildung 11: ¹ High-sensitivity, single-beam n_2 measurements (M. Sheik-bahae, A. A. Said, and E. W. Van Stryland) Center for Research in Electro-Optics and Lasers, University of Central Florida, Orlando, Florida 32816



$\Delta Y_{peak-valley}$ zeigt die Stärke der Linse an.

Je größer ΔY , desto stärker ist auch die thermische Linse.

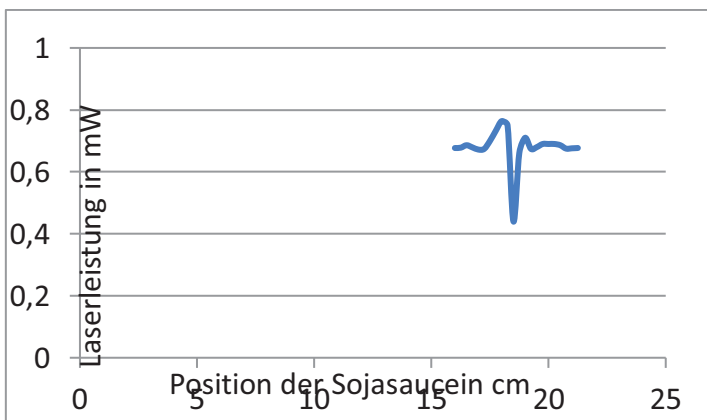
5.2.1 Variation der Laserleistung



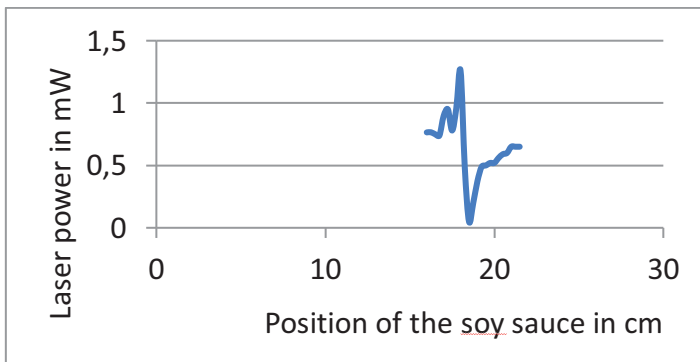
ΔY nimmt mit der Laserleistung zu. Je größer die eingestrahelte Laserleistung desto stärker ist also auch die thermische Linse.

5.2.2 Variation der Schichtdicke

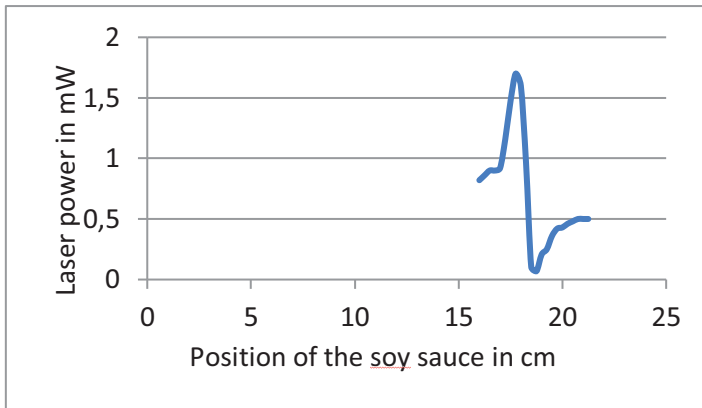
Bevor Versuche zur Schichtdicke angestellt wurden, wurden folgende Annahmen getroffen. Je dicker die Linse, desto besser muss der Effekt funktionieren, da das Licht mehr Zeit hat, um gebeugt zu werden. Eine dickere Schicht Sojasauce könnte allerdings auch dazu führen, dass sich die Wärme nicht schnell genug ausbreitet und der Effekt somit schlechter funktioniert. Daher wurde im folgenden Experiment wieder der Z-scan durchgeführt, mit dem der Einfluss der Schichtdicke des Mediums anhand von drei unterschiedlichen Schichtdicken untersucht wurde.



Schichtdicke: $200\mu m$
Laserleistung: $30mW$
Absorbierte Leistung: $10mW$



Layer thickness $400\mu m$
Absorbed power: $15mW$



Layer thickness $700\mu m$

Absorbed power: $20mW$

Die Experimente zeigen, dass ΔY mit einer zunehmenden Schichtdicke größer wird. Somit ist die erste getroffene Annahme richtig. Eine dickere Schichtdicke führt also zu einer stärkeren thermischen Linse. Dennoch ist es wichtig, eine Schicht zu verwenden, die immer noch als dünn erachtet werden kann. Wenn die Trägerdicke klein genug ist, sodass die Änderungen des Strahldurchmessers in der Probe aufgrund von Beugung oder nichtlinearer Refraktion vernachlässigt werden kann, wird das Medium als dünn erachtet.

