

Fakultät für Physik der  
Ludwig-Maximilians-Universität München

Fortgeschrittenenpraktikum I in Experimentalphysik - Kurs P3A

Blockpraktikum vom 01. bis 31. März 2021

Name:	<i>Yudong Sun</i>	Gruppe:	I4
-------	-------------------	---------	----

Datum	Versuch	Punkte	Testat
	1 Mikroskopie@Home Mikroskopie mit dem Foldscope		
	2 BEU - Beugung		
2. MAR 2021	3 LAS - Lasersicherheit		
	4A INP - Interferenzphänomene		
	4B MIN - Michelson-Interferometer		
	4D FPI - Fabry-Pérot-Interferometer		
	4E MZI - Mach-Zehnder-Interferometer		
	5B LLA - c-Messung/Lambertscher Strahler		
	5C POL - Polarisation		
	5D SPG - Spektrogoniometer		
	5E FFR - Fresnelsches Gesetz der Reflexion		

Unterschrift der/des Studierenden:	
------------------------------------	--

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum auf.

Teilversuch 1: Maximal zulässige Bestrahlung

Einheitszeit dauer: 4 Std  $\Rightarrow t$  im Bereich  $10^2$  bis  $3 \times 10^4$   
 $= 14400\text{ s}$

Brillen  $R[\text{n}]$   $\rightarrow$  optische Phelte.

Wellenlänge $\lambda$	MZB der Hornant für $C_0 = 1$
473 nm	$C_3 \cdot W \cdot m^{-2} = 10^{0,02(\lambda-400)} W \cdot m^{-2}$ $= 2,884 W \cdot m^{-2}$
532 nm	$10 W \cdot m^{-2}$
590 nm	$10 W \cdot m^{-2}$

Bemerkung:  $\lambda$  falsch eingestellt.

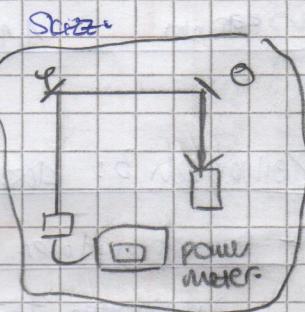
Bereit: 985 / 1 MW  
 Falsch: 1,12 mW

Teilversuch 2: Strahlungsleistung kontrollieren mit geprägte Laser verschiedene Wellenlängen

Bestimmen der Anfangsleistungen:

Wellenlänge $\lambda$	Leistung / mw	filter?
473 nm	4,4	X
532 nm	8,4	✓
590 nm	1,3	✓

Zweitlinie durchgeführt, Skizze wie vorher.



Parallel auf LED.  
 (sehr dünn)

Schwellabstufung der Laserschutzzonen. und Filter position

Blatt Wellen- länge $\lambda$	Part 15a	Part 15b	Part 15c	
473 nm	2,1 mw	2,1 mw	2,1 mw	Ohne
	13,4 MW	16,1 mw	325,3 mw	Mit
532 nm	8,4 mw	8,4 mw	8,4 mw	Ohne
	4,7 MW	108,2 MW	3,4 mw	Mit
590 nm	7,2 mw	9,2 mw	9,2 mw	Ohne
	100 mw	129,6 μW	434,9 MW	Mit

kein Filter

MH Filter

MN Filter

[Part 15a]

$$\begin{aligned} 190-315 & D L5 + IRL3 \\ 315-543 & DIR L3 \\ 515-510 & DIR L4 \\ 315-535 & DIR L5 \end{aligned}$$

[Part 15b]

$$\begin{aligned} 0,01W 2 \cdot 10^{-6} J & 440-500 R1 \\ 0,1W 2 \cdot 10^{-5} J & 530-530 R2 \\ 0,01W 2 \cdot 10^{-6} J & 530-570 R1 \end{aligned}$$

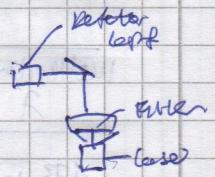
[Punkt 15c]

$$\begin{aligned}
 190-315 & \text{ DLS + IRL3} \\
 315-435 & \text{ DIR L5 // 755-1100 DIR L3} \\
 435-560 & \text{ DIR L4 // 795-1085 DIR L5} \\
 560-1075 & \text{ DIL5 + IRL6}
 \end{aligned}$$

