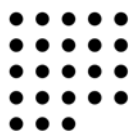


# BAuA-Projekt F 2310

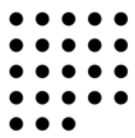
## Funktionale Abhängigkeit der Blendung

Prof. Dr.-Ing. Hans-Dieter Reidenbach,  
Fachhochschule Köln

Forschungsbereich Medizintechnik und Nichtionisierende Strahlung



- Einleitung
- Wie war der Stand vor Projektbeginn?
- Welche Methoden und Verfahren wurden angewandt?
- Welche Ergebnisse liegen vor?
- Welche funktionalen Abhängigkeiten gibt es?



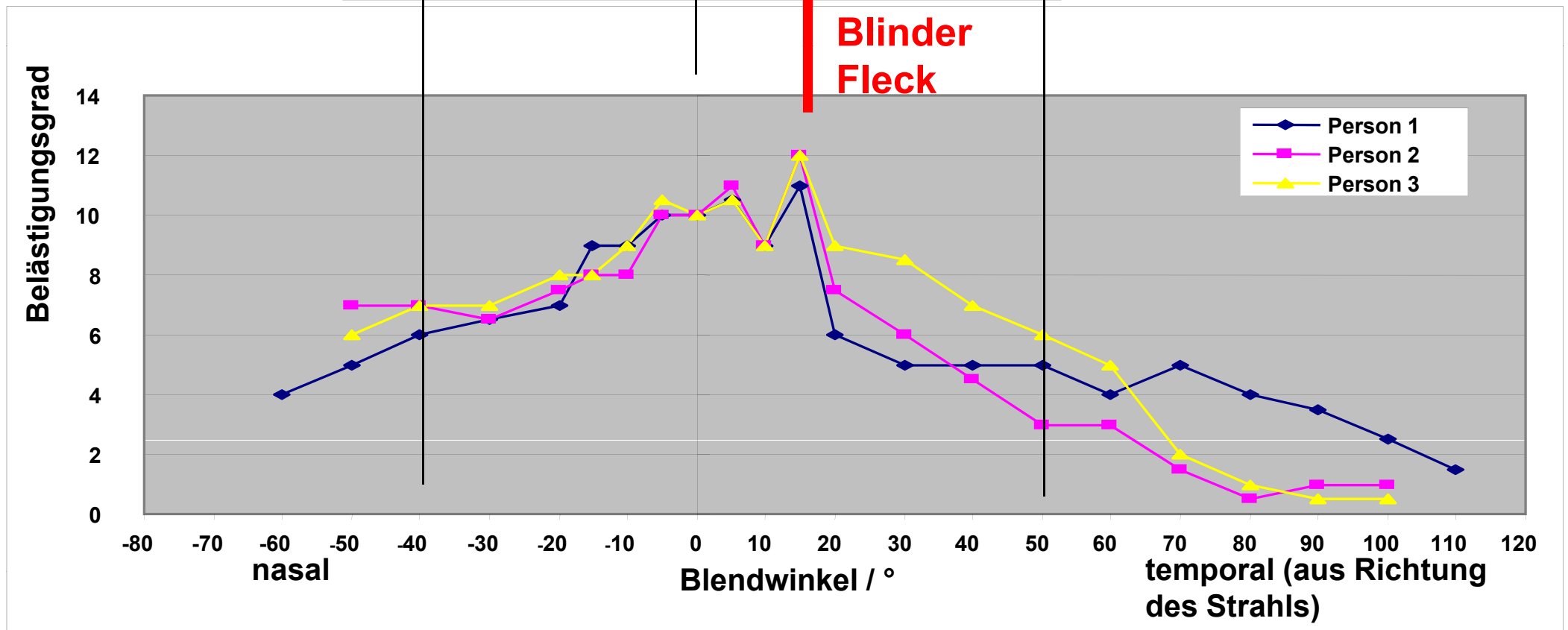
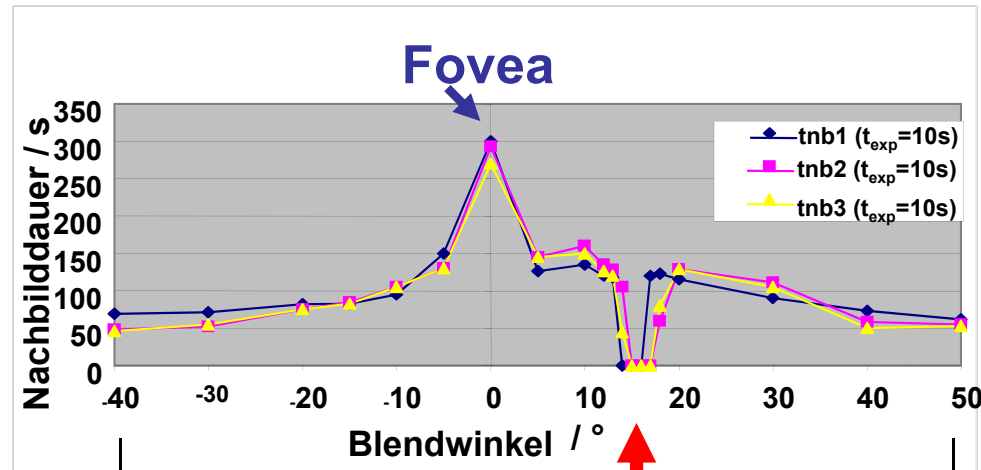
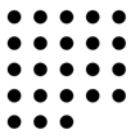
- Schwerpunkt des aktuellen Forschungsprojektes war die Untersuchung der unmittelbaren Sehbeeinträchtigungen nach einer akuten Blendung durch Laserstrahlung.
- Dabei sollten die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften des verwendeten Laserstrahls und einer akuten Sehbeeinträchtigung durch einen Blendvorgang experimentell ermittelt werden.



---

- Wie war der Stand vor Projektbeginn?

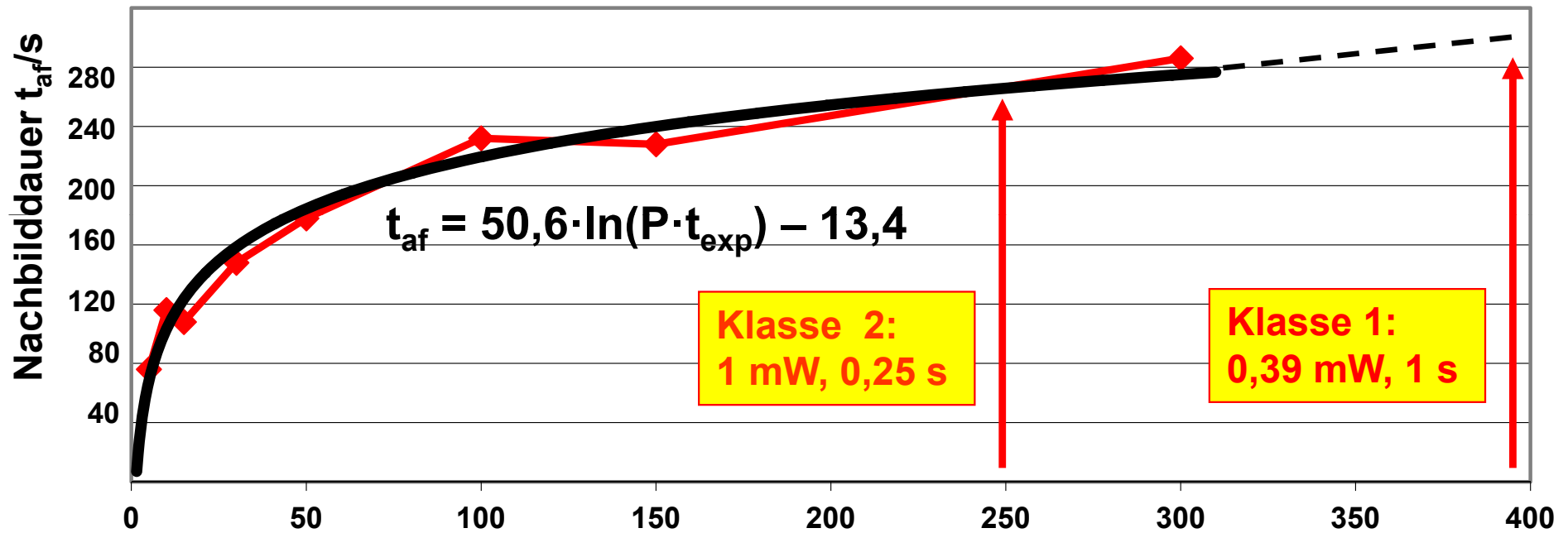


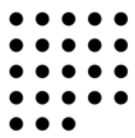




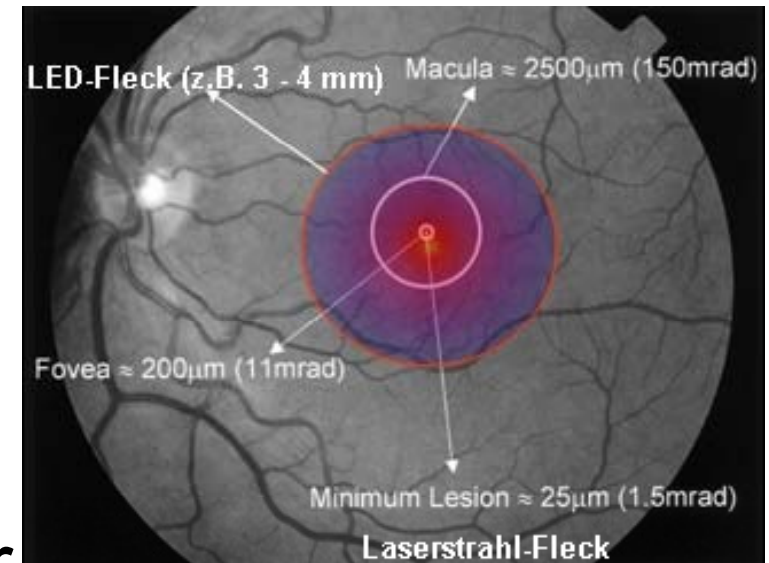
## Laserbestrahlung (632,8 nm) in der Fovea (Blendwinkel 0°)

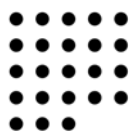
$$t_{af,fovea} = 2 \cdot \{t_{af,5^\circ/s} \approx 25,3 \cdot \ln[(P \cdot t_{exp})/\mu J] - 6,7\} \approx 50,6 \cdot \ln[(P \cdot t_{exp})/\mu J] - 13,4$$





- **Nachbilddauern bis zu 300 s bei zentraler Exposition mit einem Klasse 1-Laser**
- **Starke Abhängigkeit vom Winkel zwischen Blick- und Strahlrichtung**
- **Deutlich geringere Dauern sowohl in der Parafovea als auch in der Peripherie**
- **Dosisbeziehung** bei der Nachbilddauer als Funktion der Expositionsdauer im **Bereich von 0,5 s bis 10 s**





## ■ „Vorlaufforschung“

### ● Anderes Messverfahren

- ❖ Statt Nachbilddauer ist Lesestördauer geeigneter

### ● Wellenlängenabhängigkeit

- ❖ Vergleich rot vs. Grün
- ❖ Weitere Wellenlängen

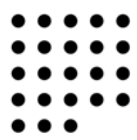
### ● Suche nach der Schwelle

- ❖ Beginn des Nachbildes / Beginn der Lesestörung

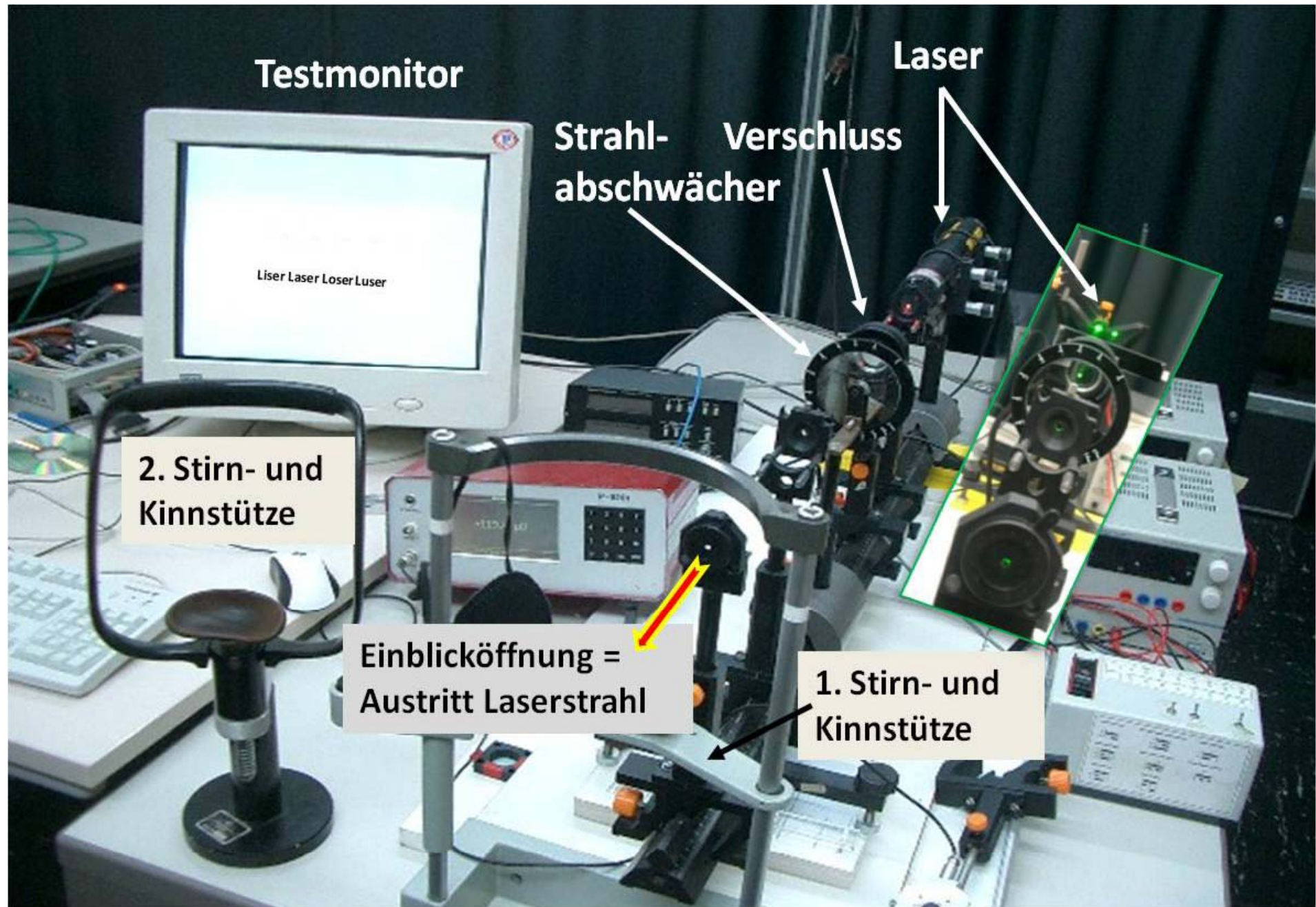


1.) Rechnergestützter Lesetest

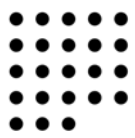
2.) Modifizierter Landolt-C Sehtest




# Messverfahren für Lesestördauer



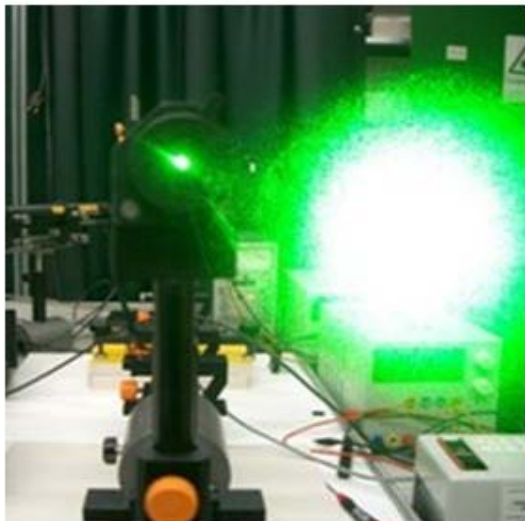




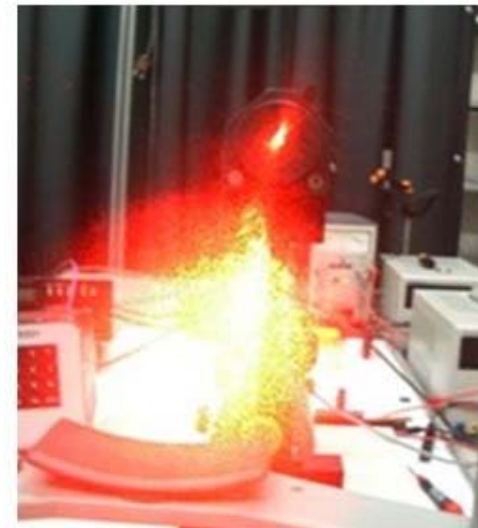
# Blenduntersuchungen bei 2 Wellenlängen

Blendquelle	Parameter		Zahl der Versuche	Summe der Tests
<b>L A S E R</b> 	Wellenlänge/nm	<b>632,8</b>	943	<b>1.267</b>
		<b>532</b>	324	
	Expositionsdauer/s	0,25, 0,5, 1, 5, und 10	Zahl der unterschiedlichen Testsituationen: 10 (2 Wellenlängen und 5 Expositionsauern)	
Maximale Laserstrahlleistung/mW	0,783			

**Gesamt: 19 Versuchspersonen, 1.267 Expositionen**



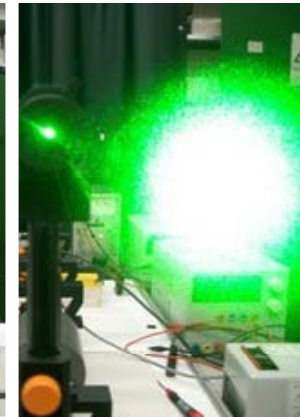
Blendeindruck beider Laserstrahlquellen



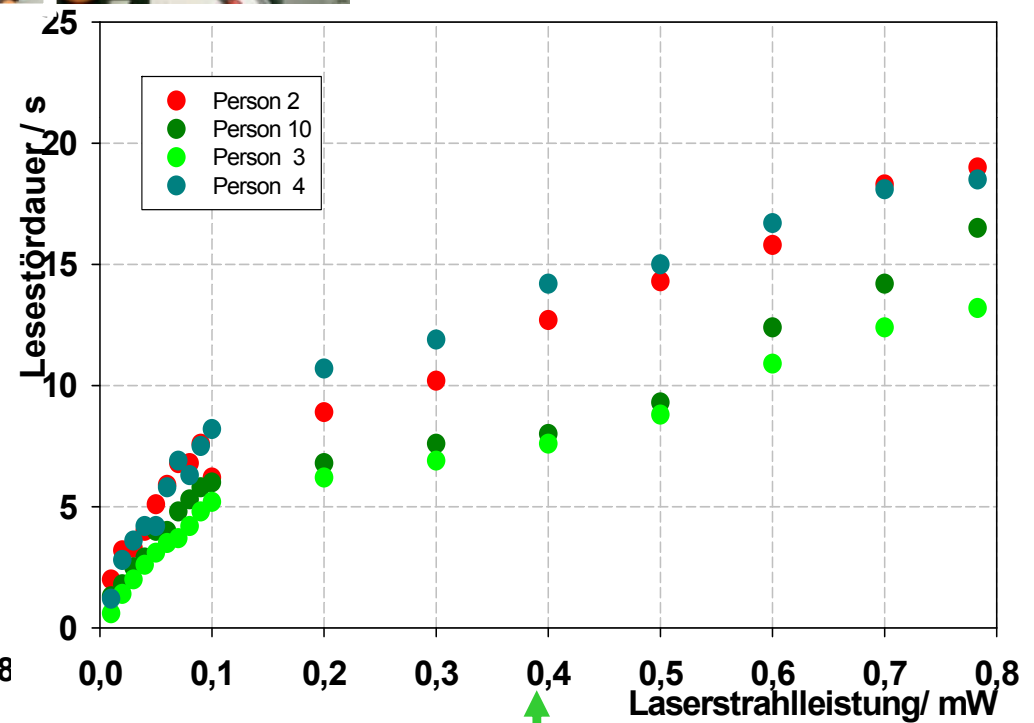
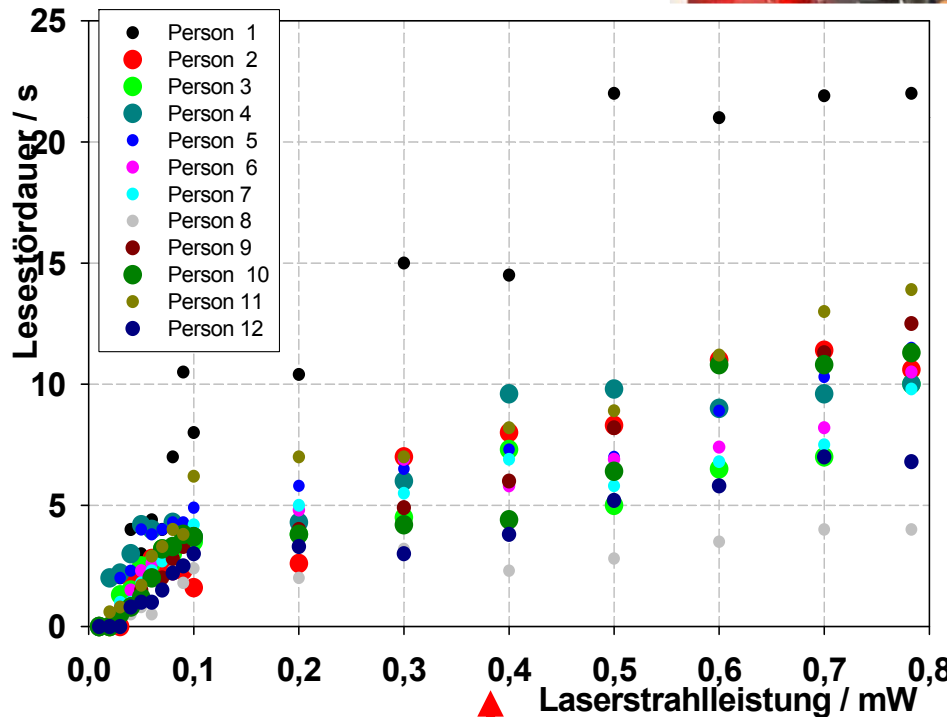
# Rot-Grün-Vergleich – Bestrahlungsdauer: 0,25 s



632,8 nm, 0,25 s



532 nm, 0,25 s

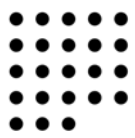


↑ Klasse 1 ↑

Der Faktor zwischen grün und rot ist nur etwa 1,5 anstatt 3,3 nach der V-Lambda-Kurve.  
Die Auswirkungen bei grün sind größer als bei rot.

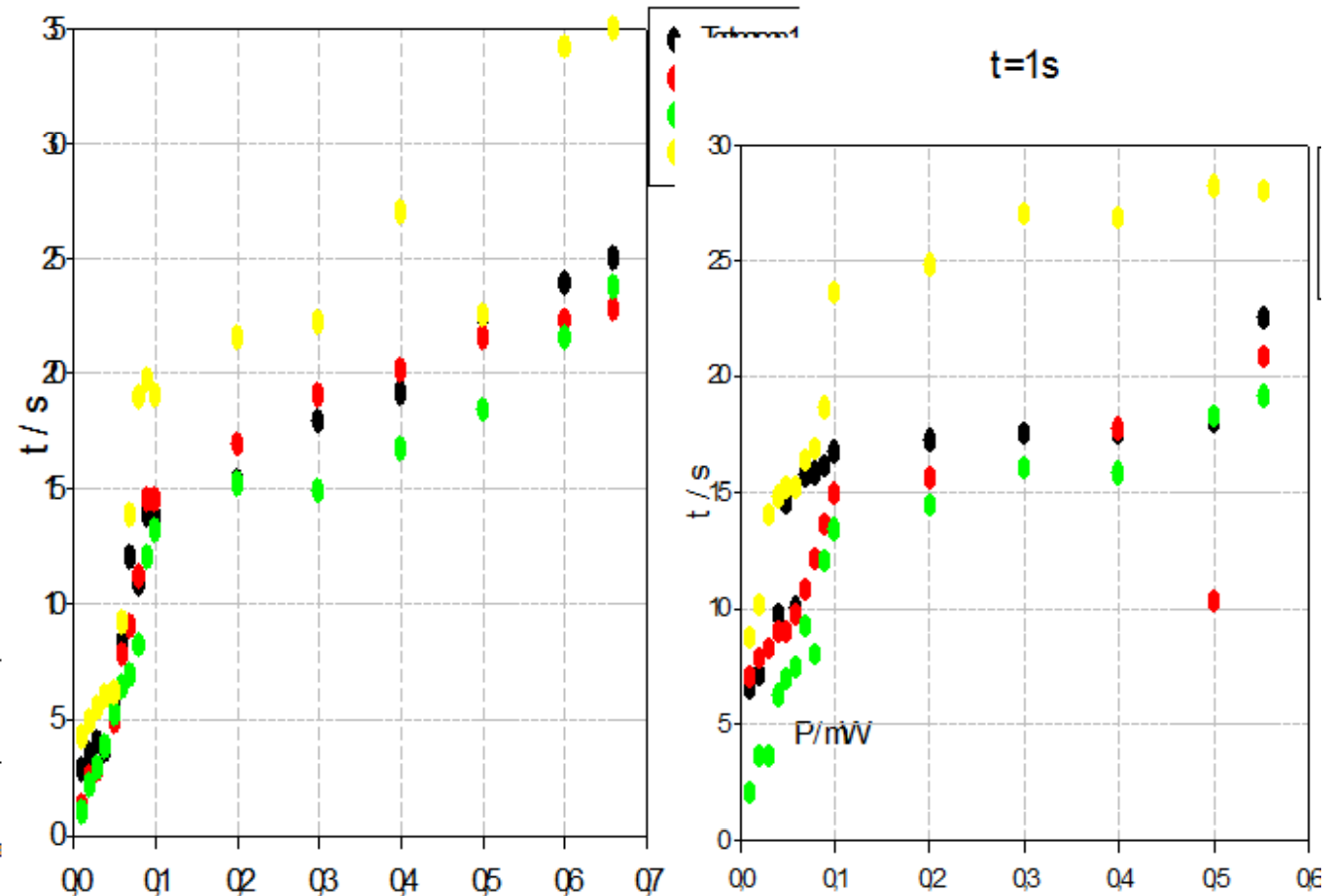
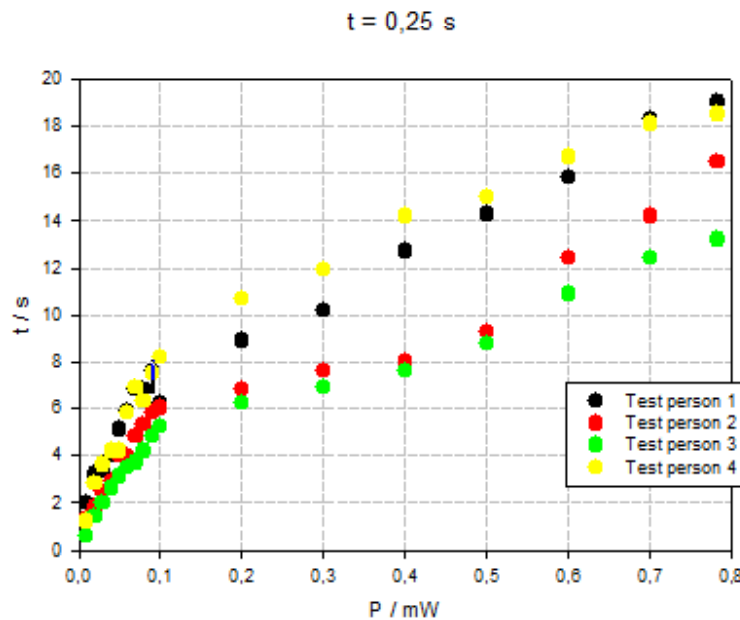
Aber es gibt individuelle Unterschiede bis zu einem Faktor 7.





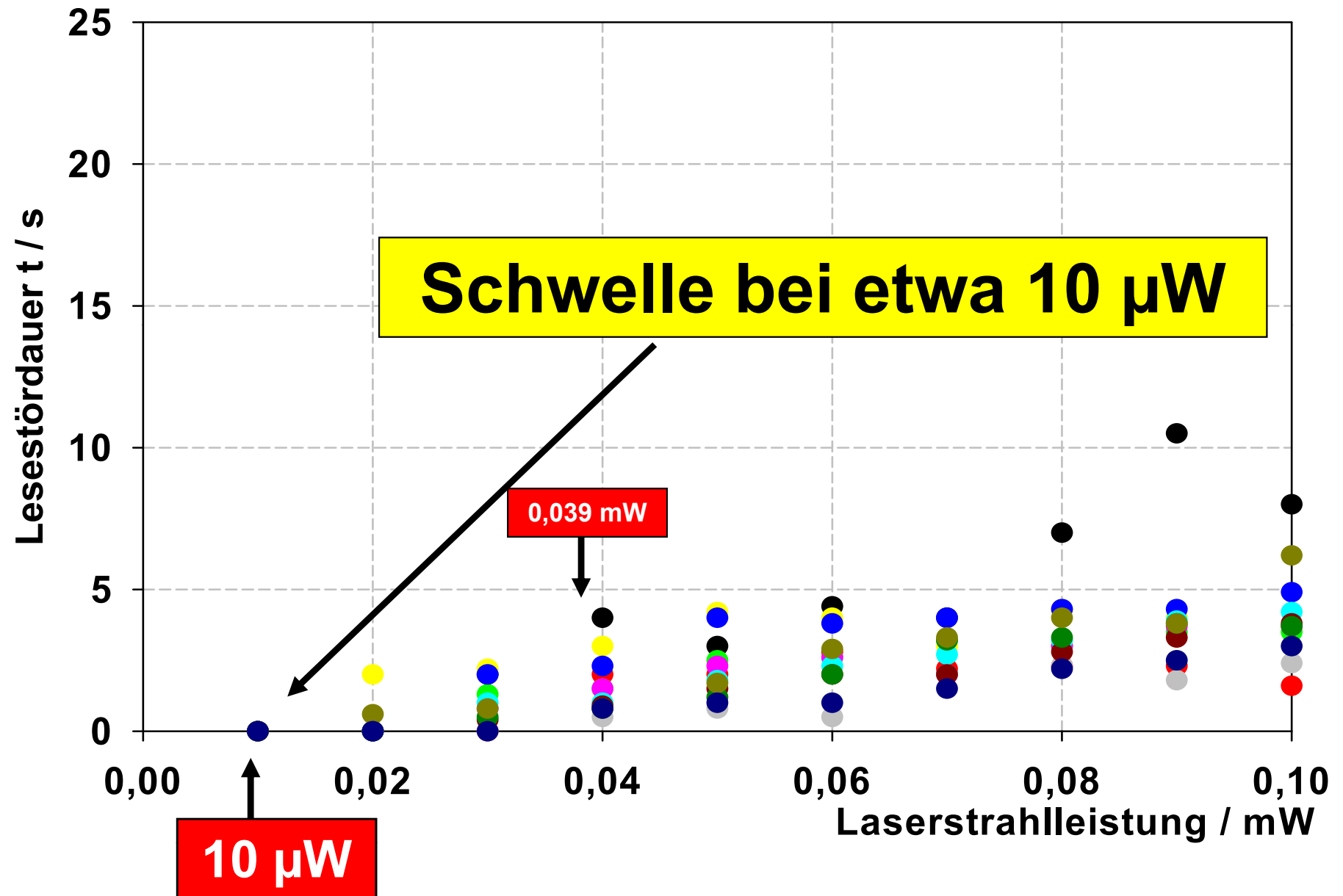
- Vorübergehende Blendung stellt sich als Ergebnis einer kurzen Expositionsdauer ein, wenn die Laserstrahlleistung ausreichend groß ist

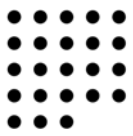
$t = 0,5 \text{ s}$



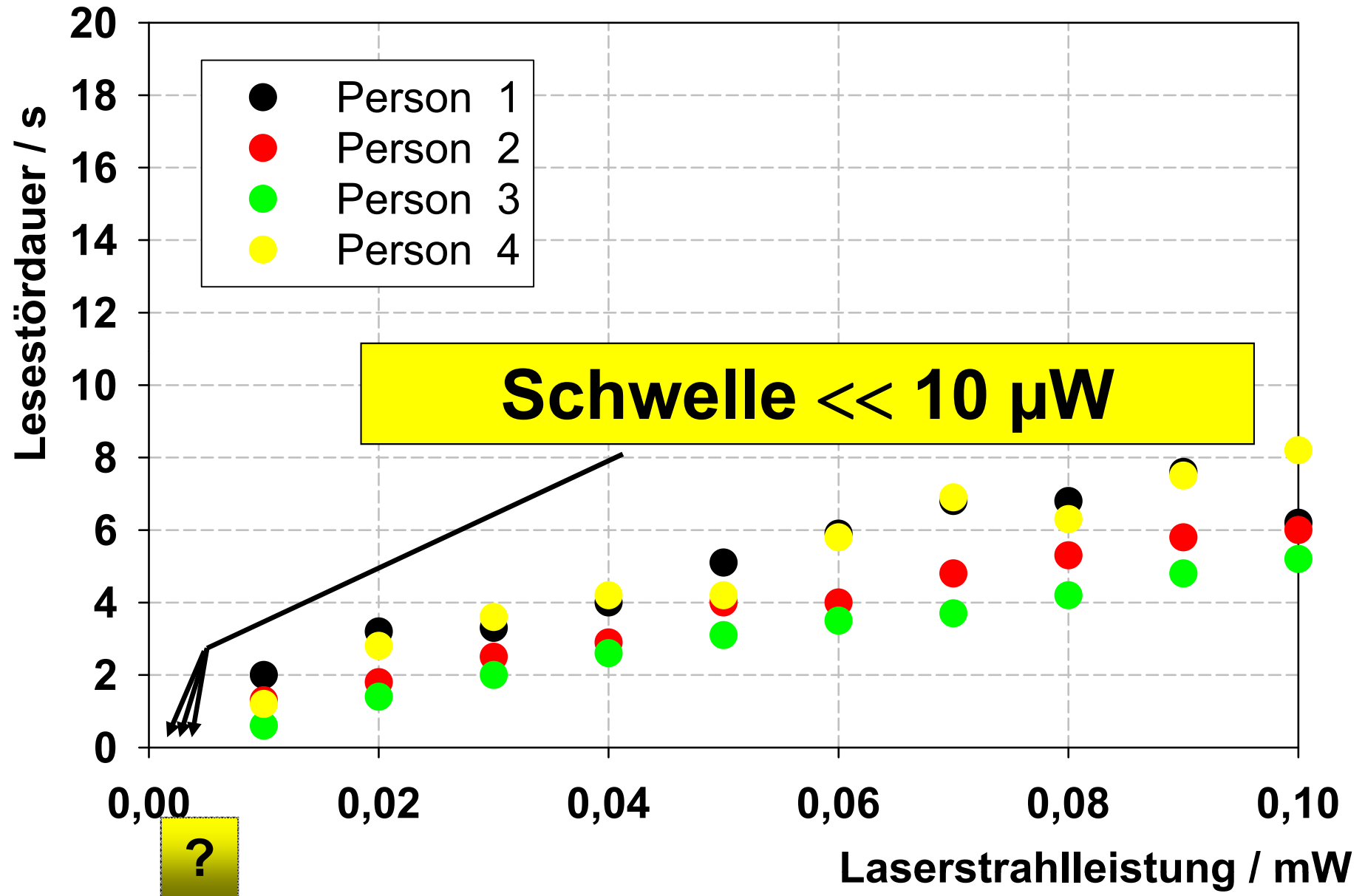


# He-Ne Laser (0,25 s): Schwellenverhalten



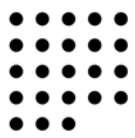


# SHG Nd-Laser (0,25 s): Schwellenverhalten





- Nachstehende **Beeinträchtigungswerte** können erwartet werden:
  - 4 s – 8 s bei 80  $\mu$ W und 0,25 s-Exposition
  - 13 s – 23 s bei 0,1 mW und 1 s-Exposition
  - 16 s – 27 s bei 0,39 mW und 1 s-Exposition
- ~~(Bisher angenommen: 10 % bis 30% der NBD)~~
- Auswertung von Ergebnissen unterstützt einen Zusammenhang wonach die tatsächliche Beeinträchtigungsdauer ungefähr **3 % bis 5 %** der Nachbilddauer beträgt



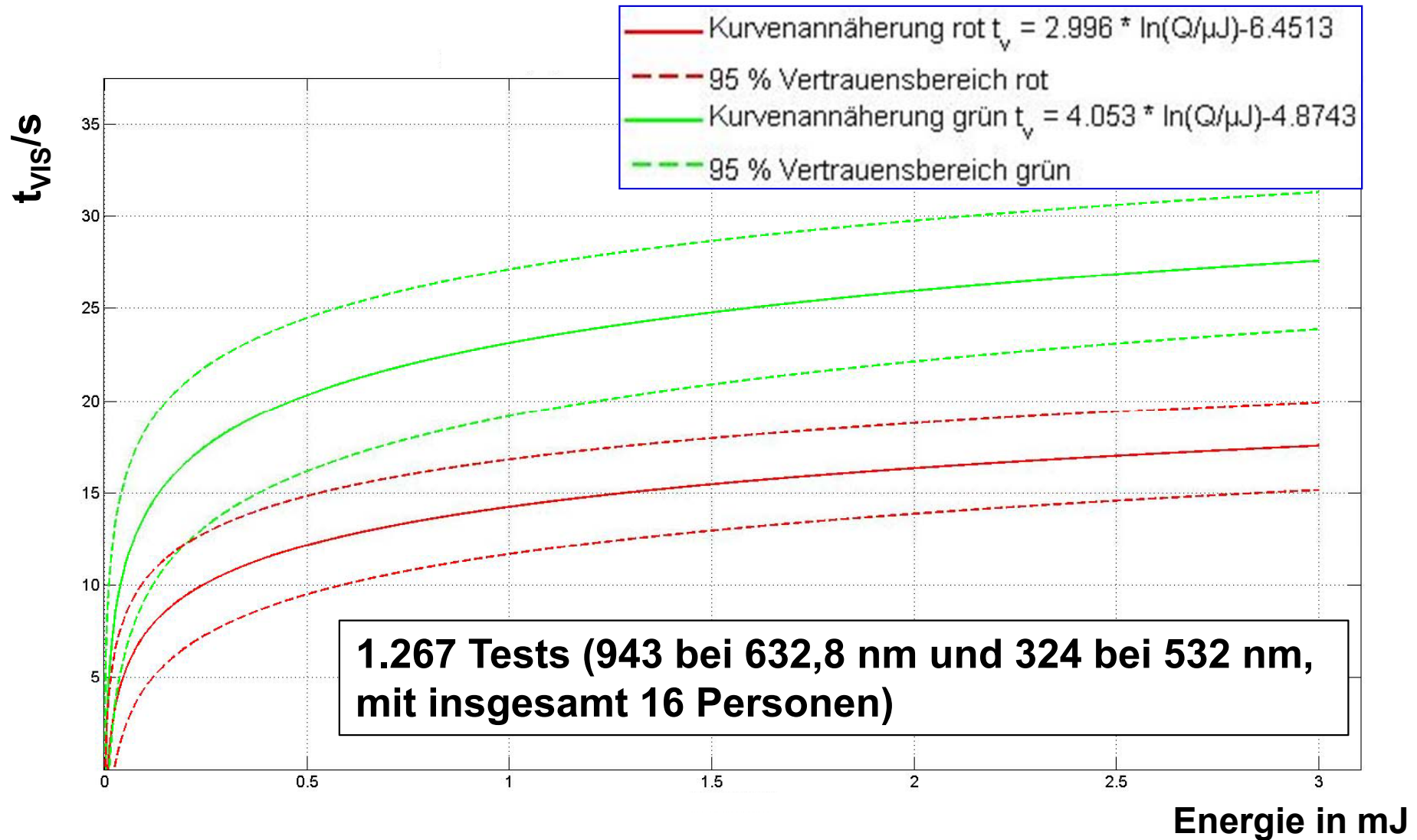
- Sehbeeinträchtigungsdauer  $t_{\text{VIS}}$  als Funktion der optischen Strahlleistung  $P$  und der Expositionsdauer  $t_{\text{exp}}$

$$t_{\text{VIS}} = a \cdot \ln(P \cdot t_{\text{exp}}) - b$$

- a und b hängen vom Untersuchungsszenarium ab
  - Wellenlänge
  - Testaufgabe
    - ❖ Landolt-C-Visustest
    - ❖ Leseaufgabe
  - Adaptationszustand (hell, dunkel)
  - u.a.m.

