

Endlich! Licht gestoppt!

Jürgen Schnack

Universität Osnabrück, D-49069 Osnabrück, Germany



<http://obelix.physik.uni-osnabrueck.de/~schnack/>

Scientists Put the Deep Freeze on Light and Slow It Down to 38 Miles Per Hour!

„Light, which travels in a vacuum at almost 300,000 kilometers per second (186,000 miles per second), takes only 8 and 1/3 minutes to journey from the Sun to the Earth. Now a team of physicists has managed to slow the speed down by a factor of 20 million. . . . The physicists have created conditions under which light travels at only 17 meters per second, At that rate, light from the Sun would take almost 300 years to reach Earth. Let's hope that these scientists do not put the brakes on sunlight; otherwise, we may never see the Sun rise again. . . .

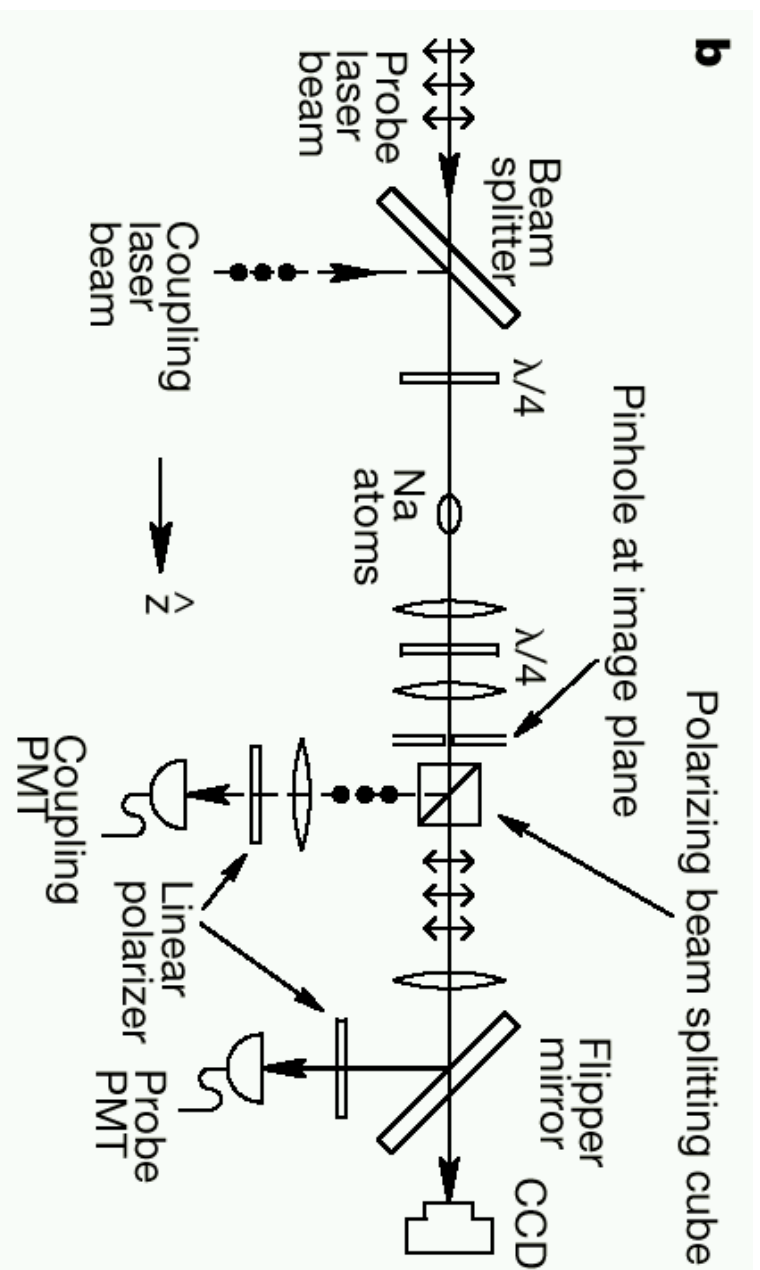
Now what's going on here? Didn't Einstein tell us that the speed of light was constant? Are scientists trying to play a joke on us? Did Einstein make a mistake?“

©Jupiter Scientific Publishing Company

Inhalt

1. Was wurde eigentlich gemessen?
2. Einige Grundlagen der Optik dispersiver Medien
3. Elektromagnetisch Induzierte Transparenz (EIT)
4. Licht bremsen und stoppen
5. Ausblick

