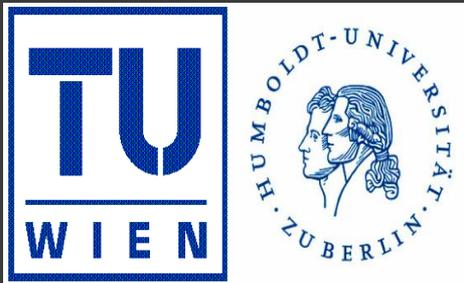


# RANDOM LASER

Laser ohne Resonator



STEFAN PUTZ

[spu@sil.at](mailto:spu@sil.at)

13.05.2009

# Inhalt

2

Einleitung

„konventionelle Laser“

Multiple Streuprozesse

Lichtdiffusion mit optischer Verstärkung

Photonenstatistik

Modenstruktur

Chaotisches Verhalten

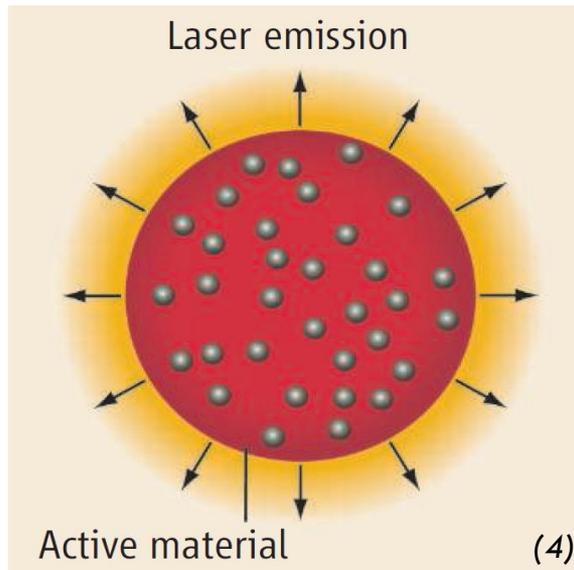
3

# Einleitung

Random Laser

# Randomlaser

4



## Bestandteile

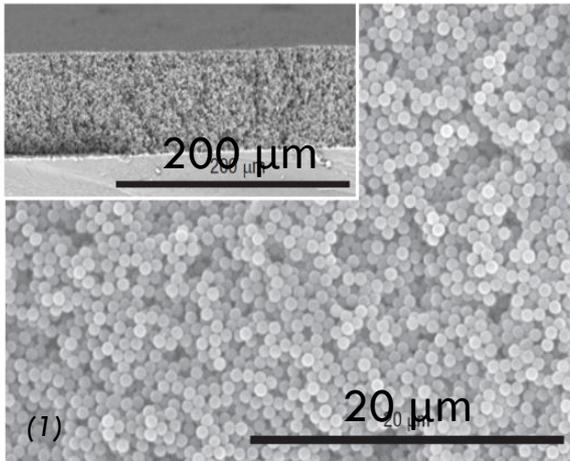
- Teilchen welche das Licht möglichst stark streuen
- Optisches Verstärkungsmedium

Simple Konzept aber theoretisch sehr herausfordernd!

# Random-Medium

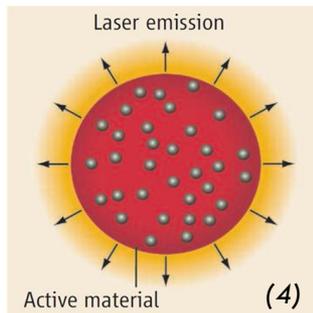
## Unterscheidung in zwei Arten:

5



### Aggregation von aktiven Streupartikeln

- Bsp.: Zinkoxid ZnO

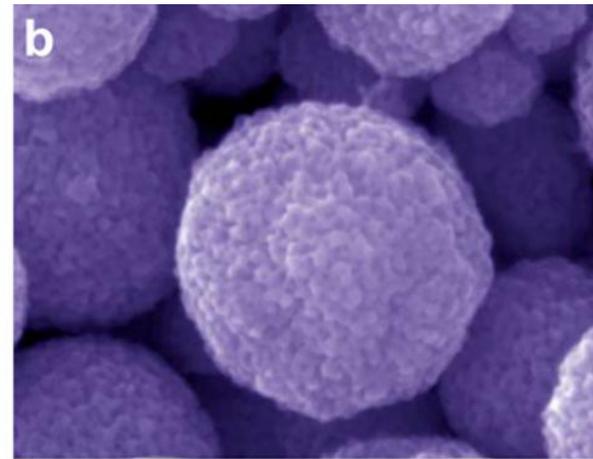
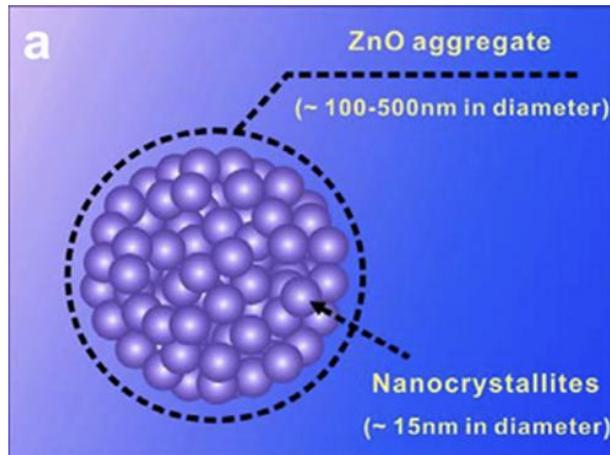


### Passive Streupartikeln in Verstärkermedium

- Poröses Glas dotiert mit Laser-Farbstoff

# ZnO Random-Laser

6



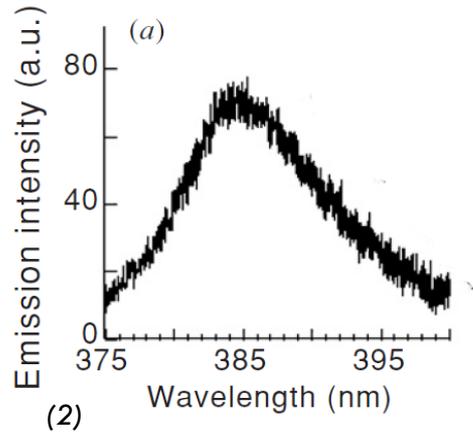
a) schematisch Darstellung eines Clusters aus ZnO Nanokristallen

b) SEM aufnahme eines ZnO Aggregates

(6)

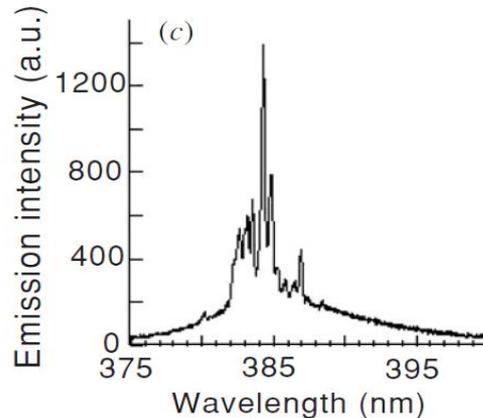
# ZnO Random-Laser

7



Geringe Pumpleistung:

- Spontanes Emissionsspektrum



Pumpleistung groß

- Laserschwelle erreicht
- Starke spektrale Peaks
- **PROBE LASERT!**

# „Motivation“

8

Neuartige Laserquellen sind verfügbar

Stichwort: Nanofabrikationstechniken

Die vorhandene Theorie stellt einen Spezialfall dar.