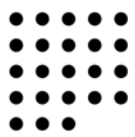


# Beeinträchtigungsdauer bei Laserstrahlung $\lambda = 532$ nm und 632,8 nm

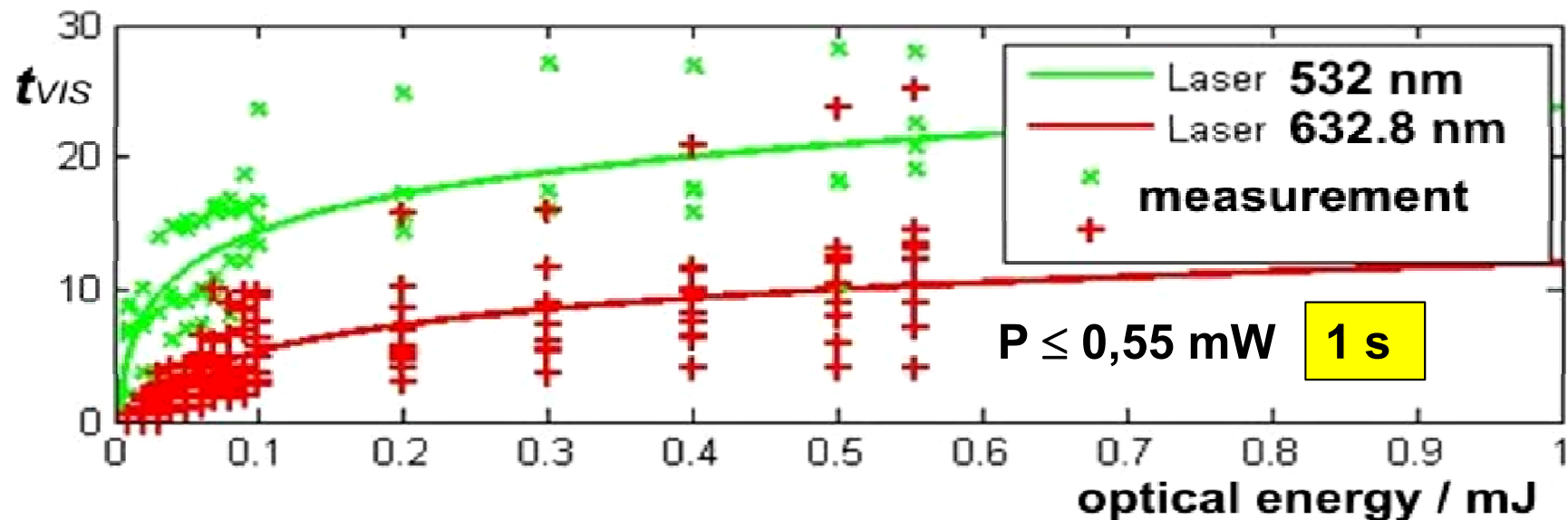
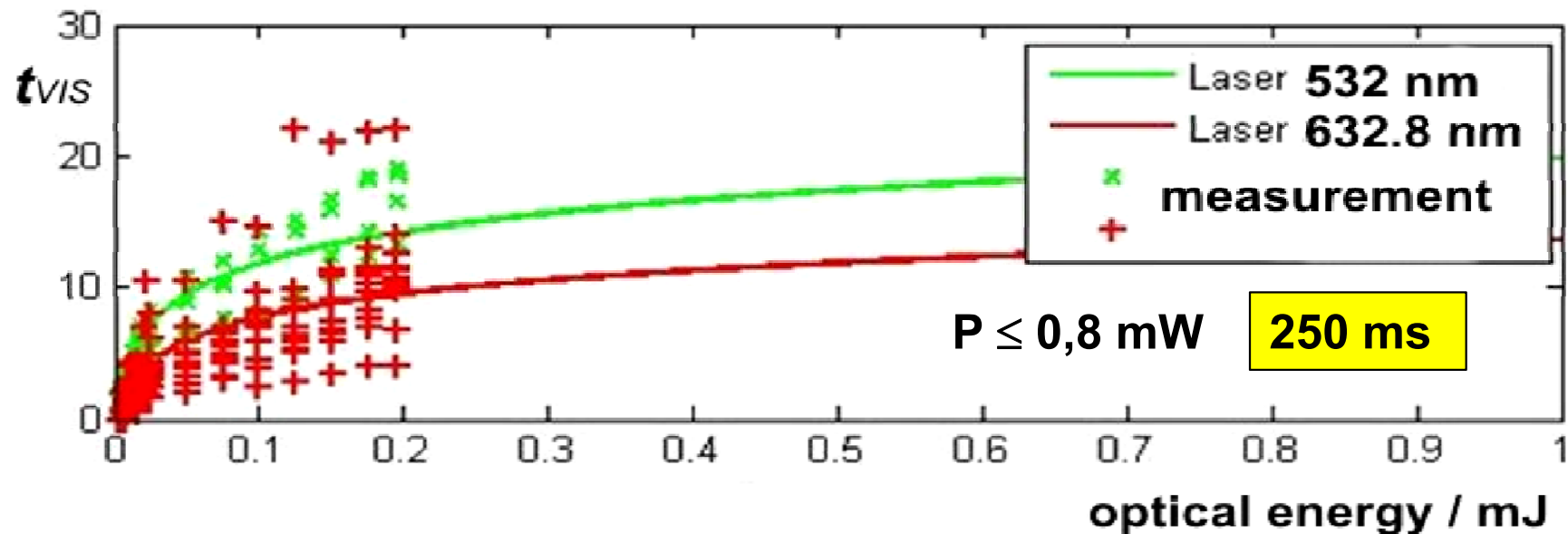


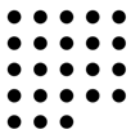
$$t_{VIS, 632,8 \text{ nm}} = 2,996 \times \ln(P \times t_{exp}) - 6,4513 \approx 3 \times \ln(P \times t_{exp}) - 6,5$$

$$t_{VIS, 532 \text{ nm}} = 4,053 \times \ln(P \times t_{exp}) - 4,8743 \approx 4 \times \ln(P \times t_{exp}) - 4,9$$

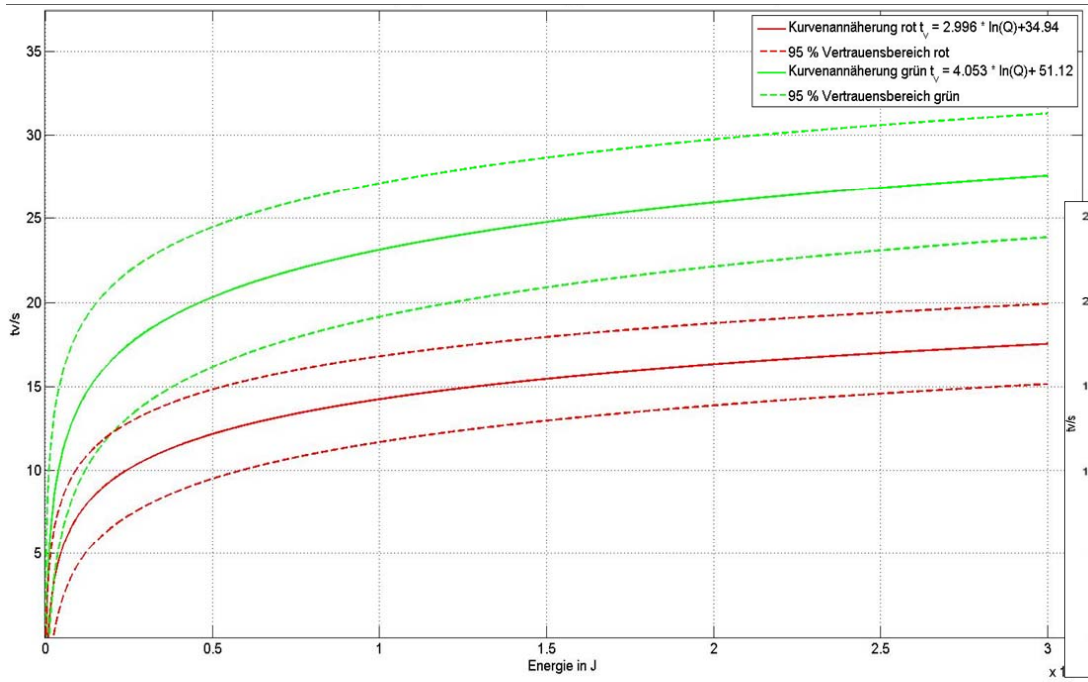


# Sehbeeinträchtigungsdauer

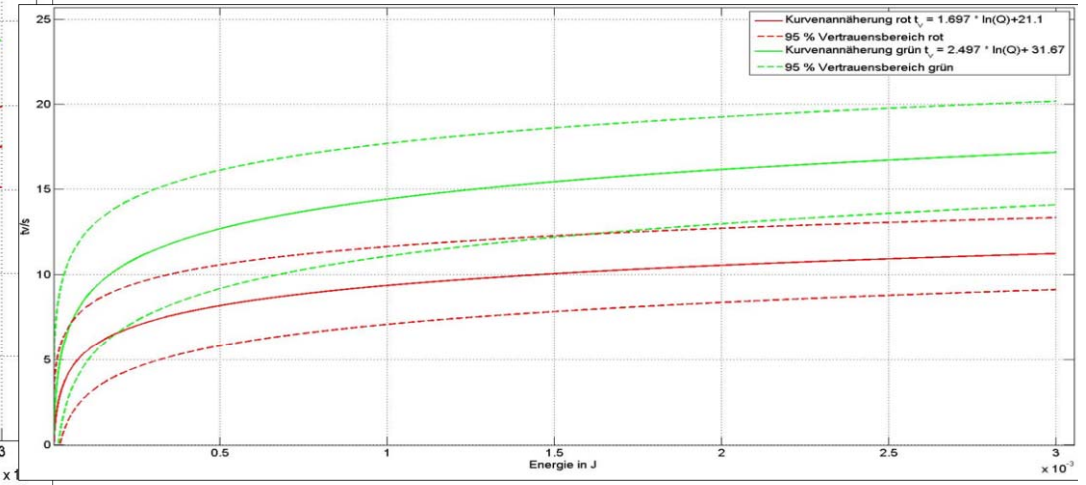




# Vergleich Laserstrahlung vs. LED-Strahlung

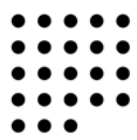


**Leseaufgabe**

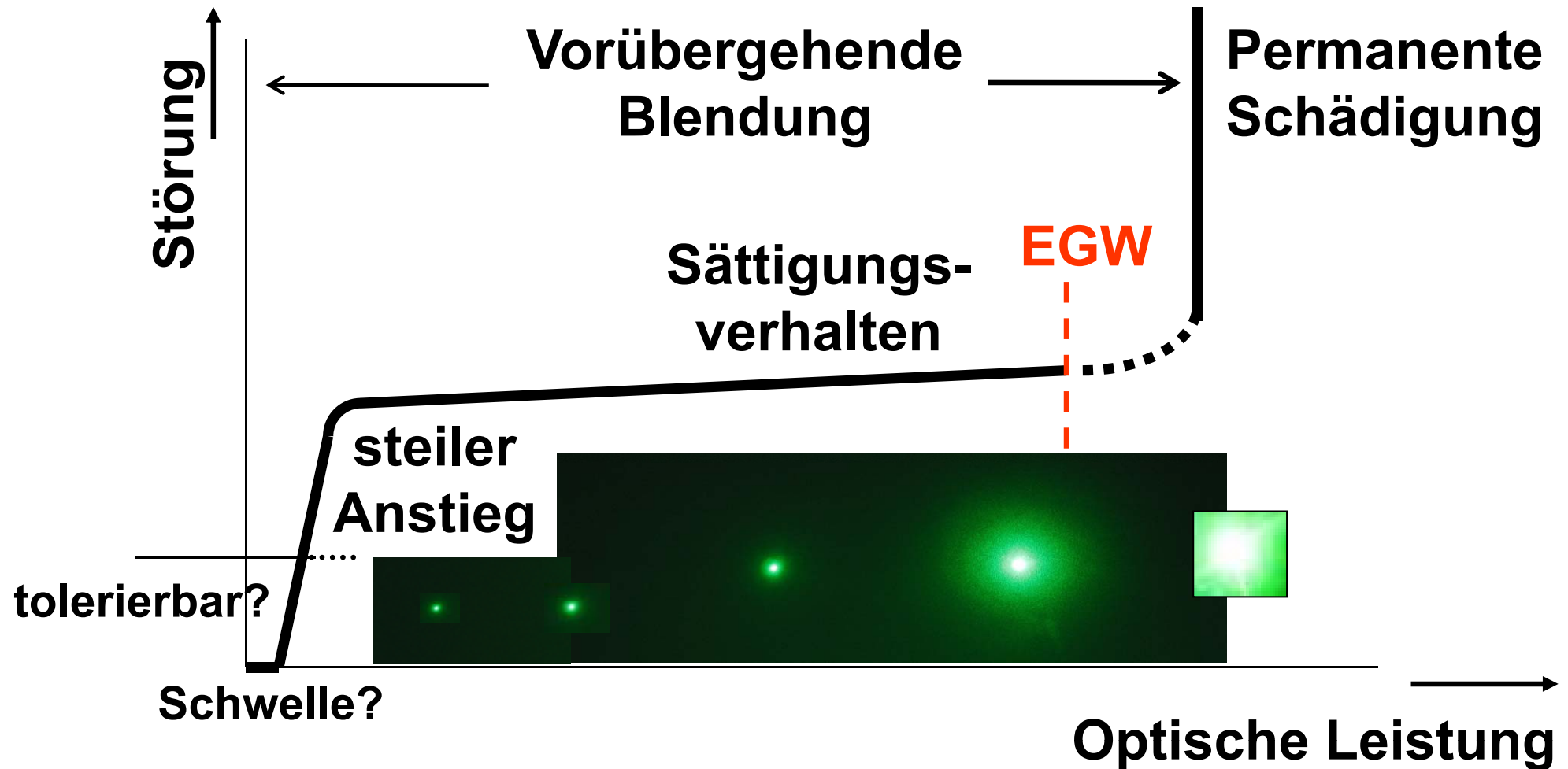


**Landolt-C-Ringe (Visustest)**





## Charakteristik der Sehstörung





# Vorschlag bei CIE TC 6-55

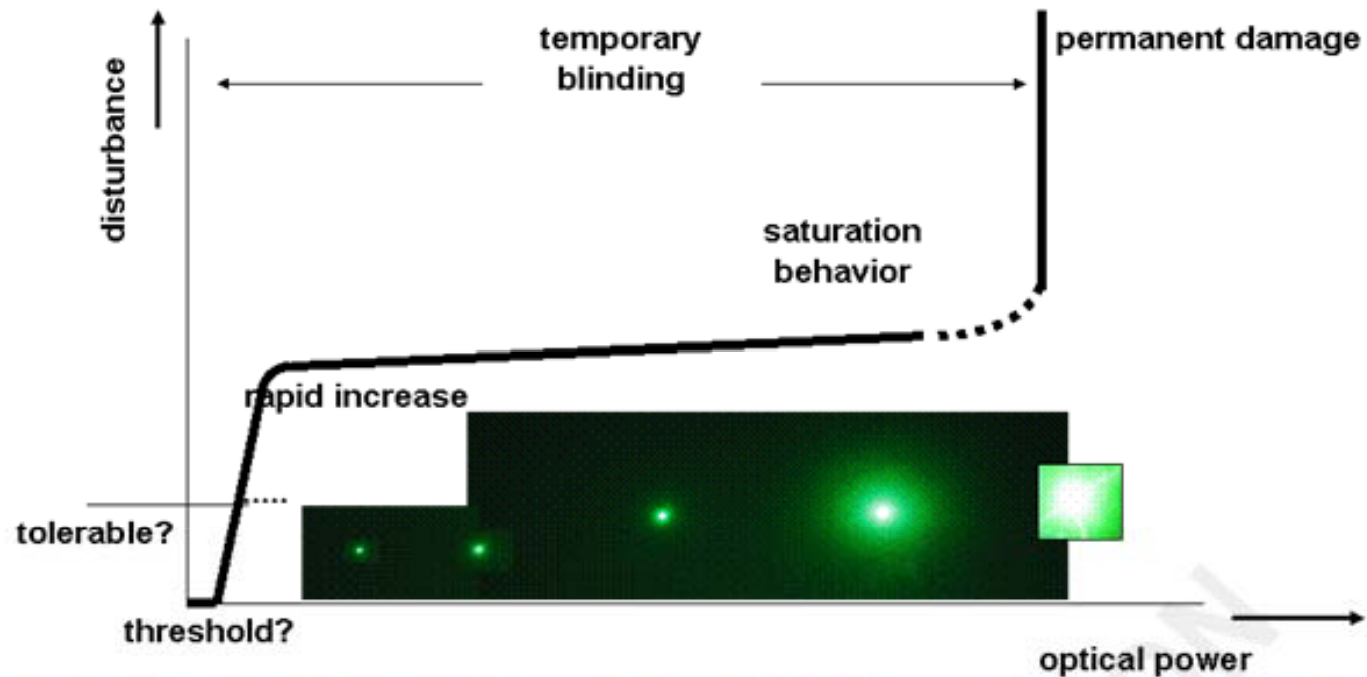
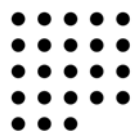


Fig. 17/21/: relation between the incidental optical power and the visual disturbance as well the occurrence of deterministic injury schematically

After a virtual threshold, for low optical power levels, the visual system is quickly saturated. As the power increases, the visual system reacts with a dazzling sensation that prevents against permanent damages. The values are depending on the energy – as for temporary blinding itself including related disturbing effects (incapable perception) may pose serious risks. These effects were extensively studied in conjunction with high-brightness lasers (see /21 – 24/). For instance, afterimages may last for several minutes, the colour vision can be distorted for about 2.5 minutes whereas the visual acuity mostly recovers after durations of 30 to 90 seconds. In absence of deterministic effects, some of these studies even suggest in general a new classification scheme for bright optical sources in terms of their related capabilities into blinding groups which bases on the maximum impaired vision durations.

## TC 6-55: Photobiological Safety of LEDs

To report on the differing methods of assessing the photobiological safety of Light Emitting Diodes (LEDs). The assessment measures in the CIE Lamp Safety Standard, CIE S 009/E:2002 will be compared to the measures in IEC 60825-1-2001. This entails a review and report on the known effects from a physiological standpoint and a determination of the dose relationships that pose a potential risk for eye injury from excessive irradiation. Chair: [Werner Horak](#) (DE)



## Interpretationsversuch:

Experimenteller Befund:

Verzehnfachung eines Reizes führt zur Verdopplung der Empfindungsstärke ("Intensität" der Empfindung)



Empfindungsstärke  $R \sim \log(\text{Reizstärke } S)$

$$R = k \cdot \log(S/S_0) = k \cdot \log S - k \cdot \log S_0$$

$S_0$  = Reizschwelle

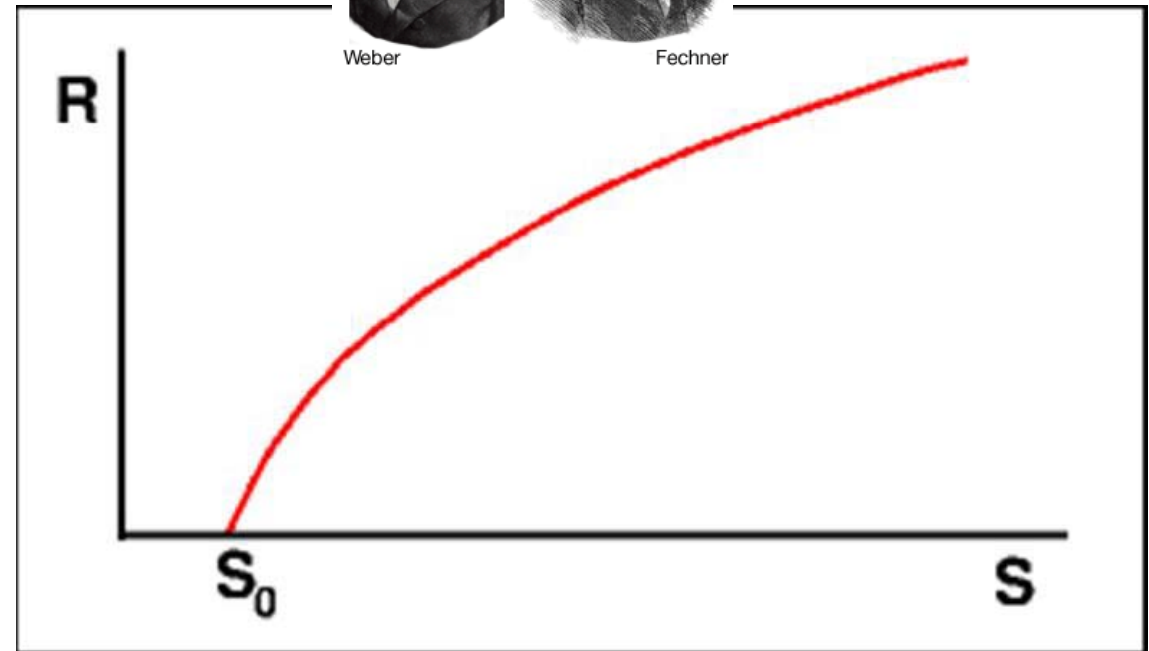
$k$  := Maßstabsfaktor



Weber

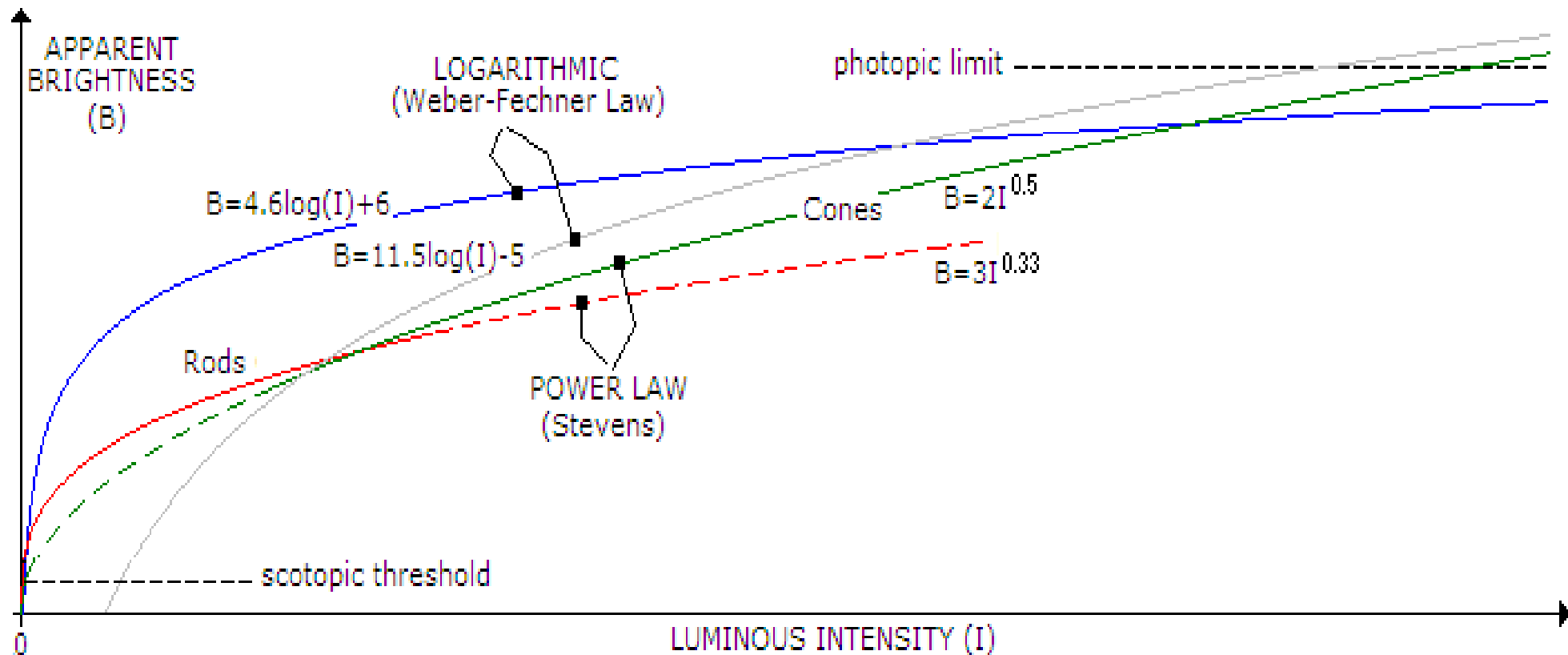


Fechner



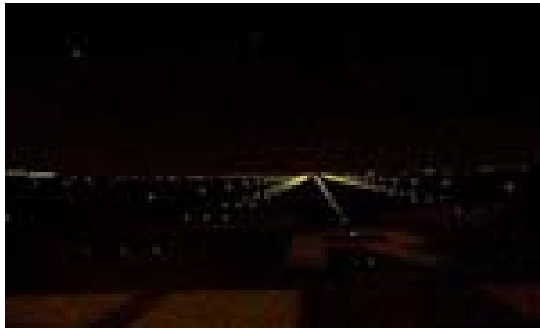


# Beschreibung durch logarithmischen Zusammenhang oder durch Potenzfunktion (n. Stevens)



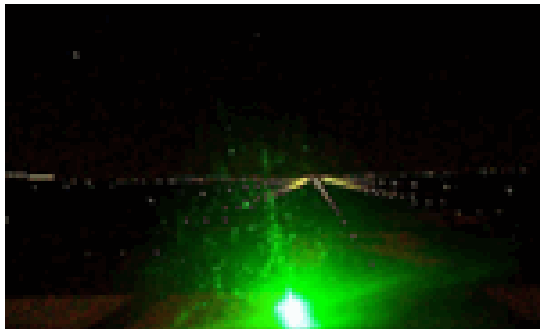
Eine nahezu in den Ursprung verschobene logarithmische Kurve (n. Weber-Fechner) steigt schneller als eine Potenzfunktionskurve (n. Stevens; **rot** für Stäbchen, Exponent 0,33 und **grün** für Zapfen, Exponent 0,5). Die logarithmische Kurve ist dafür aber flacher bei größeren Leistungsdichten. Einen steileren Anstieg kann man durch eine andere, vom Ursprung verschobene logarithmische Kurve (z. B. Konstante = -5 statt +6) darstellen. M.a.W. für größere Leistungsdichten ergeben beide Kurvenformen vergleichbare Ergebnisse.

• **Aufnahmen aus der FAA-Studie zur Illustration von 4 Testszenarien**



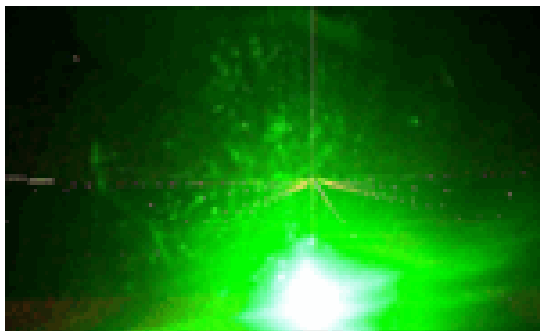
**No laser exposure.**  
**This gives a baseline for a “normal” approach.**

**Example:**  
**5 mW,**  
**532 nm,**  
**1 s**



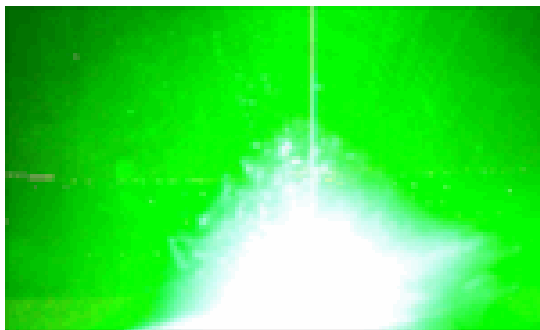
**0.5 μW/cm<sup>2</sup>: This corresponds to a 5 mW (milliwatt) laser pointer at 3,700 feet, or a 50 mW pointer at 2.2 miles.**

**192.5 nW**



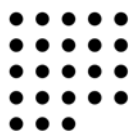
**5.0 μW/cm<sup>2</sup>: This corresponds to a 5 mW pointer at 1,200 feet, or a 50 mW pointer at 3,800 feet.**

**1.925 μW**



**50 μW/cm<sup>2</sup>: This corresponds to a 5 mW pointer at 350 feet, or a 50 mW pointer at 1,100 feet. The animation simulates flashblindness and a slowly fading afterimage.** <http://www.pangolin.com/faa/laser-aircraft-animation-and-explanation.htm>; Modified

**19.25 μW**



## Laser power levels:

0  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,

0.5  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  for 1 second,

5.0  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  for 1 second, and

50.0  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  for 1 second.

## Operational maneuver:

Short-final approach – 30° Left turn,

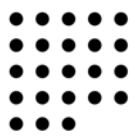
Short-final approach – 30° Right turn.

- The highest single planned exposure was 50  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ .
- A 50  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  exposure for 1 second is equal to 50  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ , or 2.8% of the MPE.