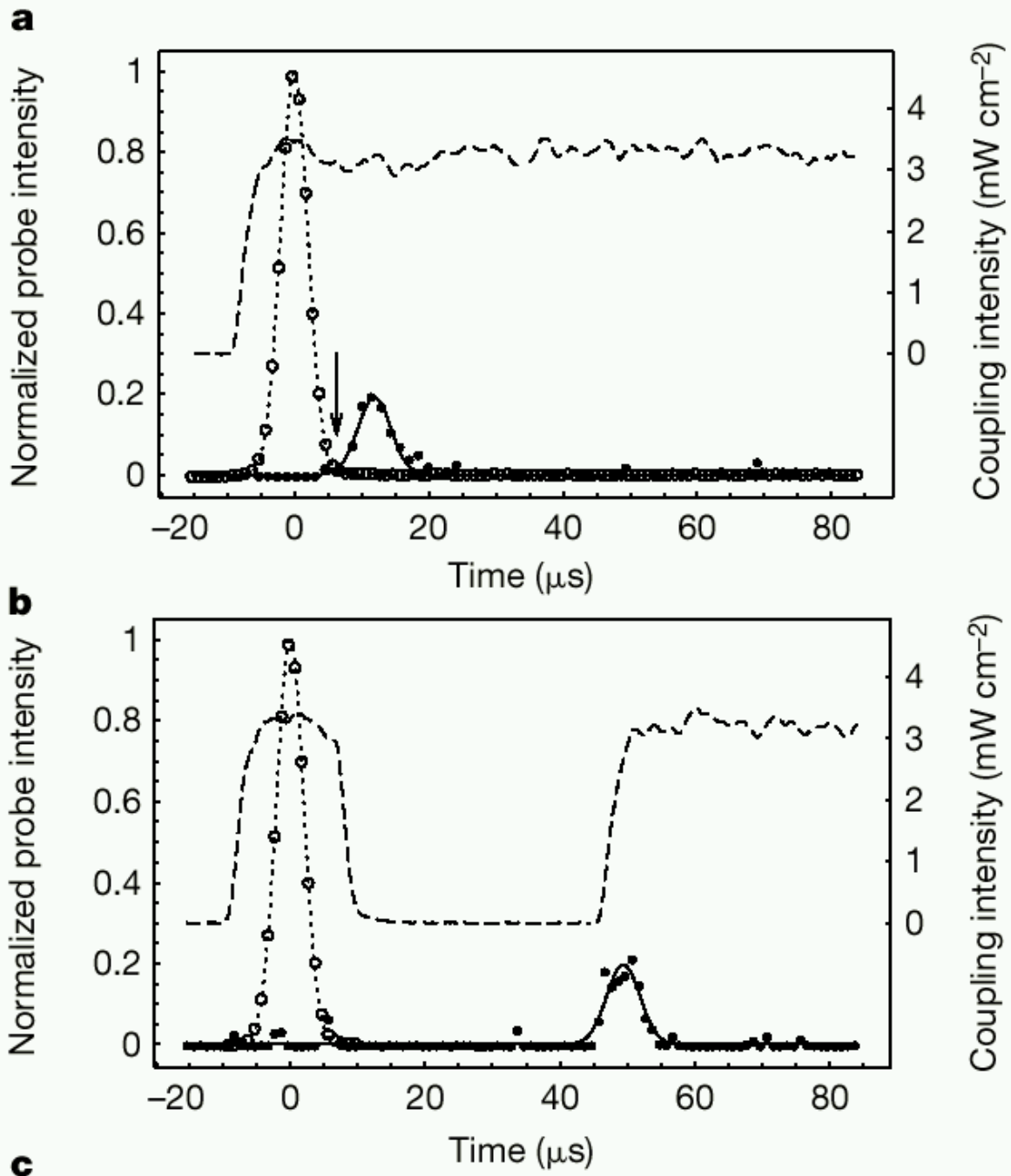
Versuchsaufbau



© Chien Liu et al., Nature (London) **409** (2001) 490.

