NICHTLINEARE OPTIK

Ein Überblick von Steven Becker

Agenda

Zweite Harmonische

Ausblick

$$\vec{P} = \epsilon_0 \left(\chi^{(1)} \vec{E} + \chi^{(2)} \vec{E}^2 + \chi^{(3)} \vec{E}^3 + \cdots \right)$$

Lichtmaterie WW

Selbstfokussierung

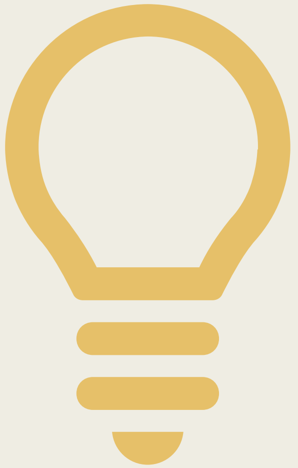
Lineare Lichtmaterie WW

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

ϵ_0 - Dielektrischekonstante, $\vec{E}$ - Elektrisches Feld, $\vec{P}$ - Polarisation

$$\vec{P} = \epsilon_0\, \chi^{(1)} \vec{E}$$

$\chi^{(1)}$- Dielektrische Suszeptbilitität, $(1) \triangleq$ Tensor erster Ordnung (Matrix)



Licht einer Glühbirne führt zu linearen Antworten

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Lineare Lichtmaterie WW

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

ϵ_0 - Dielektrischekonstante, $\vec{E}$ - Elektrisches Feld, $\vec{P}$ - Polarisation

$$\vec{P} = \epsilon_0 \left(\chi^{(1)} \vec{E} + \chi^{(2)} \vec{E}^2 + \chi^{(3)} \vec{E}^3 + \cdots \right)$$

$\chi^{(n)}$- Dielektrische Suszeptbilitität, (n) ≙ Tensor n-ter Ordnung

Laser führen zu
Nichtlinearen Antworten

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Lineare Lichtmaterie WW

$$\vec{P} = \epsilon_0\left(\chi^{(1)}\vec{E} + \chi^{(2)}\vec{E}^2 + \chi^{(3)}\vec{E}^3 + \cdots\right)$$

$\chi^{(n)}$- Dielektrische Suszeptbilitität, $(n) \triangleq$ Tensor n-ter Ordnung

$$\chi^{(2)} \sim 10^{-12}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{V}}, \qquad \chi^{(3)} \sim 10^{-24}\ \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{V}^2}$$

Laser führen zu
Nichtlinearen Antworten

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Zweite Ordnung

$$\vec{P} = \epsilon_0\left(\chi^{(1)}\vec{E} + \chi^{(2)}\vec{E}^2 + \chi^{(3)}\vec{E}^3 + \cdots\right)$$