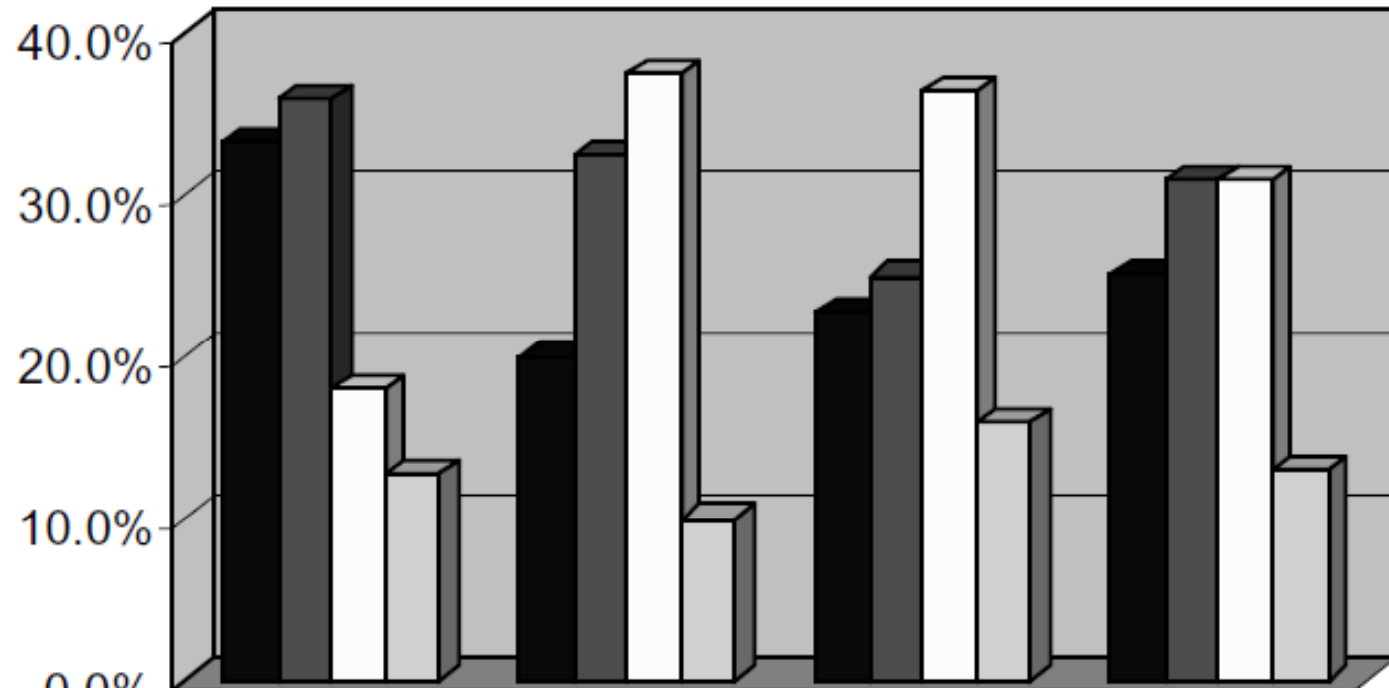


**FREQUENCY OF VISUAL EFFECTS BY EXPOSURE LEVEL**

<b>Effects</b>	<b>0.5 <math>\mu\text{W}/\text{cm}^2</math></b>	<b>5.0 <math>\mu\text{W}/\text{cm}^2</math></b>	<b>50 <math>\mu\text{W}/\text{cm}^2</math></b>	<b>TOTAL</b>
<b>None</b>	13	8	10	<b>31</b>
<b>Glare</b>	14	13	11	<b>38</b>
<b>Flashblindness</b>	7	15	16	<b>38</b>
<b>Afterimage</b>	5	4	7	<b>16</b>
<b>Total</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>123</b>

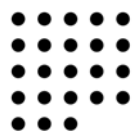


## PERCENTAGE OF VISUAL EFFECTS



	0.5 uW/cm <sup>2</sup>	5.0 uW/cm <sup>2</sup>	50 uW/cm <sup>2</sup>	TOTAL
■ NONE	33.3%	20.0%	22.7%	25.2%
■ GLARE	35.9%	32.5%	25.0%	30.9%
□ FLASHBLINDNESS	17.9%	37.5%	36.4%	30.9%
■ AFTERIMAGE	12.8%	10.0%	15.9%	13.0%



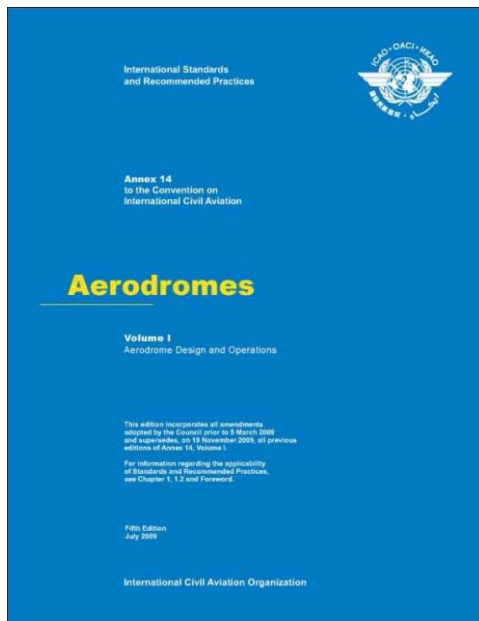


## Vorübergehende Sehbeeinträchtigungen

Zone	Name der Zone (Effekt)	Maximal zulässige Bestrahlung	Äquivalente Laserleistung in 7 mm
$RW_{LZ}$	„ <u>l</u> aserfreie Zone“ (keine Ablenkung)	$50 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2} =$ $0,5\cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$	19,25 nW
$RW_{KZ}$	„ <u>k</u> ritische Zone“ (Ablenkungs- Gefahr; Blendung)	$5 \text{ }\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ $= 50\cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$	<b>1,925 <math>\mu\text{W}</math></b>
$RW_{EZ}$	„ <u>e</u> mpfindliche Zone“ (Blitzlichblindheit; Nachbilder)	$100 \text{ }\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2} =$ $1 \text{ W/m}^2$	38,5 $\mu\text{W}$
NOHD	Nominal ocular hazard distance, Sicherheitsabstand	$25 \text{ W/m}^2$	1 mW



# Annex 14 to the Chicago Convention



International Civil  
Aviation Organization  
- ICAO

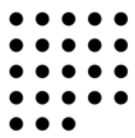
(Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt)

One recommended practice contained in Annex 14 (Aerodromes), Volume I (Aerodrome Design and Operations), Chapter 5 (Visual aids for navigation), par 5.3 Lights, subpar. 5.3.1.2 (**Laser emissions which may endanger the safety of aircraft**):

**5.3.1.2 Recommendation.— *To protect the safety of aircraft against the hazardous effects of laser emitters, the following protected zones should be established around aerodromes:***

- ***a laser-beam free flight zone (LFFZ)***
- ***a laser-beam critical flight zone (LCFZ)***
- ***a laser-beam sensitive flight zone (LSFZ).***

**Bereits etablierte Begriffe!?**



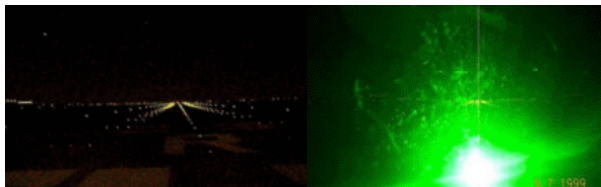
- Untersuchungen im Flugsimulator
  - Aber nur wenige Zahlenwerte (z. B. 532 nm, 1 s, 5 mW)
- Einteilung auf Basis von deterministischen Schädigungen
  - 0,39 mW = 390 μW ergibt GZS-Wert der Klasse 1
    - ❖ Bestrahlungsdauer ≥ 10 s
    - ❖ bei 7 mm Pupillendurchmesser: 10 W/m<sup>2</sup> = 1 mW/cm<sup>2</sup>
  - $RW_{SZ}: 1/10 \cdot 1 \text{ mW/cm}^2 = 1 \text{ W/m}^2 = 100 \text{ μW} \cdot \text{cm}^{-2};$   
**38,5 μW**
  - $RW_{CZ}: 1/20 \cdot RW_{SZ} = 1/200 \cdot 1 \text{ mW/cm}^2 = 5 \text{ μW} \cdot \text{cm}^{-2};$   
**1,925 μW**
  - $RW_{LZ}: 1/100 \cdot RW_{CZ} = 1/2.000 \cdot RW_{SZ} = 1/20.000 \cdot 1 \text{ mW/cm}^2$   
 $= 1/20.000 \cdot \text{MZB}(t = 10 \text{ s}) = 50 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2};$   
**19,25 nW**  
m.a.W. geteilt durch 10, 200 und 20.000.
  - **Das gibt zwar glatte Werte, ist aber gewöhnungsbedürftig.**

# Zoneneinteilung – Reichweiten (FAA/ANSI)

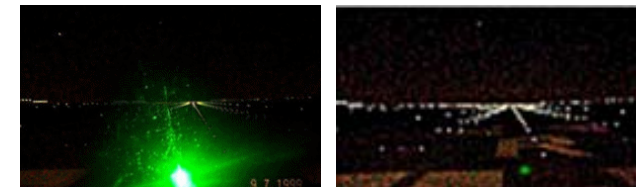
Reichweiten für verschiedene Zonen als Funktion der Laserstrahlleistung; Strahldivergenz  $\Theta = 1$  mrad

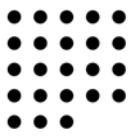
$$RW_{AZ} = \sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot MZB_{AZ}}} \cdot \frac{1}{\Theta}$$

Laserstrahlleistung/ mW	<u>Reichweite</u> $RW_{EZ}$ km	<u>Reichweite</u> $RW_{KZ}$ km	<u>Reichweite</u> $RW_{LZ}$ km
	<b>Blitzlichtblindheit/ Nachbilder</b>	<b>Blendung</b>	<b>Kein Effekt</b>
<b>5</b>	<b>0,08</b>	<b>0,357</b>	<b>3,568</b>
10	0,113	0,505	5,046
50	0,252	1,128	11,284
100	0,357	1,596	15,958
<b>500</b>	<b>0,798</b>	<b>3,568</b>	<b>35,682</b>
<b>1000</b>	<b>1,128</b>	<b>5,046</b>	<b>50,463</b>

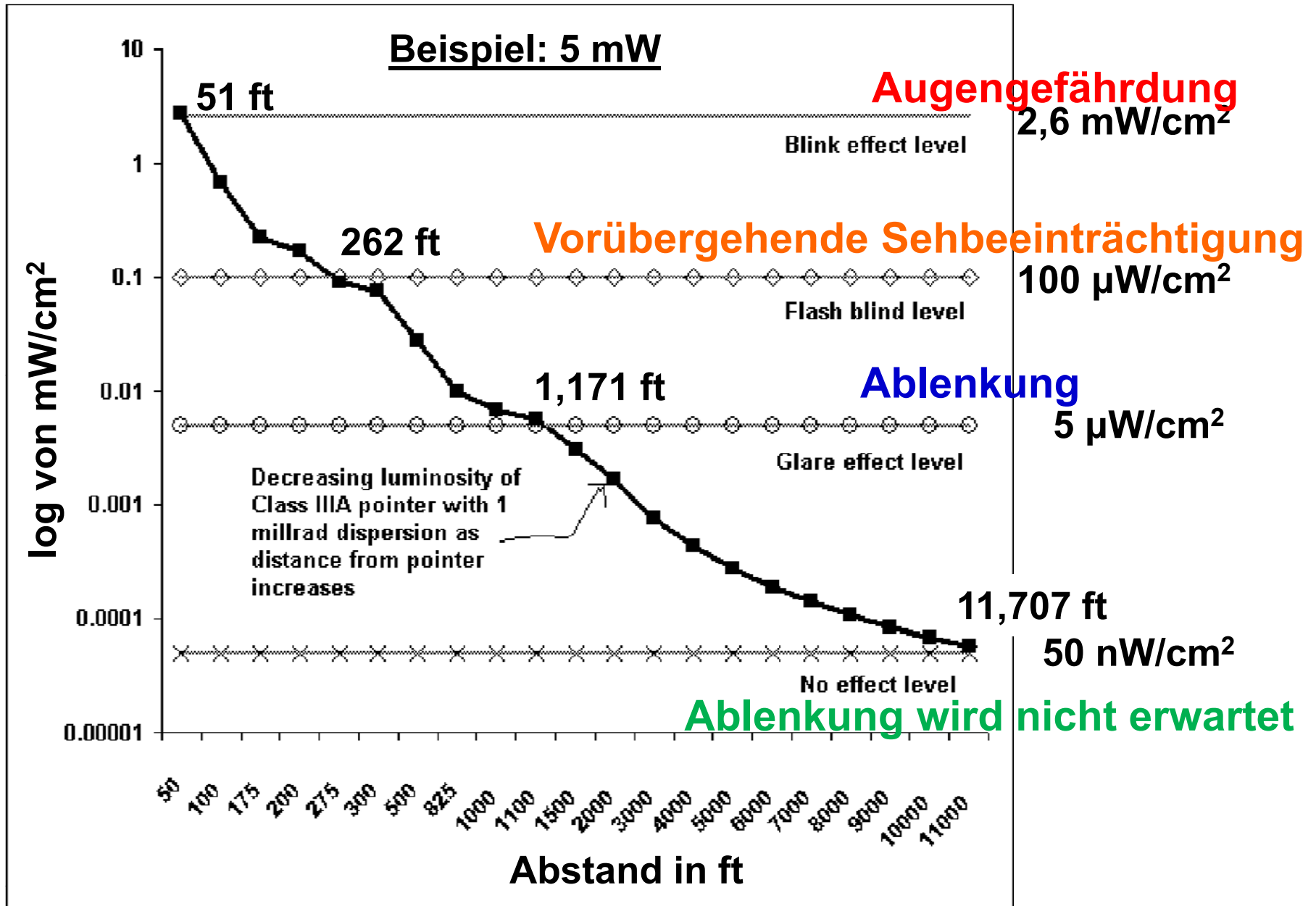


Blendung





# Bedeutung der Reichweiten



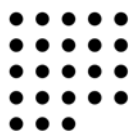
modified

[http://fisherka.csolutionshosting.net/astronote/observed/GIptst/discuss.html#Table\\_FAANominalHazardZones](http://fisherka.csolutionshosting.net/astronote/observed/GIptst/discuss.html#Table_FAANominalHazardZones), accessed

23/2/2013

16.9.2013

Blendung



- Gegenwärtig werden folgende Begriffe für vorübergehende Sehbeeinträchtigungen benutzt:

- Ablenkung,
- Erschrecken,
- Blendung,
- Blitzlichtblindheit,
- Nachbild

- Reichen diese Beschreibungen oder können sie dadurch verbessert werden, indem eine Aussage über die Zeitdauer der Beeinträchtigung gemacht wird, wenn bekannt ist, welche Bestrahlungsstärke und Expositionsdauer vorliegen?

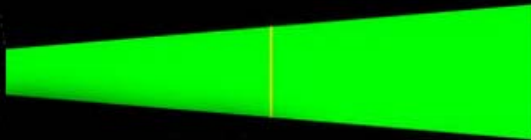




## Aus dem Internet:

### PORTABLE LASER DISRUPTER FOR SELF DEFENSE

Self Defense Laser Disrupter



range over 980 feet

\$1,500.00

Buy Now



- Name: Green Laser Dazzler 500mw to 600mw.
- Wavelength: 532nm.
- Output power: 500mW~600mW.
- Operating Mode: TEM00.
- Beam Divergence: 1.2 mrad to 12 mrad (adjustable).
- Beam Diameter: 0.472 of an inch to 4.724 inches (adjustable).

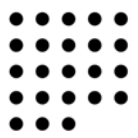
Focusable Mechanism that can help you find the best beam profile size for ideal disrupting effect

The beam divergence, beam diameter, and safety features can be custom made!  
Handgun, rifles or telescope mountable for versatility.

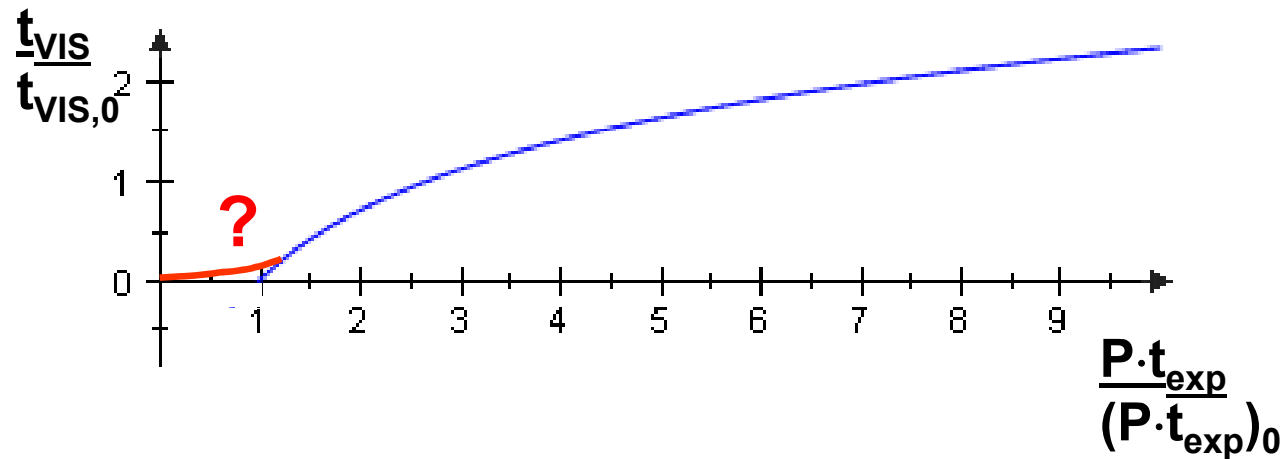
Non-lethal crowd control and tactical area denial.

CE/FDA/ROHS CERTIFIED, standard FDA compliant safety features all included.

2.55-10mW/CM<sup>2</sup>: ideal power density for temporary blinding effect, rather than permanent vision impairment.



## ■ Verbesserung der Auflösung an der Schwelle



## ■ Experimentelle Bestimmung unter Dunkeladaptationsbedingungen

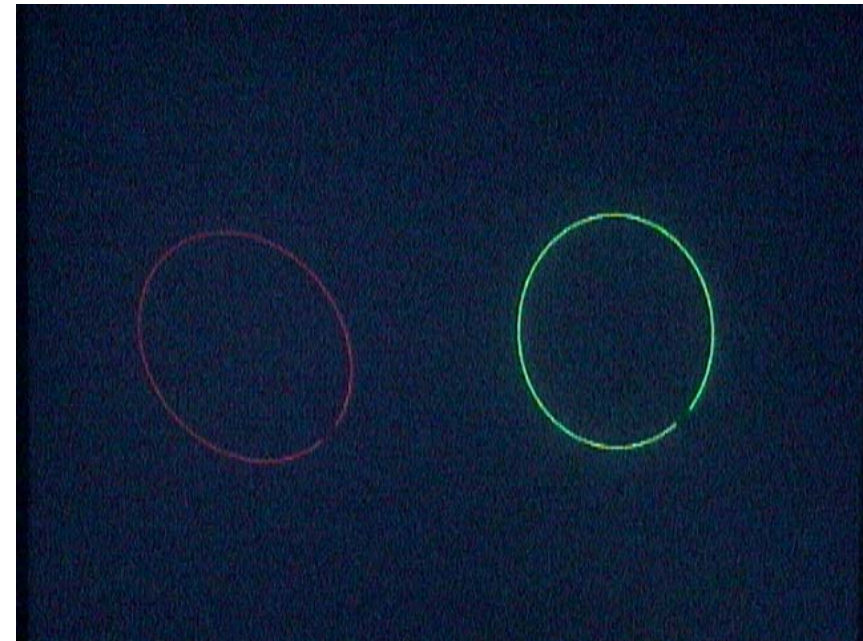
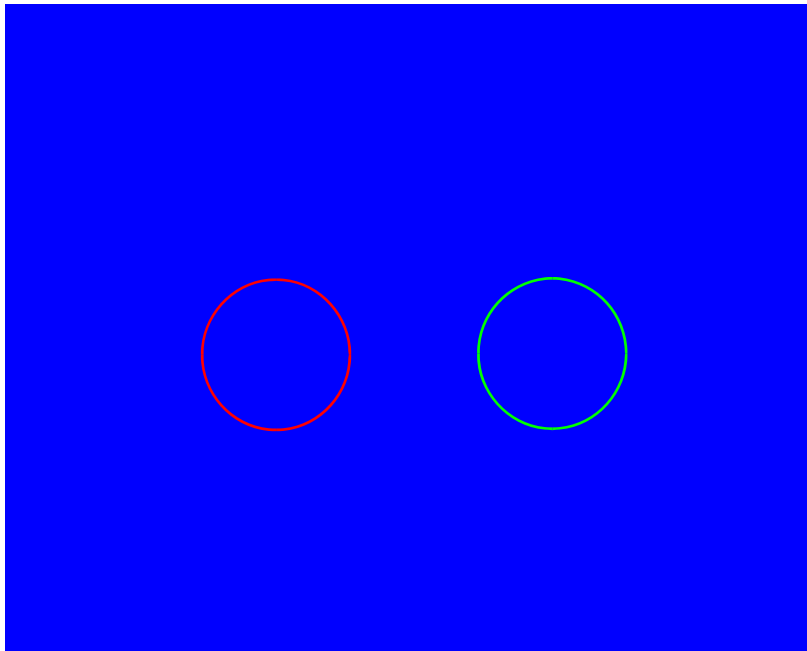


# • Zentrales Thema: Wellenlängenabhängigkeit

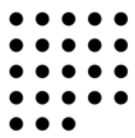
---



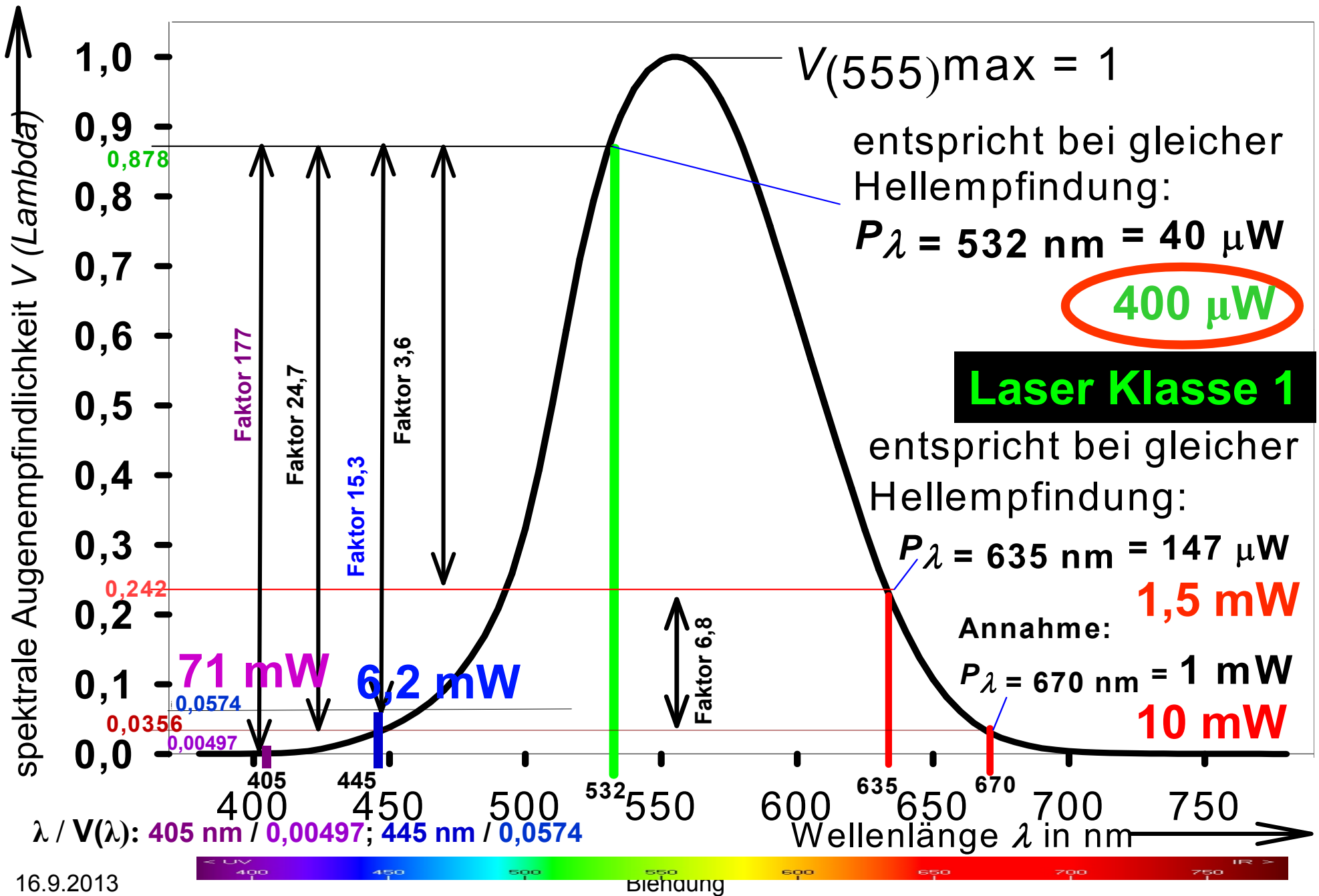
- Bis jetzt geht man in der Photometrie praktisch ausschließlich von der spektralen Hellempfindlichkeit aus
  - Bewertung mit  $V(\lambda)$ -Kurve



**Ein „grüner“ Klasse-1 Laser würde als Laserpointer völlig ausreichen.**

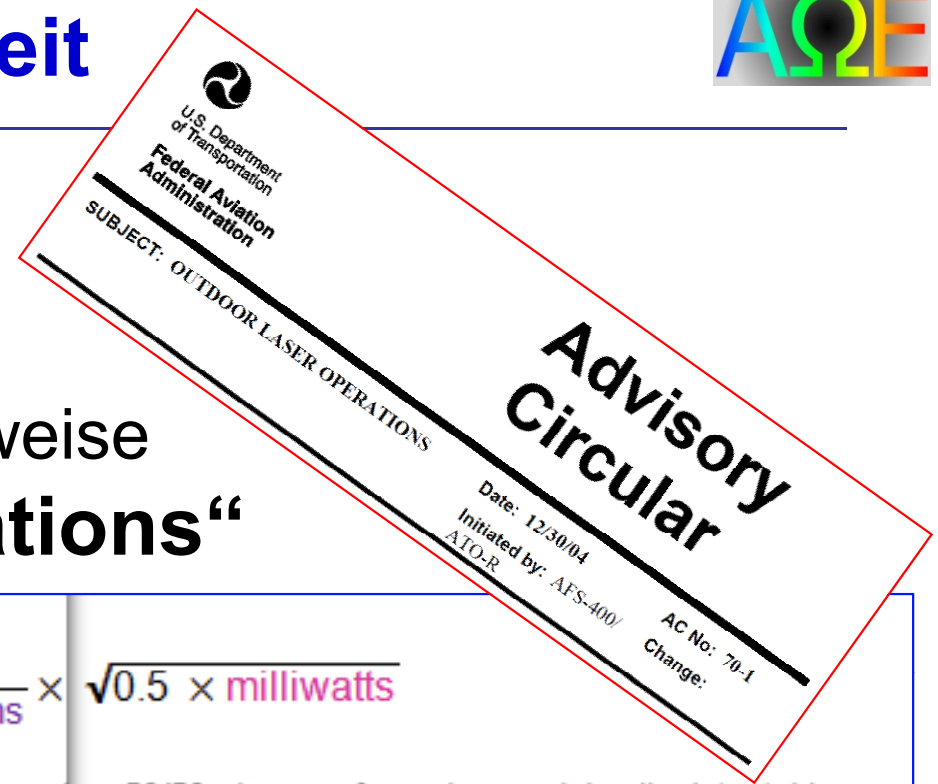


# Hellempfindungsvergleich





## ■ Die amerikanische Vorgehensweise „Visual interference equations“



$$\text{NOHD (Nominal Ocular Hazard Distance) in feet} = \frac{32.8}{\text{milliradians}} \times \sqrt{0.5 \times \text{milliwatts}}$$

$$\text{ED50 distance in feet} = \frac{\text{NOHD}}{3.16}$$

*At the ED50 distance, there is a 50/50 chance of causing a minimally detectable retinal lesion, under laboratory conditions.*

$$\text{SZED (flashblindness distance) in feet} = \frac{32.8}{\text{milliradians}} \times \sqrt{12.7 \times \text{milliwatts} \times \text{Visual Correction Factor}}$$

*Typical Visual Correction Factors for common consumer lasers:*

*Green laser 532 nm, VCF = 0.88016*

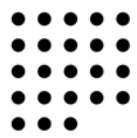
*Red laser 633 nm, VCF = 0.23825*

*Blue laser 445 nm, VCF = 0.03050*

$$\text{CZED (glare distance) in feet} = \text{SZED} \times 4.47$$

$$\text{LFZED (distraction distance) in feet} = \text{CZED} \times 10$$

<http://www.laserpointersafety.com/safetyinfo/safetyinfo/calcs.html>



# Vergleich „hier und dort“



Wellenlänge in nm	$V(\lambda)$	USA - VCF
<b>405</b>	<b>0,00497172</b>	<b>0.0008</b>
<b>445</b>	<b>0,0574339</b>	<b>0.03050</b>
473		<b>0.10536</b>
488		<b>0.19414</b>
<b>532</b>	<b>0,878306</b>	<b>0.88016</b>
555	<b>1,0</b>	<b>1.0</b>
632,8 / 633	<b>0,268572</b>	<b>0.23825</b>
<b>635</b>	<b>0,241690</b>	
<b>670</b>	<b>0,0355998</b>	<b>0.0321</b>

?

**Wellenlänge : 405, 445, 473, 532, 635, 650 nm**  
**Ausgangsleistung : 5 – 500 mW oder noch mehr**  
**Reichweite: bis zu 20 Meilen und noch mehr**

**Welches ist der beste Laserpointer?**





## ■ Bei den meisten Flugzeug-Zwischenfällen waren **grüne** Laserpointer beteiligt. ✓

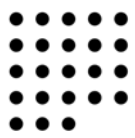
- Während der ersten Hälfte des Jahres 2011 gaben die Piloten in 93 % der Fälle nach einem Bericht der FAA an, ein **grünes Licht** gesehen zu haben. ✓
- **Blaues Licht** wurde in weniger als 1 % der Zwischenfälle berichtet. ✓
- **Aber bleibt das auch so?**



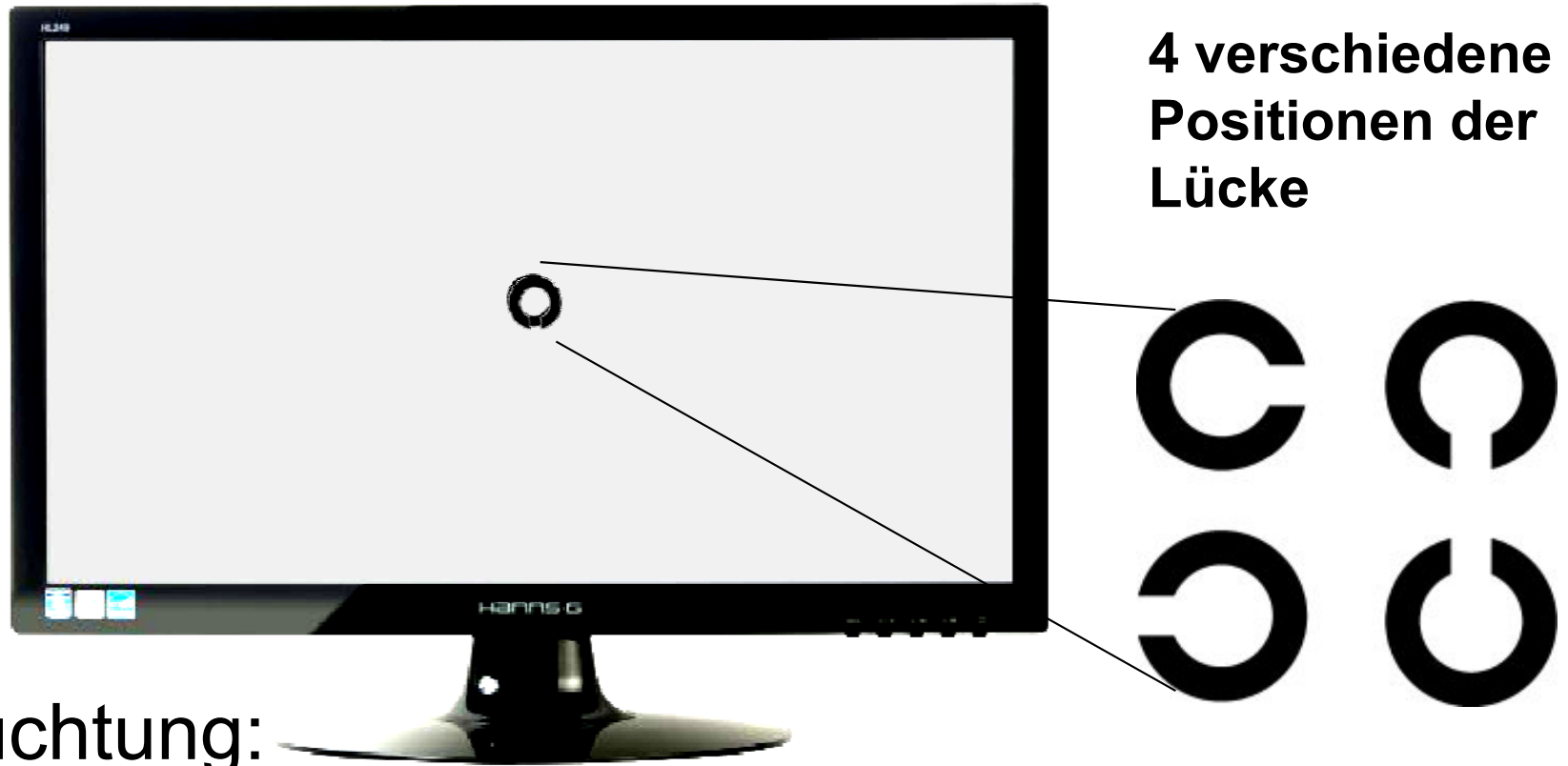
Output wavelength	532nm+405nm
Output Power	50mW-200mW







- Schwarze Landolt-C's auf einem Monitor
- Leuchtdichte: 20 cd/m<sup>2</sup> (entsprechend Cockpit A-320)



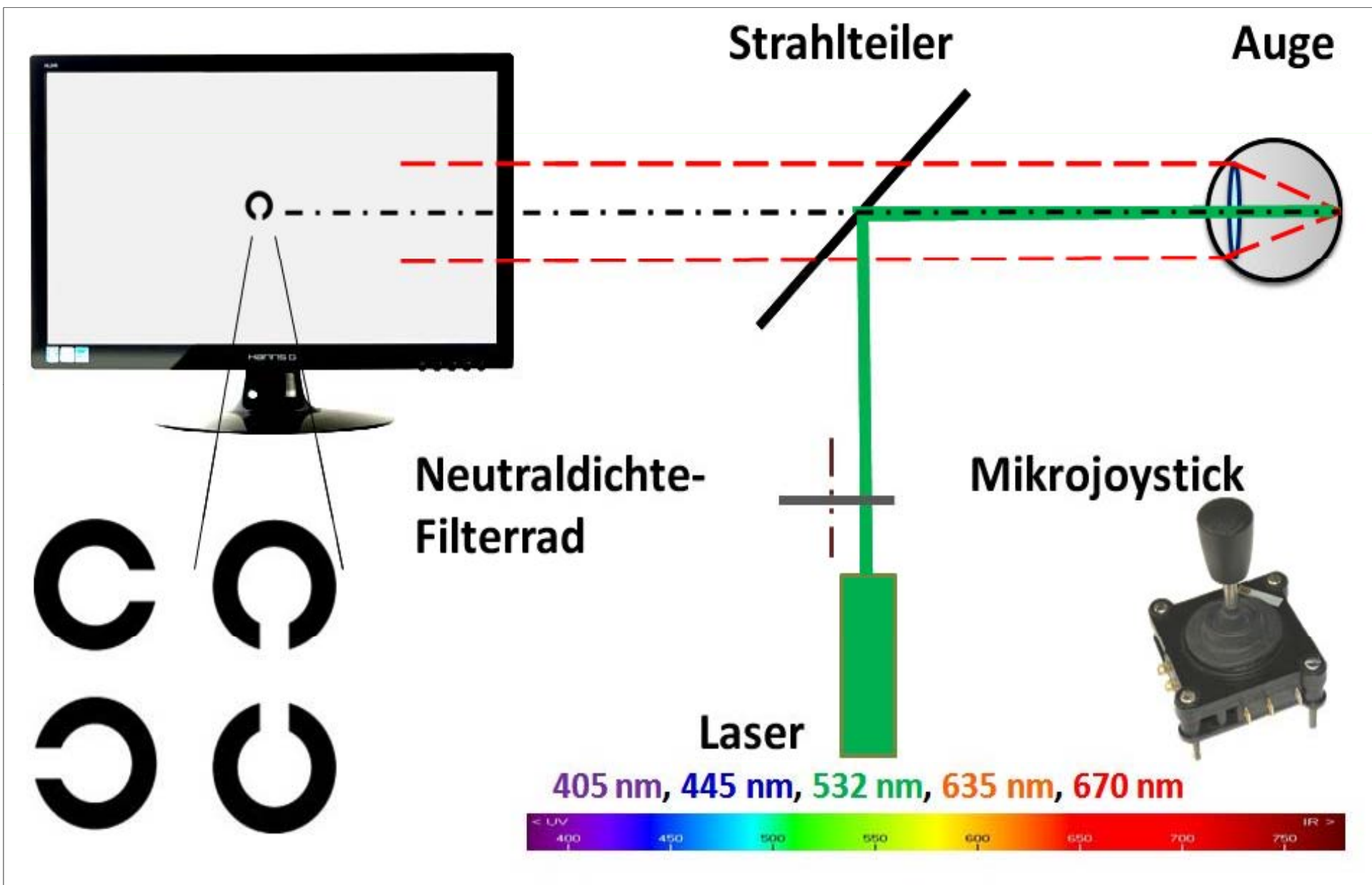
- Beleuchtung:

- Entweder Laborbeleuchtung mit D65 oder
- Dunkler Raum (jeder Test nach 10 Minuten Dunkeladaptation)



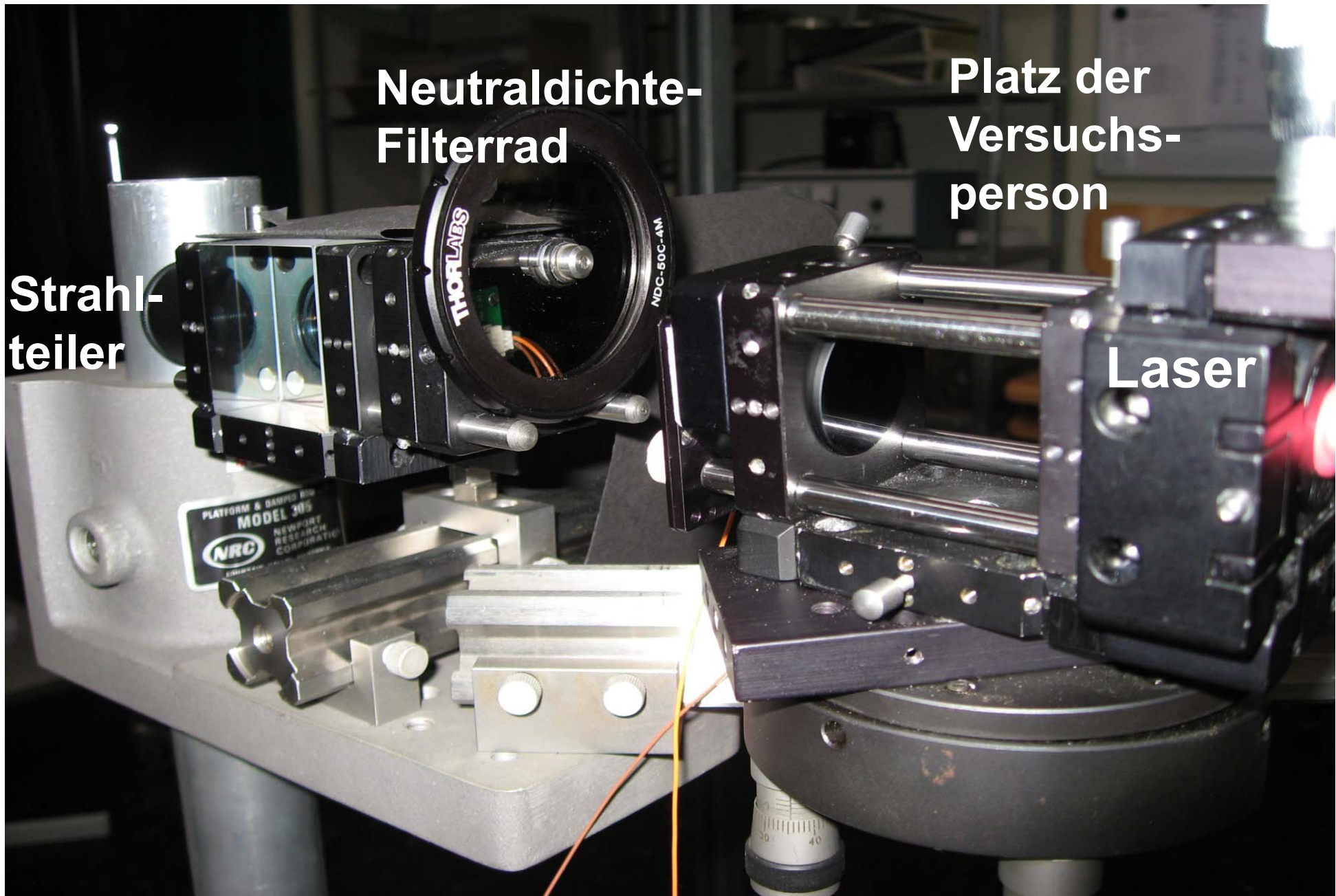


# Schema zur Bestimmung der Visusbeeinträchtigung mit Landoltring in 4 Darbietungs-Positionen



**Vorteil: Keine Kopfbewegung erforderlich! ⇒ Schneller!**

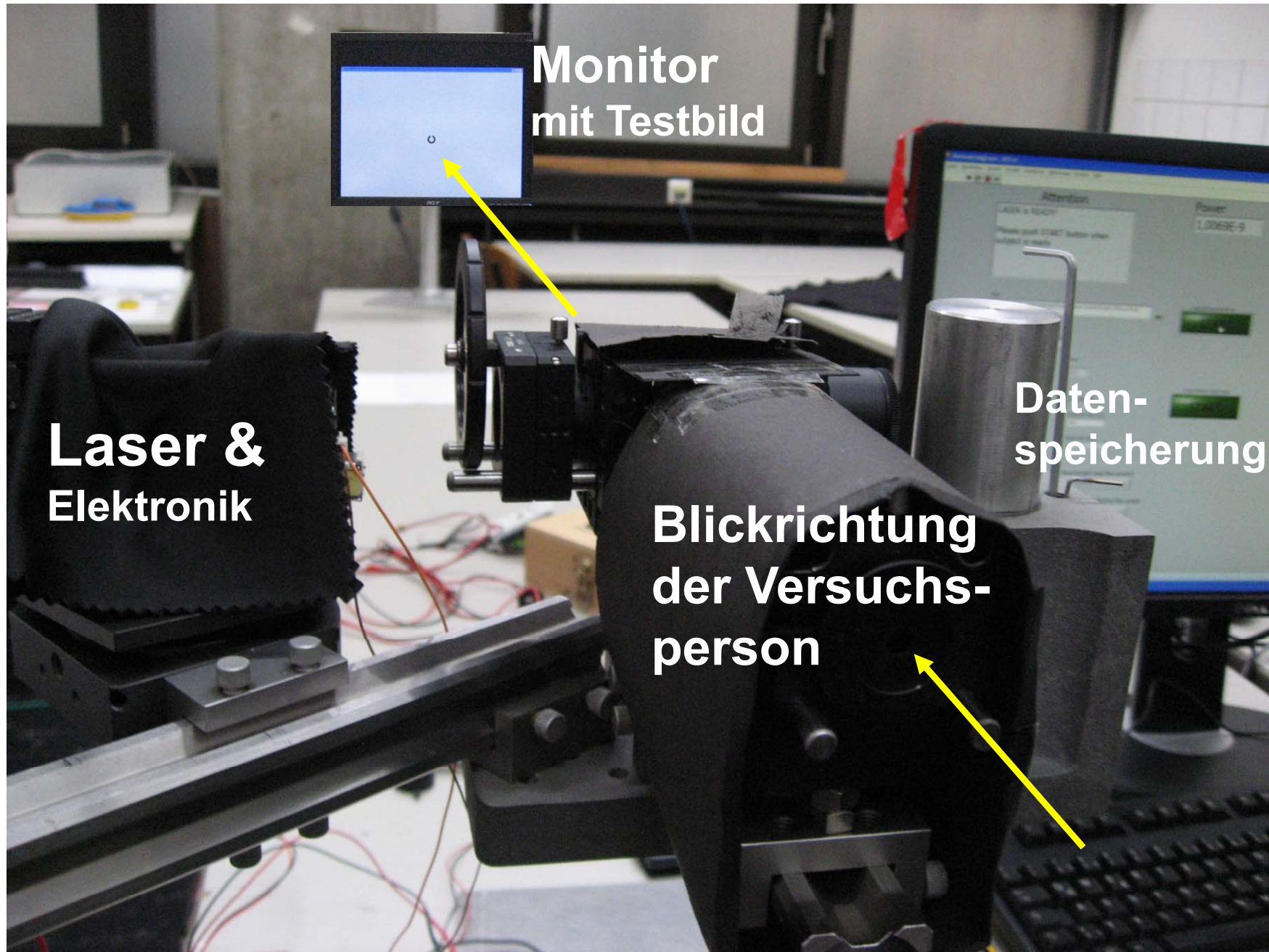
- **Technischer Aufbau der Laserstrahlblendquelle**



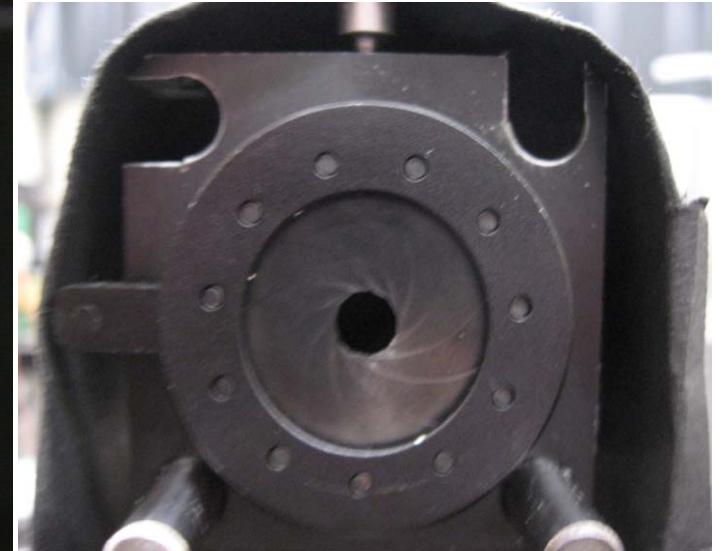
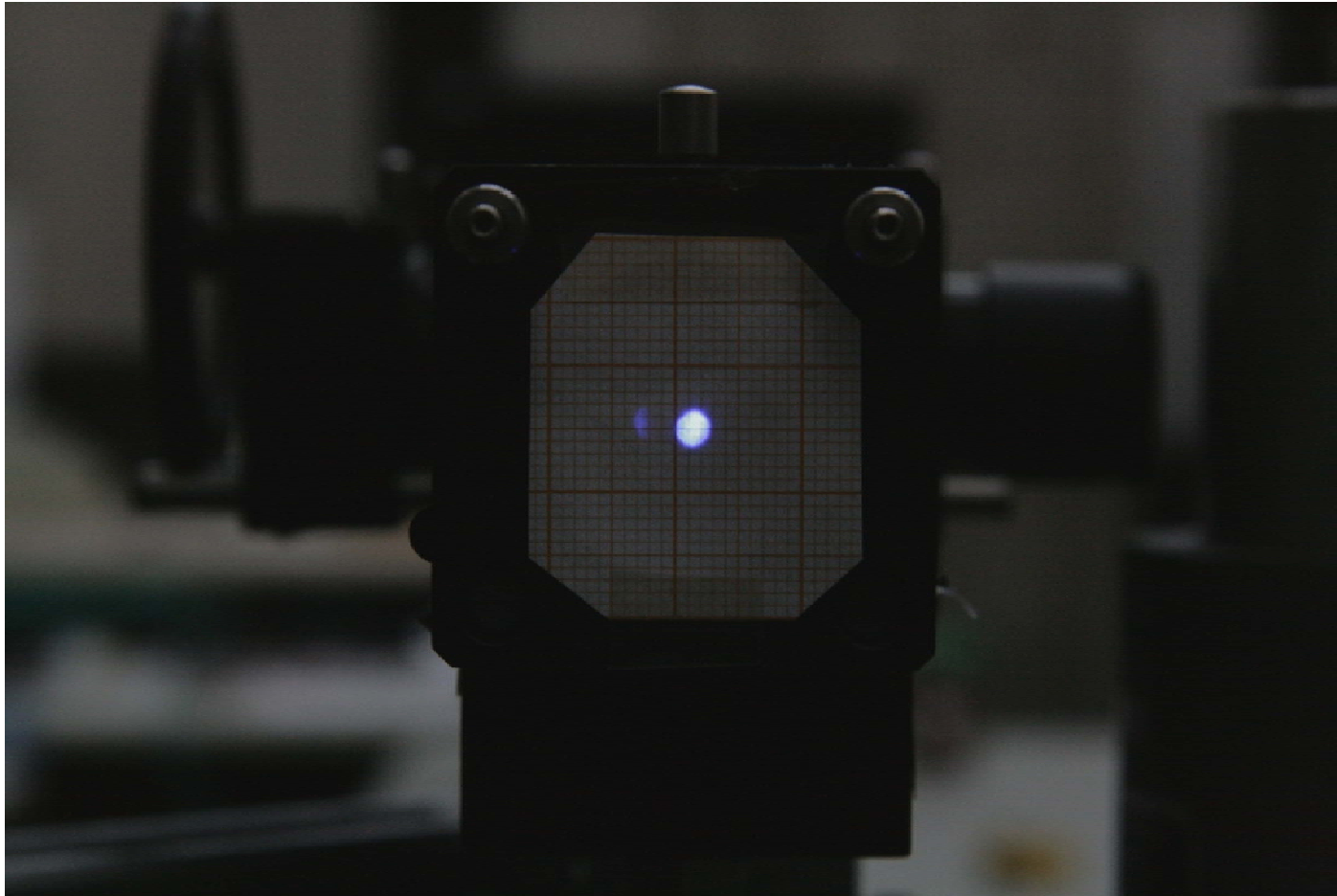


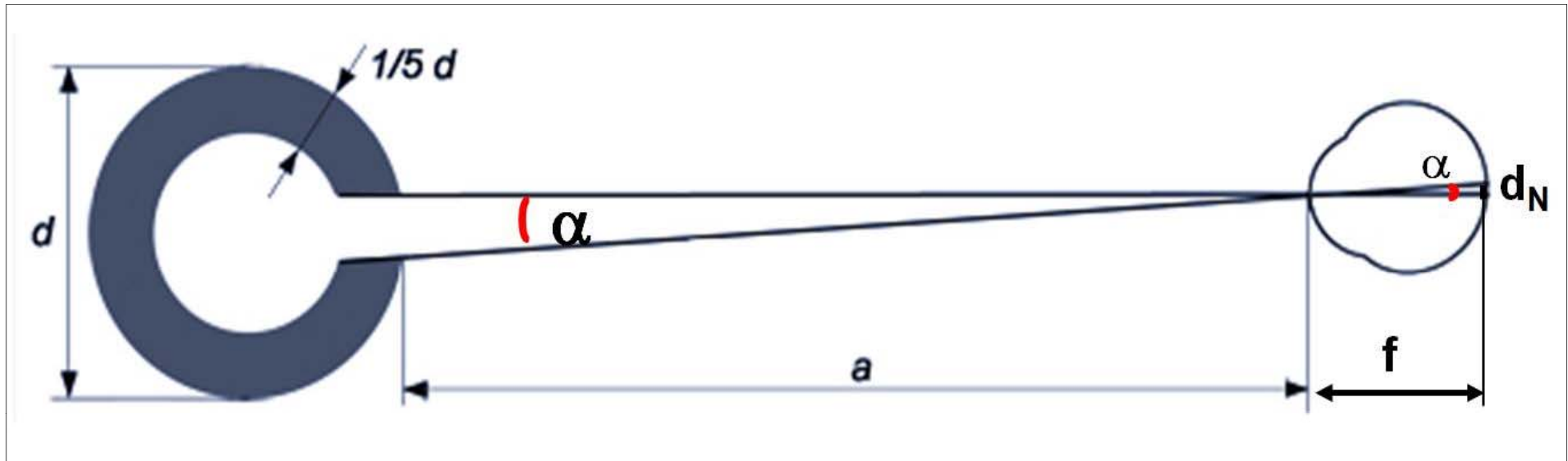
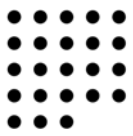


# Visusbeeinträchtigungs-Testapparatur aus Sicht der Versuchsperson



-  Strahlquerschnitt des Laserstrahls der Wellenlänge 405 nm in der Hornhaut- bzw. Messaufbau-Laserstrahl-Austrittsebene

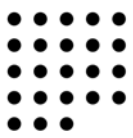





$f = 17 \text{ mm}$

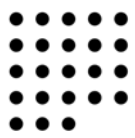
$$d_N = \alpha \cdot f = \frac{\frac{1}{5} \cdot d}{a} \cdot f = \frac{\frac{1}{5} \cdot 15,7 \text{ mm}}{2.700 \text{ mm}} \cdot 17 \text{ mm} = 19,77 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \approx 20 \mu\text{m}$$

$$\alpha = \frac{d_N}{f} = \frac{d}{5 \cdot a} = 1,163 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 1,163 \text{ mrad} = 0,0666^\circ \approx 0,067^\circ$$



- Wellenlänge:
  -  405 nm (violett-blau)
  - 445 nm (blau)
  - 532 nm (grün)
  - 635 nm (orange-rot)
  - 670 nm (rot)
- Expositionsdauer: **100 ms**
- Zahl der Versuchspersonen:
  - 7 (alle  $\lambda$ 's) +
  - 7 (nur 405 nm, 532 nm und 635 nm)
- Zahl der Wiederholungen/Tests: 3
- Gesamtzahl der Expositionen:
  - Unter D65: **945 + 567 = 1.512**
- Laserstrahlleistung:
  - 1 nW
  - 10 nW
  - 100 nW
  - 1  $\mu$ W
  - 10  $\mu$ W
  - 100  $\mu$ W
  - 200  $\mu$ W
  - 400  $\mu$ W
  - 640  $\mu$ W





## Zusätzliche Tests:

- Expositionsdauer:

1 s & 2 s

(10 s nur bei 532 nm & 670 nm)

- Zahl der Teilnehmer: 3 (bei 1 s)

- Zahl der Teilnehmer: 1 (sonst)

- Zahl der Wiederholungen: 3

- Gesamtexpositionen:

- Bei D65: 48 (für 2 Pers.)  
+ 324 (für eine Person)  
= 372

- Laserstrahlleistung:

1 nW

10 nW

100 nW

1 μW

10 μW

100 μW

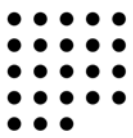
200 μW


(400 μW 635 nm,

532 nm, 445 nm,

405 nm, alle 1 s & 2 s)

(560 μW 405 nm, 1 s)

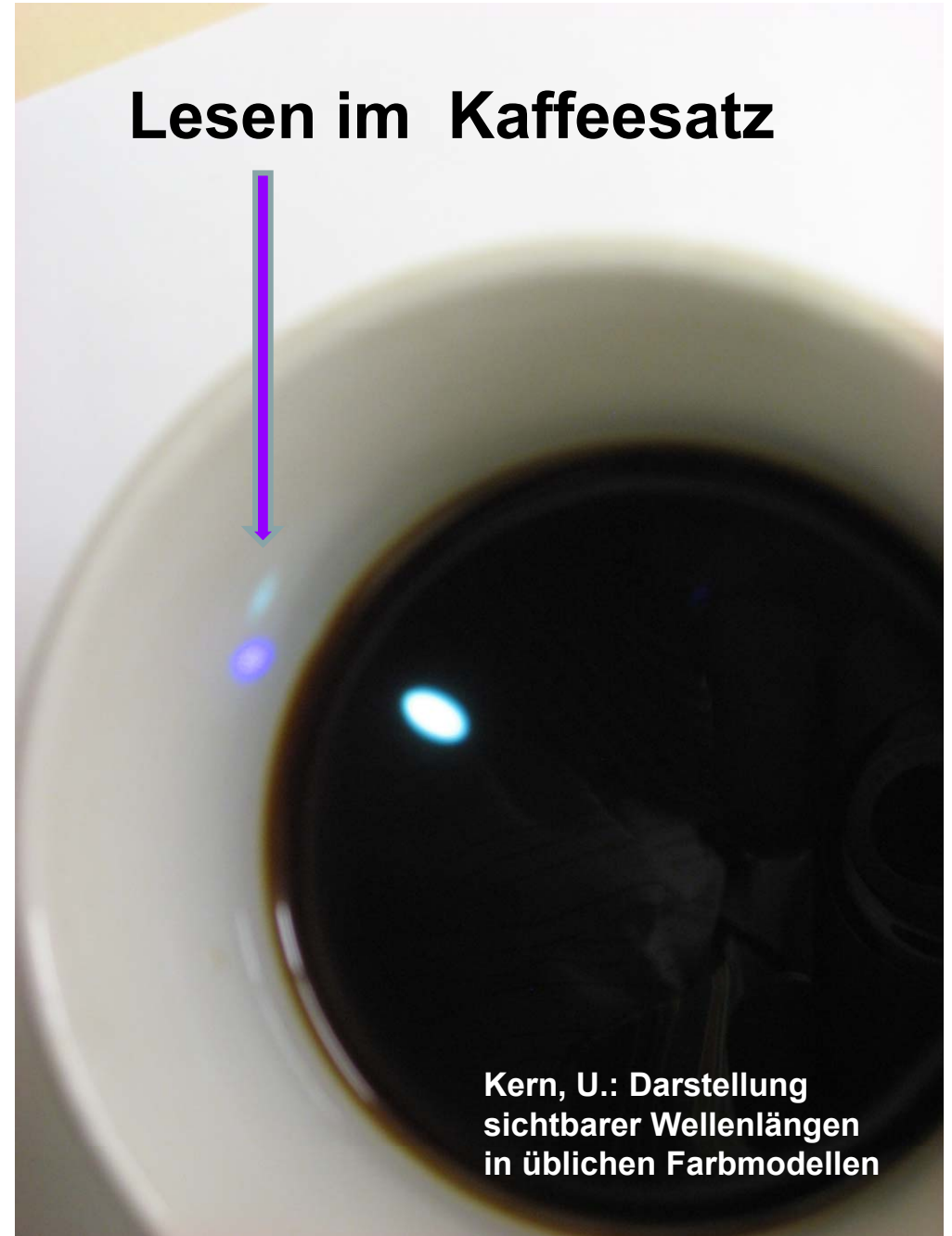


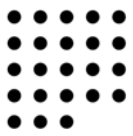
- **Unter Dunkeladaptation:**
- Wellenlänge:
  -  405 nm (violett-blau)
  - 445 nm (blau)
  - 532 nm (grün)
  - 635 nm (orange-rot)
  - 670 nm (rot)
- Laserstrahlleistung:
  - 1 nW
  - 10 nW
  - 100 nW
  - 1  $\mu$ W
  - 10  $\mu$ W
  - 100  $\mu$ W
  - 200  $\mu$ W
  - 400  $\mu$ W
  - 640  $\mu$ W
- Expositionsdauer: **100 ms**
- Zahl der Versuchspersonen: 7
- Zahl der Wiederholungen/Tests: 1
- Gesamtzahl der Expositionen: **135**



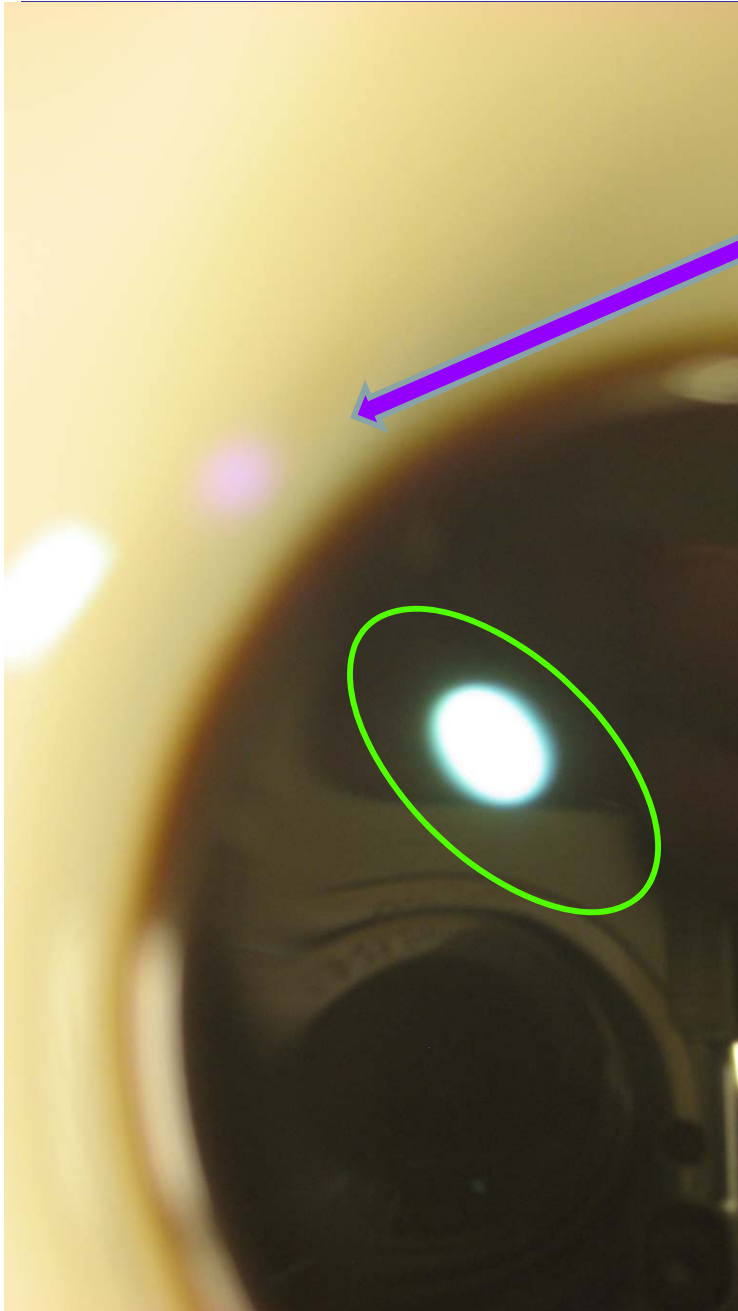


# Wie kann man 405 nm sichtbar machen?



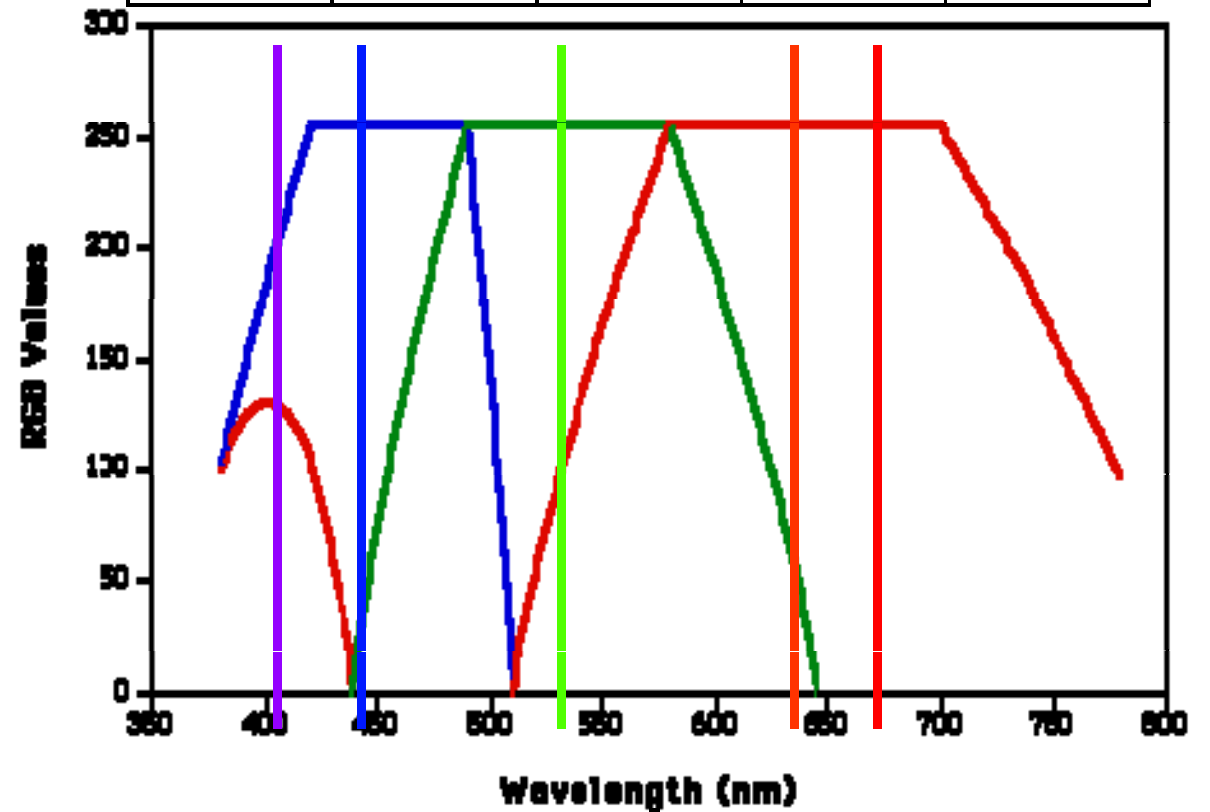


# So sieht 405 nm etwa aus

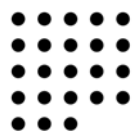


RGB-Werte:

405	445	532	635	670
148	0	80	255	255
0	25	255	40	0
255	255	0	0	0



Dan Bruton: Approximate RGB values for Visible Wavelengths  
<http://www.physics.sfasu.edu/astro/color/spectra.html>



# Welche Ergebnisse liegen vor?

---





## ■ Wie sieht es mit

- Ablenkung
- Blendung
- Blitzlichtblindheit und
- Nachbildern

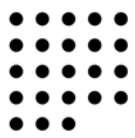
aus?

## ■ Über Nachbilder haben wir schon ganz viel geschrieben

- Für die sollte man keine eigene Kategorie benutzen

## ■ Blitzlichtblindheit?

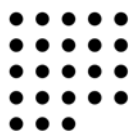
- Schwierige Sache!



# Blitzlichtblindheit bei 532 nm



$\lambda = 532 \text{ nm}, t_{\text{exp}} = 100 \text{ ms}$			
Laserstrahlleistung P in $\mu\text{W}$	Blitzlichtblindheit Ja/nein	Blitzlichtblindheitsdauer $t_{\text{BLB}}/\text{s}$	Bemerkungen
1	Nein		
<b>10</b>	Ja	ca. 0	Beginn; Nachmessung ergab 9,7 $\mu\text{W}$
50	Ja	sehr kurz	
60	Ja	0...0,5	
80	Ja	0...0,5	
100	Ja	1...2	
106,5	Ja	ca. 2	
200	Ja	1...3	
(400)	Ja	1...3	(Unkorrigierter $\mu\text{W}$ - Wert)
640 (800)	Ja	mehrere	(Unkorrigierter $\mu\text{W}$ - Wert)
(1100)	Ja	10	(Unkorrigierter $\mu\text{W}$ - Wert)
$\lambda = 532 \text{ nm}, t_{\text{exp}} = 1 \text{ s}$			
200	Ja	20; 33	
400	Ja	18; 20; 25; 37; 54	
$\lambda = 532 \text{ nm}, t_{\text{exp}} = 2 \text{ s}$			
1	Nein		
<b>100</b>	Ja		Beginn
200	Ja	einige	Blendenöffnung war verschwunden
400	Ja	15...20	



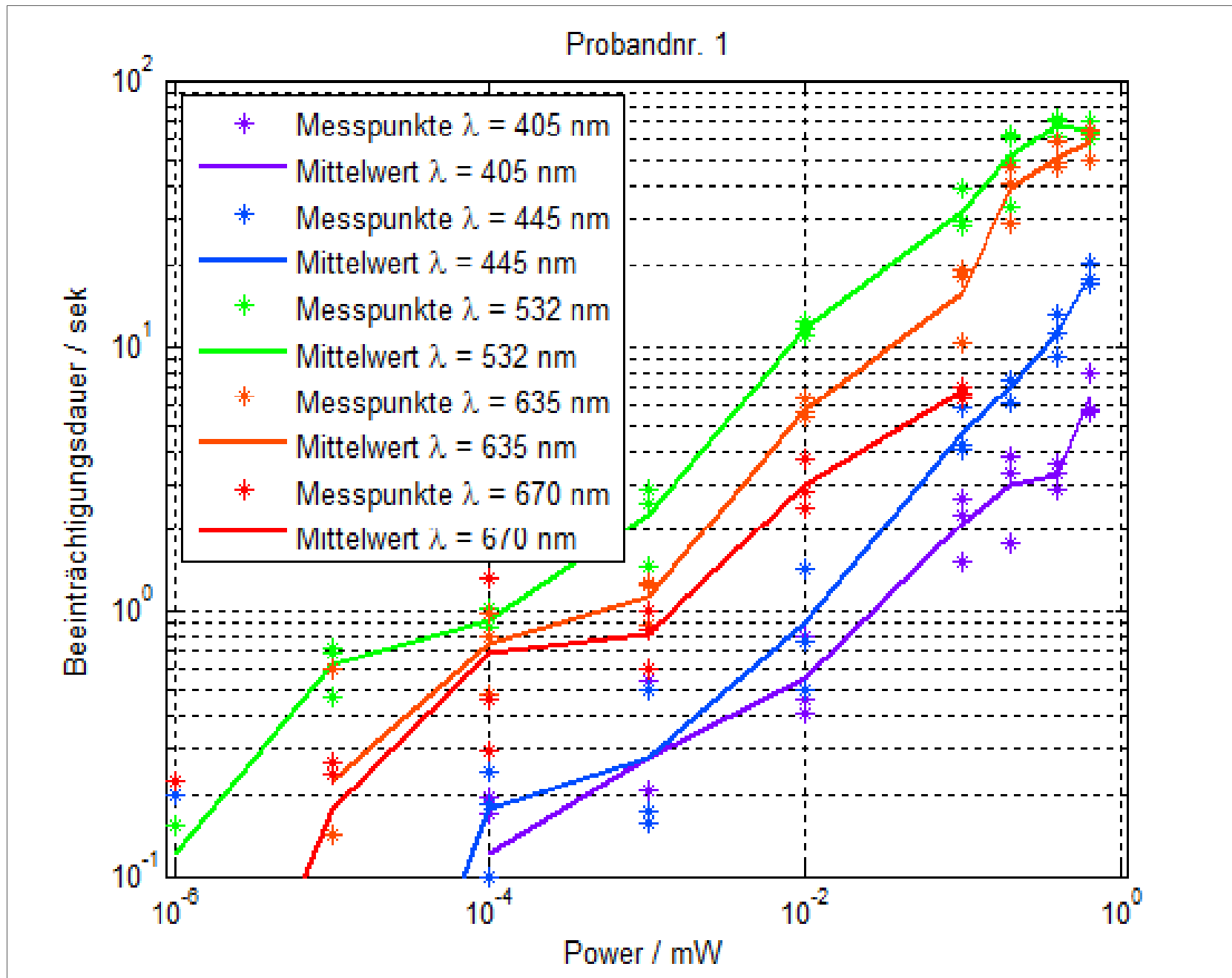
# Blitzlichtblindheit bei 635 nm und 670 nm



Laserstrahlleistung P in $\mu\text{W}$	Blitzlichtblindheit Ja/nein	Blitzlichtblindheitsdauer $t_{\text{BLB}}/\text{s}$	Bemerkungen
$\lambda = 635 \text{ nm}, t_{\text{exp}} = 100 \text{ ms}$			
<b>100</b>			eventuell Beginn
250	Ja		
1100	Ja	0,5...1	
$\lambda = 670 \text{ nm}, t_{\text{exp}} = 100 \text{ ms}$			
100	Nein		Technisch keine höhere Laserstrahlleistung möglich
$\lambda = 670 \text{ nm}, t_{\text{exp}} = 1 \text{ s}$			
<b>100</b>	Ja		Beginn