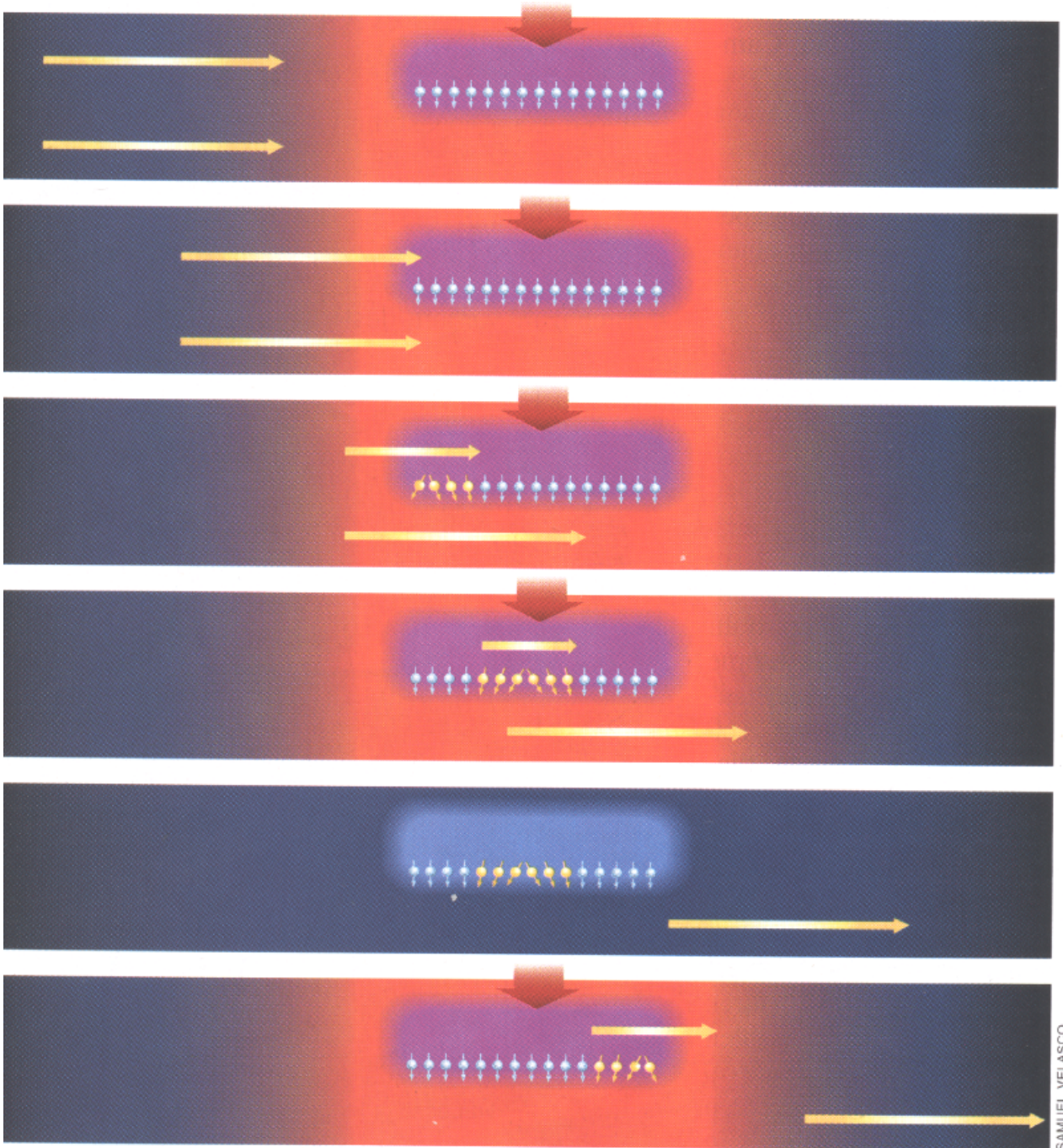
Natrium-Gas: 0.4 mm Länge, 0.05 mm Durchmesser

Pulsverzögerung und Pulsstop



© Chien Liu et al., Nature (London) **409** (2001) 490.

Prinzip



© Spektrum der Wissenschaften

Verlangsamen, Verkürzen ($\propto 10^{-7}$!) und Stoppen des Pulses

Lene Vestergard Hau und Mitarbeiter



©MaryAnn Nilsson, Harvard

Phasen- und Gruppengeschwindigkeit

Phasengeschwindigkeit und absoluter Brechungsindex

$$v_p = \frac{\omega}{k}, \quad n = n_p = \frac{c}{v_p}$$

Gruppengeschwindigkeit und Gruppenbrechungsindex

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}, \quad n_g = \frac{c}{v_g}$$

Gruppengeschwindigkeit in dispersiven Medien

$$\begin{aligned}v_g &= \frac{d\omega}{dk} = \frac{d}{dk} \frac{kc}{n} = v_p - \frac{kc}{n^2} \frac{dn}{dk} \\ &= v_p \left(1 - \frac{k}{n} \frac{dn}{dk} \right)\end{aligned}$$