Ein fundamentales Verständnis der physikalischen Abläufe würde auch das Design substantiell anderer Laserklassen ermöglichen

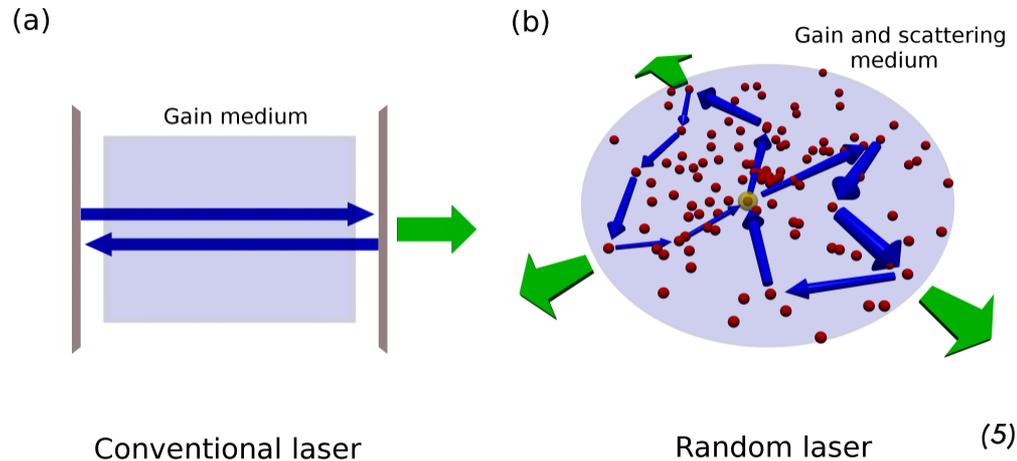
# Random Laser Prinzip

9

Funktionsprinzip **identisch** mit „konventionellen Lasern“

Streuteilchen werden in optisches Verstärkermedium eingebettet

Moden bestimmt durch **multiple Streuprozesse** und nicht durch Resonator



10

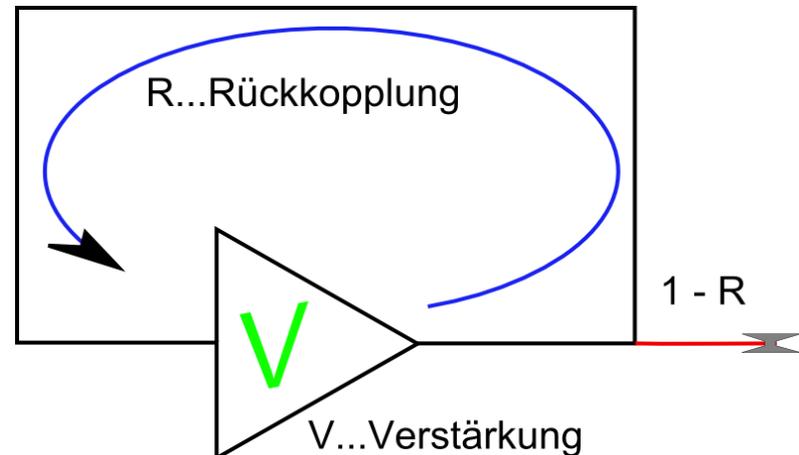
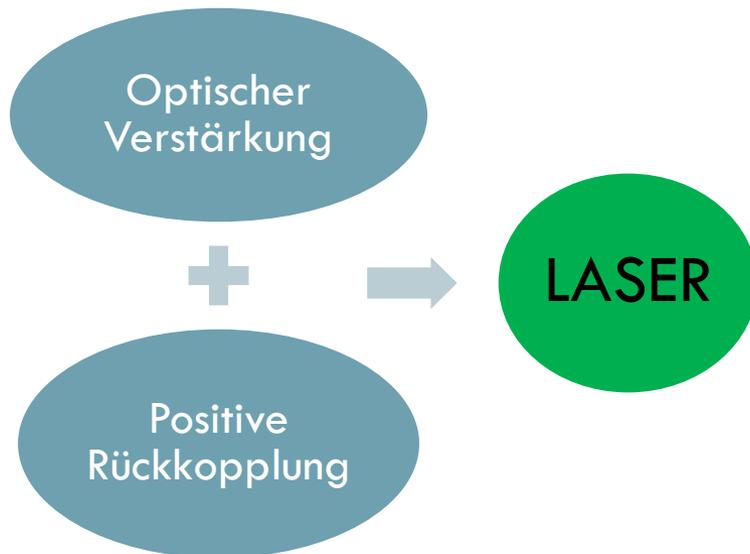
# Konventionelle Laser

## Fabry-Perot Laser

# „konventioneller Laser“

11

- Laser = *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*



Selbsterregte Schwingung wenn:  
 $V \cdot R \geq 1$

# Laserschwelle $p_{th}$ (treshold)

12

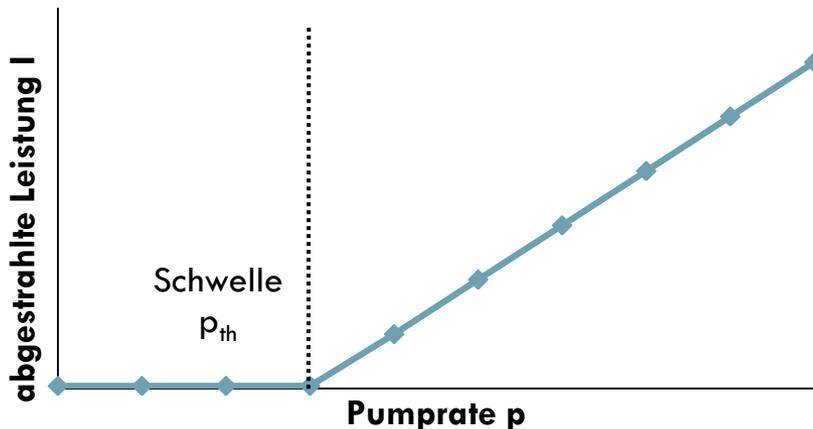
## ABGESTRAHLTE LEISTUNG

- $p < p_{th}$ : nur spontane Emission
- $p > p_{th}$ : Gewinne werden größer als Verluste, **Laserlicht** aus stimulierter Emission entsteht