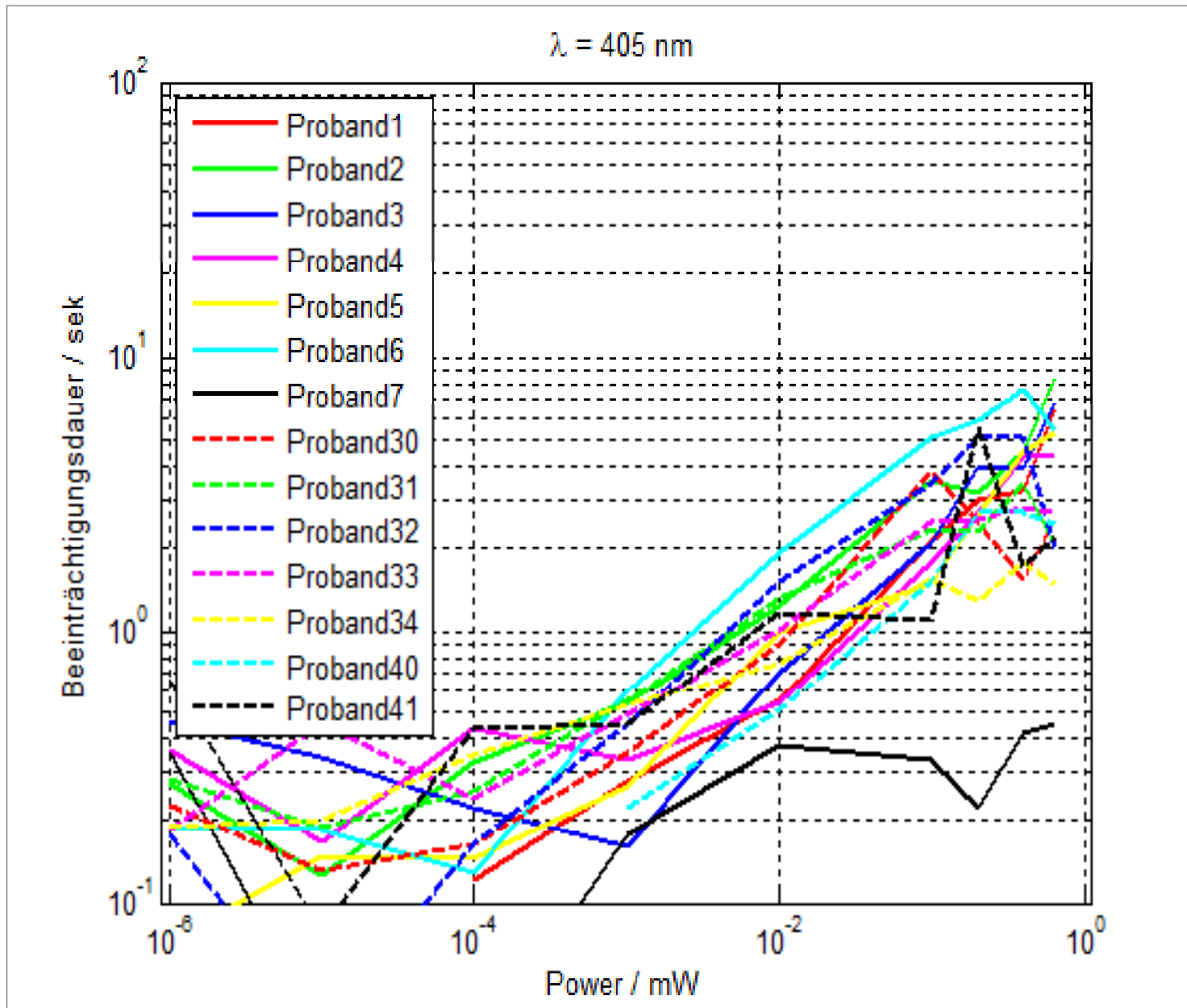


# Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung für verschiedene Wellenlängen; Expositionsdauer: 100 ms





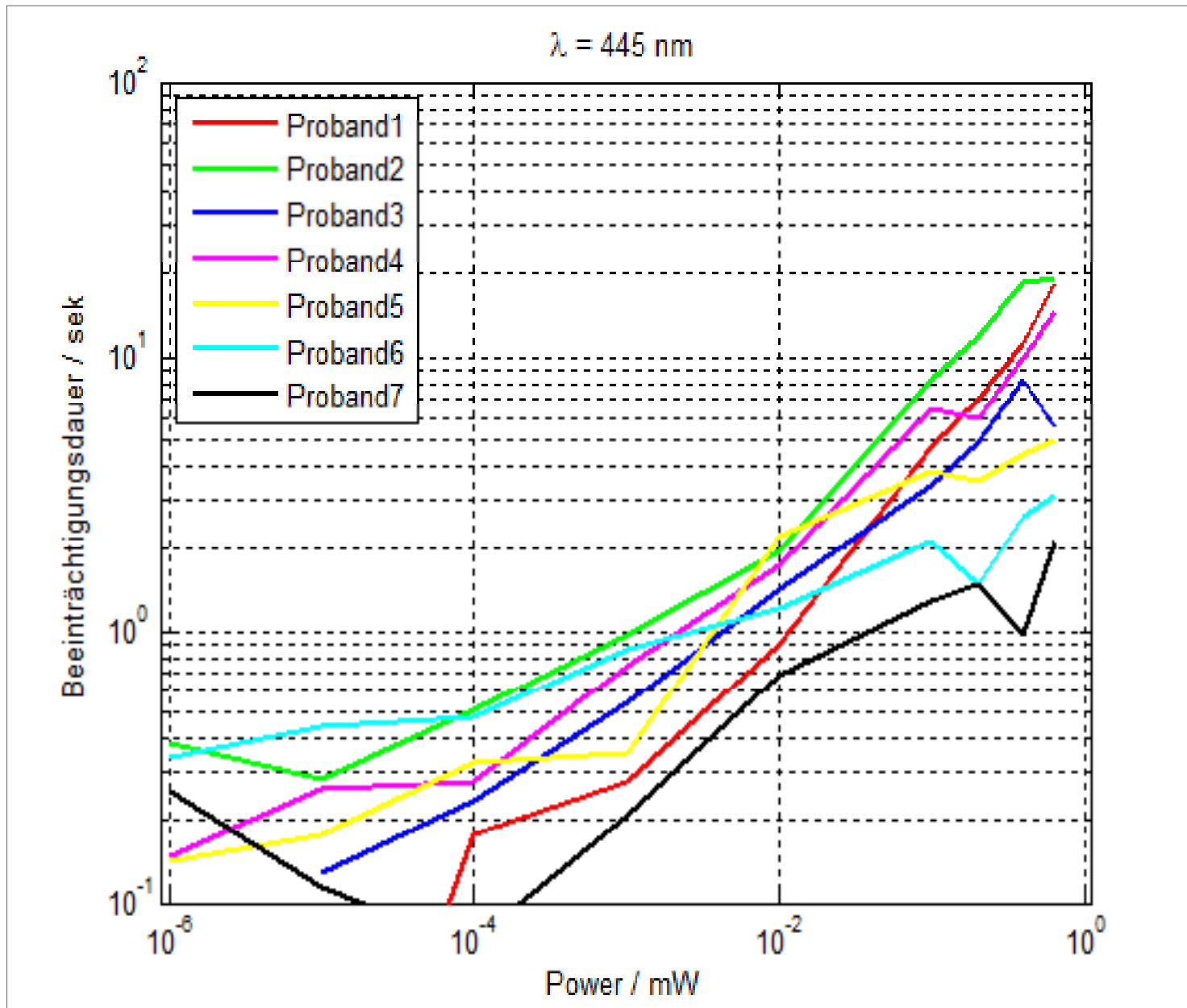
# Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung für 405 nm für alle Probanden; Expositionsdauer: 100 ms





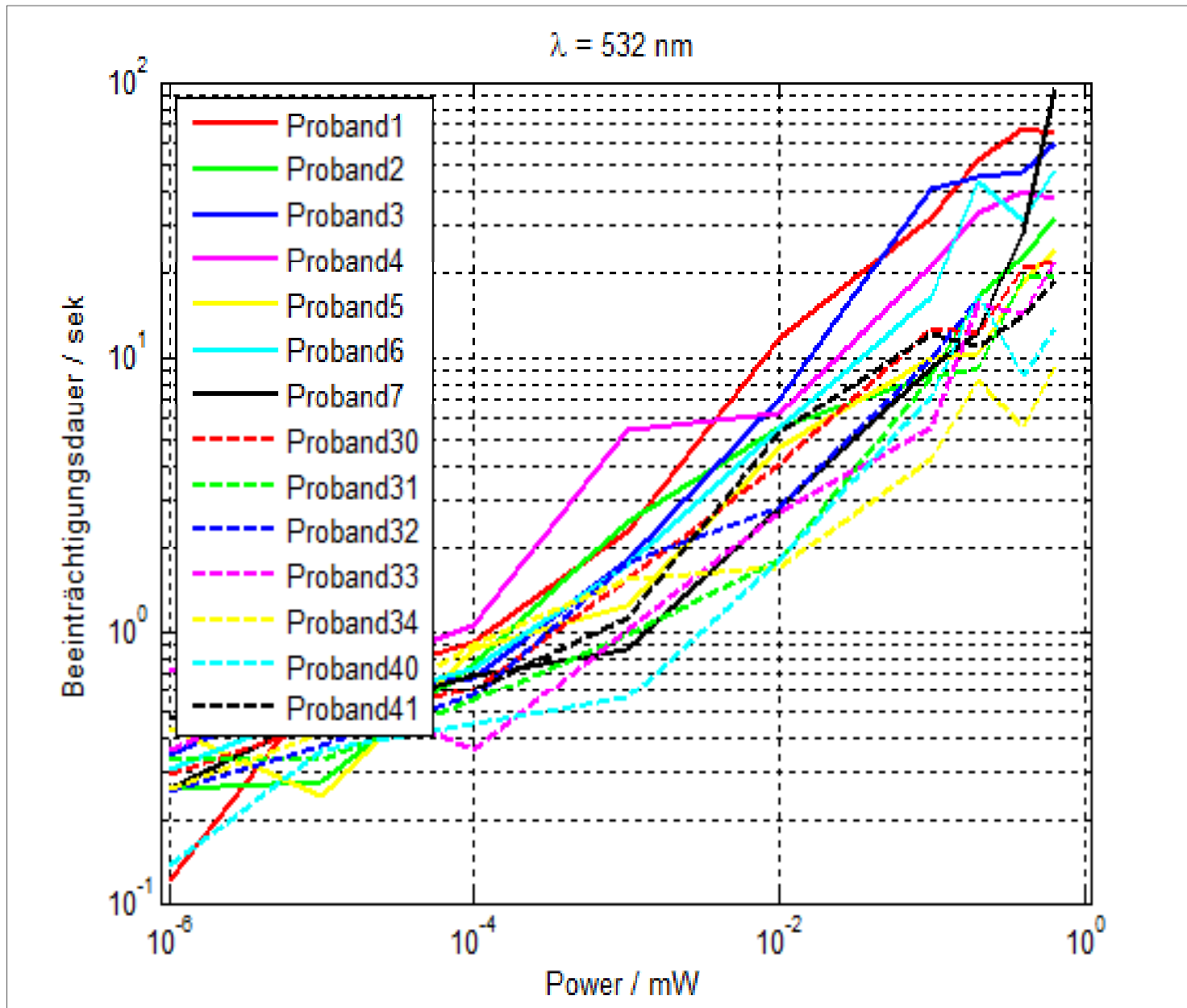


# Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung für 445 nm für alle Probanden; Expositionsdauer: 100 ms



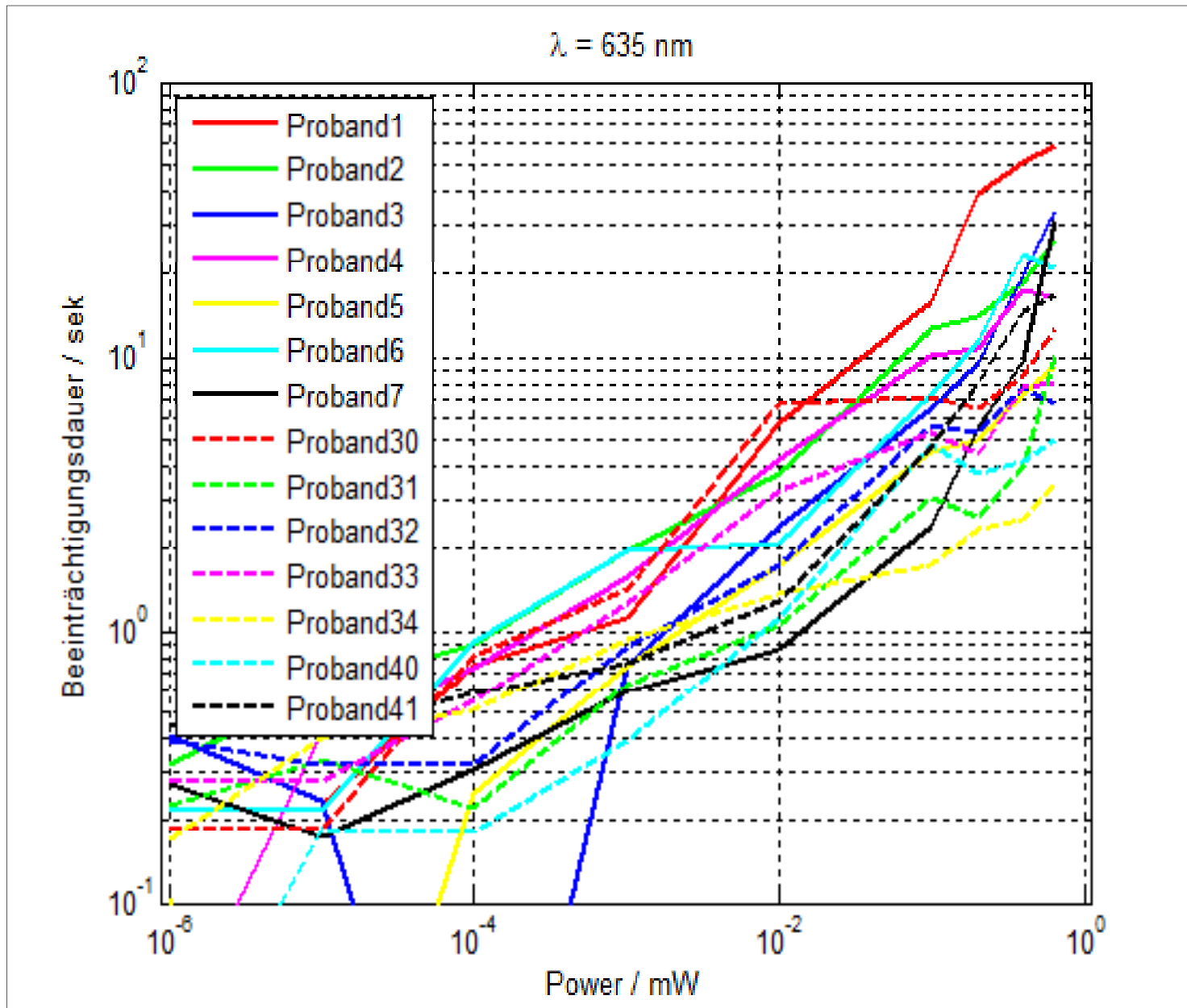


# Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung für 532 nm für alle Probanden; Expositionsdauer: 100 ms



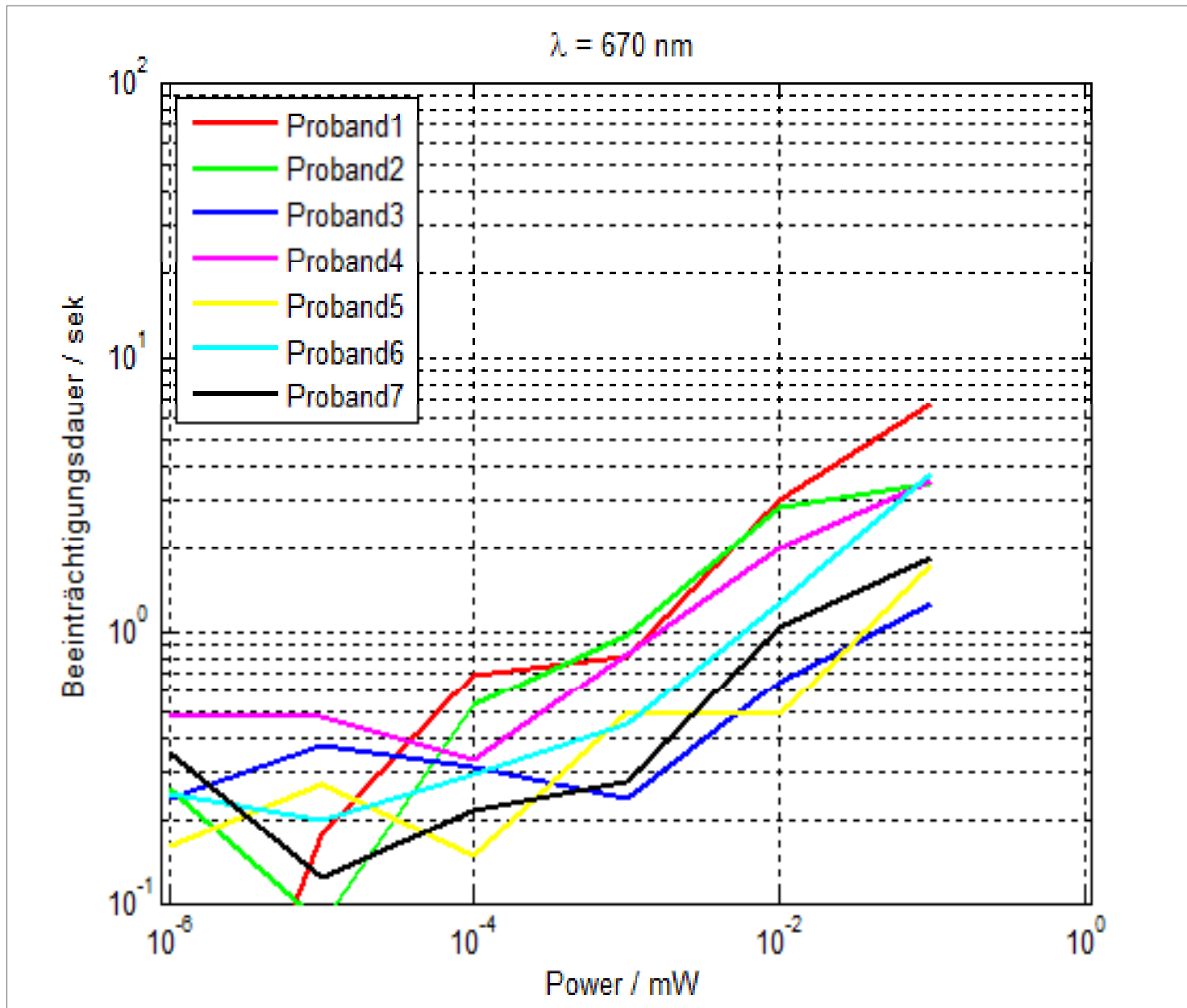


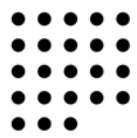
# Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung für 635 nm für alle Probanden; Expositionsdauer: 100 ms





# Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung für 670 nm für alle Probanden; Expositionsdauer: 100 ms





- Laserstrahlleistung auf der Hornhaut des Auges:
  - unter zulässigem Expositionsgrenzwert
- Maximale Sehbeeinträchtigungsdauer in Sekunden als Funktion der Laserwellenlänge bei einer Expositionsdauer von 100 ms:

Wellenlänge	bei 1 $\mu\text{W}$	bei 100 $\mu\text{W}$	bei 640 $\mu\text{W}$
405 nm	0,9 s	7,5 s	11 s
445 nm	1,2 s	13 s	22 s
532 nm	8,5 s	63 s	118 s
635 nm	2,6 s	20 s	65 s
670 nm	1,5 s	7 s	-





- Für 405 nm:  $t_{\text{VIS,max}} \leq \text{ca. } 11 \text{ s}$
- Für 445 nm:  $t_{\text{VIS,max}} \leq \text{ca. } 22 \text{ s}$
- Für 532 nm:  $t_{\text{VIS,max}} \leq \text{ca. } 118 \text{ s}$
- Für 635 nm:  $t_{\text{VIS,max}} \leq \text{ca. } 65 \text{ s}$

Laserstrahlleistung von 100  $\mu\text{W}$ :

- Für 405 nm:  $t_{\text{VIS,max,100}} \leq \text{ca. } 7,5 \text{ s}$
- Für 445 nm:  $t_{\text{VIS,max,100}} \leq \text{ca. } 13 \text{ s}$
- Für 532 nm:  $t_{\text{VIS,max,100}} \leq \text{ca. } 63 \text{ s}$
- Für 635 nm:  $t_{\text{VIS,max,100}} \leq \text{ca. } 20 \text{ s}$
- Für 670 nm:  $t_{\text{VIS,max,100}} \leq \text{ca. } 7 \text{ s}$



# Maximalwerte für $t_{VIS}$ in s bei 100 ms



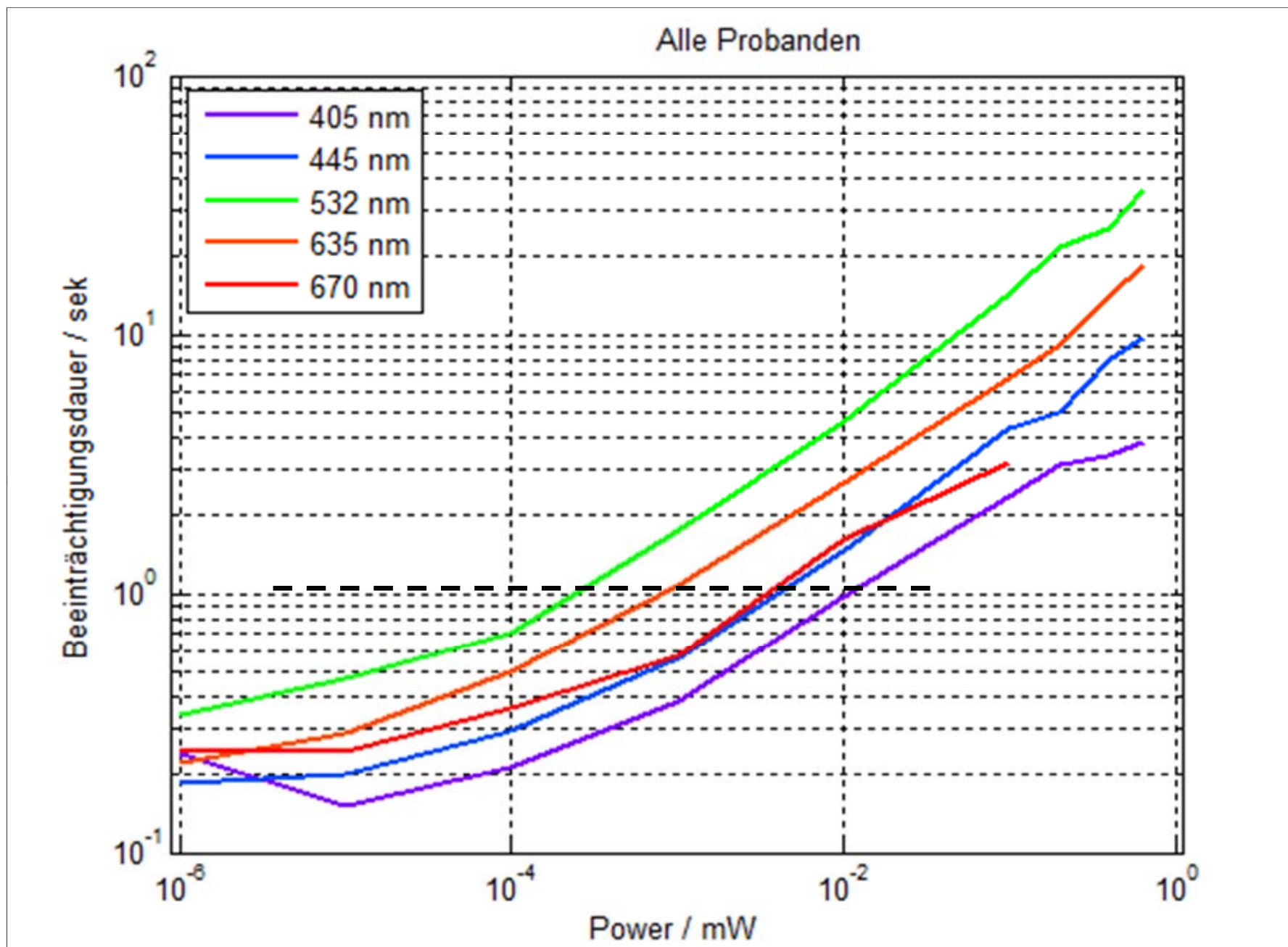
$\lambda$ in nm	Laserstrahlleistung								
	1 nW	10 nW	100 nW	1 $\mu$ W	10 $\mu$ W	100 $\mu$ W	200 $\mu$ W	400 $\mu$	640 $\mu$ W
405	1,180	0,840	0,662	0,879	3,337	7,528	7,060	12,61	11,083
445	0,690	0,576	0,709	1,190	2,999	13,074	16,398	24,224	21,957
532	1,018	<b>1,345</b>	<b>1,407</b>	<b>8,463</b>	<b>12,427</b>	<b>63,321</b>	<b>75,047</b>	<b>71,780</b>	<b>118,02</b>
635	0,913	1,428	1,643	2,611	10,351	19,181	47,242	58,138	64,553
670	0,916	0,611	1,312	1,480	4,150	7,068			

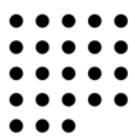
Unter einer Sekunde kann man praktisch nicht zuverlässig messen



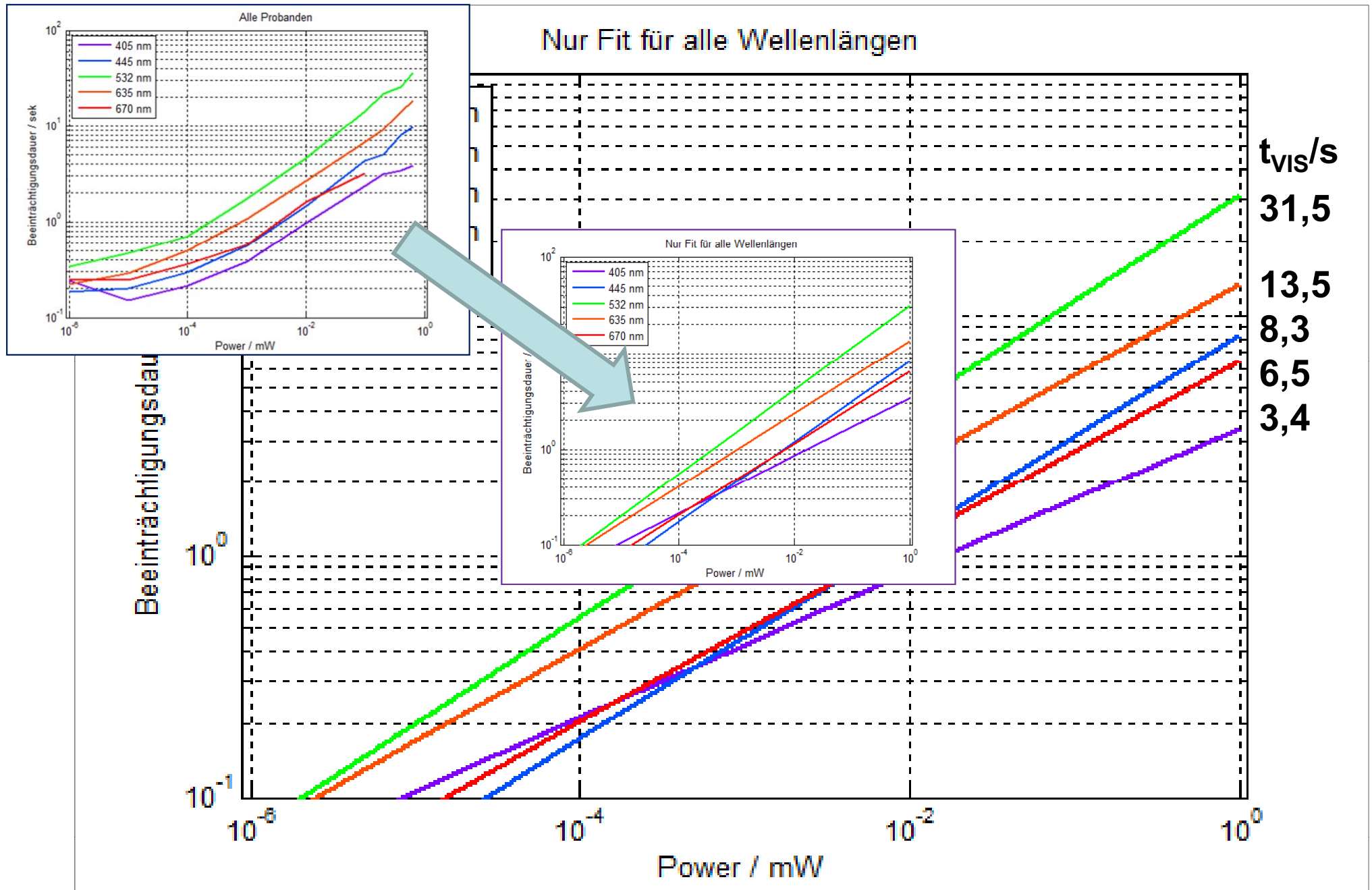


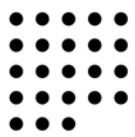
# Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung (Mittelwerte)



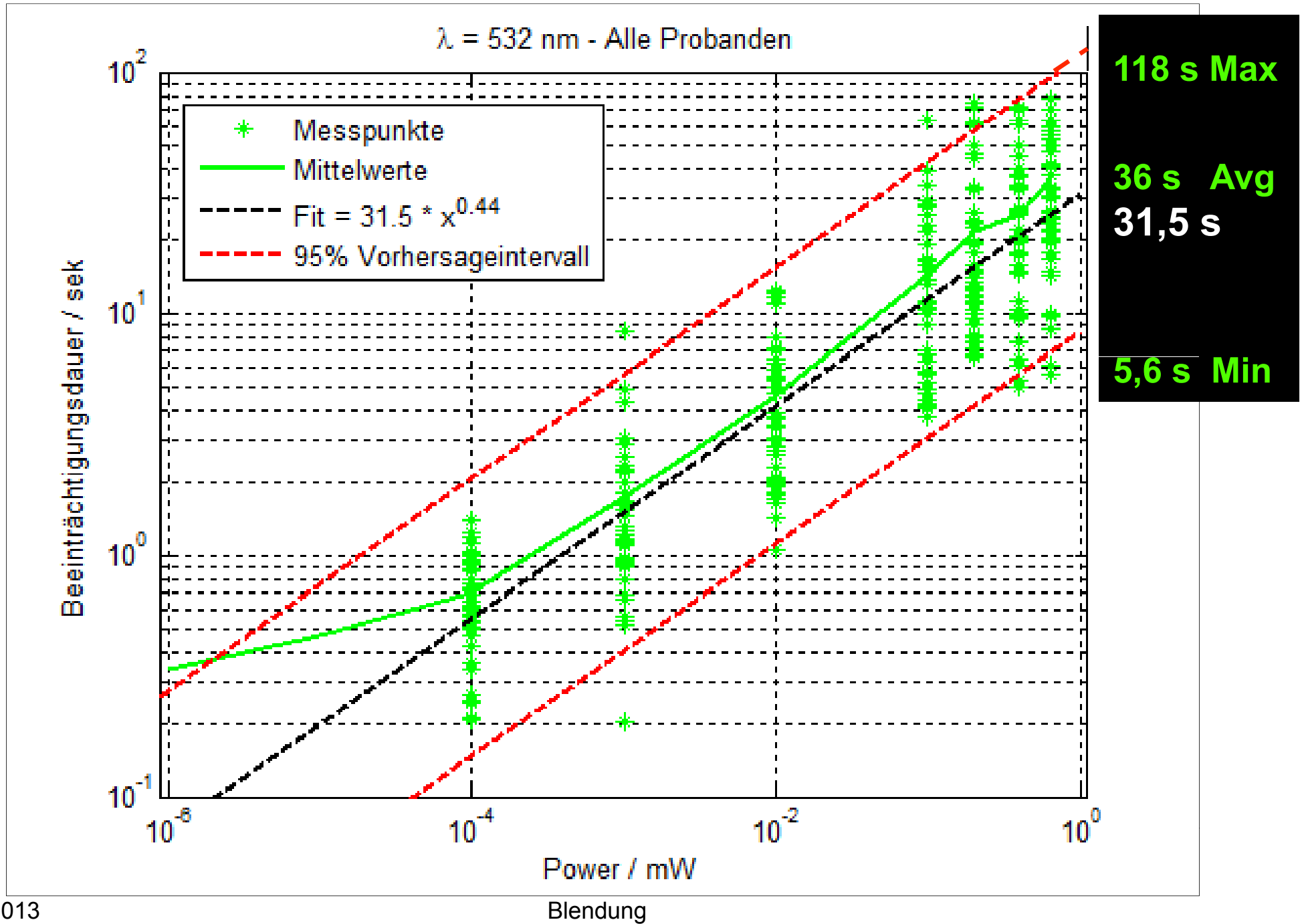


# Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung (nach Kurvenanpassung)





# Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung (Mittelwerte, 95%-Intervall und Kurvenanpassung)



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

- a Beeinträchtigungsdauer  $t_{\text{VIS}}$  in Sekunden bei einer Laserstrahlleistung  $P = 1 \text{ mW}$   
b Grad der Potenzfunktion

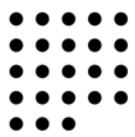
Für 405 nm:  $t_{\text{VIS}, 405} = 3,4 \cdot P^{0,30}$

Für 445 nm:  $t_{\text{VIS}, 445} = 8,3 \cdot P^{0,42}$

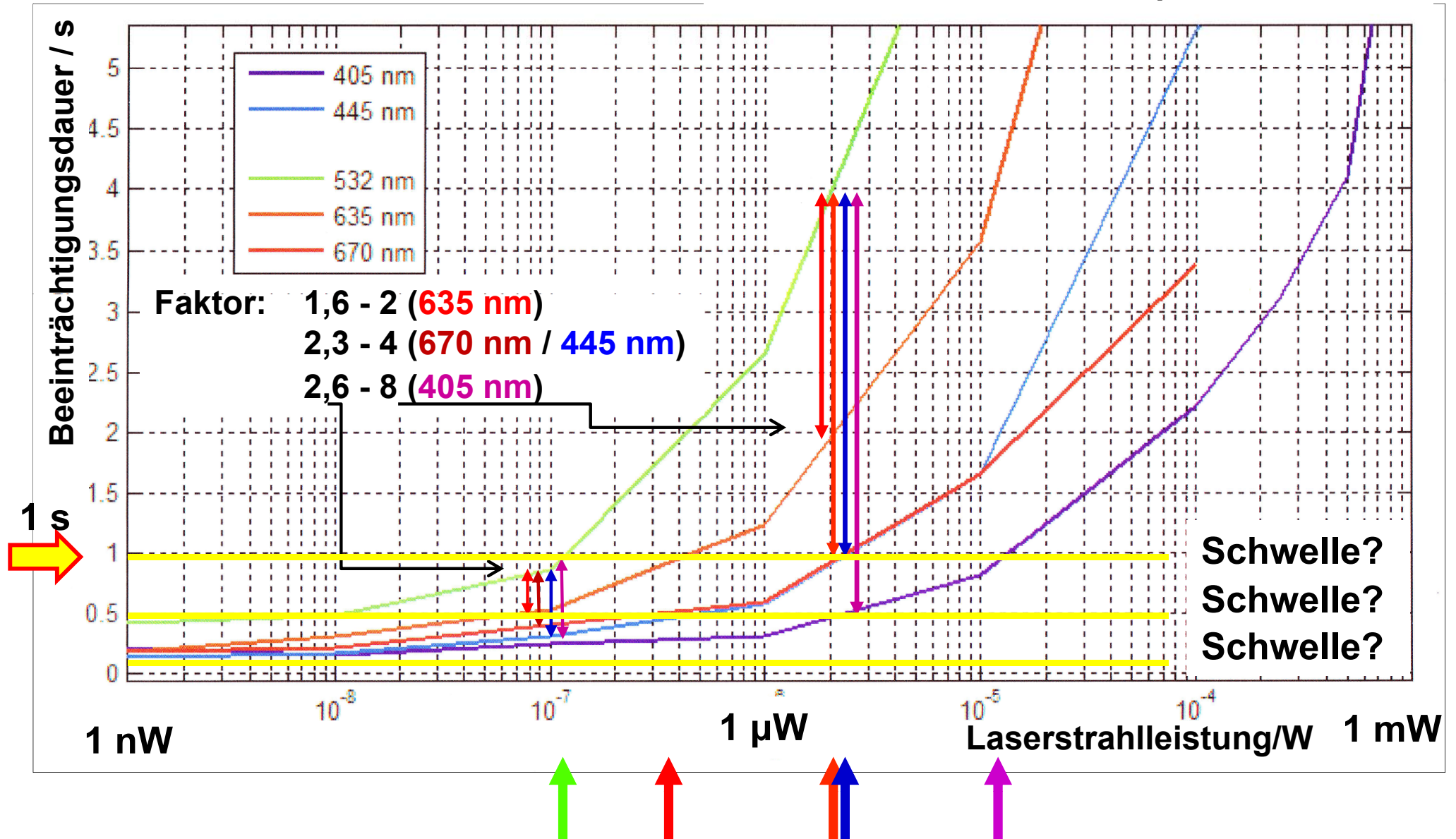
Für 532 nm:  $t_{\text{VIS}, 532} = 31,5 \cdot P^{0,44}$

Für 635 nm:  $t_{\text{VIS}, 635} = 13,5 \cdot P^{0,38}$

Für 670 nm:  $t_{\text{VIS}, 670} = 6,5 \cdot P^{0,38}$



# Schwellenverhalten: $t_{VIS} = f(\log P)$ bei $t_{exp} = 100$ ms





$$y = t_{\text{VIS}} = a \cdot x^b$$

Geradengleichung in doppeltlogarithmischer Darstellung:

$$\log(y) = \log(a \cdot x^b) = \log(a) + \log(x^b) = \log(a) + b \cdot \log(x)$$

$$Y = \log(t_{\text{VIS}}) = \log(a) + b \cdot \log(x)$$

$$Y = A + B \cdot X$$

$$\text{Mit } \log(y) = Y$$

$$\log(a) = A$$

$$\log(x) = X$$

$$b = B$$

$$\text{und } y = t_{\text{VIS}}$$

$$x = P$$



Auflösung nach der Größe  $x$ :

$$x = \left( \frac{t_{VIS}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Mit Hilfe der beiden Gleichungen für  $y$  und  $x$  kann man die Beeinträchtigungsdauer  $t_{VIS}$  bei gegebener Laserstrahlleistung  $P$  oder die erforderliche Laserstrahlleistung  $P$  für eine maximale Beeinträchtigungsdauer  $t_{VIS}$  berechnen.