6. Theorie der thermischen Linse

Die wichtigste Eigenschaft einer Linse ist ihre Brennweite. Daher befasst sich die Theorie der thermischen Linse vor allem mit ihrer Brennweite. Allerdings ergaben sich hierbei einige teilweise schwerwiegende Probleme.

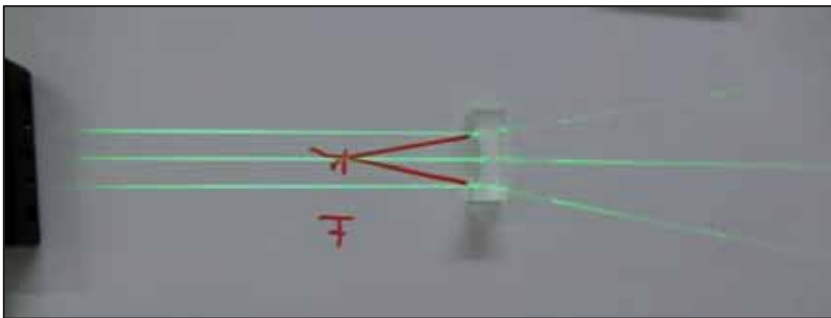


Abbildung 12

Zum einen ist die thermische Linse eine divergierende Linse, wie vorhin bereits erläutert wurde. Dies macht es geradezu unmöglich, den Fokus zu finden, da dieser nicht wie bei einer konvergierenden Linse hinter, sondern vor der Linse liegt.

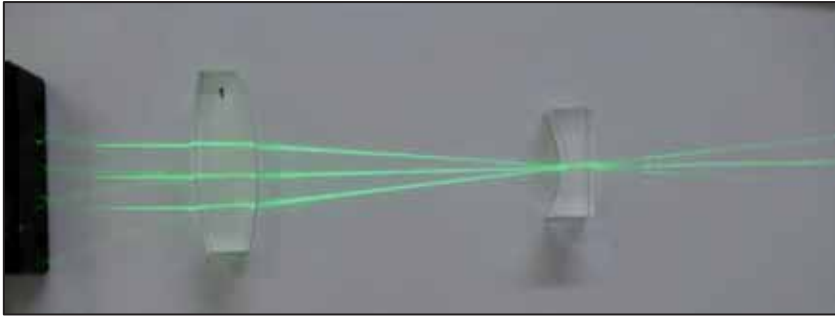


Abbildung 13

Zum anderen kommt in diesem Fall noch hinzu, dass der Brennpunkt der thermischen Linse im Fokus der konvergierenden Linse liegt. Diese ist aber unbedingt notwendig, um die nötige Intensität zu erzeugen. Und laut geometrischer Optik ist eine Linse im Fokus einer anderen Linse nutzlos.

Somit ist keine einfache experimentelle Bestimmung der Brennweite möglich, denn die Anwendung von geometrischer Optik funktioniert in diesem Fall nicht. So sind Berechnungen mit der einfachen Linsengleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$ nicht anwendbar.

6.1 Formel zur Berechnung von Johannes Weitenberg

Diese Formel gilt als theoretische Annäherung, um die Brennweite der thermischen Linse zu berechnen. Sie funktioniert nur, da man annimmt, dass die Linse aus vielen dünnen Linsen besteht, über die integriert wird. Sie gilt für einen kontinuierlichen Laserstrahl mit radialer thermischer Konduktivität, wobei Konvektion vernachlässigt wird.

<p>Brennweite:</p> $f = \frac{2\pi \cdot w^2 \cdot k}{P_{abs} \cdot \frac{dn}{dT}}$	<p>w Strahradius</p> <p>k Thermische Konduktivität (Salzwasser)</p> <p>P Laserleistung</p> <p>n Brechungsindex (Salzwasser)</p> <p>T Temperatur</p> <p>b Dicke des Mediums</p>
---	--

Da es mir nicht möglich war, Werte wie den Brechungsindex oder die Konduktivität von Sojasauce zu bestimmen, habe ich stattdessen die allgemein bekannten Werte für Salzwasser verwendet. Diese dürften sich nicht stark von den Werten für Sojasauce unterscheiden und das Ergebnis somit kaum beeinträchtigen.

Wir können eine leicht messbare Größe ΔT als Differenz zwischen den normalisierten Durchlässigkeiten von Peak (Maximum) und Tal (Minimum), $T_p - T_v$ definieren. Es zeigt sich, dass die Variation dieser Größe als Funktion von $\Delta\Phi_0$, die für verschiedene Aperturgrößen berechnet wurde, nahezu linear von $\Delta\Phi_0$ abhängt.⁴

Je größer ΔT , desto stärker ist die Linse und desto stärker wird nun auch die Wellenfront $\Delta\Phi$ gekrümmt.