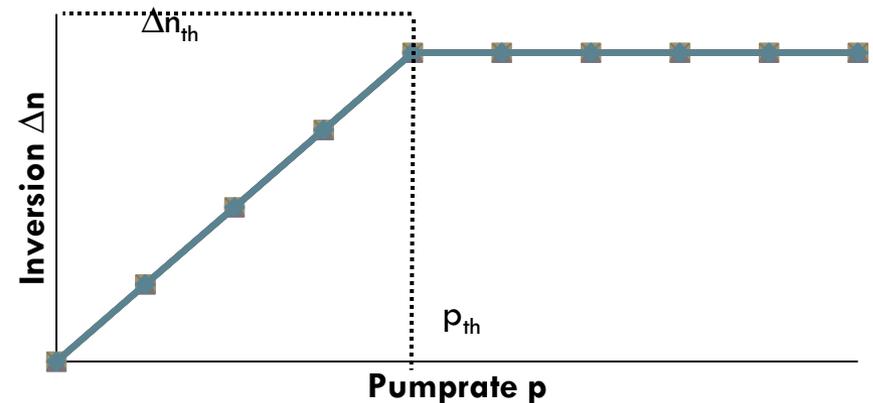
## INVERSION:

- $p < p_{th}$   $\Delta n$  steigt mit  $p$
- $p = p_{th}$  Besetzungsinversion  $\rightarrow V.R = 1$
- $p > p_{th}$   $\Delta n$  bleibt **konstant**  
wachsende Pumpleistung wird abgestrahlt

abgestrahlte Leistung vs. Pumprate



Inversion vs. Pumprate

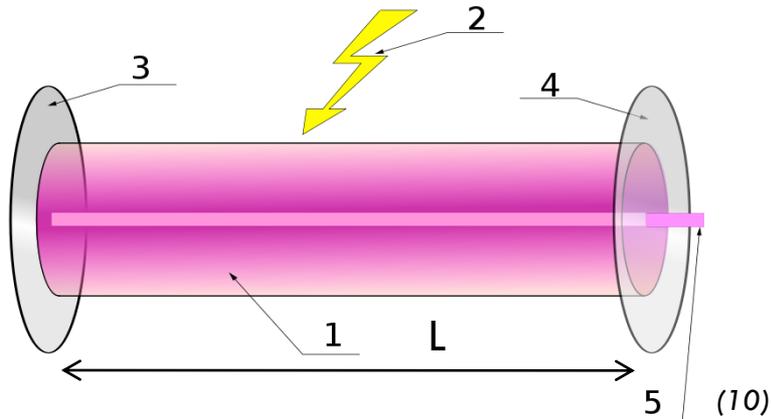


# Lasermoden

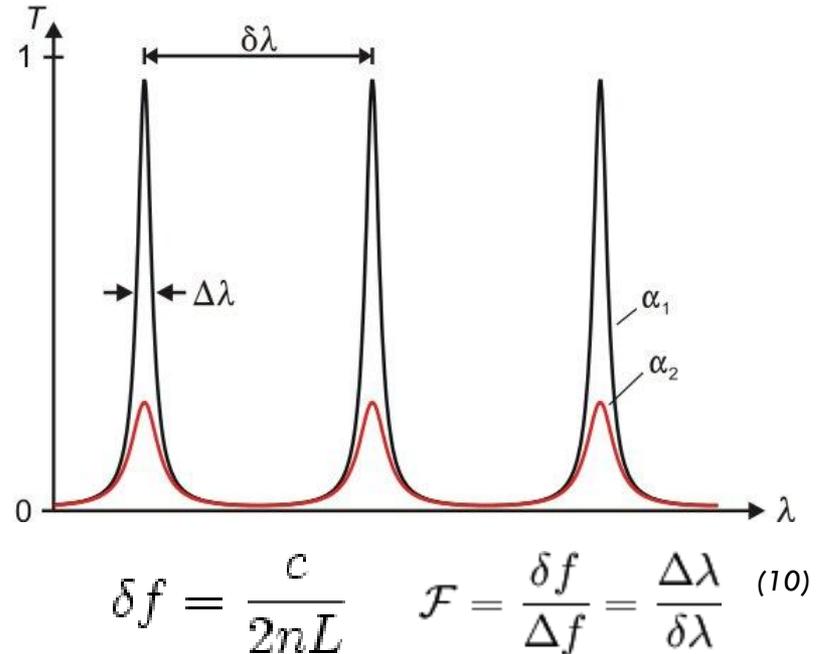
13

Einfachstes Beispiel eines Lasers:  
**Fabry-Perot Laser**

- Modenstruktur durch Resonator bestimmt!
- positive Interferenz an den Spiegeln nur bei bestimmten Moden



1. Aktives Medium(Gain)
2. Pumpenergie
3. Spiegel
4. Teildurchlässiger Spiegel
5. Laserstrahl



n...Brechungsindex L...Spiegelabstand  
 $\alpha$ ...Dämpfung  $\mathcal{F}$ ...Finesse

## Kohärenz ?

- Photonenstatistik eines kohärenten Lasers ist Poisson-Verteilt
- Wie sieht die Photonenstatistik eines Randomlasers aus ?

# Photonenstatistik: Randomlaser

15

Weit über bzw. weit unter der Laserschwelle  
**Bose-Einstein Verteilung der Photonen**



Um die Laserschwelle  
Poisson-Verteilung



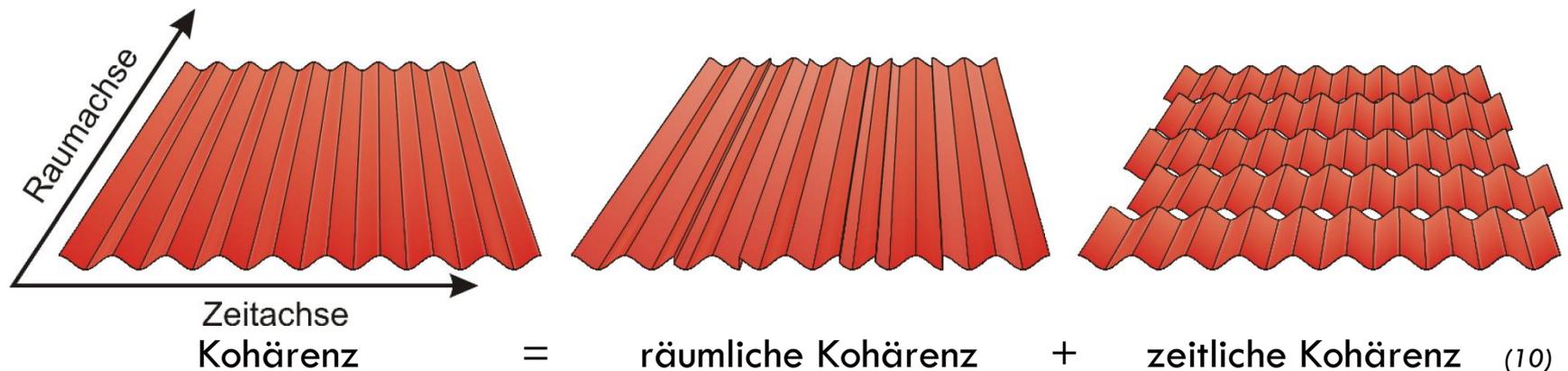
**Kohärentes Laserlicht!**

# Kein Resonator trotzdem kohärent?

16

Um dies zu Verstehen  
unterscheiden wir zwei  
Arten von Kohärenz:

- 1. Ordnung ist ein Maß für die Fluktuationen der Feldamplitude
- 2. Ordnung ist ein Maß für die Fluktuation der Intensität



# Kohärenz 1. Ordnung

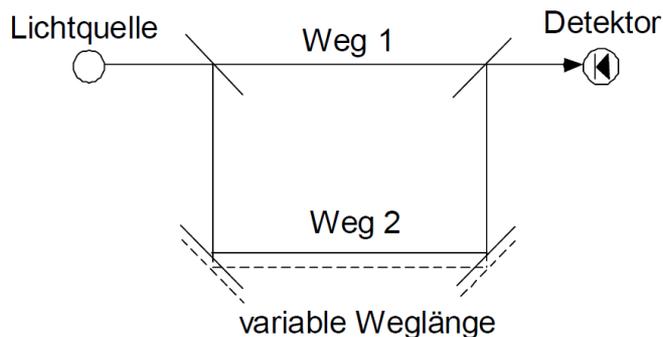
17

## GRUNDLAGEN

Wellengleichung  $\Delta \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$

E-Feld im  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \sum_m \mathbf{A}_m(\mathbf{r}, t) e^{i\varphi_m}$

Intensität:  $I(\mathbf{r}, t) \propto |\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)|^2$



Mach – Zender Interferometer

Intensität am Detektor: Superposition  $E_1$  &  $E_2$

$$E_{out}(t) = E_1(t) + E_2(t) = \frac{1}{2} (E(t) + E(t + \tau))$$

Kohärenzgrad 1. Ordnung

$$\langle E(t)^* \cdot E(t + \tau) \rangle = g^{(1)}(\tau) \langle E^*(t) \cdot E(t) \rangle$$

Klassisch:

$$g^{(1)}(\tau) := \frac{\langle E(t)^* \cdot E(t + \tau) \rangle}{\langle E^*(t) \cdot E(t) \rangle}$$

Quantentheorie:  
Glauber-Zustände

$$g^{(1)} := \frac{\langle \hat{E}_1^- \cdot \hat{E}_2^+ \rangle}{\sqrt{\langle E_1 \cdot E_1^+ \rangle \cdot \langle E_2 \cdot E_2^+ \rangle}}$$

Kohärenzbedingung:  $|g^{(1)}| = 1$

(7)

# Kohärenz 2. Ordnung

18

Ein-Moden-Lichtfeld automatisch Kohärent 1. Ordnung egal ob chaotisch oder kohärent!

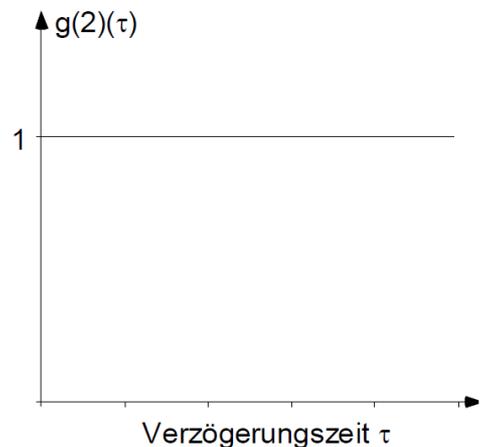
Statistische Eigenschaft des Lichtfeldes durch Intensitätskorrelation!

Intensitätskorrelation:  $g^{(2)}(\tau) := \frac{\langle I(t) \cdot I(t + \tau) \rangle}{\langle I(t) \cdot I(t) \rangle}$

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle E^*(t) \cdot E^*(t + \tau) \cdot E(t + \tau) E(t) \rangle}{\langle E^*(t) \cdot E(t) \rangle^2}$$

Beispiel:

ebene monochromatische Welle:  $E(t) = E_0 \cdot e^{i\omega t}$



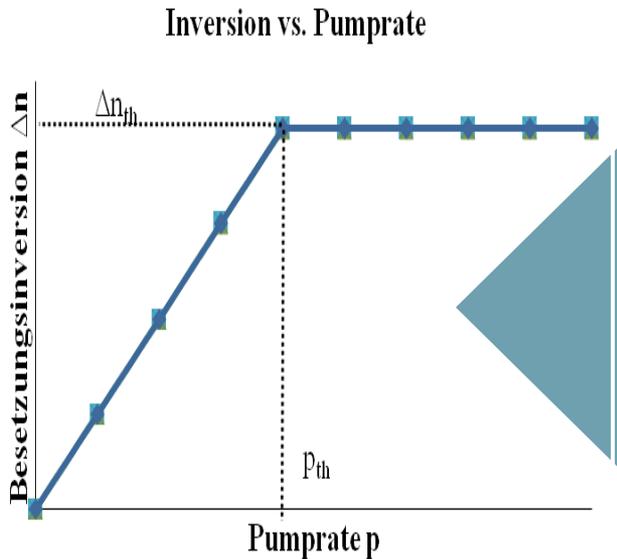
$$\begin{aligned} g^{(2)}(\tau) &= \frac{\langle E_0 \cdot e^{-i\omega t} \cdot E_0 \cdot e^{-i\omega(t+\tau)} \cdot E_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{i\omega(t+\tau)} \rangle}{\langle E_0 \cdot e^{-i\omega t} \cdot E_0 \cdot e^{i\omega t} \rangle^2} \\ &= \frac{\langle E_0^4 \rangle}{\langle E_0^2 \rangle^2} = \frac{E_0^4}{E_0^4} = 1. \end{aligned}$$

POISSONSTATISK!

(7)

# Kohärenz 2. Ordnung

19



Wird erreicht durch Sättigung des Gains im Verstärkungsmedium.

Dieser nicht-lineare Effekt limitiert die Intensität und erhöht gleichzeitig die Kohärenz 2. Ordnung..

Wenn die Lichtemission Kohärent 1. und 2. Ordnung ist spricht man von kohärentem Licht

20

# Multiple Streuprozesse

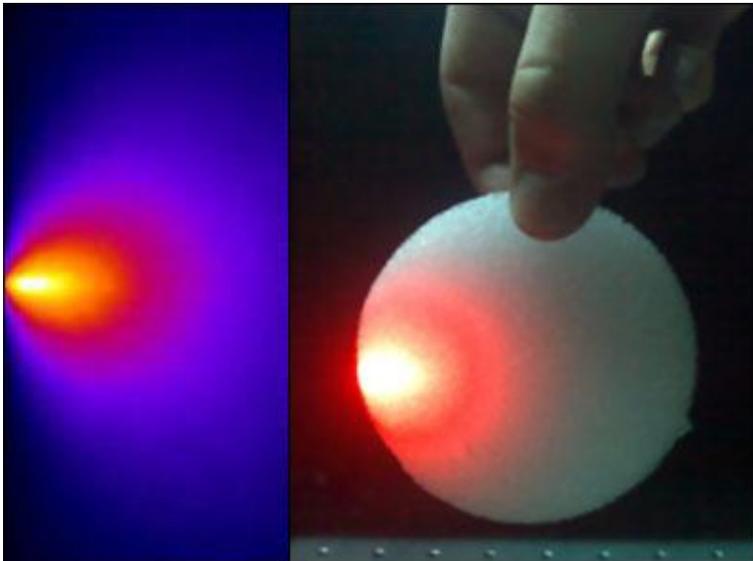
# Multiple Streuprozesse

21

Multiple Streuprozesse sind ein altbekannter Prozess in nahezu allen optischen Medien

Prozess der die visuelle Erscheinung von vielen Gegenständen im alltäglichen Leben bestimmt

- Bsp. Wolken, weiße Farbe, menschliches Gewebe,...