**Bekannt sein müssen die Koeffizienten  $a$  und  $b$**





# Festlegung von Blendungsexpositionsgrenzwerten (1)



- Für eine „gewünschte“ maximal zulässige Sehbeeinträchtigung  $t_{VIS}$  („tolerierbare Beeinträchtigung“) lässt sich eine maximale optische Leistung  $P$  aus den experimentellen Zusammenhängen berechnen.

$$\text{Aus } t_{VIS} = a \cdot P^b$$

folgt :

$$P = \left( \frac{t_{VIS}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

# • Festlegung von Blendungsexpositionsgrenzwerten (2)



- Bei gegebener Expositionsdauer  $t_{\text{exp}}$  lässt sich daraus die maximale optische Energie  $Q$  berechnen und umgekehrt bei gegebener optischer Energie  $Q$  die maximale Expositionsdauer  $t_{\text{exp}}$ .
- Die Größe  $Q = P \cdot t_{\text{exp}}$  lässt sich bei gegebener Pupillengröße  $d_p$  in eine Pupillen-Bestrahlung  $H_p$  umrechnen und nach Division durch die Expositionsdauer  $t_{\text{exp}}$  in eine Pupillen-Bestrahlungsstärke  $E_p$ .
- Durch Multiplikation mit der Pupillenfläche erhält man dann die entsprechende optische Leistung  $P_p$ .

# • Festlegung des Blendschwellenabstandes

- Augensicherheitsabstand  $NOHD = \sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot EGW}} \cdot \frac{1}{\Theta}$
- Augenschädigungsabstand

$$NOHD_{ED50} = \sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot EGW_{50}}} \cdot \frac{1}{\Theta} = \frac{NOHD}{\sqrt{10}} = \sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot (10 \cdot EGW)}} \cdot \frac{1}{\Theta}$$

- Blendschwellenabstand

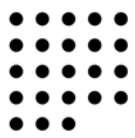
$$\begin{aligned} NBD &\approx 100 \cdot NOHD_{ED50} = 100 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot EGW_{50}}} \cdot \frac{1}{\Theta} = 100 \cdot \frac{NOHD}{\sqrt{10}} = \\ &= \sqrt{1000} \cdot NOHD = \sqrt{1000} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot EGW}} \cdot \frac{1}{\Theta} \end{aligned}$$



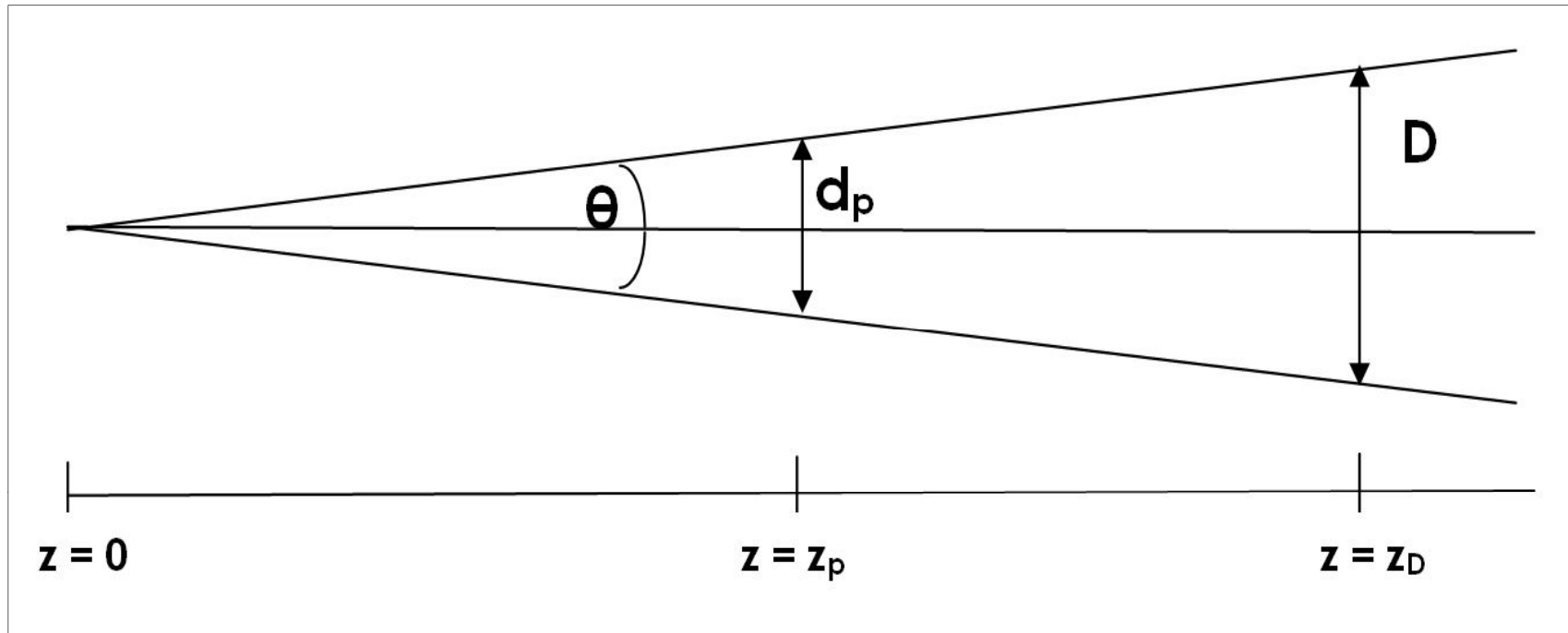
# Schädigungsschwellenwert ED50, Expositionsgrenzwert EGW und Blendungsgrenzwert EBGW



	<b>ED50 (0,25 s)</b>	<b>EGW (0,25 s)</b>	<b>EGW (10 s)</b>	<b>EBGW (0,25 s – 0,1 s)</b>	<b>EBGW (10 s)</b>
<b>Bestrahlungsstärke E</b>	<b>25 mW/cm<sup>2</sup></b>	<b>2,5 mW/cm<sup>2</sup></b>	<b>1 mW/cm<sup>2</sup></b>	<b>10 µW/cm<sup>2</sup> - 25 µW/cm<sup>2</sup></b>	<b>1 µW/cm<sup>2</sup> - 2,5 µW/cm<sup>2</sup></b>
<b>Leistung P</b>	<b>10 mW</b>	<b>1 mW</b>	<b>0,4 mW</b>	<b>4 µW – 10 µW</b>	<b>0,4 µW – 1 µW</b>
<b>Reduktionsfaktor in Bezug auf ED50-Wert</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>2.500 – 1.000</b>	<b>25.000 – 10.000</b>
<b>Reduktionsfaktor in Bezug auf EGW(0,25 s)</b>	<b>0,1</b>	<b>1</b>	<b>2,5</b>	<b>250 – 100</b>	<b>2.500 – 1.000</b>



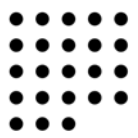
# Leistung in der Pupille



$$P_{7\text{mm}} = E \cdot A_P = \frac{P_L}{A_D} \cdot A_P = \frac{P_L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_P^2}{\frac{\pi}{4} \cdot (z \cdot \Theta)^2} = \frac{P_L \cdot d_P^2}{z^2 \cdot \Theta^2}, \quad P_L = \text{Laserstrahlleistung}$$

$$\text{Für } \Theta = 1 \text{ mrad und } d_P = 7 \text{ mm gilt: } \frac{z}{\text{m}} = \sqrt{\frac{P_L \cdot 49}{P_x}} = 7 \cdot \sqrt{\frac{P_L}{P_x}}$$

$P_x = P_P$  die in die Pupille fallende Laserstrahlleistung



- In die Pupille fallende Laserstrahlleistung:  $P_P = P_L \cdot \left(\frac{d_P}{D}\right)^2$   
mit  $D$  dem Laserstrahldurchmesser in der Entfernung  $z$

$$P_P = \frac{d_P^2}{(\Theta \cdot z)^2} \cdot P_L$$



■ Für 405 nm:  $t_{\text{VIS}, 405} = 3,4 \cdot \left[ \frac{d_P^2}{(\Theta \cdot z)^2} \cdot P_L \right]^{0,30}$

■ Für 445 nm:  $t_{\text{VIS}, 445} = 8,3 \cdot \left[ \frac{d_P^2}{(\Theta \cdot z)^2} \cdot P_L \right]^{0,42}$

■ Für 532 nm:  $t_{\text{VIS}, 532} = 31,5 \cdot \left[ \frac{d_P^2}{(\Theta \cdot z)^2} \cdot P_L \right]^{0,44}$

■ Für 635 nm:  $t_{\text{VIS}, 635} = 13,5 \cdot \left[ \frac{d_P^2}{(\Theta \cdot z)^2} \cdot P_L \right]^{0,38}$

■ Für 670 nm:  $t_{\text{VIS}, 670} = 6,5 \cdot \left[ \frac{d_P^2}{(\Theta \cdot z)^2} \cdot P_L \right]^{0,38}$



Entfernung  $z$  in m, die bei gegebener Laserstrahlleistung  $P_L$  einer bestimmten Laserstrahlleistung  $P_p$  im Auge entspricht



Laserstrahlleistung $P_p$ im Auge	Laserstrahlleistung $P_L$ in mW		
	5 mW	100 mW	1.000 mW
	Entfernung $z$ in m		
1 nW	15.652	70.000	221.359
10 nW	4.950	22.136	70.000
100 nW	1.565	70.000	22.136
1 $\mu$ W	495	2.214	7.000
10 $\mu$ W	156,5	700	2.214
100 $\mu$ W	49,5	221,4	700
200 $\mu$ W	35	156,5	495
250 $\mu$ W	31,3	140,0	442,7
400 $\mu$ W	24,7	110,7	350
500 $\mu$ W	22,1	99	313
640 $\mu$ W	19,6	87,5	276,7
800 $\mu$ W	17,5	78,3	247,5



-  **Laserstrahlleistung  $P_\lambda$  für eine vorgegebene Beeinträchtigungsdauer  $t_{\text{VIS},\lambda}$**

$$P_\lambda = \left( \frac{t_{\text{VIS},\lambda}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Für eine Beeinträchtigungsdauer von **1 S** erhält man:

■  $\lambda = 405 \text{ nm}$ :  $P_{405} = \left( \frac{1}{3,4} \right)^{\frac{1}{0,3}} = 0,017 \text{ mW} = 17 \text{ } \mu\text{W}$

■  $\lambda = 445 \text{ nm}$ :  $P_{445} = \left( \frac{1}{8,3} \right)^{\frac{1}{0,42}} = 0,0065 \text{ mW} = 6,5 \text{ } \mu\text{W}$

■  $\lambda = 532 \text{ nm}$ :  $P_{532} = \left( \frac{1}{31,5} \right)^{\frac{1}{0,44}} = 0,0004 \text{ mW} = 0,4 \text{ } \mu\text{W}$

■  $\lambda = 635 \text{ nm}$ :  $P_{635} = \left( \frac{1}{13,5} \right)^{\frac{1}{0,38}} = 0,001 \text{ mW} = 1 \text{ } \mu\text{W}$

■  $\lambda = 670 \text{ nm}$ :  $P_{670} = \left( \frac{1}{6,5} \right)^{\frac{1}{0,38}} = 0,0073 \text{ mW} = 7,3 \text{ } \mu\text{W}$

-  **Laserstrahlleistung  $P_\lambda$  für eine vorgegebene Beeinträchtigungsdauer  $t_{\text{VIS},\lambda}$**

$$P_\lambda = \left( \frac{t_{\text{VIS},\lambda}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Für eine Beeinträchtigungsdauer von **10 s** erhält man:

■  $\lambda = 405 \text{ nm}$ :  $P_{405} = \left( \frac{10}{3,4} \right)^{\frac{1}{0,3}} = 36,45 \text{ mW} \quad !!! \Rightarrow ?$

■  $\lambda = 445 \text{ nm}$ :  $P_{445} = \left( \frac{10}{8,3} \right)^{\frac{1}{0,42}} = 1,56 \text{ mW} \quad !$

■  $\lambda = 532 \text{ nm}$ :  $P_{532} = \left( \frac{10}{31,5} \right)^{\frac{1}{0,44}} = 0,0737 \text{ mW} = 74 \text{ } \mu\text{W}$

■  $\lambda = 635 \text{ nm}$ :  $P_{635} = \left( \frac{10}{13,5} \right)^{\frac{1}{0,38}} = 0,45 \text{ mW} = 454 \text{ } \mu\text{W}$

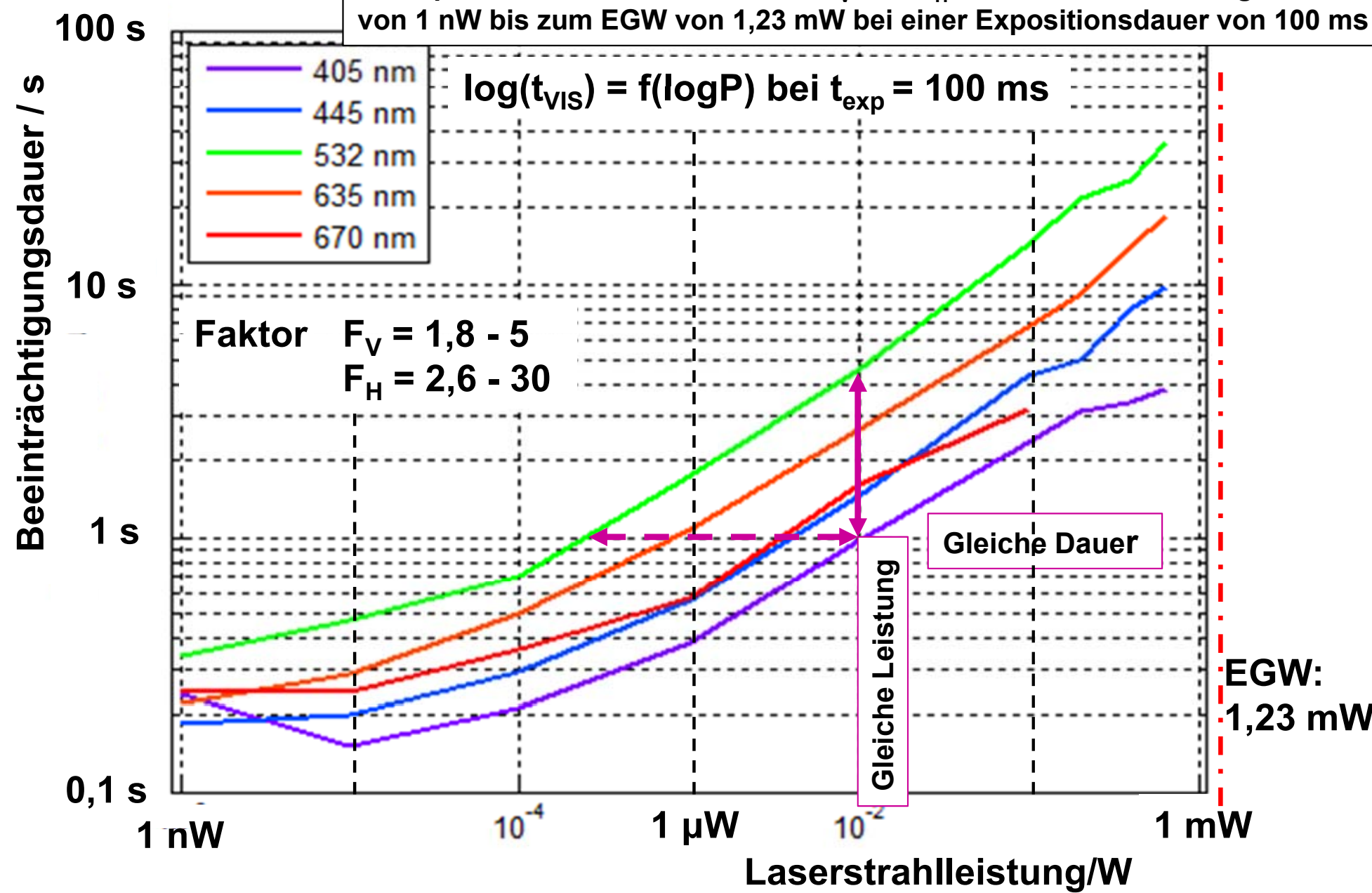
■  $\lambda = 670 \text{ nm}$ :  $P_{670} = \left( \frac{10}{6,5} \right)^{\frac{1}{0,38}} = 3,11 \text{ mW} \quad !!$



# Wellenlängenabhängigkeit der Beeinträchtigungsdauer

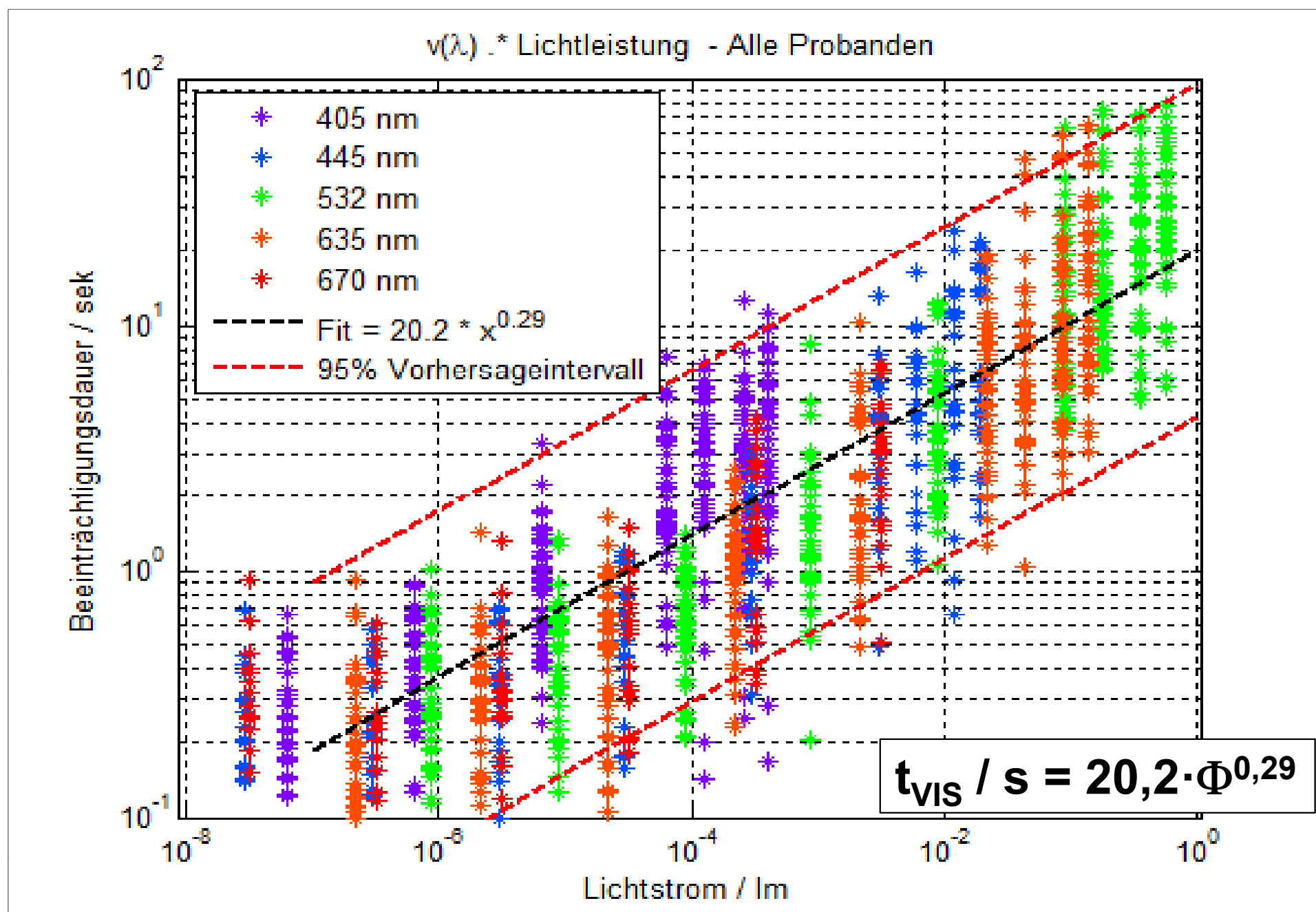


Prinzip der Definition der Faktoren  $F_V$  und  $F_H$  im Laserstrahlleistungsbereich von 1 nW bis zum EGW von 1,23 mW bei einer Expositionsdauer von 100 ms

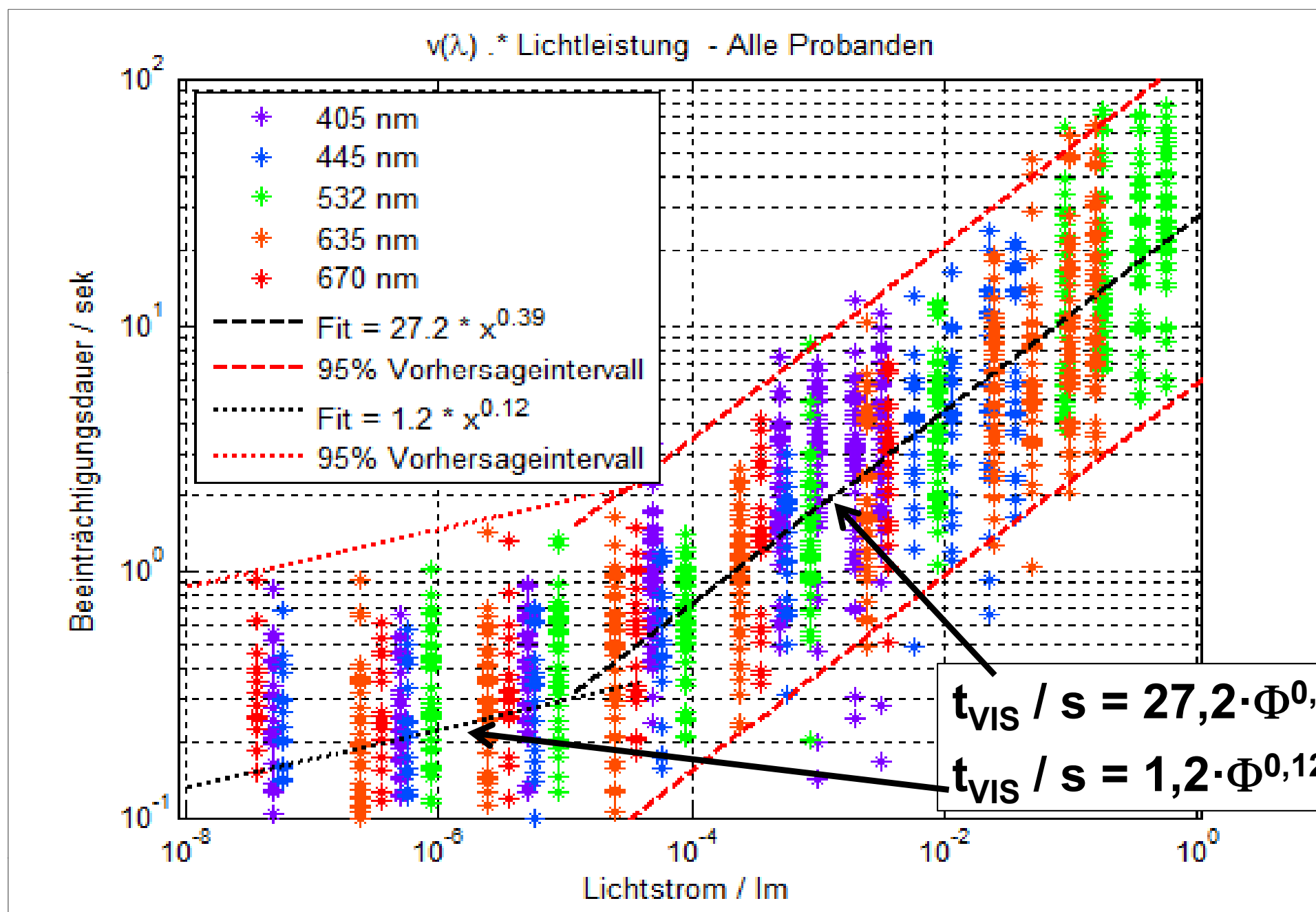




# Beeinträchtigungsdauer in Sekunden als Funktion des Lichtstroms

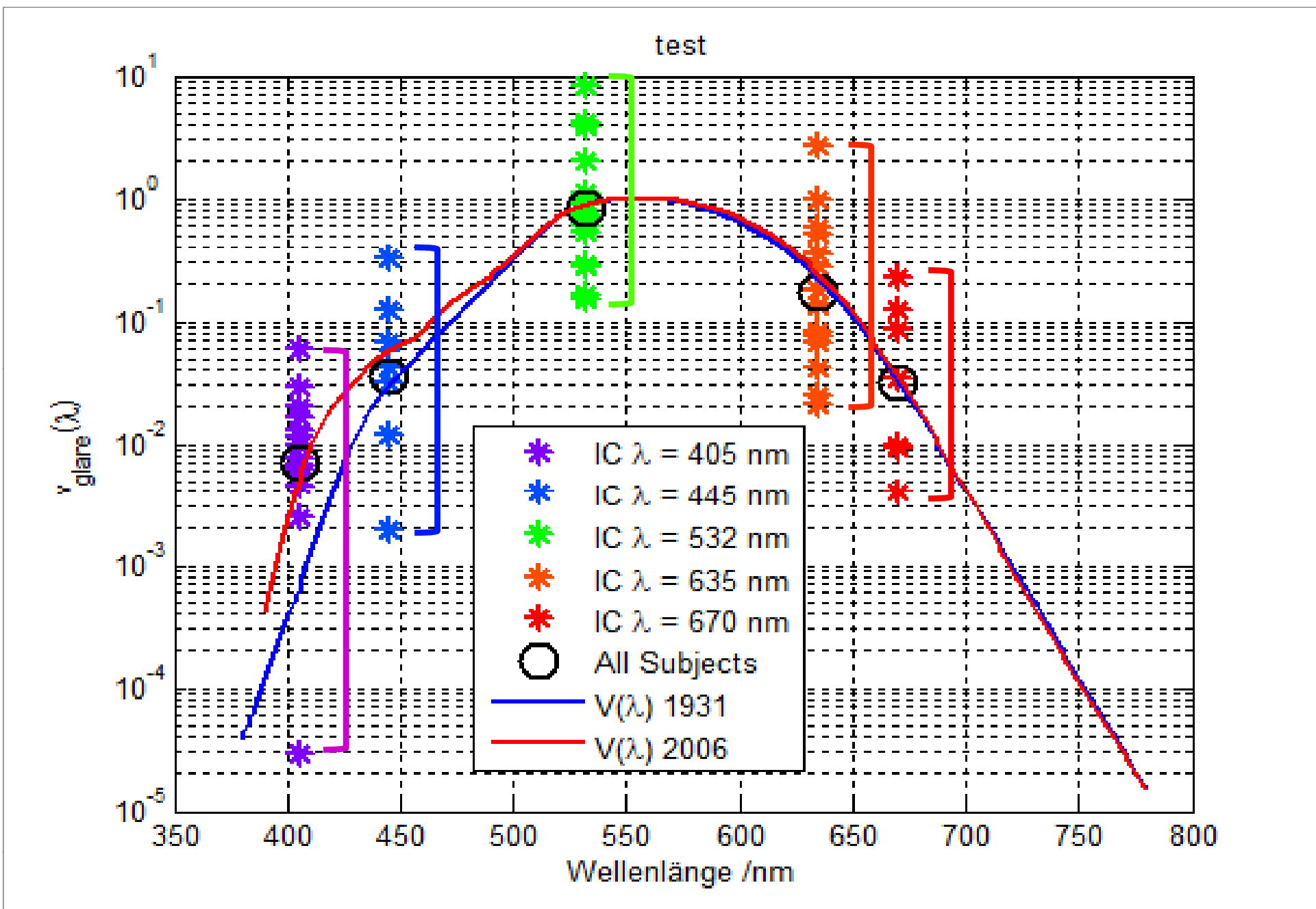


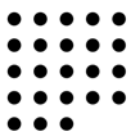
# Beeinträchtigungsdauer als Funktion des Lichtstroms aufgeteilt in zwei Bereiche



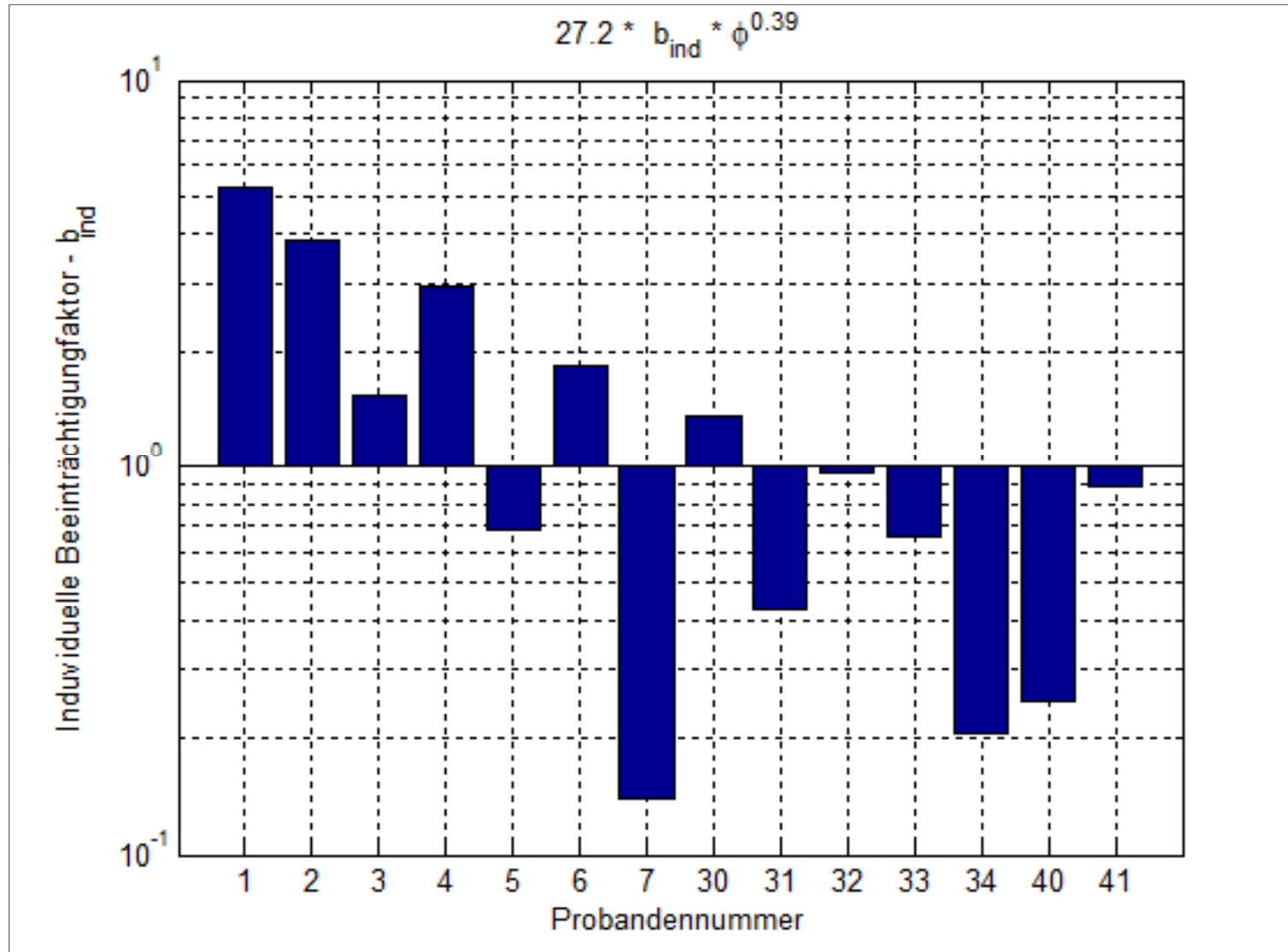


# Blendfunktion $V_{\text{glare}}(\lambda)$ als Funktion der Wellenlänge im Vergleich zur $V(\lambda)$ -Kurve





# Individueller Beeinträchtigungsfaktor $b_{ind}$



$$t_{vis, ind} / s = 27,2 \cdot b_{ind} \cdot \Phi^{0,39}$$

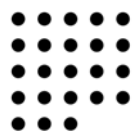


Vergleich der experimentell für alle Testpersonen ermittelten Koeffizienten mit den „ermittelten  $V(\lambda)$ -“ und mit den  $V(\lambda)$ -Werten