<del>Filter</del> Wellenlänge $\lambda$	RG1000	NIR 9	BGS9	
423 nm	2,5 mW	2,5 mW	2,5 mW	Ohne
	23,6 mW	132,4 mW	21,0 mW	Mit
532 nm	8,4 mW	8,4 mW	8,4 mW	Ohne
	44,7 mW	366,7 mW	67,5 mW	Mit
590 nm	1,2 mW	1,2 mW	1,2 mW	Ohne
	6,9 mW	49,2 mW	242,5 mW	Mit

kein Filter (A1T)

Filter (A1T)



Bestimmung des Strahldurchmessers.

$\rightarrow (\pm 0,10 \text{ mm})$

Wellenlänge $\lambda$ / nm	100% T	86% T	WIS $\oplus$
423 nm	2,7 mW	2,4 mW	2,55 mm
532 nm	8,4 mW	7,2 mW	2,80 mm
590 nm	1,1 mW	0,94 mW	0,90 mm

### Teilversuch 3: Klassifizierung der Laser

#### - Dauerstrahl-Laser (CW-Laser)

Angenommen  $t = 1 \text{ Std} = 10^4 \text{ s} \Rightarrow$  letzte Spalte.

[G1m]: 532 nm = 1m Bereich (400 bis 700) nm.

Mit 8,4 mW  $\rightarrow 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ W} \Rightarrow$  [3B Laser]

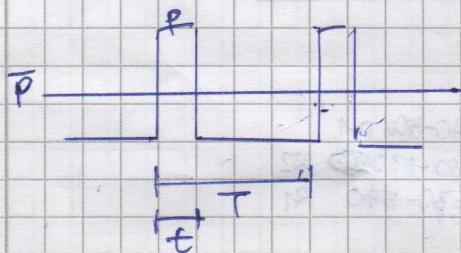
[Orange]: 590 nm = 1m Bereich (400 bis 700) nm.

Mit 1,1 mW  $\rightarrow 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ W} \Rightarrow$  [3R Laser]

#### - Gepulste Laser

$$\text{Pulseaufl.} = 416,0 \text{ ns}$$

$$\text{Periodendauer} = 1,000 \text{ ms} \Rightarrow \text{Wechselschaltrate} = 1,000 \text{ kHz}$$