$$\Delta T_{p-v} = 3 - 0,1 = 2,9$$

$$\Delta T_{p-v} = p \cdot |\Delta\Phi_0|$$

$$= 0,405 \cdot |\Delta\Phi_0|$$

$$\Delta\Phi_0 = \frac{2,9}{0,405} = 7,16$$

Nun ist es möglich, mit den berechneten Werten den Brechungsindex und anschließend die Brechungsindexänderung mit der Temperatur zu bestimmen.

$$\begin{aligned} \Delta n_0 &= \Delta\phi_0 \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\alpha}{1 - e^{-\alpha \cdot b}} \\ &= 7,16 \cdot \frac{0,632\mu m}{2\pi} \cdot \frac{1,8 \frac{1}{cm}}{1 - e^{-1,8 \frac{1}{cm} \cdot 200 \cdot 10^{-6} m}} \\ &= 2,5 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta n}{\delta T} &= \frac{\Delta n_0 \cdot \rho \cdot C}{0,5 \cdot F_0 \cdot \alpha} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,025 \frac{g}{cm^3} \cdot 4,182 \cdot \frac{J}{gK}}{\frac{25,15 mW}{0,5 \cdot \frac{100 ms}{(0,06 cm)^2 \pi}} \cdot 18 cm^{-1}} \\ &= 4,6 \cdot 10^{-5} \frac{1}{K} \end{aligned}$$

⁴ High-sensitivity, single-beam n2 measurements

Δ	Transmission
Δn_0	Indexänderung beim Fokus ($z = 0$)
F_0	Fluenz
ρ	Dichte
C_v	Spezifische Wärme
0,5	Fluenzdurchschnittsfaktor
$\Delta\phi$	Krümmung der Wellenfront
α	Absorptionskoeffizient

Brennweite:

$$f = \frac{2\pi \cdot w^2 \cdot k}{P_{abs} \cdot \frac{dn}{dT}}$$

$$= \frac{2\pi \cdot (0,006 \cdot 10^{-3}m)^2 \cdot 0,5562 \frac{W}{mK}}{14mW \cdot (-5,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{K})} = -1,7cm$$

7. Bezug zu Gravitationslinsen



Abbildung 15

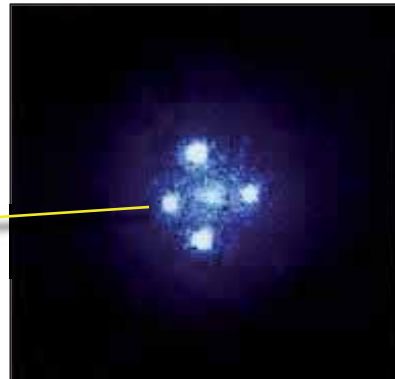


Abbildung 14

Das Einsteinkreuz ist ein Himmelsphänomen: Exakt vier Bilder desselben weit entfernten Quasars erscheinen kreuzförmig rund um eine Galaxie. Die Entstehung der Mehrfachbilder ist eine Folge der Lichtablenkung, verursacht durch die Krümmung der Raumzeit, die wie eine Linse wirkt. Sind Galaxien die Ursache für Gravitationswellen, weisen diese eine Asymmetrie auf. Auch der rote Laser hat eine asymmetrische Form und prägt diese der thermischen Linse auf.

Eine grundlegende Eigenschaft von Linsen ist nämlich, dass sie aus Punktquellen wie Quasars stets auch Punktbilder machen.

8. Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Frau Dr. Silke Stähler-Schöpf und dem PhotonLab bedanken, die mich während der Entstehung meiner Arbeit am MPQ sehr unterstützt hat. Ohne Ihre Hilfe und ständige Bereitschaft, mir mit Experimenten und Berechnungen zur Seite zu stehen, wäre ich mit meinem Projekt nie so weit gekommen.

Des Weiteren gilt mein Dank dem Betreuer meines Seminars und meinem ehemaligen Physiklehrer, Dr. Thomas Grillenbeck, der mich nicht nur ermutigt hat, an Wettbewerben teilzunehmen, sondern der in mir die Liebe zur Physik geweckt hat.

Ich bedanke mich bei Frau Dr. Françoise Delplancke-Ströbele für Ihre Unterstützung und Zeit während meines Projektes.

9.Literaturverzeichnis

Turchellio, Pereira, Gomez, Low-cost nonlinear optics experiment for undergraduate instructional laboratory and lecture demonstration, Department of Physics, Federal University of Technology of Parana, 18 May 2017

S.J. Sheldon, L.V. Knight, J.M Thorne, Laser-induced thermal lens effect: a new theoretical model, Brigham Young University, Department of Physics and Astronomy, Utah, 23 November 1982

M. Sheik-bahae, A. A. Said, and E. W. Van Stryland, High-sensitivity, single-beam n_2 measurements, Center for Research in Electro-Optics and Lasers, University of Central Florida, 11 June 1989

Diplomarbeit v. Dr. Albert Voit, Untersuchung von Transportprozessen in binären Flüssigkeiten mit Hilfe thermischer Linsen

Johannes Weitenberg