Wellenlänge in nm	405	445	532	635	670
Testperson					
1	0,01174729	0,06827221	8,30715108	2,70100994	0,23034043
2	0,02897155	0,32698943	1,12259611	0,99153838	0,12548955
3	0,01656035	0,04266298	3,89062967	0,28026612	0,00402605
4	0,00961268	0,12492926	4,23323145	0,58698965	0,08687486
5	0,01281947	0,03111067	0,68147901	0,06925645	0,0094681
6	0,0598265	0,0119484	2,04531708	0,51131467	0,03454825
7	2,8905E-05	0,00194933	0,88699024	0,07708085	0,00986887
30	0,00776837		0,75315571	0,35115748	
31	0,00681115		0,29646725	0,04223261	
32	0,02055707		0,59987623	0,08392582	
33	0,00761202		0,27642961	0,13709823	
34	0,00244015		0,1669224	0,02076373	
40	0,00453906		0,15519202	0,02442485	
41	0,00634683		0,53517363	0,17804292	
V(lambda) ermittelt	0,00704375	0,03566234	0,850746	0,17343241	0,03176569
V(lambda) 1931	0,00064	0,0298	0,8849624	0,217	0,032
V(lambda) 2006	0,00497172	0,0574339	0,878306	0,24169	0,0355998





# Expositionsdauer > 100 ms

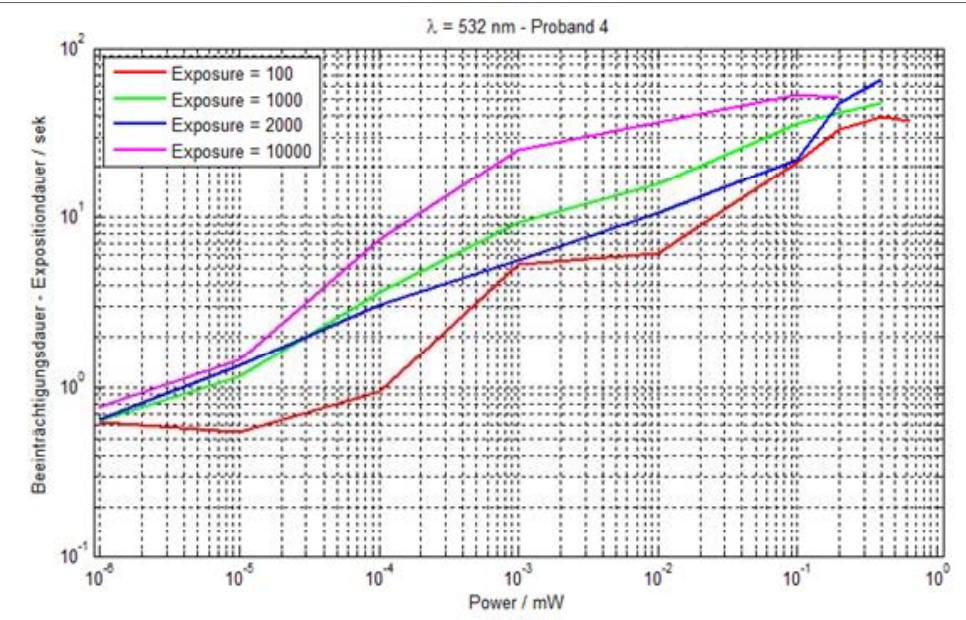
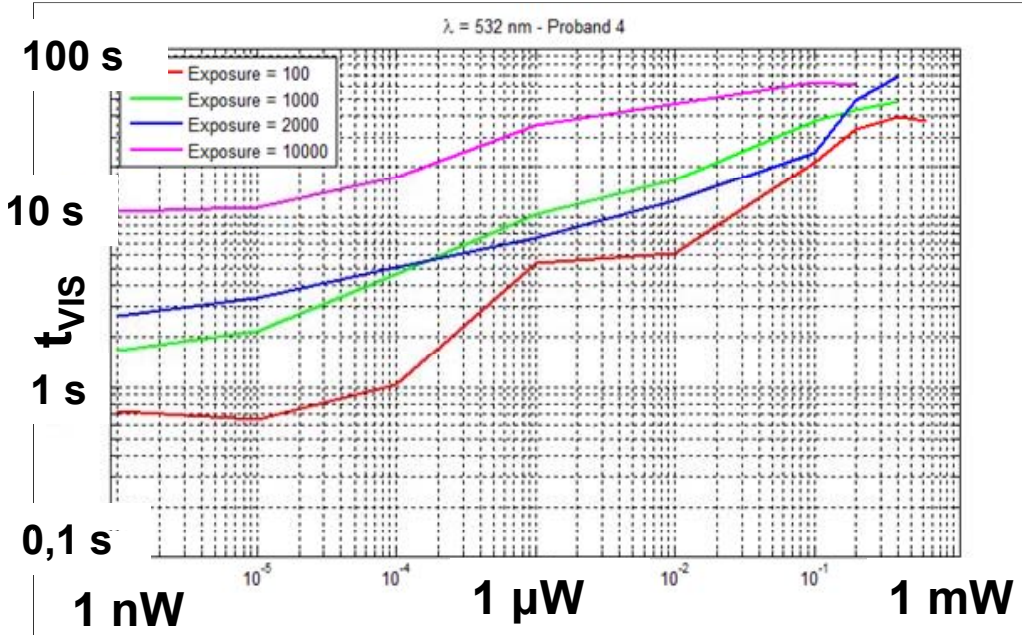
---



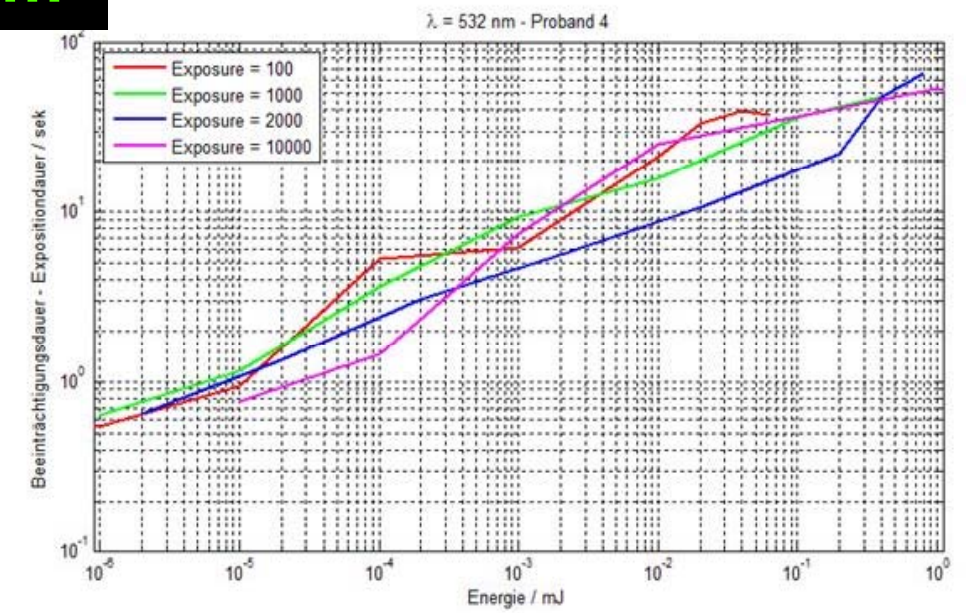
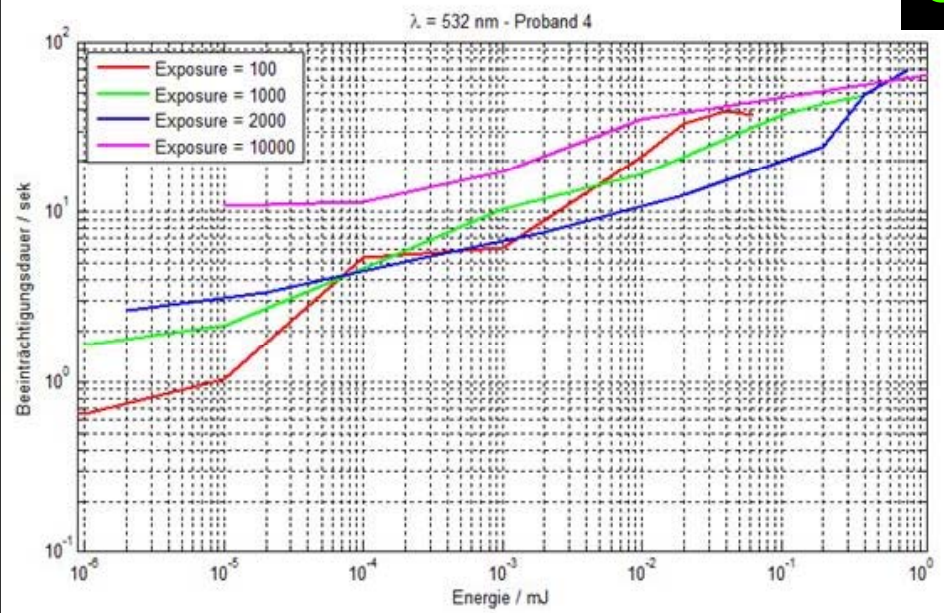
- $t_{\text{exp}} = 1 \text{ s}, 2 \text{ s} \text{ und } 10 \text{ s}$



# Beeinträchtigungsdauer (ohne und mit Abzug von $t_{exp}$ ) als Funktion der Laserstrahlleistung und der optischen Energie für die Wellenlänge 532 nm für Proband Nr. 4; $t_{exp}$ : 1 s, 2 s und 10 s und zum Vergleich auch 100 ms



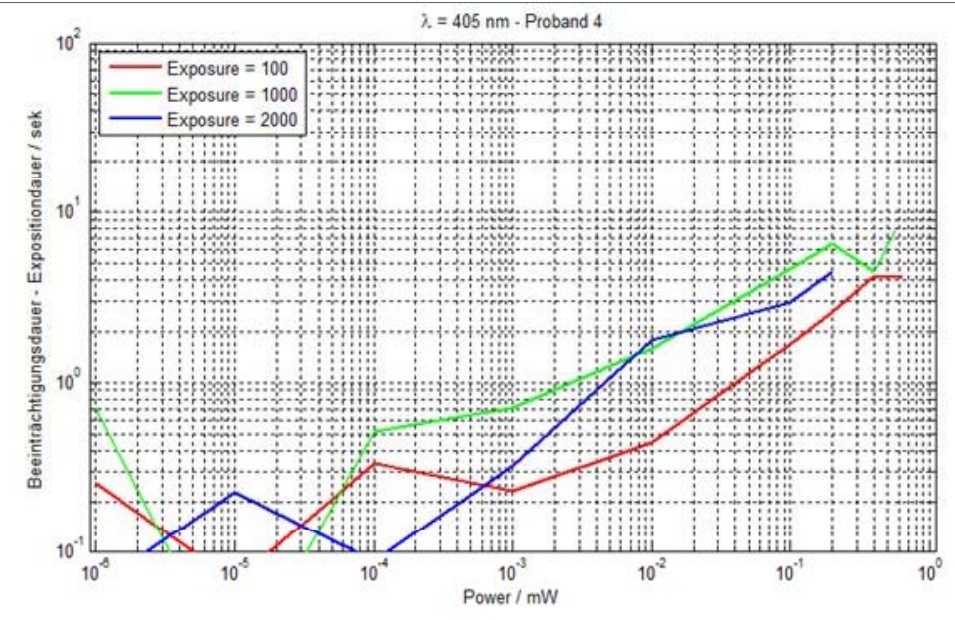
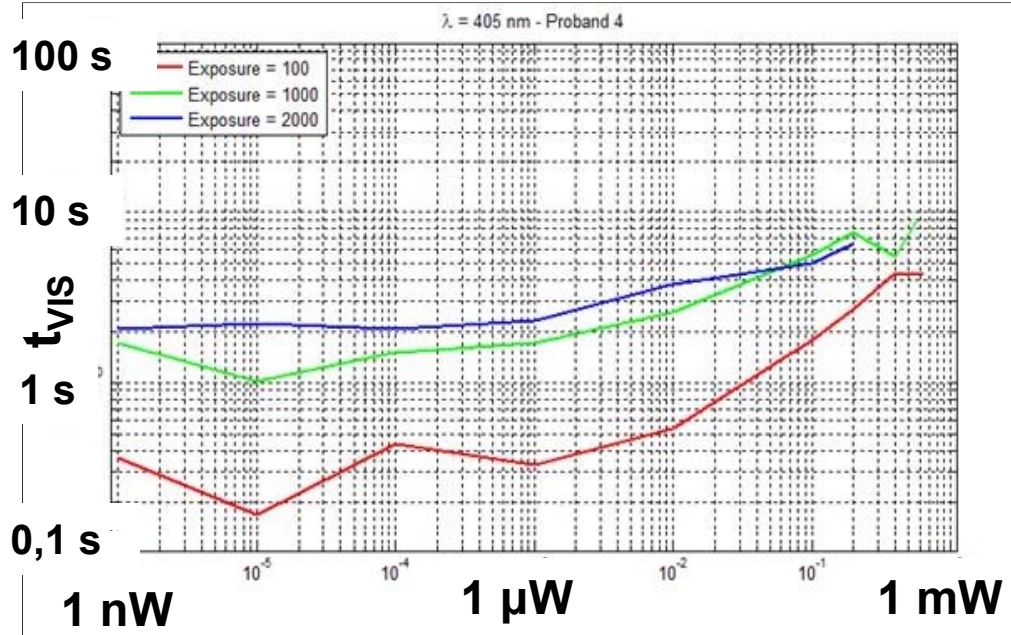
**532 nm**



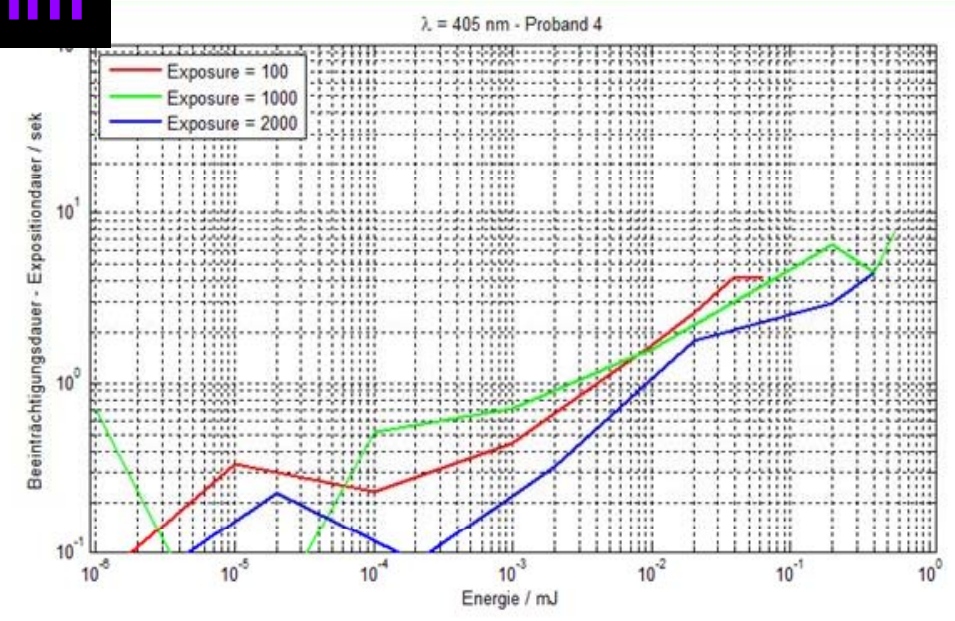
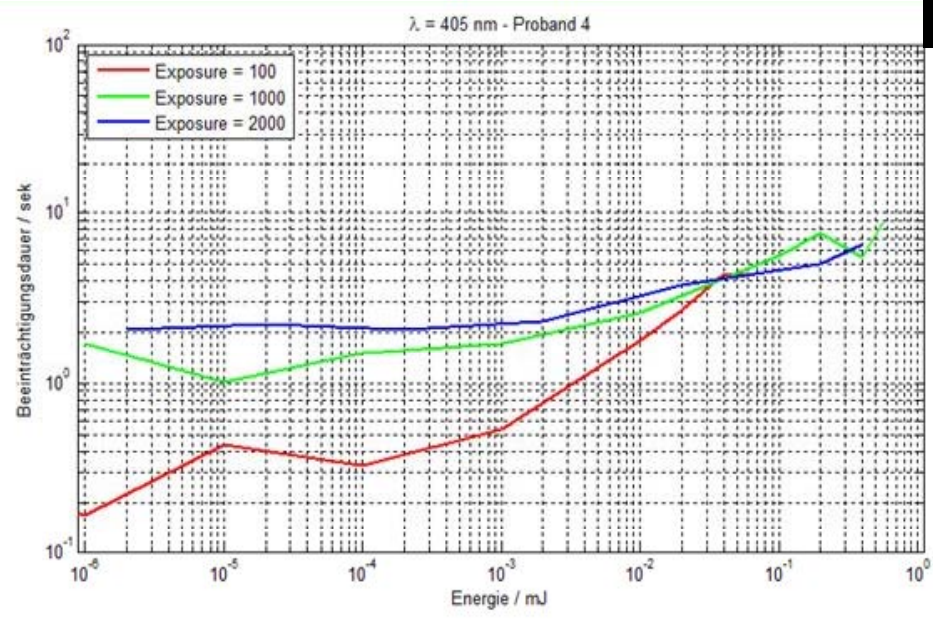




Beeinträchtigungsdauer (ohne und mit Abzug von  $t_{exp}$ ) als Funktion der Laserstrahlleistung und der optischen Energie für die Wellenlänge 405 nm für Proband Nr. 4;  $t_{exp}$ : 1 s und 2 s und zum Vergleich auch 100 ms



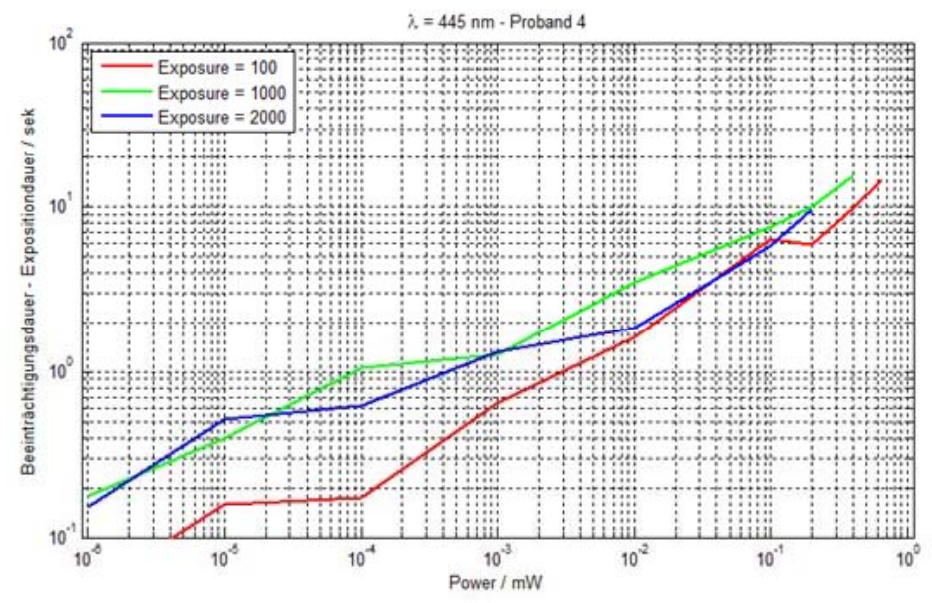
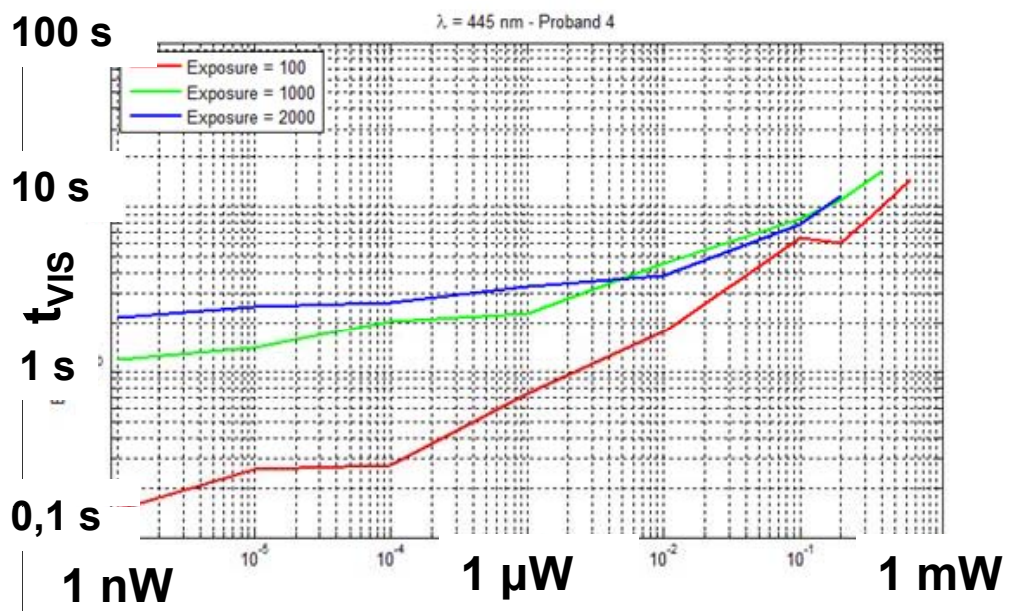
405 nm



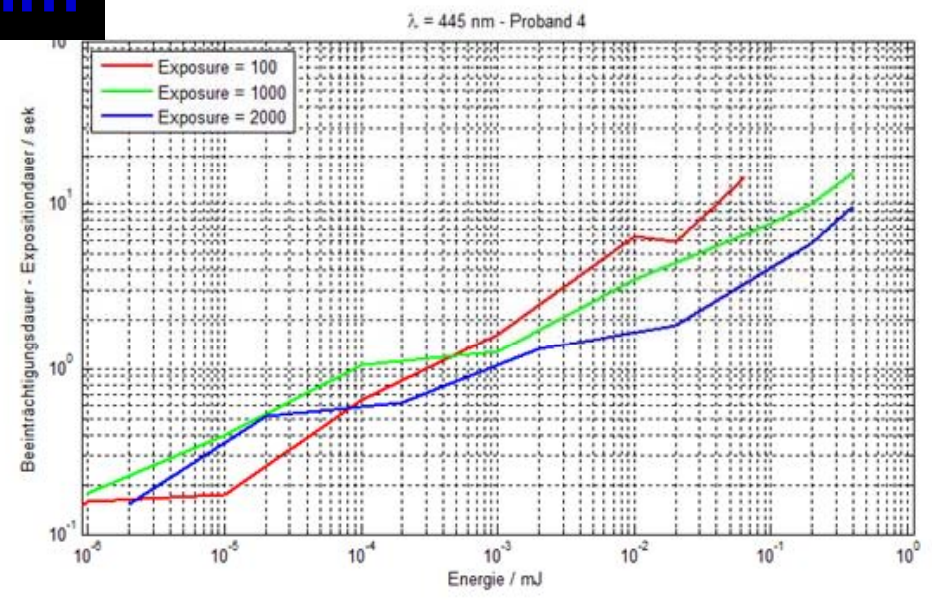
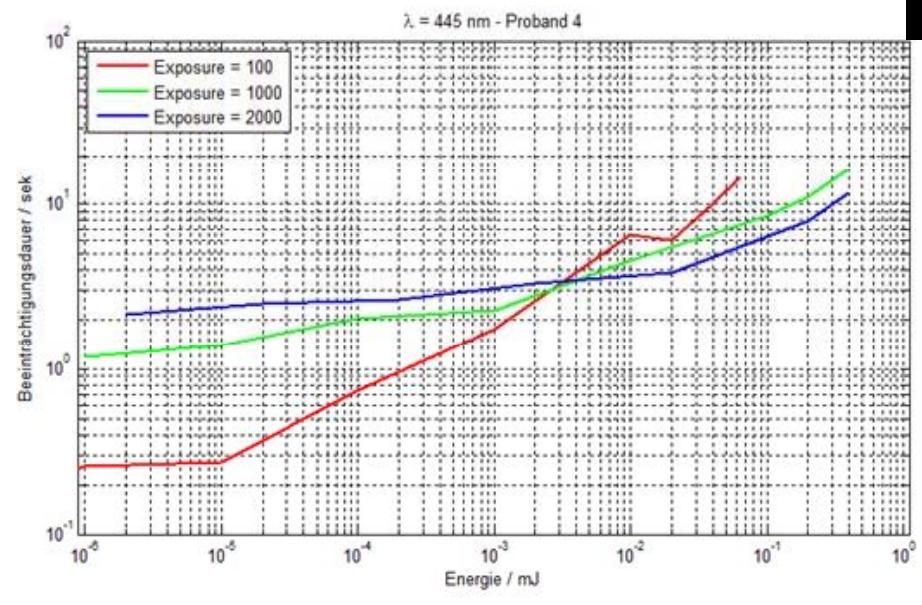




Beeinträchtigungsdauer (ohne und mit Abzug von  $t_{exp}$ ) als Funktion der Laserstrahlleistung und der optischen Energie für die Wellenlänge 445 nm für Proband Nr. 4;  $t_{exp}$ : 1 s und 2 s und zum Vergleich auch 100 ms



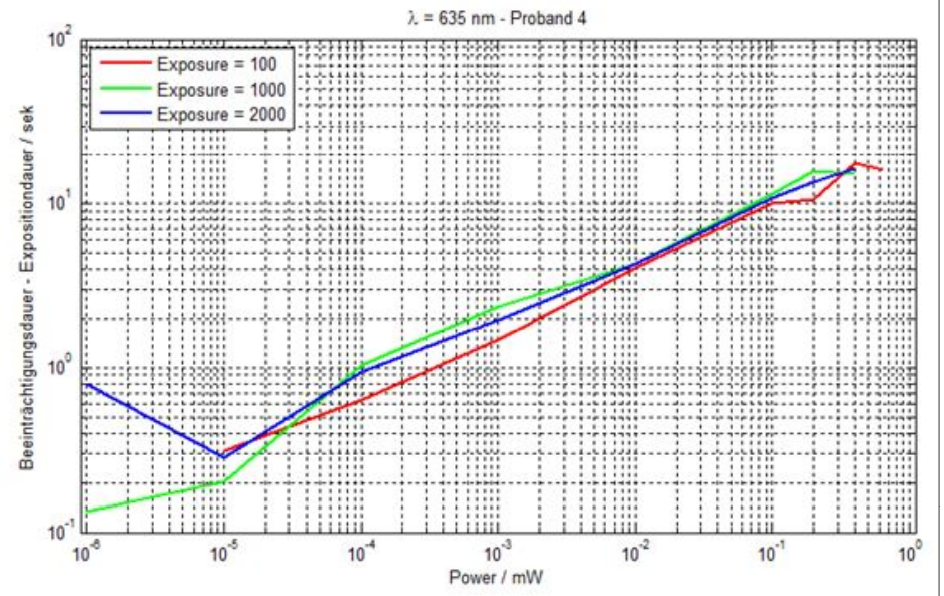
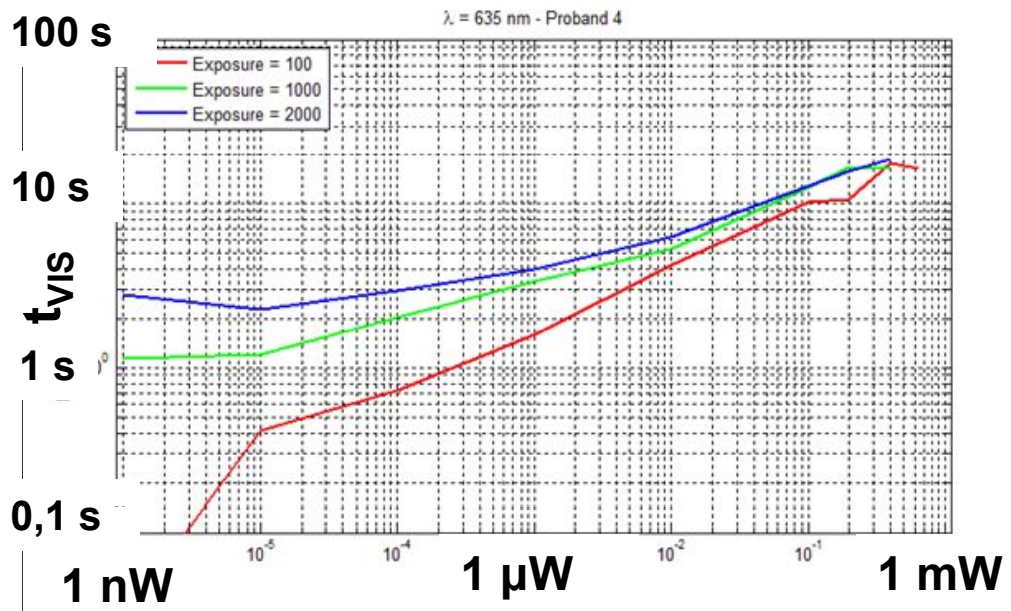
**445 nm**



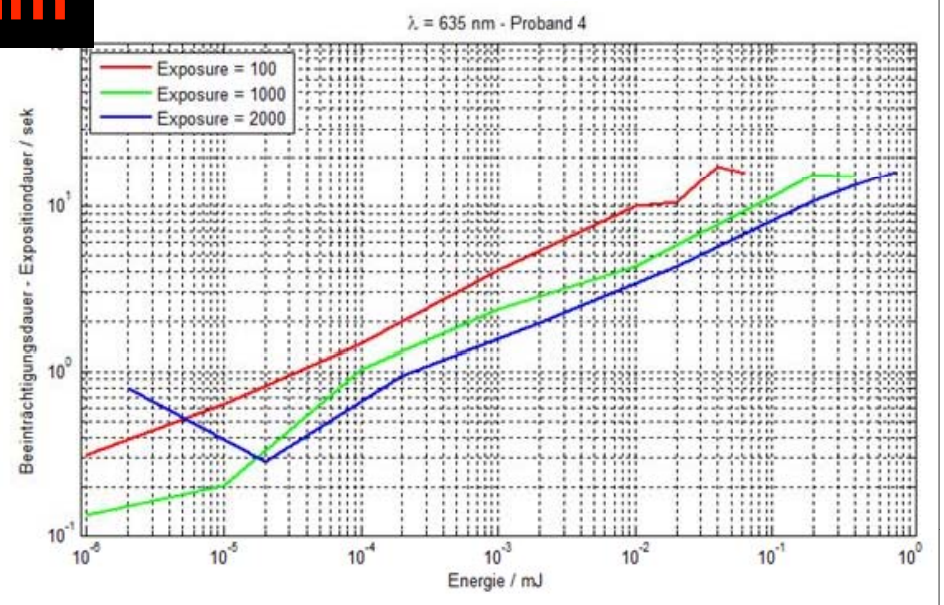
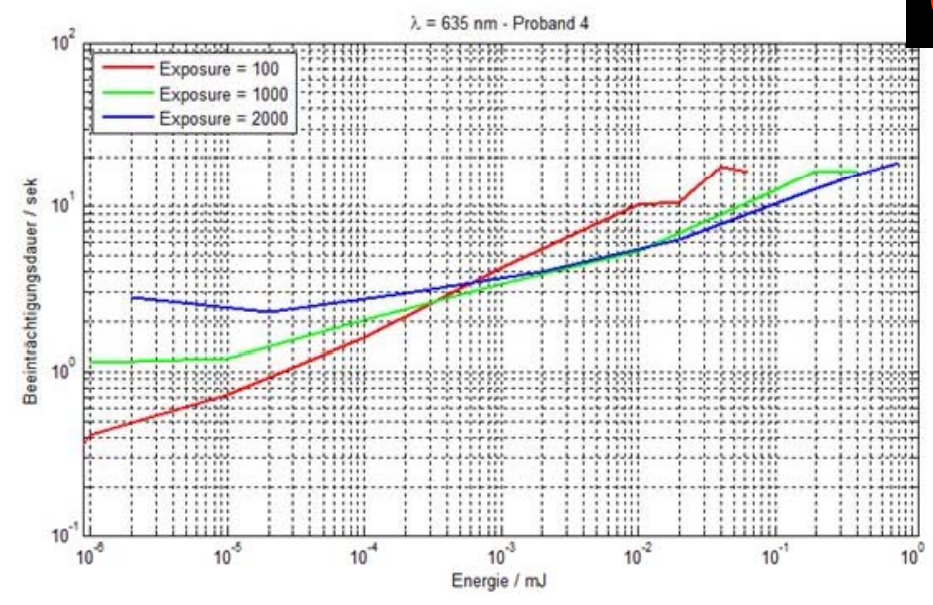




# Beeinträchtigungsdauer (ohne und mit Abzug von $t_{exp}$ ) als Funktion der Laserstrahlleistung und der optischen Energie für die Wellenlänge 635 nm für Proband Nr. 4; $t_{exp}$ : 1 s und 2 s und zum Vergleich auch 100 ms



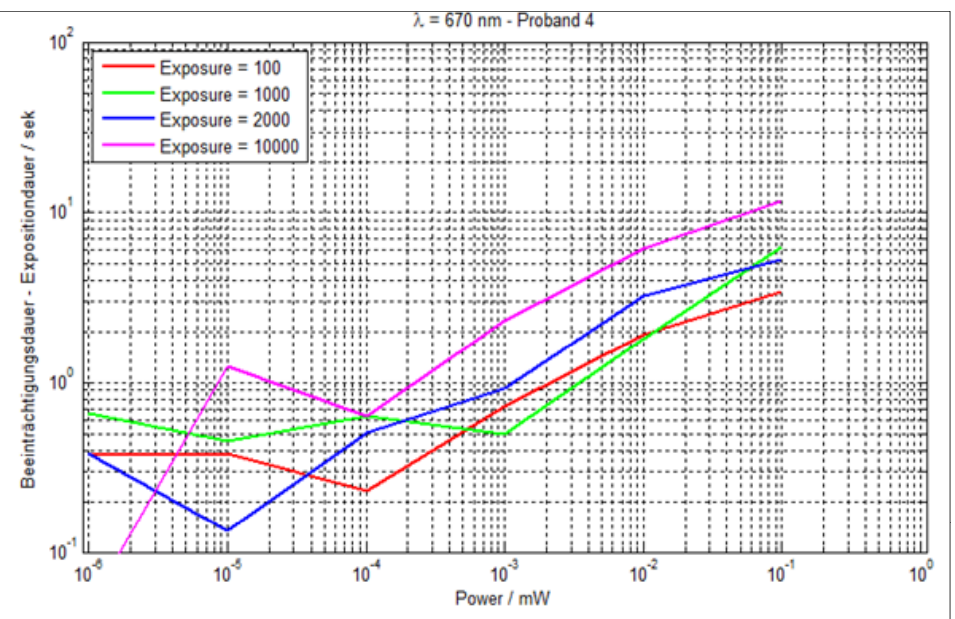
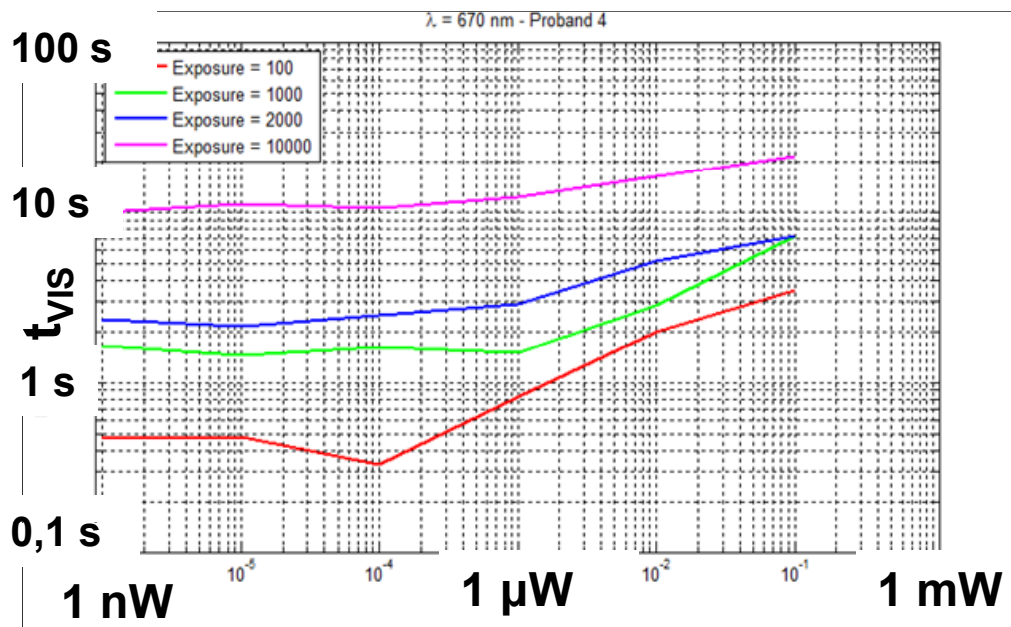
**635 nm**