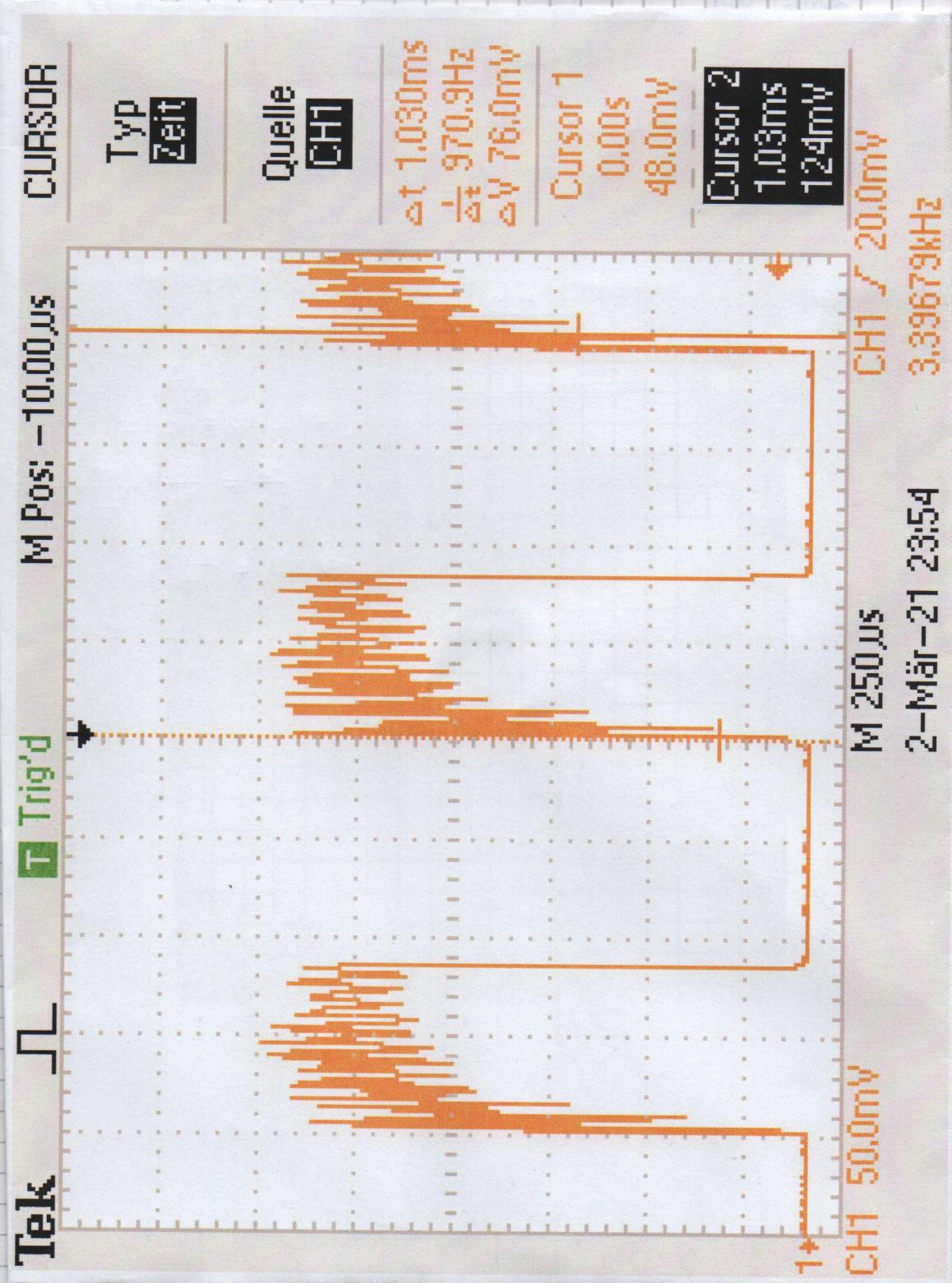


$$P_{\text{peak}} = \bar{P} \cdot \frac{T}{t}$$

$$= (4,4 \cdot 10^{-3}) \cdot \left( \frac{1 \cdot 10^{-3}}{416 \cdot 10^{-9}} \right) \text{ mW}$$

$$= 0,0106 \text{ W} > 0,005 \text{ W}$$

$\Rightarrow$  [3B Laser]



## Teilversuch 4: Abhang von Laserleistungsfaktor relevanten Parametern durch verschiedene optische Instrumente

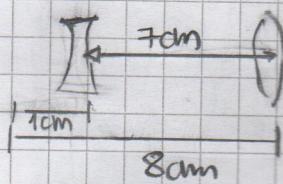
- ① Der Strahl durchmesser wird bei 2 Stellen entlang der Strahlverlaufsrichtung gemessen.  $\downarrow$  die weit entfernt sind.

Strahl ~~ist~~ kollimiert, wenn Strahl bei beiden Stellen gleich schnell.

$\Rightarrow$  Strahl kollimiert mit  $D = 2 \text{ cm}$ .

Abstand von Laser zu Linse = 7,8 cm

②



Leistung bleibt gleich.

Intensität:

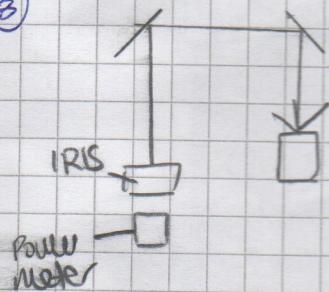
$$P = IA$$

$$\Rightarrow I_1 A_1 = I_2 A_2$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{\pi}{4} d_1^2}{\frac{\pi}{4} d_2^2} = \frac{d_1^2}{64 d_2^2}$$

$$\Rightarrow I_2 = \frac{1}{64} I_1$$

③

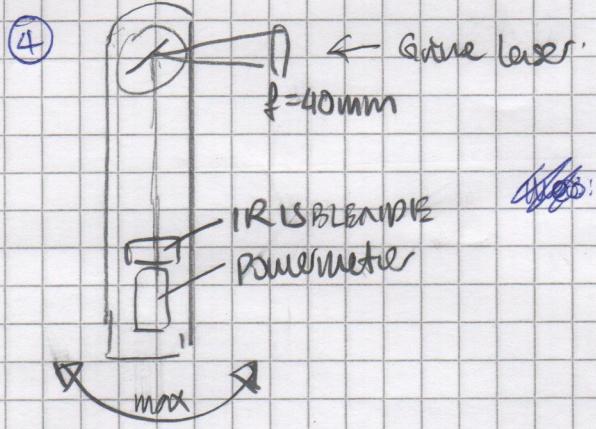


Weitweg messen.