Der grüne Laserpointer

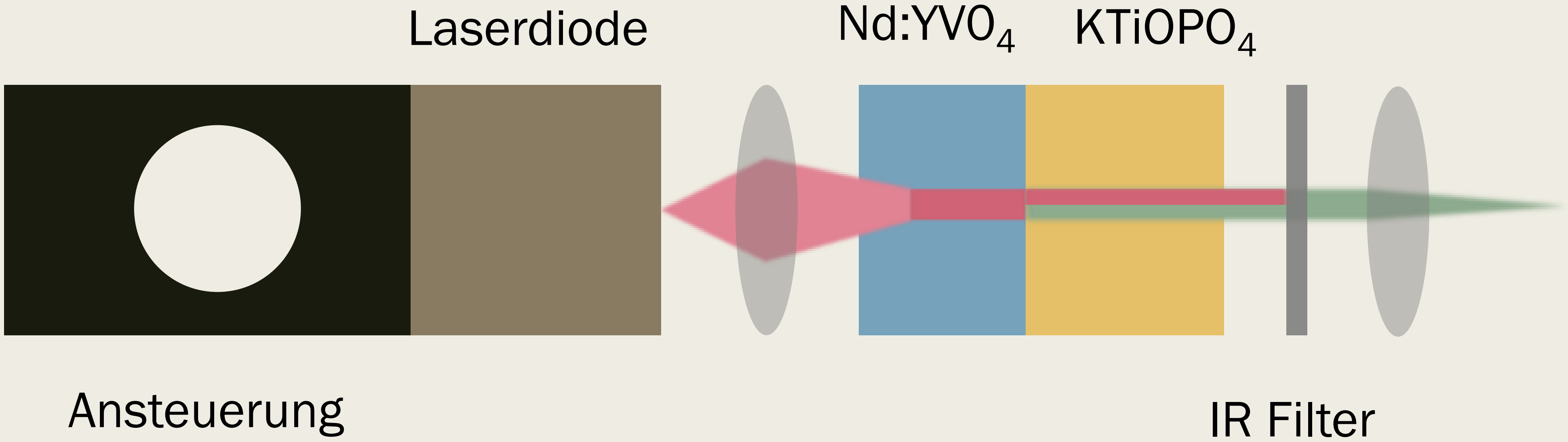
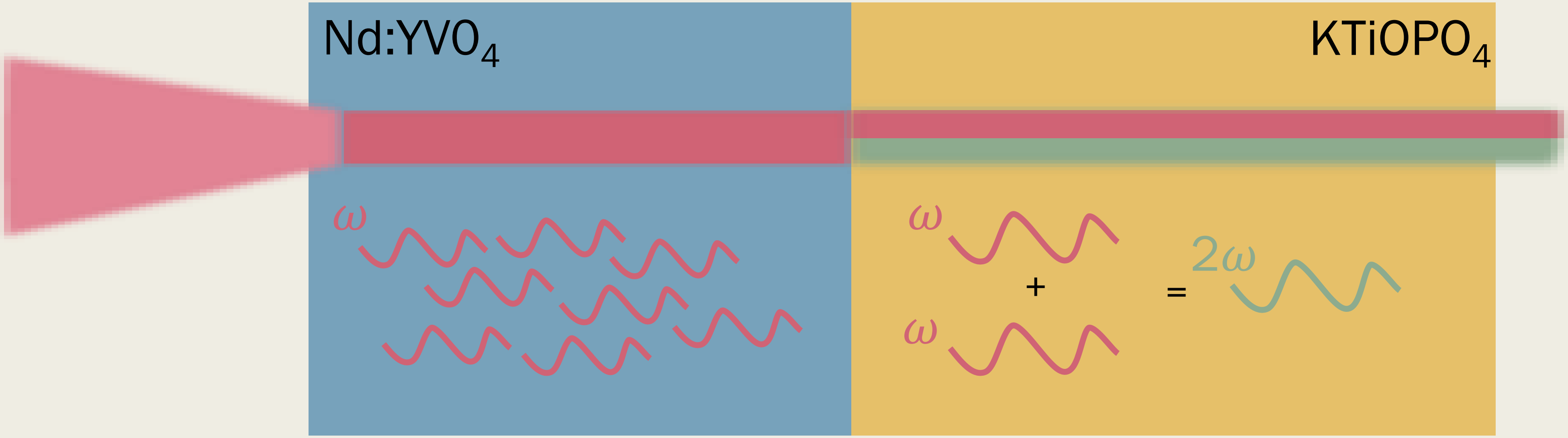