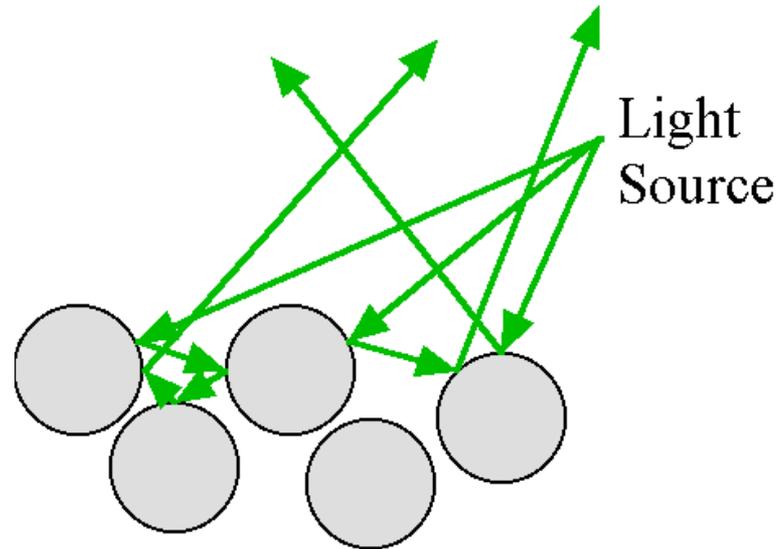


Weitgehend analog mit Diffusion und in vielen Bereichen sind diese Begriffe identisch

Diffusion durch isotropes chaotisches Medium  
links Monte Carlo Simulation ,Rechts: Experiment (8)

# Multiple Streuprozesse

22



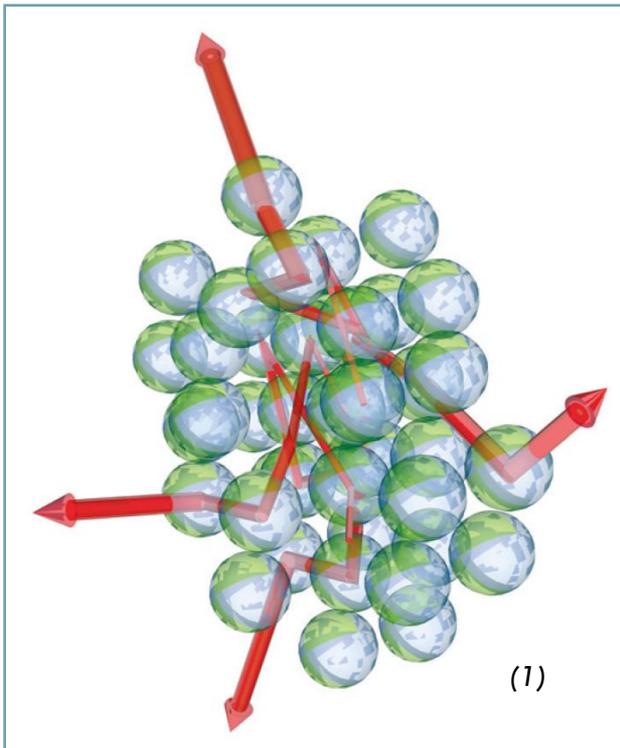
Lambertian reflectance (diffusion) <sup>(11)</sup>

Diffusion von Licht ist eine vereinfachte Betrachtung von multiplen Streuprozessen

**Interferenzeffekte** werden bei der Diffusion von Licht vernachlässigt

# Multiple Streuprozesse in Randomlasern

23



Licht tritt in das **Medium** ein und wird „**gefangen**“. Viele **Streueignisse** finden statt **bis** der **Strahl** wieder **austritt**.

Art der Ausbreitung ist die eines „**Random Walks**“

Fundamentale Parameter:

- Freie Weglänge  $l$  ( $\varnothing$  Schrittweite )
- Diffusionskoeffizient

2 Regime:

- Strahlenoptik  $l \gg \lambda$
- Wellenoptik  $l \approx \lambda$

# Charakteristische Längen

24

## STREUWEGLÄNGE $l_s$

Die  $\emptyset$  Weglänge zwischen 2 aufeinander folgenden Streueignissen



## TRANSPORTWEGLÄNGE $l_t$

Die  $\emptyset$  Weglänge die ein Welle zurücklegt bevor sich die Ausbreitungsrichtung ändert



Elastische  
Streuprozesse an Teilchen in der Größenordnung der  
Lichtwellenlänge

Mie-,Rayleigh-Streuung

# Charakteristische Längen

25

Dimension  $d$  & RL-Abmessung  $L$

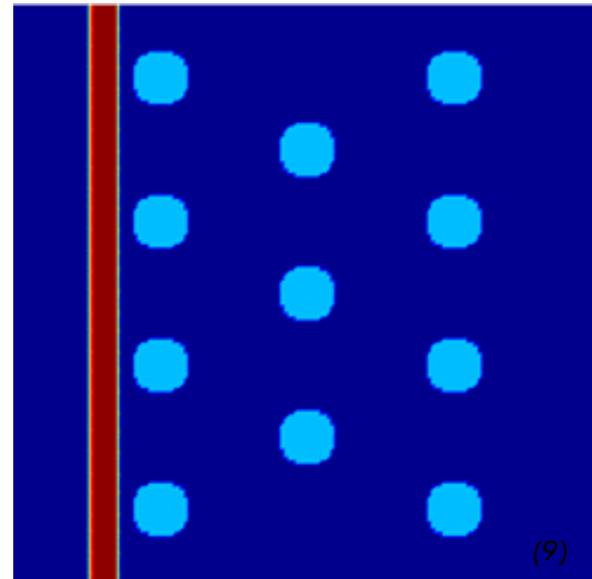
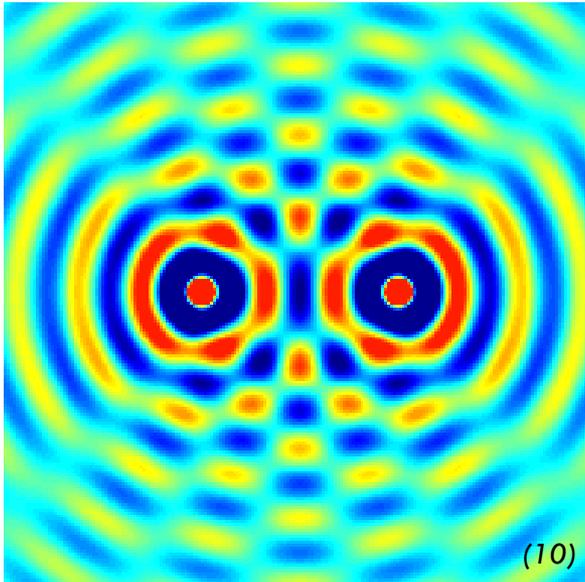
- Für ein Medium mit  $d > 1$ , ist  $L$  der kleinsten Abmessung maßgebend