<del>Leistung</del> <del>mw</del>	<del>Abstand</del> <del>mm</del>	<del>Leistung</del> <del>mw</del>
14,0	8,0	
	7,9	

P/mw	$\phi/\text{mm}^2$
1,0	1,2
0,7	0,7

Leistung / mw	Abstand / mm
8,0	14,0
7,9	9,0
7,8	7,5
7,7	7,1
7,6	7,0
7,5	6,9
7,2	6,5
7,0	6,1
6,5	5,3
6,2	5,0
5,7	4,2
5,1	3,8
4,5	3,5
3,9	3,0
2,0	2,1



$$P_{\max} = 357 \mu\text{W}$$

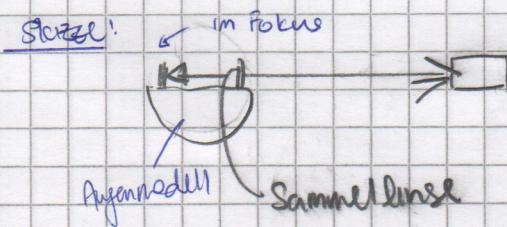
~~$P_{\text{ref}} = 49,98 \text{ mW (theoretisch)}$~~

$\Rightarrow \text{Gefunden: } P_{\text{ref}} = 49,7 \text{ mW}$

$\Theta = 3^\circ$

### Teilversuch 5: Retinostimulation

Der 100 mW IR-Laser muss ins Augenmodell gestrahlt.



<b>LMU München</b>	
<b>Physikalische Praktika</b>	
Versuch:	LAS
Datum:	2. I. 21
Betreuer:	C. Jüls

# LAS – Lasersicherheit

## Auswertung

Yudong Sun  
Gruppe I4

3. März 2021

### **Teilversuch 1: Maximal zulässige Bestrahlung (MZB)**

Keine Auswertung

### **Teilversuch 2: Strahlungsleistung kontinuierlicher und gepulster Laser verschiedener Wellenlänge (Laser 473 nm, 532 nm, 590 nm)**

#### **2.1 Bestimmung der Ausgangsleistung**

Keine Auswertung

#### **2.2 Schutzabstufung der Laserschutzbrillen und Filtergläser**

Da wir immer nur die relative Leistung vergleichen, ist der Effekt von der falschen Wellenlänge-Einstellung nicht so groß.

Mit den Werten:

Wellenlänge	Leistung / mW		
	Part 15a	Part 15b	Part 15c
473 nm	2,1	2,1	2,1
	0,0134	0,0461	0,3253
532 nm	8,4	8,4	8,4
	0,0047	0,1082	3,4
590 nm	1,2	1,2	1,2
	1,0	0,7296	0,4349

werden die optische Dichten  $\log_{10} \frac{P_0}{P}$  mithilfe LibreOffice Calc berechnet:

Wellenlänge	Optische Dichte			
	Part 15a	Part 15b	Part 15c	
473 nm	2,2	1,7	0,81	Exp
	3 bis 5	1	0	Theo
532 nm	3,3	1,9	0,39	Exp
	3 bis 5	1	0	Theo
590 nm	0,079	0,22	0,44	Exp
	0	0	0	Theo

Also sind die Brillen schutzend wie beschreibt für alle Wellenlängen, außer die Brille Part 15a mit der Wellenlänge 473 nm. Die berechnete optische Dichte war weniger als die beschriebte optische Dichte und deswegen nicht genug schutzend für das Verwendungszweck.