⇒ Mathematica notebooks

Beispiel: Brechzahlen von Glas

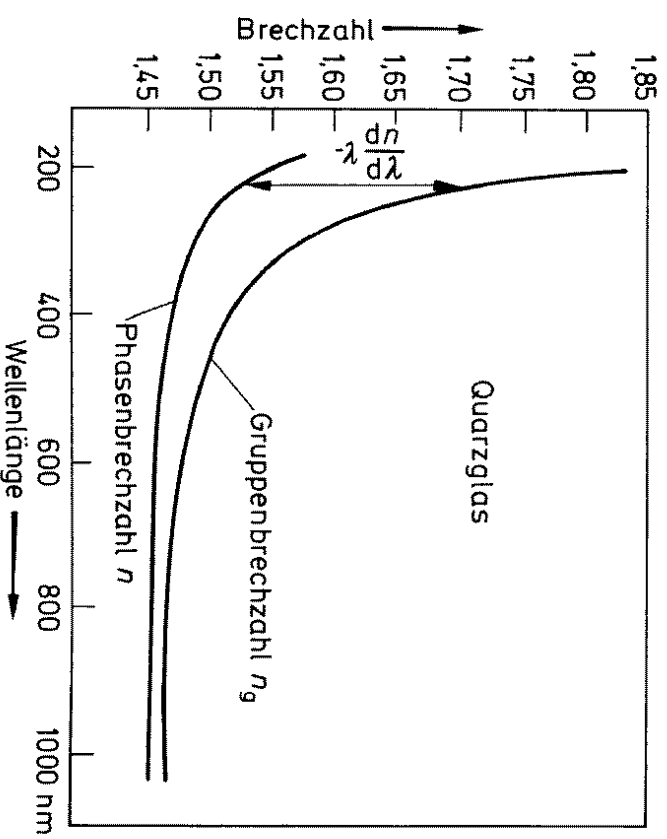


Abb. 2.7 Phasen- und Gruppenbrechzahl von Quarzglas [11].

Wie bekomme ich eine hohe Gruppenbrechzahl?

- Brechzahl ändert sich besonders stark in der Nähe von Resonanzen,
- schmales Frequenzintervall für Transparenz garantiert gleichzeitig, dass $n(k)$ in diesem Bereich stark variiert,
- \Rightarrow Elektromagnetisch Induzierte Transparenz (EIT) realisiert diese Bedingungen,
- erläutere deshalb im Folgenden wie man mit EIT ein möglichst schmales Frequenzintervall für Transparenz herstellt.

Elementare Theorie der Dispersion

Modell: getriebener, gedämpfter harmonischer Oszillator

$$\frac{\tilde{n}^2(\omega) - 1}{\tilde{n}^2(\omega) + 2} = \frac{e^2 N/V}{3\epsilon_0 m_e} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}$$

N/V – Dipoldichte

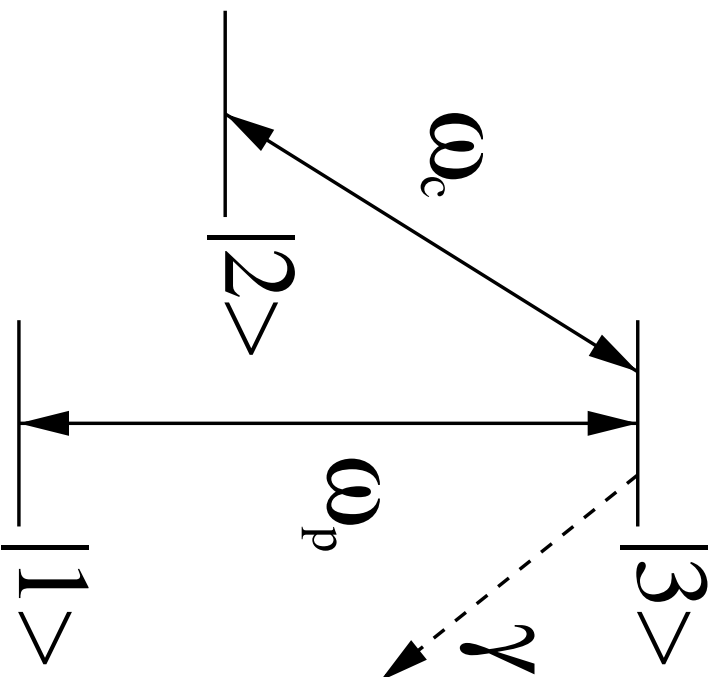
$$\tilde{n} \approx 1$$

$$\tilde{n}^2(\omega) \approx 1 + \frac{e^2 N/V}{\epsilon_0 m_e} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}$$

komplexer Brechungsindex $\tilde{n}(\omega)$: Realteil absoluter Brechungsindex, Imaginärteil beschreibt Absorption, d.h. Dämpfung des Feldes im Medium;