Ø Verweildauer eines Photons

- $\tau_d = 2 \cdot L / D$
- $D$ ... Diffusionskoeffizient

# Multiple Streuprozesse

26



Streuung in random Materialien ist komplex aber **kohärent**

Interferenzen sind ein wichtiger Parameter eines Randomlasers

27

# Lichtdiffusion mit Verstärkung

Modellvorstellung

# Licht Diffusion mit Verstärkung

28

Für ein System in dem gilt:

**VERSTÄRKUNG  $\sim V$**

folglich

**VERLUSTE  $\sim 0$**

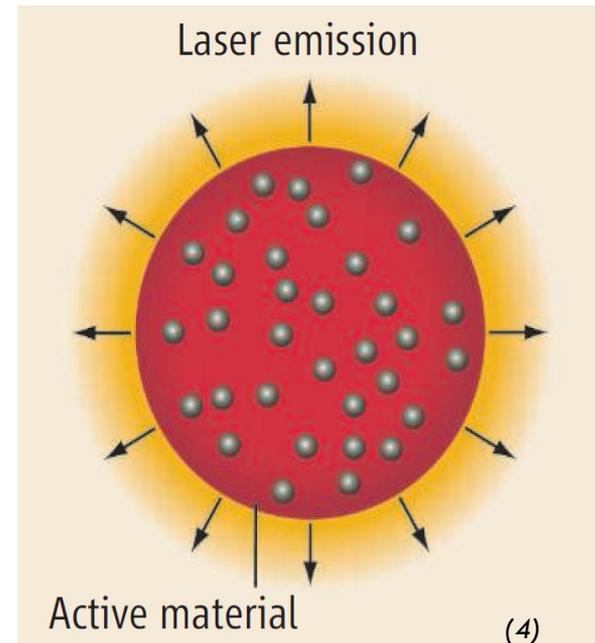


kritisches Volumen existiert

Verstärkung  $>$  Verlust

**Optischer Gewinn möglich**

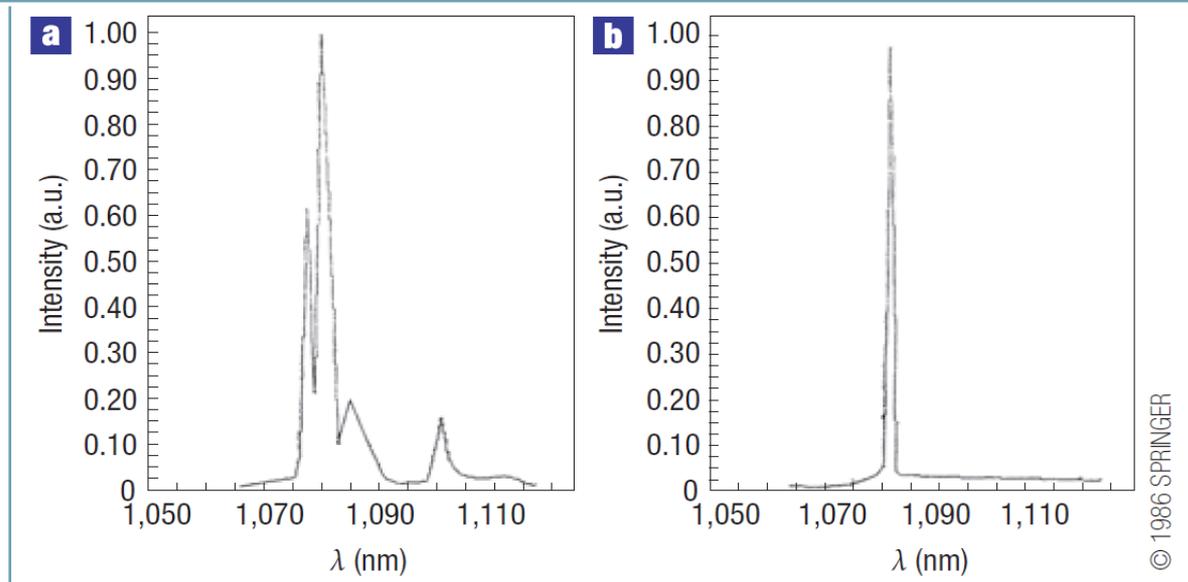
Einfachste Form der  
Beschreibung. Erstmals  
durch Letokhov um 1960



# Licht Diffusion mit Verstärkung

29

Wenn die Verstärkung von der Wellenlänge abhängt, dann treten im Emissionsspektrum Peaks mit maximaler Intensität bei maximaler Verstärkung auf



Neodym Nd<sup>3+</sup> dotiert mit Lanthan-Oxide La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

a) Fluoreszenz Spektrum b) Laserspektrum. (1)

Stefan Putz

13.05.2009

# Licht Diffusion mit Verstärkung

30

Diese einfache Modell ist ein sehr wirkungsvolles Werkzeug um spezielle Emissionseigenschaften eines Randomlasers vorherzusagen

Es trifft aber keine Aussagen über die Modenstruktur, da es einen wichtigen Aspekt in multiplen Streuprozessen vernachlässigt:

**Das Licht unterliegt Interferenzeffekten während es einen Random-Walk im Verstärkermedium zurücklegt**

# Randomlaser

31

spontane verstärkte Emission ohne Resonator



Spektrum ist geprägt durch die Verstärkungskurve



Einführung von Interferenzerscheinungen  
zur Erklärung von Moden



Erweiterung des Modells zum **RANDOMLASER**  
**Randomlaser are mirror-less but not Mode-less**

32

# Modenstruktur

Eines Randomlasers

# Modenstruktur eine RL

33

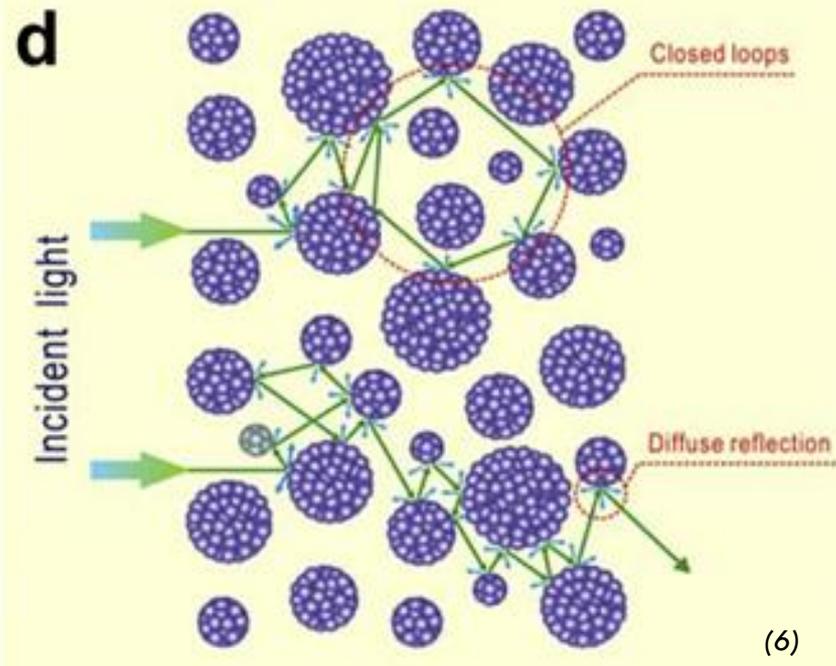
zu berücksichtigen

Dynamische Prozesse im  
Verstärkermedium.