Mit der Werten:

Wellenlänge	Leistung / mW			
	RG1000	NG9	BG39	
473 nm	2,5	2,5	2,5	Ohne
	0,0236	0,1324	2,0	Mit
532 nm	8,4	8,4	8,4	Ohne
	0,0447	0,3667	6,5	Mit
590 nm	1,2	1,2	1,2	Ohne
	0,0069	0,0492	0,2425	Mit

werden die Transmission  $(T = \frac{P}{P_0})$  mithilfe LibreOffice Calc berechnet:

Wellenlänge	Transmission $T / \%$			
	RG1000	NG9	BG39	
473 nm	0,94	5,3	80	Exp
	< 0,001	4,356	95,6	Theo (470 nm)
532 nm	0,53	4,4	77	Exp
	< 0,001	4,021	95,71	Theo (530 nm)
590 nm	0,58	4,1	20	Exp
	< 0,001	3,908	66,8	Theo

wobei die theoretische Werte aus den Datenblätter<sup>1</sup> stammen.

Die gemessene Transmissionen bei RG1000 scheinen schon ziemlich niedrig (< 1%) und die Diskrepanz zwischen die theoretische und experimentelle Werte stammt vermutlich aus der Beleuchtung des Experiment-Raums und der begrenzten Genauigkeit des Powermeters.

<sup>1</sup>[http://www.schott.com/d/advanced\\_optics/a1138abb-eab0-4996-b31b-6032be69d452/1.5/schott-longpass-rg1000-jun-2017-en.pdf](http://www.schott.com/d/advanced_optics/a1138abb-eab0-4996-b31b-6032be69d452/1.5/schott-longpass-rg1000-jun-2017-en.pdf)  
[http://www.schott.com/d/advanced\\_optics/297bc6b7-4f93-4df7-8348-2fe1e0f810b8/1.5/schott-neutral-density-ng9-jun-2017-en.pdf](http://www.schott.com/d/advanced_optics/297bc6b7-4f93-4df7-8348-2fe1e0f810b8/1.5/schott-neutral-density-ng9-jun-2017-en.pdf)  
[http://www.schott.com/d/advanced\\_optics/4fdfdb14e-be6b-453b-850e-1eec963259c3/1.6/schott-bandpass-bg39-jun-2017-en.pdf](http://www.schott.com/d/advanced_optics/4fdfdb14e-be6b-453b-850e-1eec963259c3/1.6/schott-bandpass-bg39-jun-2017-en.pdf)

Die gemessene Transmissionen bei NG9 liegen allein der Nähe von der theoretischen Werten, also können wir annehmen, dass sie verträglich miteinander sind.

Die gemessene Transmissionen bei BG39 sind viel niedriger als die theoretische Werten. Diese Diskrepanz liegt vermutlich daran, dass der Powermeter verschiedene Wellenlängen nicht unterscheiden kann. Es wird also immer die Leistung aller Wellenlänge gemessen. Da das Filterglas aber die andere Wellenlänge auch filtert, ist die Leistung von der anderen Wellenlängen auch erniedrigt. Somit beträgt die Beleuchtung des Experiment-Raumes auch zu der Messung. Das kann dann zu einer niedrigere Transmissionmessung.

Diese Problem könnte aufgehoben werden, indem man die Beleuchtung im Raum während des Experiments ausschaltet.

### 2.3 Bestimmung des Strahldurchmessers

Aus Abbildung 10 der Anleitung gilt:

- $T = 86\% \implies d = 2\omega$
- $T = 99\% \implies d = \pi\omega$

Somit können wir den 99%-Durchmesser mit der folgenden Formel bestimmen:

$$d_{99} = d_{86} \times \frac{\pi}{2} \quad (2.1)$$

Die mittlere Intensität des Strahlquerschnitts ist dann gegeben durch:

$$\bar{I} = \frac{P_0 \times 0,99}{A} = \frac{P_0 \times 0,99}{\pi \times \left(\frac{d_{99}}{2}\right)^2} = \frac{4 \times 0,99 P_0}{\pi d_{99}^2} = \frac{3,96 P_0}{\pi d_{99}^2} \quad (2.2)$$

Unter Berücksichtigung der Gaußschen Strahlprofil ist die maximale Intensität gegeben durch:

$$I_0 = \frac{2}{\pi \omega^2} P_0 = \frac{2}{\pi \left(\frac{d_{86}}{2}\right)^2} P_0 = \frac{8}{\pi d_{86}^2} P_0 \quad (2.3)$$

Wir erhalten dadurch:

Wellenlänge / nm	$P_0$ / mW	$d_{86}$ / mm	$d_{99}$ / mm	$\bar{I}$ / $\text{W m}^{-2}$	$I_0$ / $\text{W m}^{-2}$
473	2,7	2,55	4,01	212	$1,06 \cdot 10^3$
532	8,4	2,70	4,24	589	$2,94 \cdot 10^3$
590	1,1	0,94	1,48		

Im Vergleich zur der Grenzwerten aus Teilversuch 1 liegen die maximale Intensität weit ober der MZB. Die Laser im Versuchsraum sind somit in diesem Sinne ziemlich gefährlich.