$\tilde{n}(\omega)$ variiert in der Nähe von Resonanzen besonders stark

Prinzip (Zusammenfassung)



- Dreinevensystem; Niveau $|1\rangle$ sei besetzt
- Einstrahlung von Licht der Frequenz ω_p („probe“): Absorption
- zusätzliche Einstrahlung von Licht der Frequenz ω_c („coupling“): Umbesetzung wird verhindert, keine Absorption
- \Rightarrow induzierte Transparenz
- \Rightarrow besetzter Zustand bleibt besetzt: „coherent population trapping“^a \equiv „dark state“
- starke Variation des Brechungsindex in der Umgebung von ω_p

^aG. Alzetta, A. Gozzini, L. Moi, G. Orriols, Nuovo Cimento B **36** (1976) 5

Hamiltonoperator

$$\tilde{H} = \tilde{H}_0 + \tilde{H}_{\text{WW}}(t)$$

$$\tilde{H}_0 = |1\rangle E_1 \langle 1| + |2\rangle E_2 \langle 2| + |3\rangle E_3 \langle 3|$$

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{\text{WW}}(t) = & |1\rangle \hbar \Omega_p e^{i\omega_p t} \langle 3| + |3\rangle \hbar \Omega_p^* e^{-i\omega_p t} \langle 1| \\ & + |2\rangle \hbar \Omega_c e^{i\omega_c t} \langle 3| + |3\rangle \hbar \Omega_c^* e^{-i\omega_c t} \langle 2| \end{aligned}$$

- $\hbar \Omega_{p/c}$ – Wechselwirkungsstärke des atomaren Systems mit probe/coupling-Laser;
- Laserpuls wird als Produkt aus ebener Welle und (schwach) zeitabhängiger Amplitude beschrieben: $\vec{E}_p(t) = \vec{E}_p^0(t) e^{i\omega_p t}$;
- $\hbar \Omega_p = -\vec{E}_p^0 \cdot \langle 1 | \vec{d} | 3 \rangle$, $\Omega_{p/c}$ heißen Rabi-Frequenzen, \vec{d} ist der Dipoloperator

Wechselwirkungsbild

$$|\Psi(t)\rangle = \sum_{n=1}^3 c_n(t) e^{-iE_n t} |n\rangle$$

$$i \begin{pmatrix} \dot{c}_1(t) \\ \dot{c}_2(t) \\ \dot{c}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \Omega_p \\ 0 & 0 & \Omega_c \\ \Omega_p^* & \Omega_c^* & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \\ c_3(t) \end{pmatrix}$$

- $i\dot{c}_3(t) = \Omega_p^* c_1(t) + \Omega_c^* c_2(t)$
- Absorption: $\frac{d}{dt} (c_3 c_3^*) > 0$
- keine Absorption: $\dot{c}_3(t) = 0 \Rightarrow \frac{c_1(t)}{c_2(t)} = -\frac{\Omega_c^*}{\Omega_p^*}$

Basis der hellen und dunklen Zustände

$$|-\rangle = \frac{i}{\Omega} [\Omega_c^* |1\rangle - \Omega_p^* |2\rangle] \quad , \quad |+\rangle = \frac{1}{\Omega} [\Omega_p |1\rangle + \Omega_c |2\rangle]$$

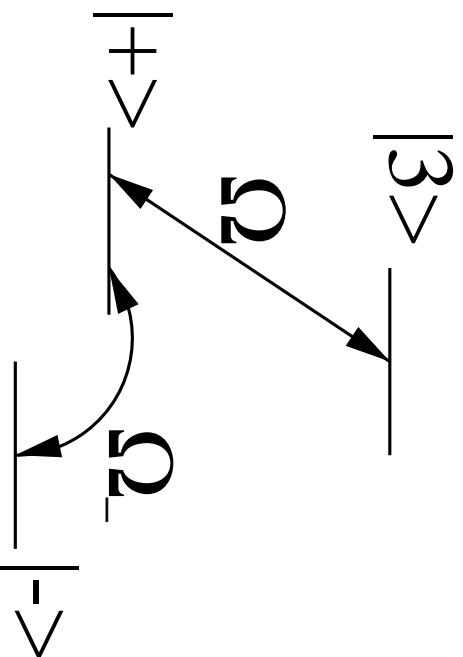
$$\Omega = \sqrt{|\Omega_p|^2 + |\Omega_c|^2}$$

$$i \begin{pmatrix} \dot{c}_+(t) \\ \dot{c}_-(t) \\ \dot{c}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \Omega \\ 0 & 0 & 0 \\ \Omega & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_+(t) \\ c_-(t) \\ c_3(t) \end{pmatrix}$$