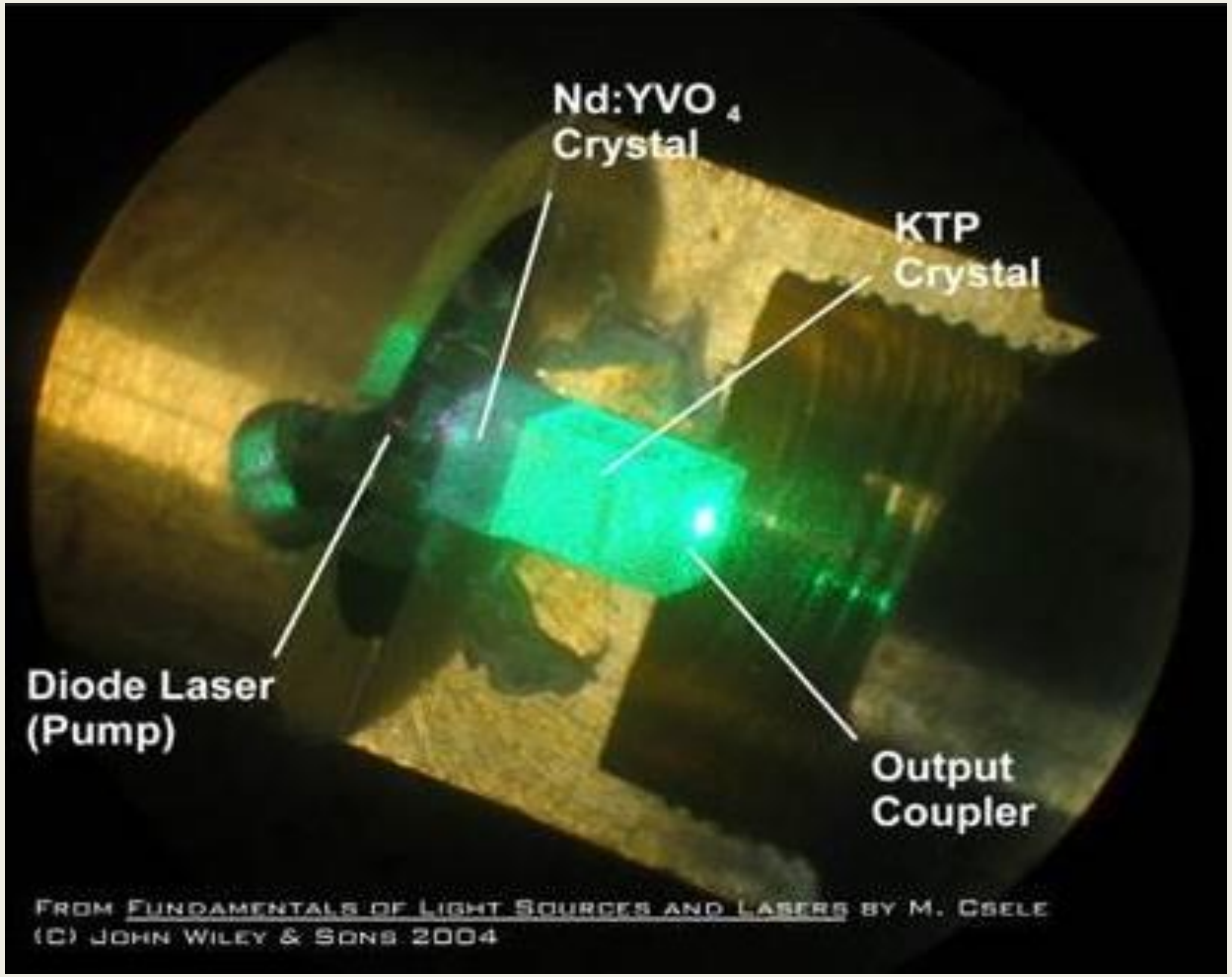
Abbildung nach: panoptics, A laser pointer of diode-pumped solid state, 2016, https://tinyurl.com/y37ru2fl

Zweite Harmonische



$\lambda = 1064\text{nm}$ $\lambda = 532\text{nm}$

Abbildung nach: panoptics, A laser pointer of diode-pumped solid state, 2016, https://tinyurl.com/y37ru2fl



Zweite Harmonische im Laserpointer

Bild: panoptics, A laser pointer of diode-pumped solid state, 2016, https://tinyurl.com/y37ru2fl

Zweite Harmonische - Beschreibung

Eingangswelle:

$$\tilde{E}(t) = Ee^{-i\omega t} + c.c.$$

Polarisation:

$$P^{(2)} = \epsilon_0 \chi^{(2)} \tilde{E}^2$$

$$= 2\epsilon_0 \chi^{(2)} |E|^2 + (\epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 e^{-2i\omega t} + c.c.)$$

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Zweite Harmonische - Beschreibung

Polarisation:

$$P^{(2)} = \epsilon_0 \chi^2 E^2$$

$$= 2\epsilon_0 \chi^{(2)} |E|^2 + (\epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 e^{-2i\omega t} + c.c.)$$

Wellengleichung:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \ddot{\vec{E}} = \mu_0 \ddot{\vec{P}}$$

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Effizienz

$$\Gamma = \frac{I(2\omega)}{I(\omega)} \propto \chi_{\text{eff}}^2 \, L^2 \, I(\omega) \, \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta k \, L}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta k \, L}{2}\right)^2}$$