### Teilversuch 3: Klassifikation der Laser

Keine Auswertung

## Teilversuch 4: Änderung von lasersicherheitsrelevanten Parametern durch verschiedene optische Instrumente

### 4.3 Strahlprofil

Da ich die Aufgabe 1 in der Vorbereitung falsch gemacht habe, sind die Rechnung hier nachbessert. Mit WolframAlpha erhalten wir:

$$\begin{aligned}
 P &= \int_A I \, dA = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R dr r I_0 \exp\left\{-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^2\right\} \\
 &= 2\pi I_0 \int_0^R dr r \exp\left\{-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^2\right\} \\
 &= 2\pi I_0 \omega^2 \left[1 - \exp\left\{-2\left(\frac{R}{\omega}\right)^2\right\}\right]
 \end{aligned}$$

Die resultierende Kurve sieht aber genauso aus, wie in der Vorbereitung. Wähle  $\omega = \sqrt{2}$  und  $I_0 = \frac{1}{4\pi}$  und plotte  $1 - \exp\{-R^2\}$ :

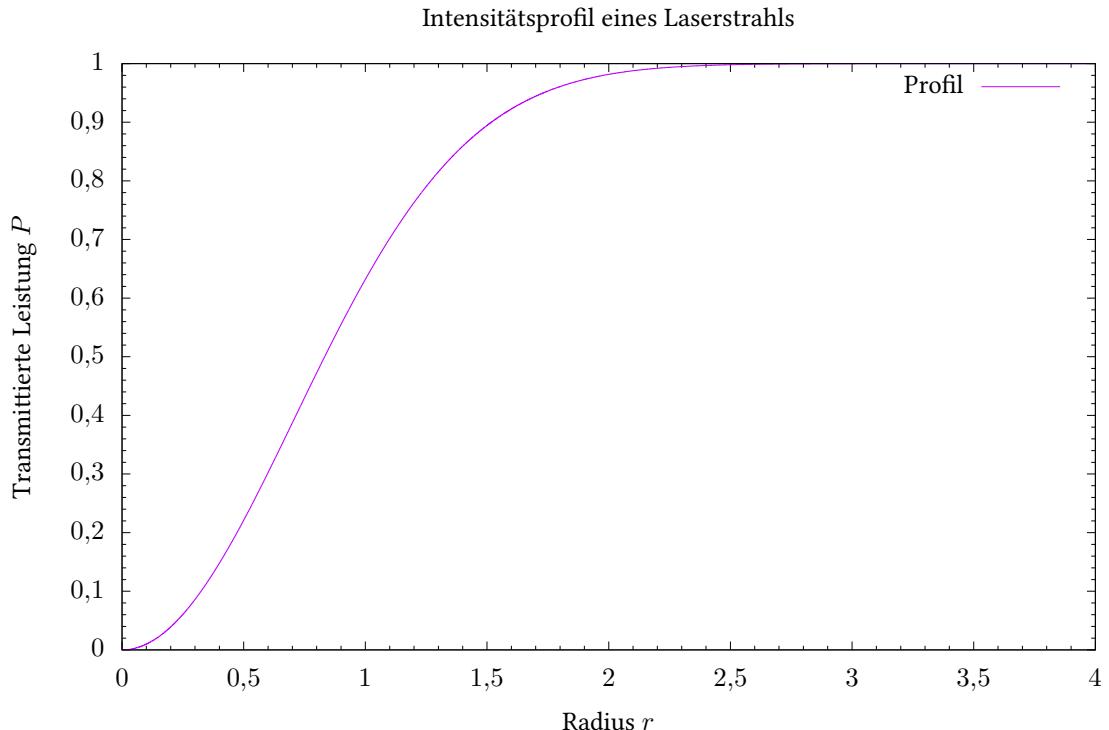


Abbildung 4.1: Intensitätsprofil eines Laserstrahls

Nun plotten wir die Daten aus dem Versuch und führe eine Kurveanpassung mit:

$$P(d) = A\omega^2 \left( 1 - \exp \left\{ -2 \left( \frac{d}{2\omega} \right)^2 \right\} \right) = A\omega^2 \left( 1 - \exp \left\{ -\frac{d^2}{2\omega^2} \right\} \right) \quad (4.1)$$

$$= AW \left( 1 - \exp \left\{ -\frac{d^2}{2W} \right\} \right) \quad (4.2)$$

Bei der Kurvenanpassung wird einen Fehler  $\Delta P$  von 0,1 mW und einen Fehler  $\Delta d$  von 0,1 mm angenommen.

Aus gnuplot (Appendix A) erhalten wir:

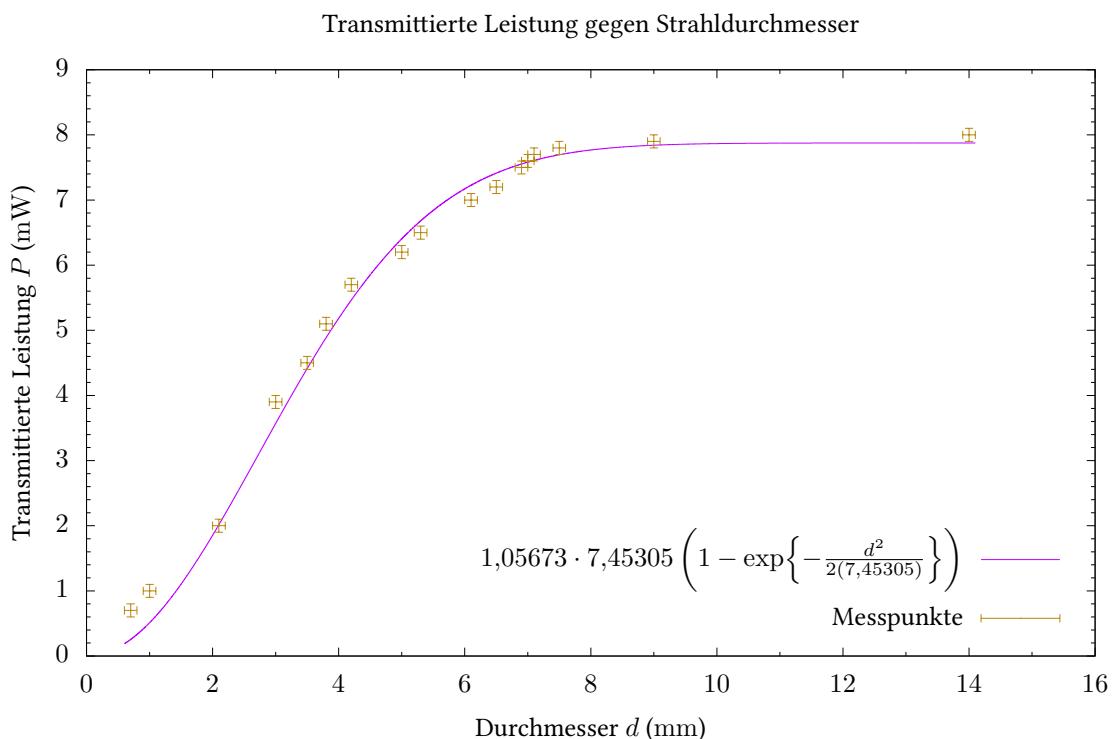


Abbildung 4.2: Intensitätsprofil des grünen Lasers ( $\chi_{\text{red}}^2 = 1,77774 \approx 1 \Rightarrow$  Gute Anpassung)

mit dem Endergebnis:

Variable	Wert	Gerundet
$A$	$(1,0567 \pm 0,0488) \text{ mW m}^{-2}$	$(1,06 \pm 0,05) \text{ mW m}^{-2}$
$\omega^2$	$(7,4531 \pm 0,4013) \text{ mm}^2$	$(7,5 \pm 0,5) \text{ mm}^2$

Da die Kurveanpassung ziemlich gut war, können wir daraus schließen, dass die experimentelle Werte die theoretische Gleichung wirklich übereinstimmt. Es ist auch zu bemerken, dass die erhaltenen Kurve komplementär zum gaußförmigen Intensitätsprofil des Laserstrahls ist.