Dunkelzustand $|-\rangle$ von Wechselwirkung entkoppelt,

d.h. wenn $c_-(t) = 1$, dann keine Absorption

Berücksichtigung zeitabhängiger Rabi-Frequenzen



M. Fleischhauer, A.S. Manka,
Phys. Rev. A **54** (1996) 794

- Rabi-Frequenzen zeitabhängig, können allerdings reell gewählt werden

- Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit führt auf

$$i \begin{pmatrix} \dot{c}_+(t) \\ \dot{c}_-(t) \\ \dot{c}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \Omega_- & \Omega \\ \Omega_- & 0 & 0 \\ \Omega & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_+(t) \\ c_-(t) \\ c_3(t) \end{pmatrix}$$

$$\Omega_- = \frac{\dot{\Omega}_p}{\Omega_p} - \frac{\dot{\Omega}_c}{\Omega_c}$$

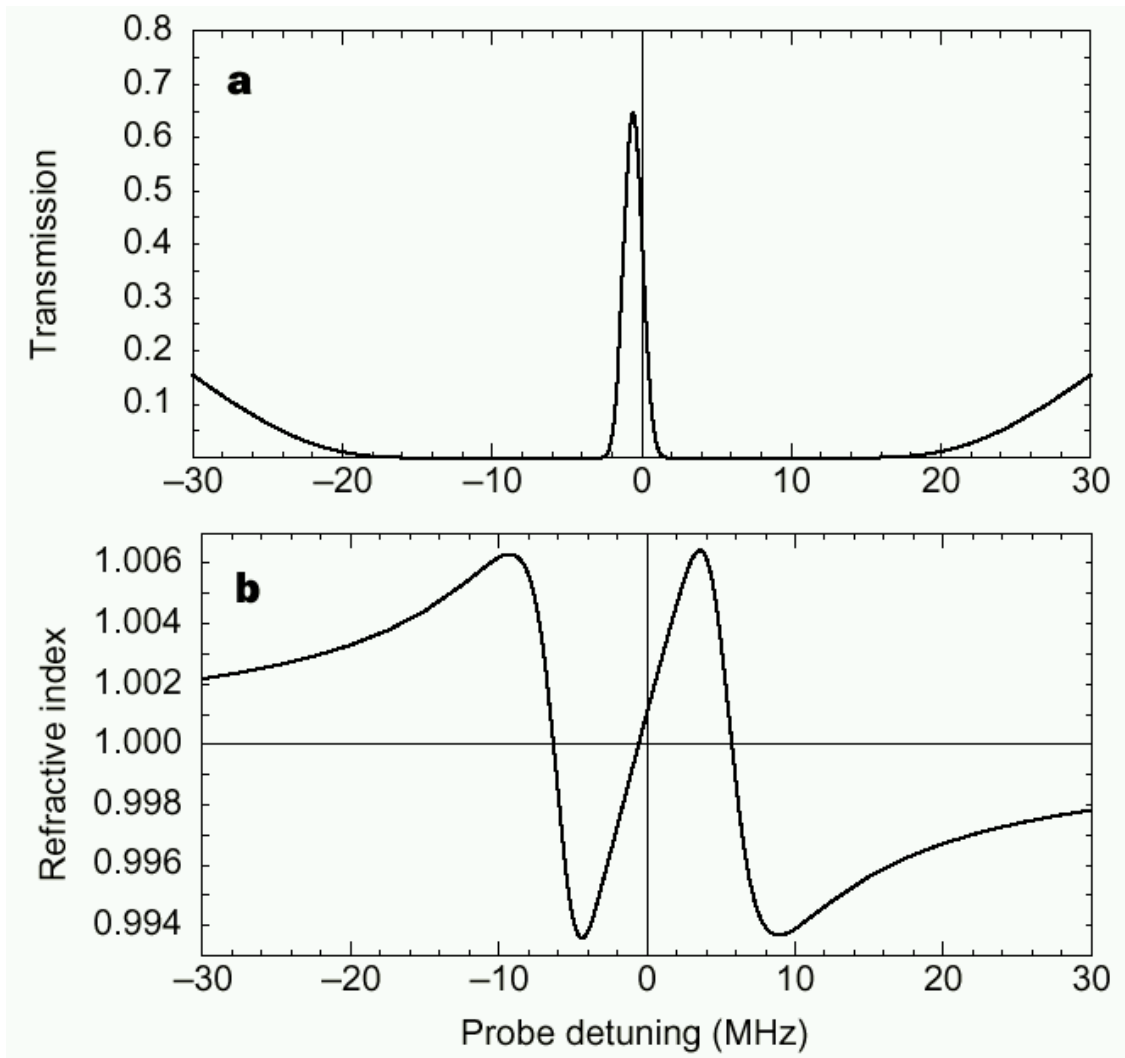
- Ziel: Anfangsbesetzung, z.B. $c_1(0) = 1$, in Besetzung von $|-\rangle$ überführen