Sättigung der Verstärkung

Interferenzeffekte welche  
Einblick in die Modenstruktur  
liefern

Modellierung schwierig!

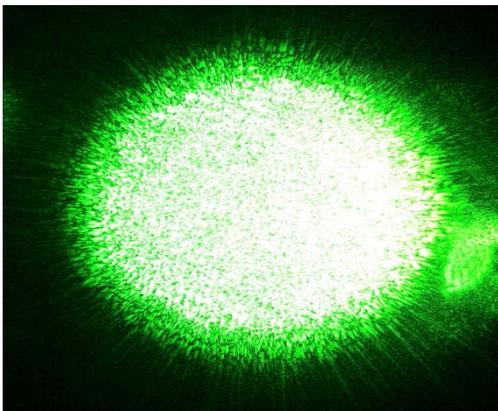


# Ausgedehnte Mode

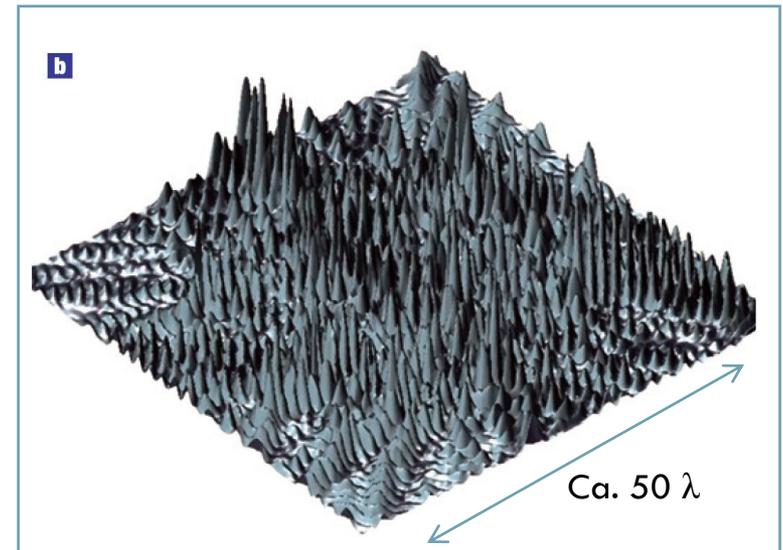
34

Durch Interferenz körnige  
Intensitätsverteilung „Speckle“  
Abstand  $\sim \lambda/2$

Moden breiten sich im gesamten  
Anregungsgebiet aus!



Subjektives  
Speckle-Pattern  
eines grünen  
Laserpointers (10)

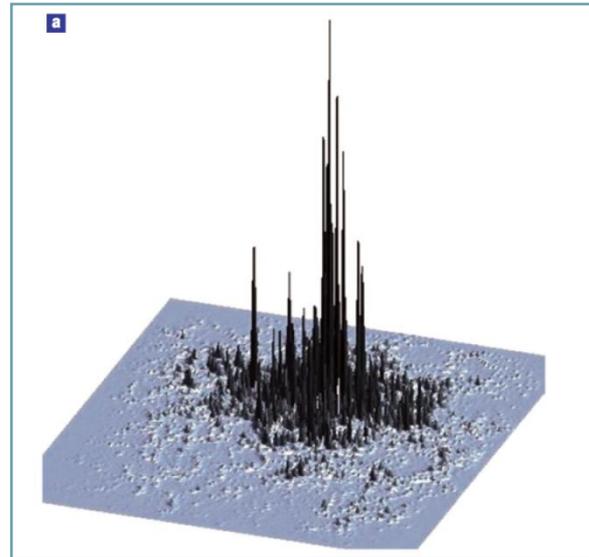


Finite-Differente Zeit-Domain  
Kalkulation der EM- Feld Intensität (7)

# Lokalisierte Moden

35

Variierende  
geschlossene Moden  
mit exponentiell  
abklingenden  
Amplituden



Finite-Differente  
Zeit-Domain  
Kalkulation der  
EM- Feld  
Intensität (1)

Bedingung für  
lokalisierte Moden:

- Materialien welche extrem stark Streuen
- loffe Regel:
  - $k \cdot l \leq 1$   
 $k \dots$  Wellenvektor,  $l \dots$  freie Weglänge

# Modenstruktur eines RL

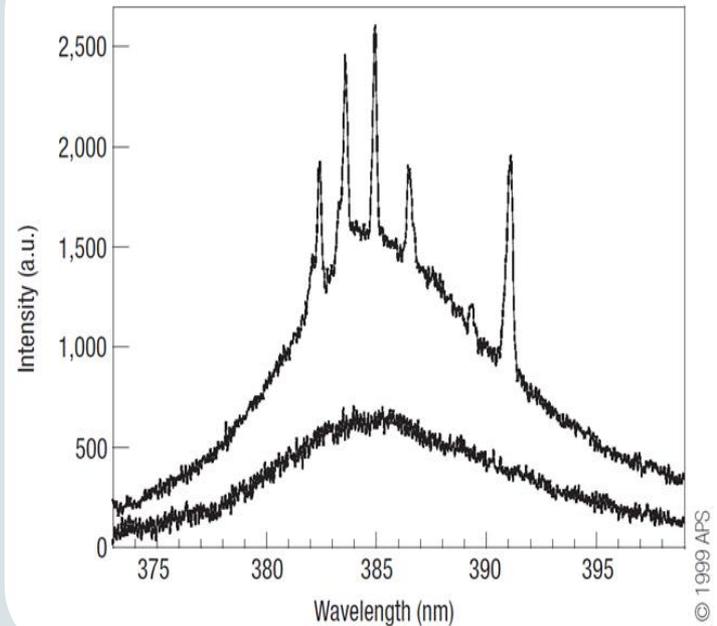
## lokalisierte oder ausgedehnte Moden?

36

Emissionsspektren von Randomlasern zeigen starke spektrale Peaks auch wenn Loffe-Regel nicht erfüllt ist!

Peaks verursacht durch lokale und oder ausgedehnte Moden  
Nicht eindeutig abgeklärt!