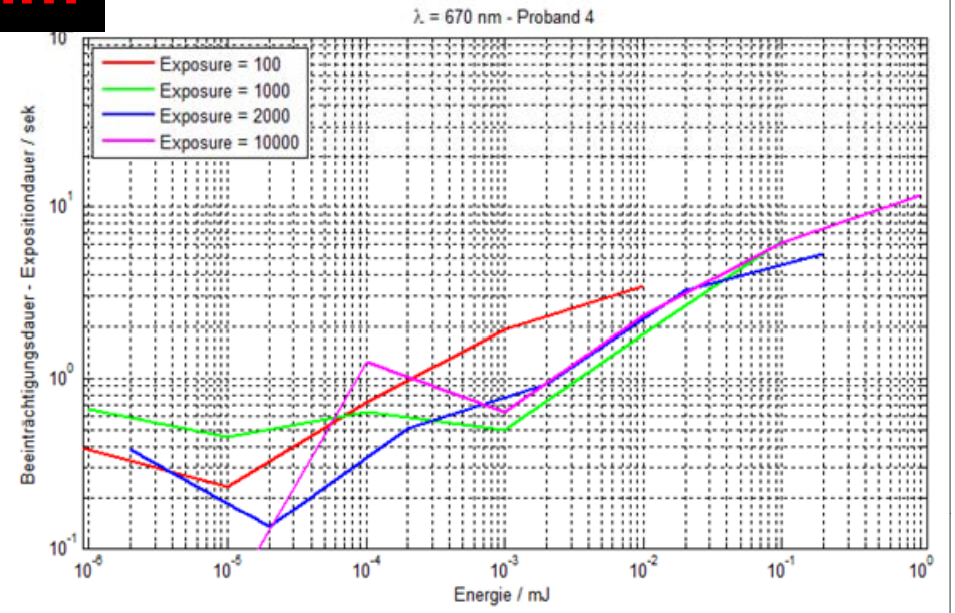
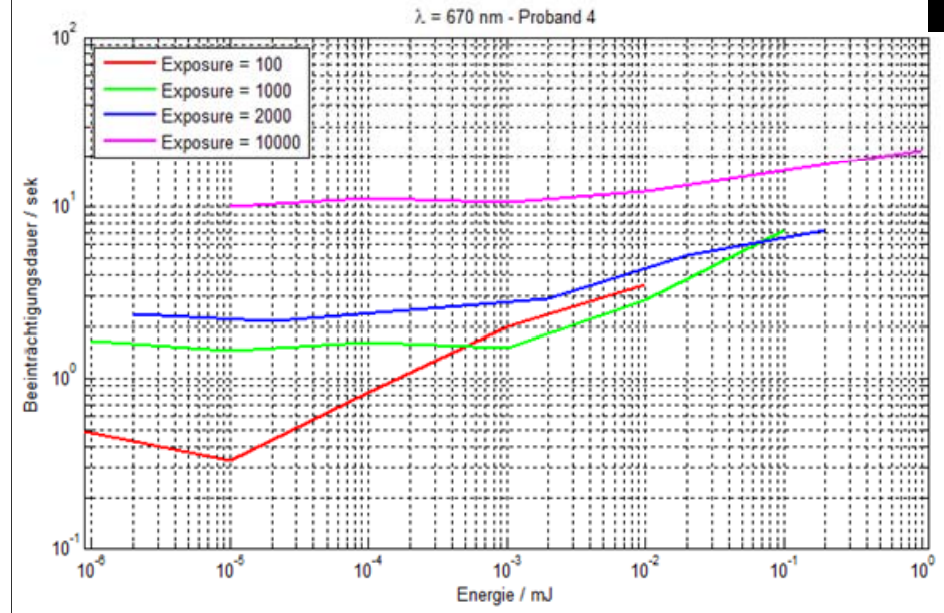


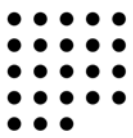


# Beeinträchtigungsdauer (ohne und mit Abzug von $t_{exp}$ ) als Funktion der Laserstrahlleistung und der optischen Energie für die Wellenlänge 670 nm für Proband Nr. 4; $t_{exp}$ : 1 s, 2 s und 10 s und zum Vergleich auch 100 ms



**670 nm**

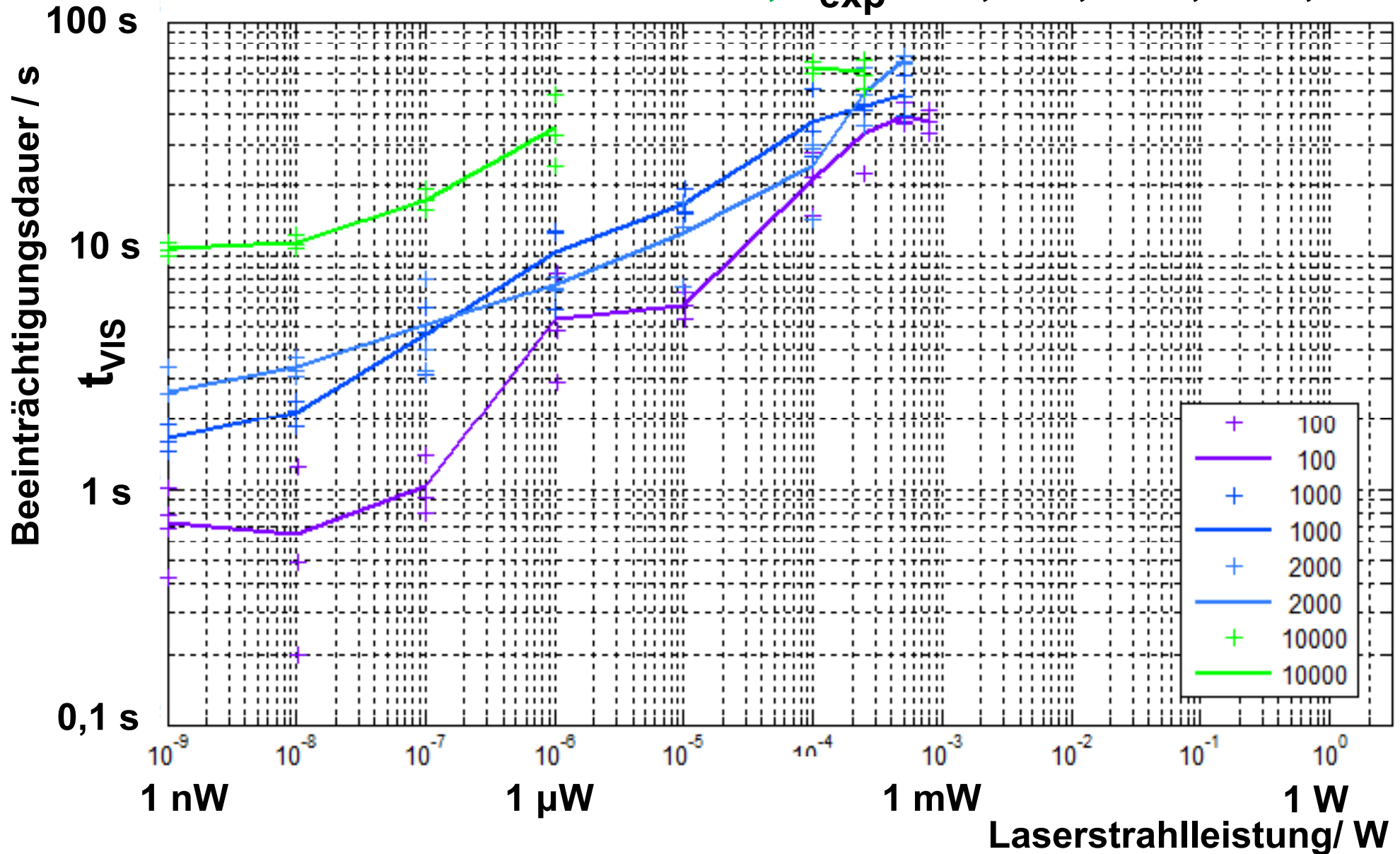




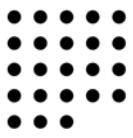
# Gesamte Beeinträchtigungsdauer = $f(t_{\text{exp}}, P)$



**532 nm;  $t_{\text{exp}} = 0,1 \text{ s}, 1 \text{ s}, 2 \text{ s}, 10 \text{ s}$**



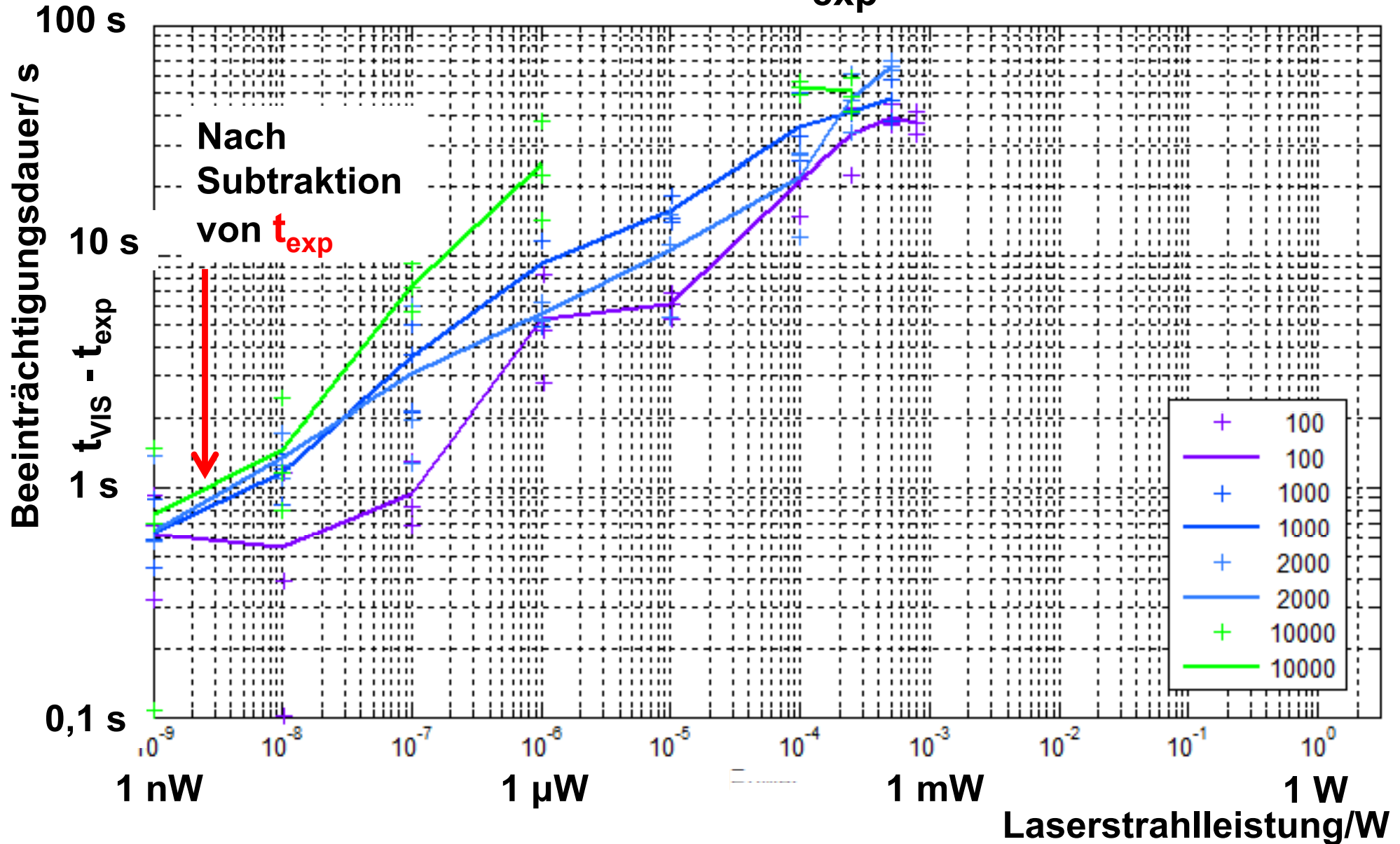




# Echte Beeinträchtigungsdauer = $f(t_{exp}, P)$



532 nm;  $t_{exp} = 0,1 \text{ s}, 1 \text{ s}, 2 \text{ s}, 10 \text{ s}$





- Zu langen Expositionsdauern
- Zu kurzen Wellenlängen

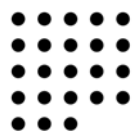


Reidenbach, H.-D.; Beckmann, D.; Al Ghouz, I.; Dollinger, K.; Ott, G.; Brose, M.:

Is There an Unknown Risk for Short-Wavelength Visible Laser Radiation?;

Strahlenschutzpraxis, H. 3 (2013), 45-53

<http://osiris22.pi-consult.de/view.php3?show=5100014402052>

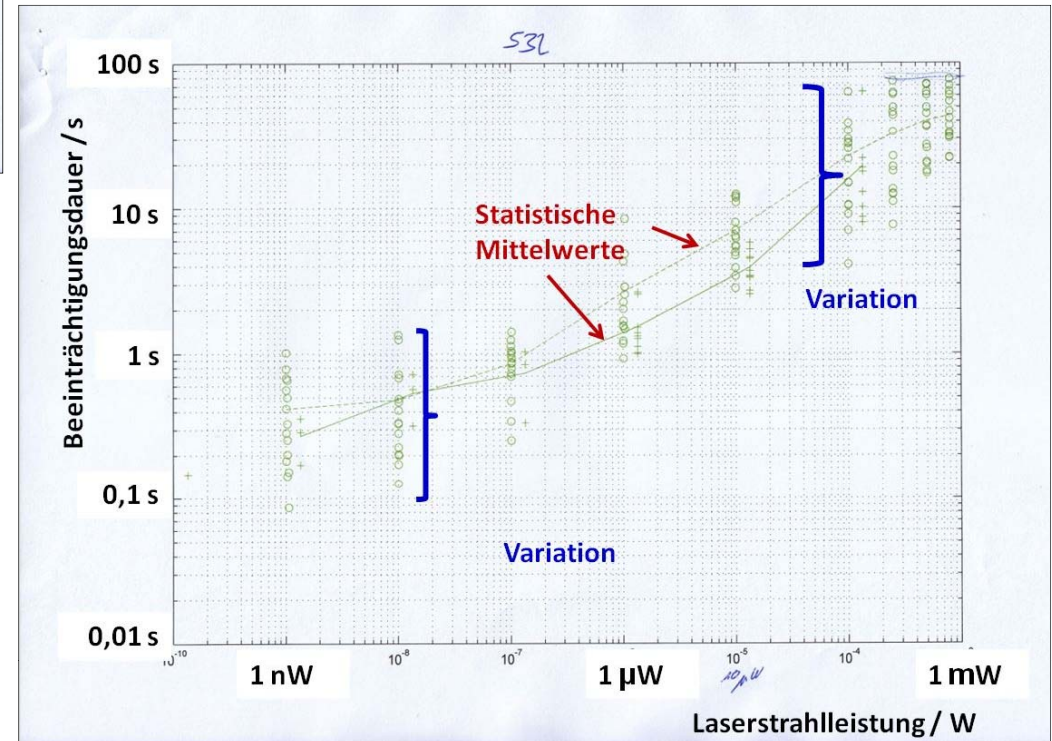
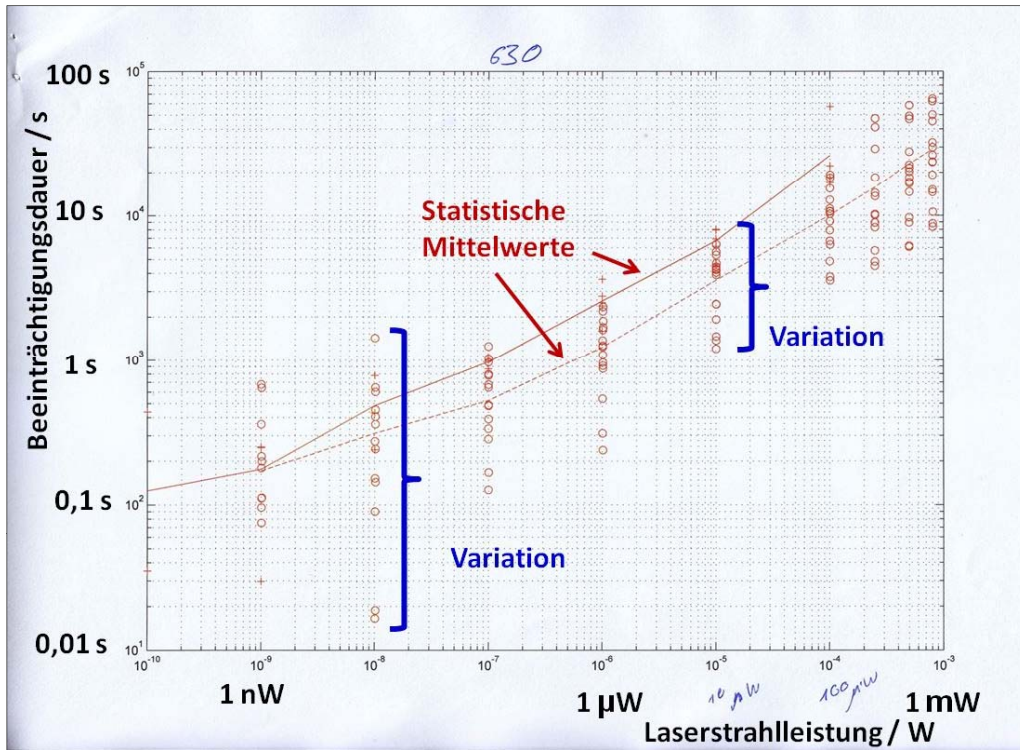


# Hell- und Dunkeladaptation

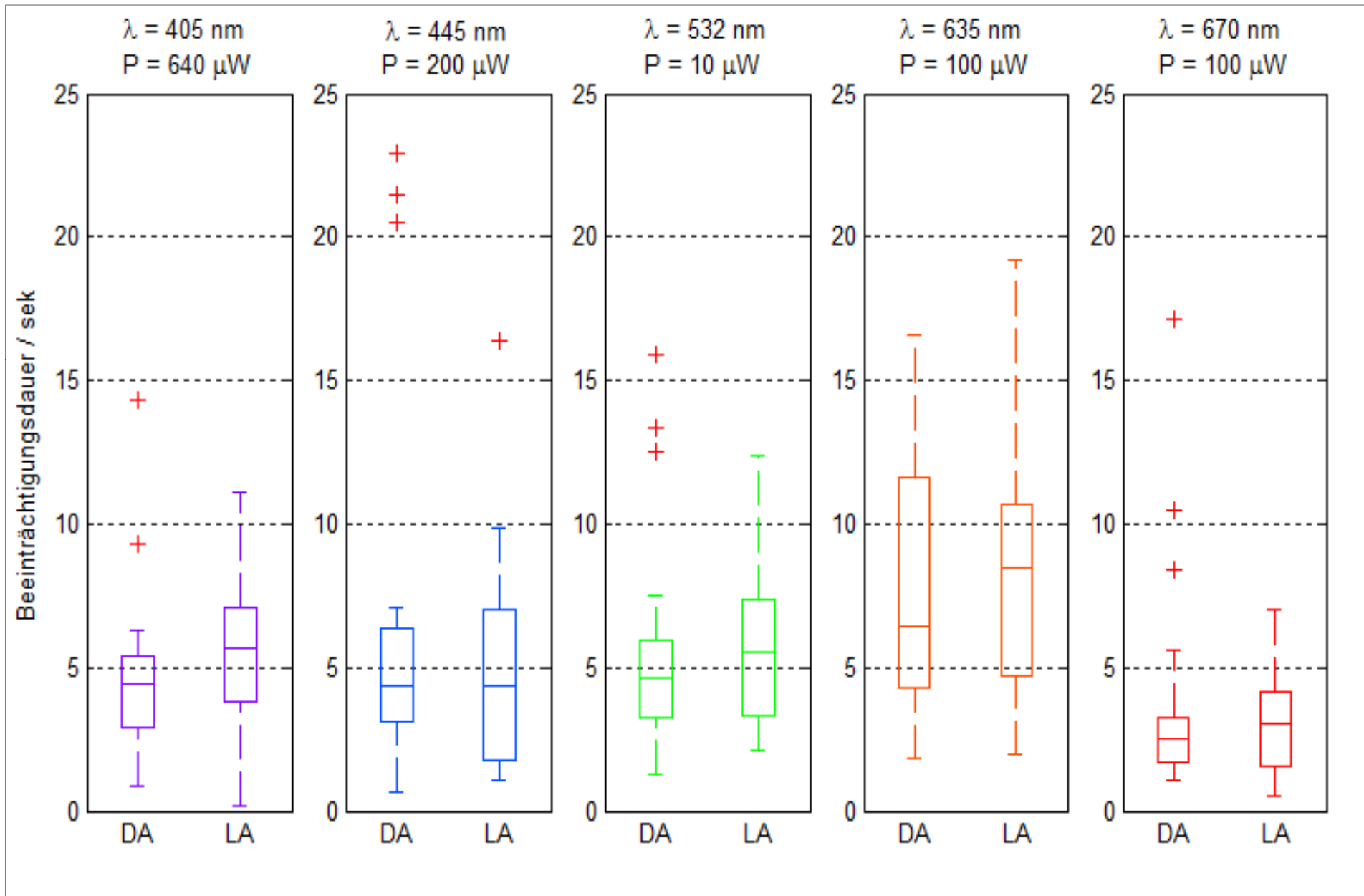
---



Beeinträchtigungsdauer  $t$  als Funktion der Laserstrahlleistung für die Wellenlängen 635 nm und 532 nm bei hell- und dunkeladaptierten Augen;  
 $t_{\text{exp}}$ : 100 ms, Messprotokoll mit Anmerkungen zur Auswertung; Messwerte:  
 + dunkeladaptiert, o helladaptiert, ----- helladaptiert, ——— dunkeladaptiert



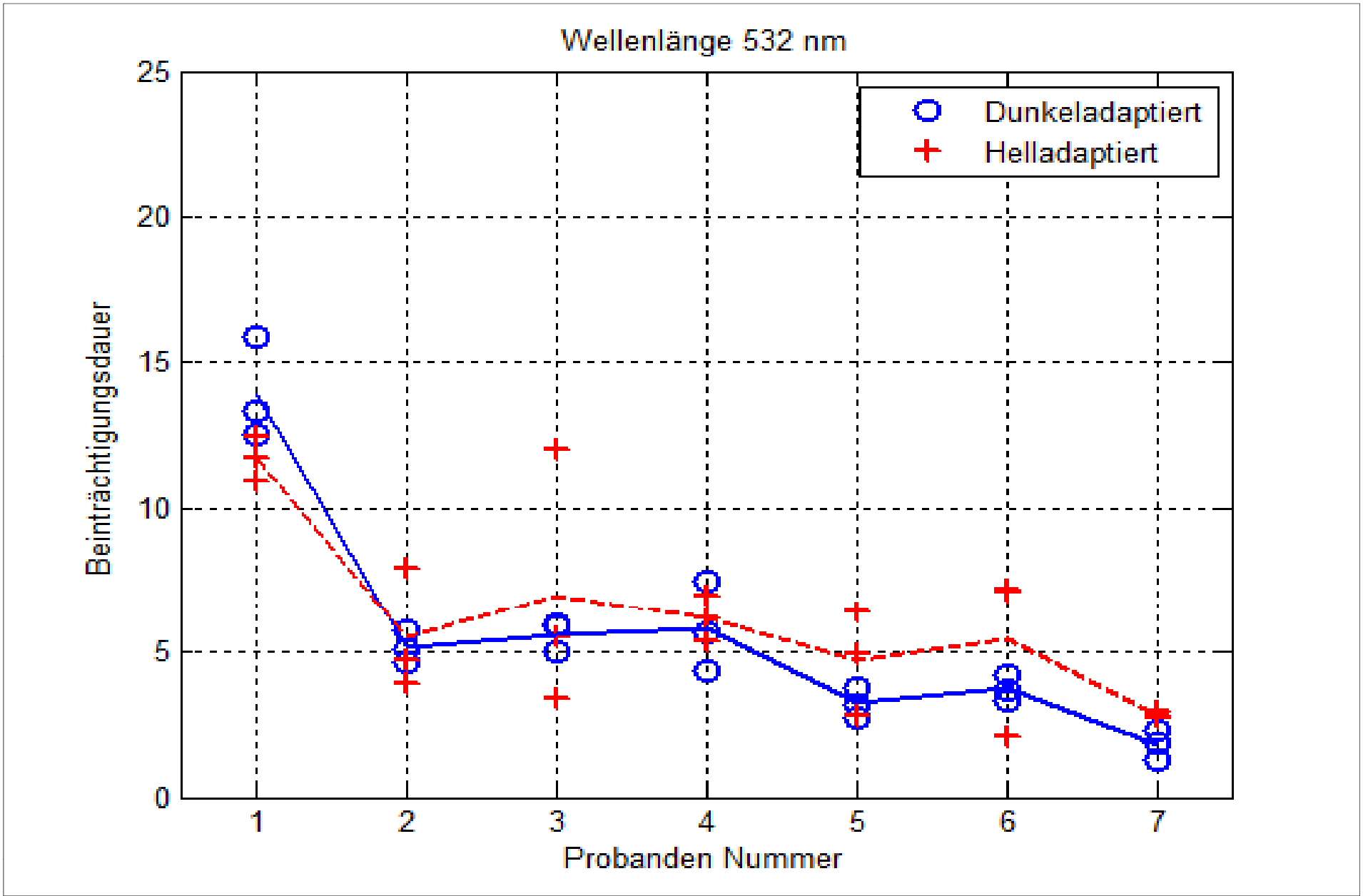
Vergleich der Beeinträchtigungsdauer nach Hell- und Dunkeladaptation bei ausgewählten  
 Expositionsbedingungen für alle 5 untersuchten Wellenlängen (405 nm, 445 nm, 532 nm,  
 635 nm und 670 nm) für bestimmte Laserstrahlleistungen;  
 DA: dunkeladaptiert, LA: helladaptiert; Expositionsdauer: 100 ms

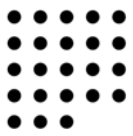




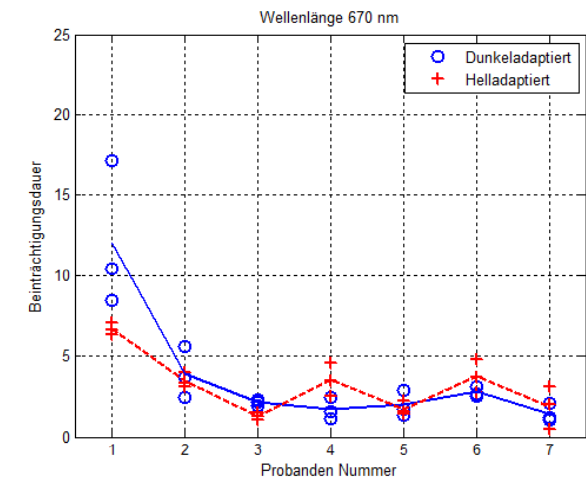
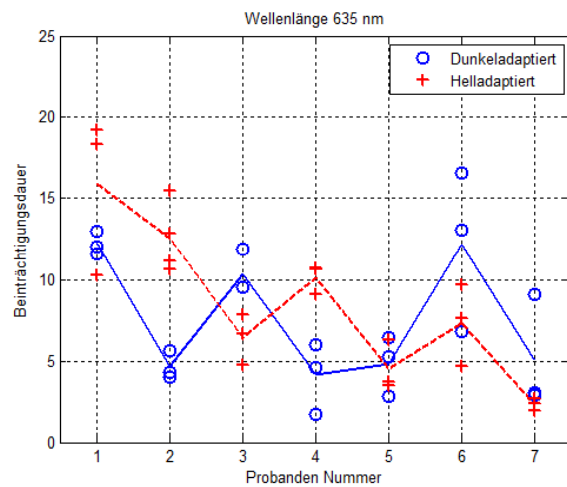
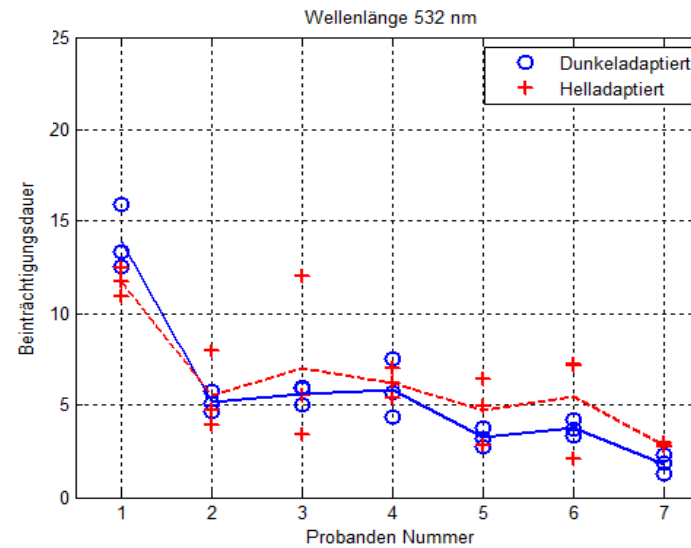
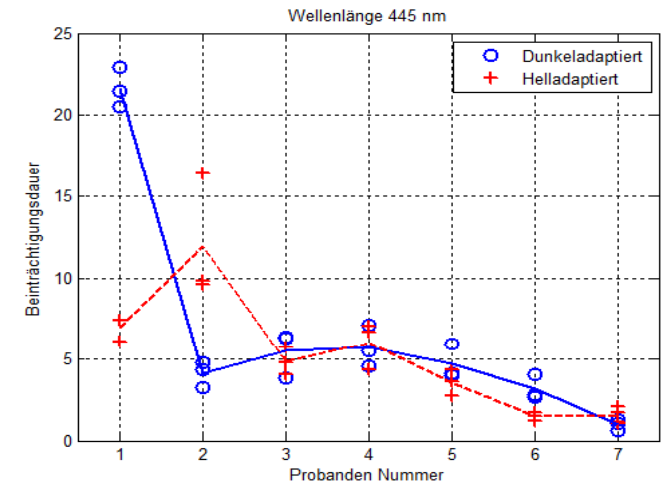
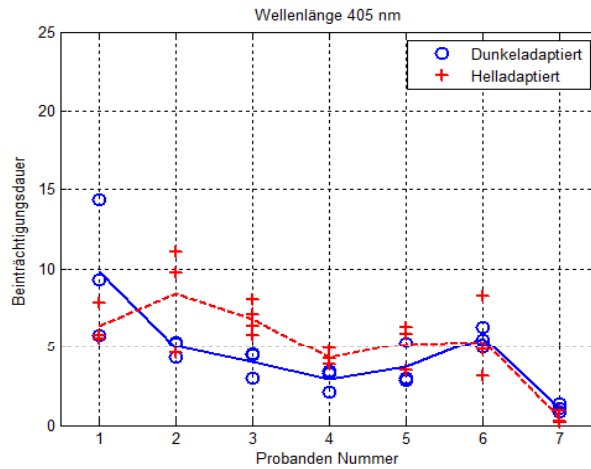


Vergleich der Mittelwerte der Beeinträchtigungsdauer nach Hell- und Dunkeladaptation für alle 7 Versuchsteilnehmer für die Wellenlänge 532 nm;  $t_{exp} = 100$  ms





# Vergleich der Mittelwerte der Beeinträchtigungsdauer nach Hell- und Dunkeladaptation für alle 7 Versuchsteilnehmer für alle 5 eingesetzten Wellenlängen (405 nm, 445 nm, 532 nm, 635 nm und 670 nm); Expositionsdauer: 100 ms







# Fazit: Vorübergehende Blendung und effektive Zone



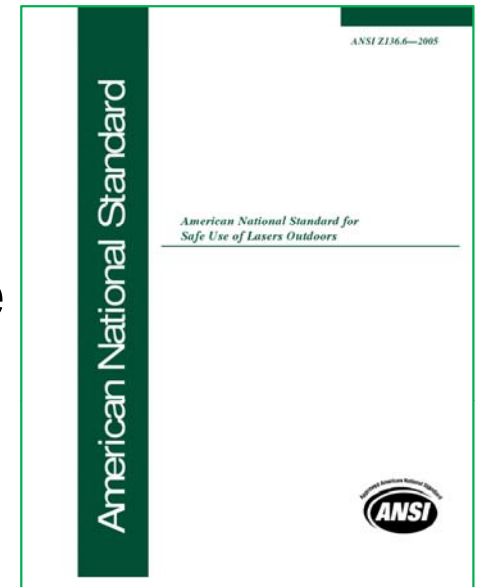
- Blendung tritt bereits relativ weit außerhalb des NOHD auf:

- Zonen-/Bereichs-Definitionen:

- In USA gibt es bereits seit einiger Zeit eine Einteilung in 3 Bereiche/Zonen, wobei bestimmte Effekte/Erscheinungen berücksichtigt werden.



- ❖ **Zonen nach ANSI/FAA**



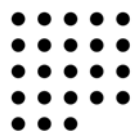
- In Köln haben wir aufgrund von Untersuchungen den gesamten Bereich nach der Zeitdauer einer Beeinträchtigung der Lesefähigkeit/Erkennbarkeit eingeteilt.



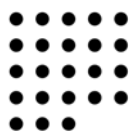
- ❖ **Kölner Modell**



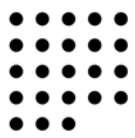
- **Unterschiedliche Laserwellenlängen wurden bezüglich der Beeinträchtigungsdauer untersucht**
- **Relativ kurze Expositionsdauer erzeugt bemerkenswerte Beeinträchtigungen der Sehschärfe**
- **Relativ niedrige Laserstrahlleistungen oder – energien erzeugen bedeutende Beeinträchtigungen**
- **Längere Expositionsdauern erzeugen stärkere Beeinträchtigungen, aber die Verhältnisse sind nichtlinear**
- **Ein Sättigungsverhalten ist feststellbar**
- **Eine Schwelle der Beeinträchtigungsdauer als Funktion der Laserstrahlleistung wurde untersucht.**



- **Wellenlängenabhängige Werte wurden gefunden**
- **532 nm erzeugt den größten Effekt**
- **Funktionale Beziehungen können zur Ableitung von Expositionsblendungsgrenzwerten (EGBW) benutzt werden soweit es um indirekte Auswirkungen vorübergehender Blendung geht**
- **Individuelle Unterschiede bei den beeinträchtigten Sehfunktionen liegen vor (bis zu einem Faktor von etwa 8!)**
- **Bei “Sehforschern” ist es seit langem bekannt, dass die spektrale Empfindlichkeit der Augen von Mensch zu Mensch verschieden ist**



- Der Forschungsbericht kommt bald
  - Er wird recht umfangreich



# Dank an alle Mitwirkenden

- Dipl.-Ing. Klaus Dollinger
- Dipl.-Ing. Dirk Beckmann, M.Sc.
- Dipl.-Ing. Imène Al Ghouz



- Fachhochschule Köln
- Forschungsbereich Medizintechnik und Nichtionisierende Strahlung

- Dipl.-Ing. Günter Ott,
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin



- Dipl.-Phys. Martin Brose
- Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro  
Medienerzeugnisse