Abgestimmte Pulse

$$|-\rangle = \frac{i}{\Omega} [\Omega_c |1\rangle - \Omega_p |2\rangle]$$

- $t = 0$: $c_1(0) = 1$,
- strahle Kopplungslaser ein: $|-\rangle = |1\rangle$,
- strahle zusätzlich Probe-Laser ein, aber so dass $\Omega_- = \dot{\Omega}_p/\Omega_p - \dot{\Omega}_c/\Omega_c \approx 0$,
- dann $c_-(t) \approx 1 \quad \forall t$,
- Pulse, die $\Omega_- = 0$ erfüllen, werden abgestimmt Pulse (matched pulses) genannt,
- abgestimmte Pulse bilden sich selbst!

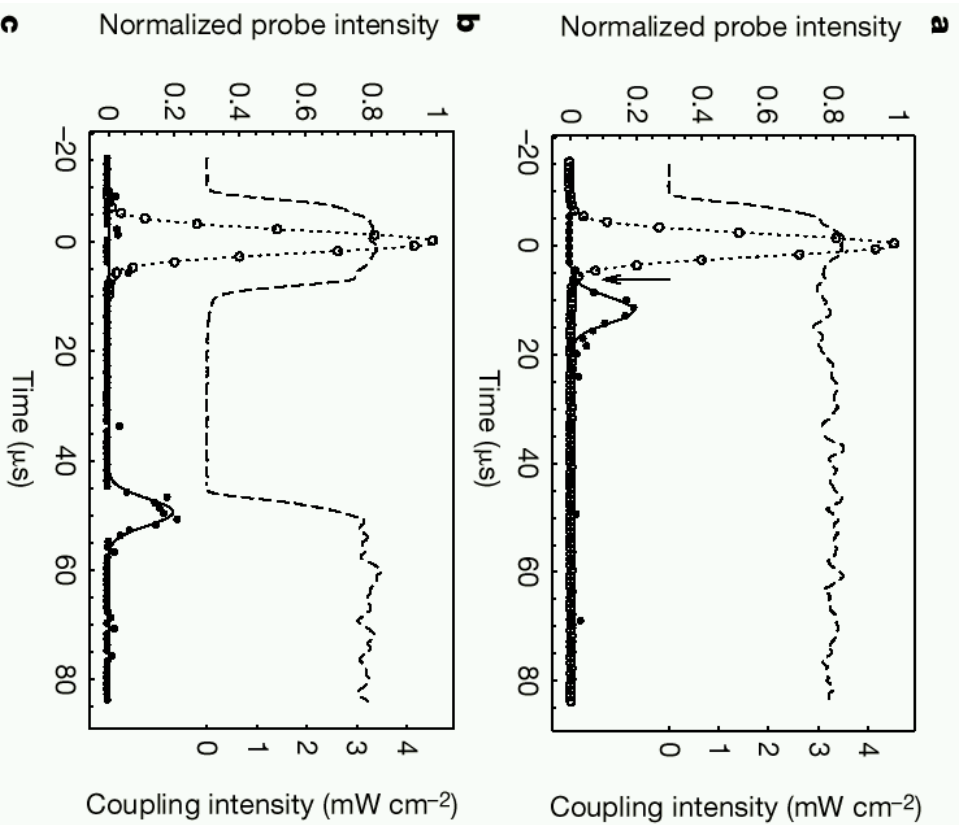
Transmission und Brechungsindex



© L.V. Hau et al., Nature (London) **397** (1999) 594.