Lokalisierte Moden leiden stärker unter Verstärkersättigung



ZnO, Korngröße 100nm  
mit 15ps Pulsen  
 $\lambda = 355\text{nm}$  gepumpt (2)

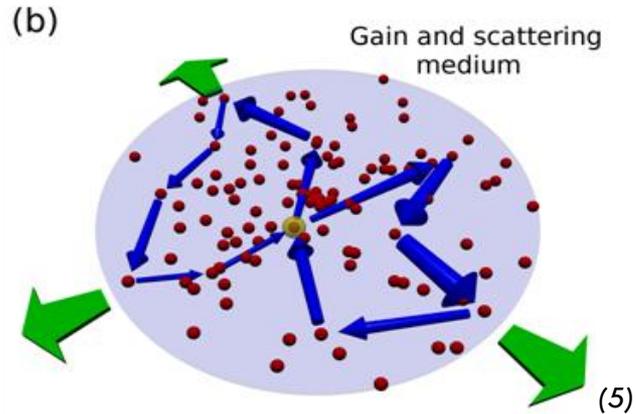
37

# Chaotisches Verhalten

und Levy Statistik

# Chaotisches Verhalten

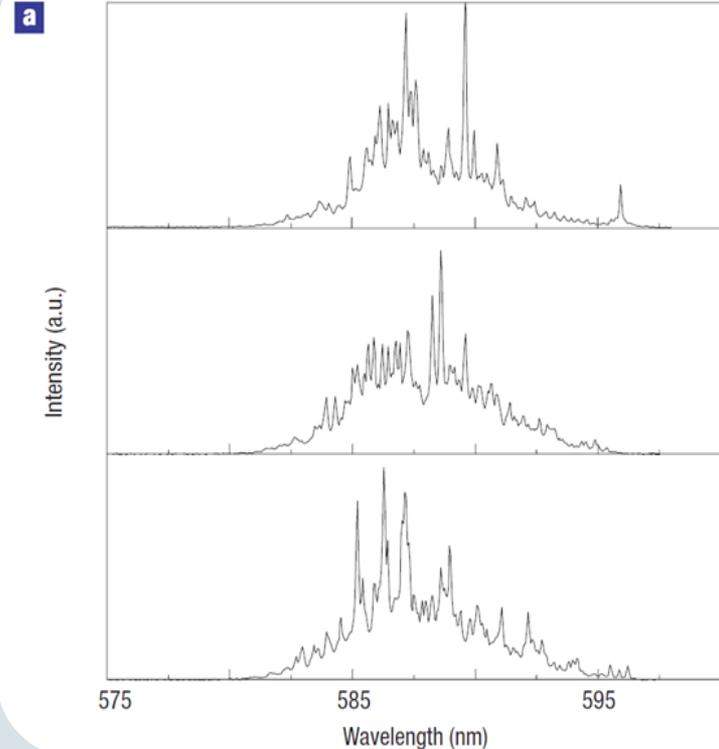
38



Random laser

Emissionsspektren sind unterschiedlich und nicht korreliert von „Shot to Shot“

- Anzahl der Moden  $\infty$   
Mode mit kleinstem Verlust lasert am ehesten



Poröses Glas dotiert mit Laser-Farbstoff, mit 15ps Pulsen bei  $\lambda=532\text{nm}$  gepumpt (1)

Stefan Putz 13.05.2009

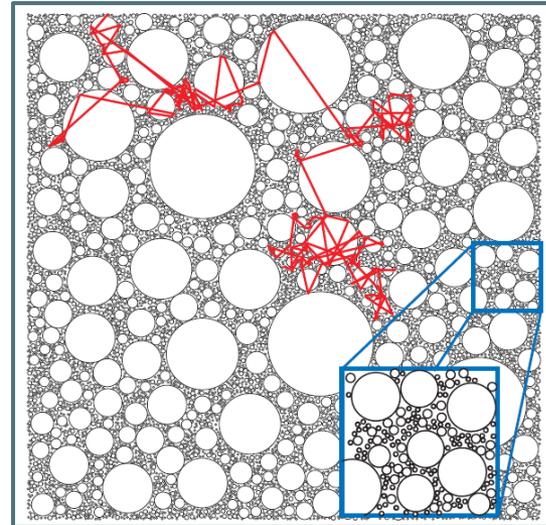
# Levy-Statistik

39

Random-Walk gehorcht  
Levy-Statistik

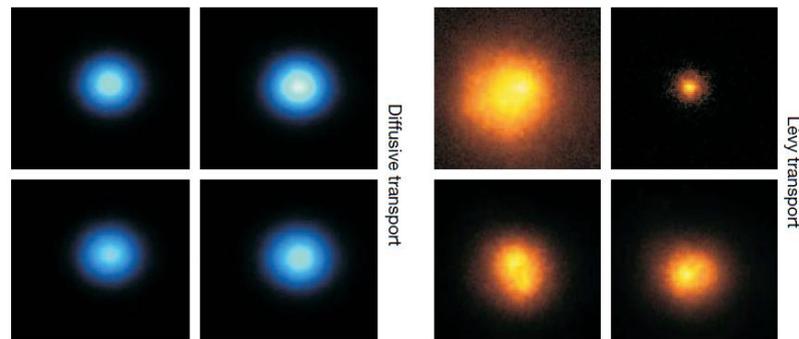
Diffusionsapproximation  
gilt nicht für Levy-Flights

Levy-Statistiken können in vielen  
unterschiedlichen Gebieten  
beobachtet werden.  
(Reiseverhalten von  
Menschen, Nahrungssuche von  
Albertrossen und eben in  
physikalischen  
Transportphänomenen)



Monte-  
Carlo  
Simulation

Super  
diffuse  
Medien  
möglich!  
(3)



normale Diffusion

Super-Diffusion

40

ENDE

# Literatur

41

- 1 D. S. Wiersma, ***The Physics and application of Randomlasers:*** nature physics Vol.4 May 2008
- 2 H. Cao, ***Review on latest developments in Randomlasers with coherent feedback:*** J. Phys. A: Math. Gen. 38 (2005) 10497-10535
- 3 P. Bartelemy, J Bertolotti & D. Wiersma, ***A Levy flight for light:*** nature Vol. 453 May 2008
- 4 J. Bravo & M. Soljagic, ***A unified Picture of Laser Physics:*** science Vol. 320 May 2008
- 5 H. Türeci, L. Ge, S. Rotter & A. Stone, ***Strong Interactions in Multimode Random Lasers:*** science Vol. 320 May 2008

# Literatur

42

- 6 G. Cao, *Popcorn-style dye-sensitized solar cells*: September 2008, SPIE Newsroom
- 7 C. Zimmermann, *Skript Quantenoptik Kapitel 3*: TU Tübingen, Juli 2008
- 8 *Introduction to light diffusion* [http://luxrerum.icmm.csic.es/?q=node/research/light\\_diffusion](http://luxrerum.icmm.csic.es/?q=node/research/light_diffusion)
- 9 N. Saffari, *Modeling of Elastic-Wave Multiple Scattering in Aerospace Composites: Ultrasonic*  
Group Mechanical Engineering - UCL - Torrington Place - London
- 10 Wikipedia.org
- 11 Numb3rs *Reflections on Light*  
<http://nuweb2.neu.edu/math/cp/blog/?id=202&month=02&year=2007&date=2007-02-11>