#### 4.4 Divergenzwinkel

Der Halbdivergenzwinkel haben wir als  $\varphi = 3^\circ$  im Versuch bestimmt. Mit einer Bestrahlungsdauer von 150 s liegen die Bestrahlung immer noch im Bereich  $10^2$  s bis  $3 \cdot 10^4$  s und wir haben als MZB für den grünen Laser  $MZB = 10 \text{ W m}^{-2}$ .

Wir nehmen noch zusätzlich an, dass der Fokus eine Durchmesser von  $d = 1 \text{ mm}$  hat.

Somit erhalten wir mit  $P = 8,4 \text{ mW}$  als  $r_{NOHD}$ :

$$\begin{aligned}
r_{NOHD} &= \frac{1}{\theta} \times \frac{180}{\pi} \left( \sqrt{\frac{8P}{\pi MZB}} - d \right) \\
&= \frac{1}{2\varphi} \times \frac{180}{\pi} \left( \sqrt{\frac{8P}{\pi MZB}} - d \right) \\
&= \frac{1}{2(3)} \times \frac{180}{\pi} \left( \sqrt{\frac{8(8,4 \cdot 10^{-3} \text{ W})}{\pi(10 \text{ W m}^{-2})}} - 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \right) \\
&= 0,43 \text{ m} = 43 \text{ cm}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Wir haben während des Versuchs die Divergenzwinkel bei einem Abstand größer als 43 cm gemessen, somit ist man bei diesem Abstand am Ende des Tisches schon vom Laser sicher.

## A gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 4

```

1 #!/usr/bin/env gnuplot
2
3 set term epslatex color size 6in, 4in
4 set output "tv4-plot.tex"
5 set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'
6
7 set title "Transmittierte Leistung gegen Strahldurchmesser"
8 set ylabel "Transmittierte Leistung $P$ ($\\si{\\milli\\watt}$)"
9 set xlabel "Durchmesser $d$ ($\\si{\\milli\\meter}$)"
10
11 set mxtics
12 set mytics
13 set samples 10000
14
15 f(x) = A*W*(1 - exp(-(x**2)/(2*W)))
16
17 # (x, y, xdelta, ydelta)
18 fit f(x) "tv4.dat" u 2:1:(0.1):(0.1) xyerrors via A,W
19
20 # Linien
21 set key bottom right spacing 2
22
23 titel = "$".gprintf("%.5f", A)."\\cdot".gprintf("%.5f", W)."\\left(1 - "
24     ↪ "\\exp{-\\frac{d^2}{2\\cdot".gprintf("%.5f", W)."}}\\right)$"
25 plot f(x) title titel lc rgb 'dark-magenta', \
    "tv4.dat" u 2:1:(0.1):(0.1) with xyerrorbars title "Messpunkte" pointtype
    ↪ 0 lc rgb 'dark-goldenrod'
```

mit tv4.dat:

#	P/mW	d/mm		
2	8,0	14,0	10	6,5    5,3
3	7,9	9,0	11	6,2    5,0
4	7,8	7,5	12	5,7    4,2
5	7,7	7,1	13	5,1    3,8
6	7,6	7,0	14	4,5    3,5
7	7,5	6,9	15	3,9    3,0
8	7,2	6,5	16	2,0    2,1
9	7,0	6,1	17	1,0    1,0
			18	0,7    0,7

Rohausgabe:

```

1 final sum of squares of residuals : 47.4052
2 rel. change during last iteration : -5.53932e-06
3
4 degrees of freedom      (FIT_NDF)          : 15
5 rms of residuals        (FIT_STDFIT)       : 1.77774
6 variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 3.16035
7 p-value of the Chisq distribution (FIT_P)       : 3.17016e-05
```

```
8      Final set of parameters          Asymptotic Standard Error
9      =====            =====
10     A           = 1.05673          +/- 0.0488    (4.618%)
11     W           = 7.45305          +/- 0.4013    (5.384%)
12
13
14 correlation matrix of the fit parameters:
15          A         W
16     A           1.000
17     W          -0.985  1.000
```