Bereich der Transparenz sehr schmal, Variation der Brechzahl entsprechend stark, niedrige Gruppengeschwindigkeiten möglich

Speicherung des Pulses

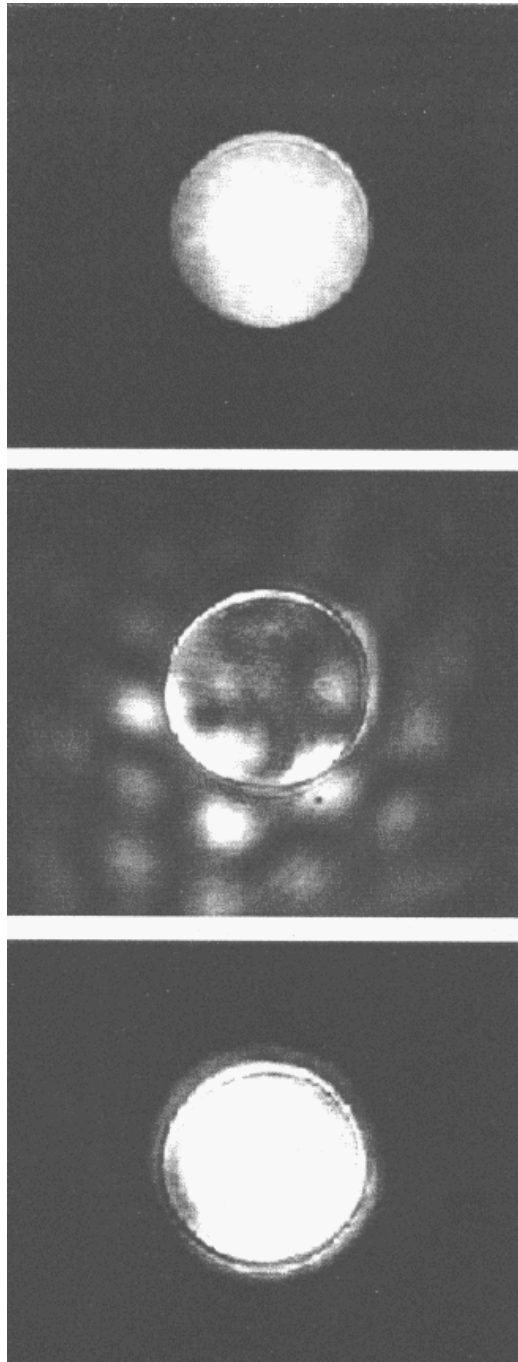


- vom „probe“-Puls induzierte Polarisation bleibt nach Abschalten des Kopplungsstrahls eingefroren;
- Wiedereinschalten des Kopplungsstrahls setzt den eingefrorenen Puls wieder frei;
- \Rightarrow **Pulsform (Information) nahezu unverändert – induzierte kohärente Emission;**
- Bedingungen: thermische Bewegung in der Speicherzeit klein, Dichte des Gases hoch genug für örtliche Auflösung der Pulsvariation;
- Informationsspeicherung auf kleinem Raum (Quantencomputer?)

Interessante Anwendungen von EIT

1. Herstellung von Transparenz
2. Exotische Gruppengeschwindigkeiten
3. Kohärent getriebene Atome gleicher Phase \Rightarrow neue elektro-optische Geräte
4. Laser ohne Besetzungsinversion
5. optische Interferometrie, Magnetometrie
6. Verhinderung von optischer Selbstfokussierung bzw. -defokussierung

Verhinderung der optischen Selbstdefokussierung



© S.E. Harris, Physics Today, **50** (1997) 36^a

^aHexagons!

Literatur

- L.V. Hau, *Gefrorenes Licht, Spektrum der Wissenschaften*, **9** (2000) 38.
- L.V. Hau, S.E. Harris, Z. Dutton, and C.H. Behroozi, *Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas*, Nature (London) **397** (1999) 594.
- Chien Liu, Z. Dutton, C.H. Behroozi, and L.V. Hau, *Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses*, Nature (London) **409** (2001) 490.
- S.E. Harris, *Electromagnetically induced transparency*, Phys. Today **50**, (1997) 36.
- E. Hecht, *Optik*, Addison-Wesley, Bonn, München (1989)
- Bergmann-Schäfer, *Optik*, Walter de Gruyter, Berlin (1993)
- R. Loudon, *The Quantum Theory of Light*, Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford (1983)