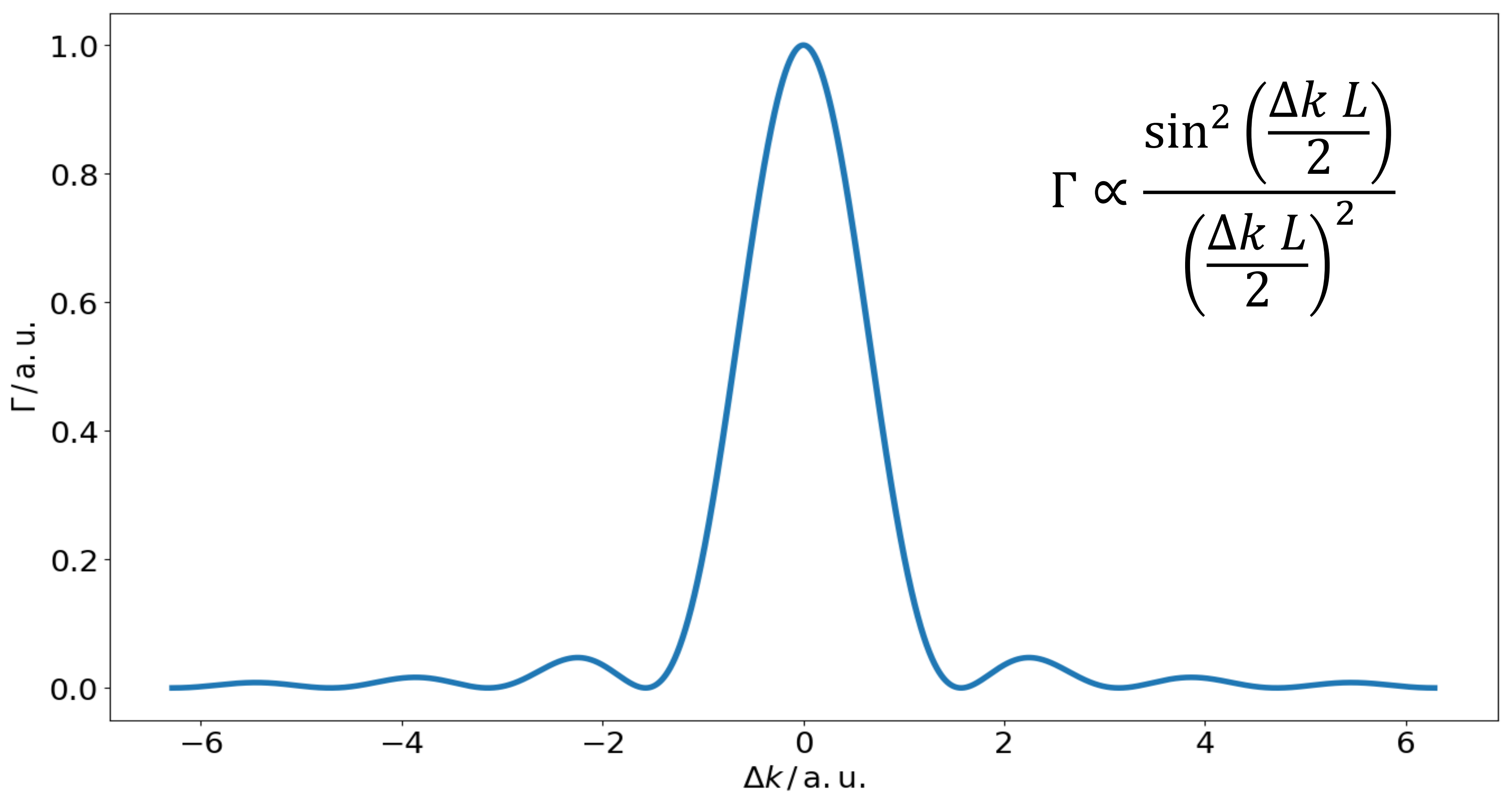
χ_{eff} - effektive Suszepbilität, L – Kristalllänge, Δk - Phasenunterschied

mit

$$\Delta k = 2k_1(\omega) - k_2(2\omega)$$

Prof. Dr. Roland Sauerbrey, Nichtlineare Optik, TU Dresden, 2017, https://www.hzdr.de/FWT/vorlesung_ss07/NichtlineareOptik_I.pdf

Effizienz



Effizienz in Abhängigkeit von der Phasendifferenz

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Phase matching

$$\vec{P} = \epsilon_0\left(\chi^{(1)}\vec{E} + \chi^{(2)}\vec{E}^2 + \chi^{(3)}\vec{E}^3 + \cdots\right)$$

Phase-matching

Maximale Effizienz wenn:

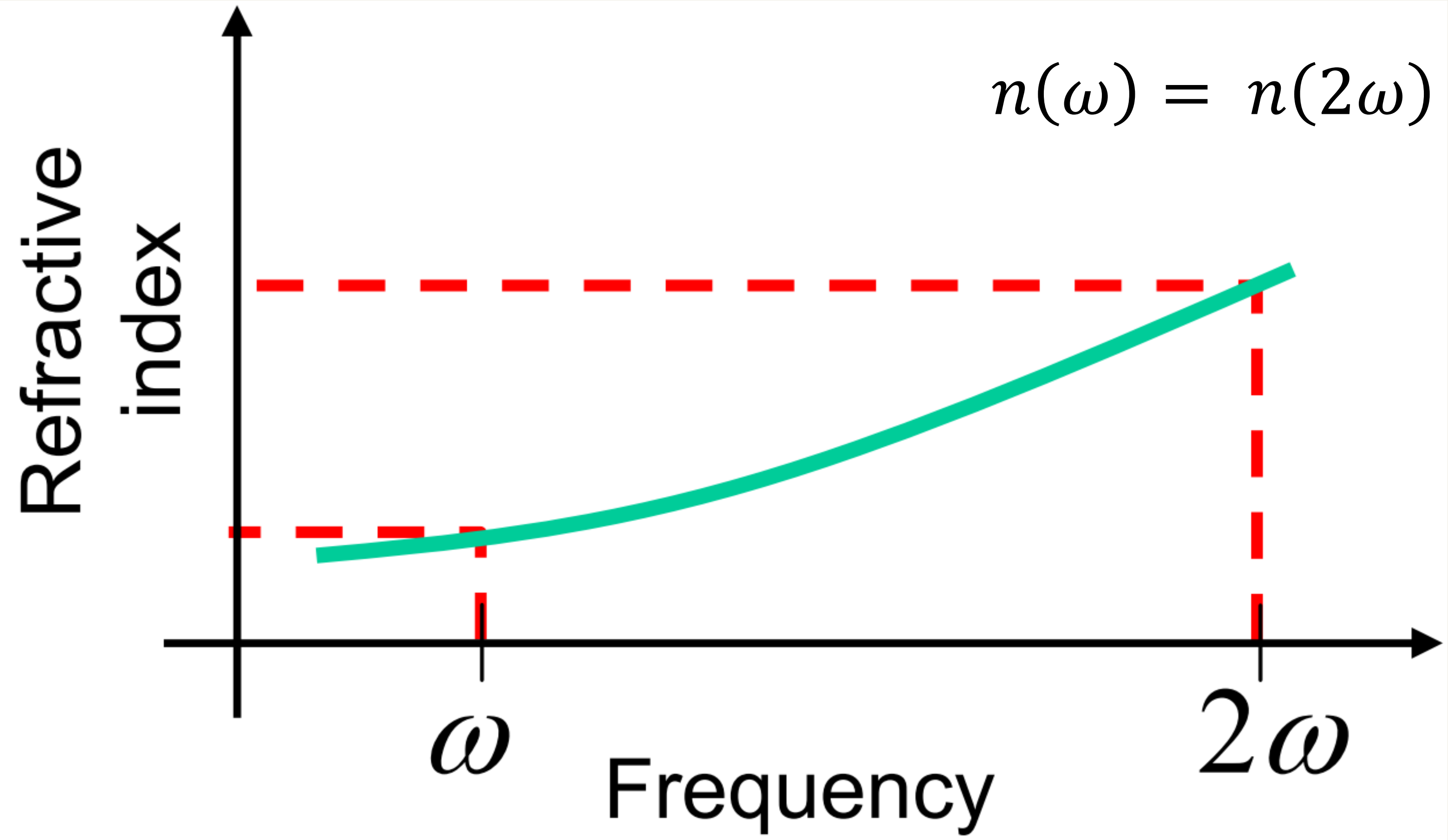
$$\Delta k = 2k_1(\omega) - k_2(2\omega) = 0$$

$$\Leftrightarrow \quad 2\frac{\omega}{c}\, n(\omega) = \frac{2\omega}{c} n(2\omega)$$

$$\Leftrightarrow \quad n(\omega) = n(2\omega)$$

Brown university, Introduction to nonlinear optics, https://tinyurl.com/y64u3m9v

Phase-matching



Schematische Darstellung der Frequenzabhängigkeit des Brechungsindexes

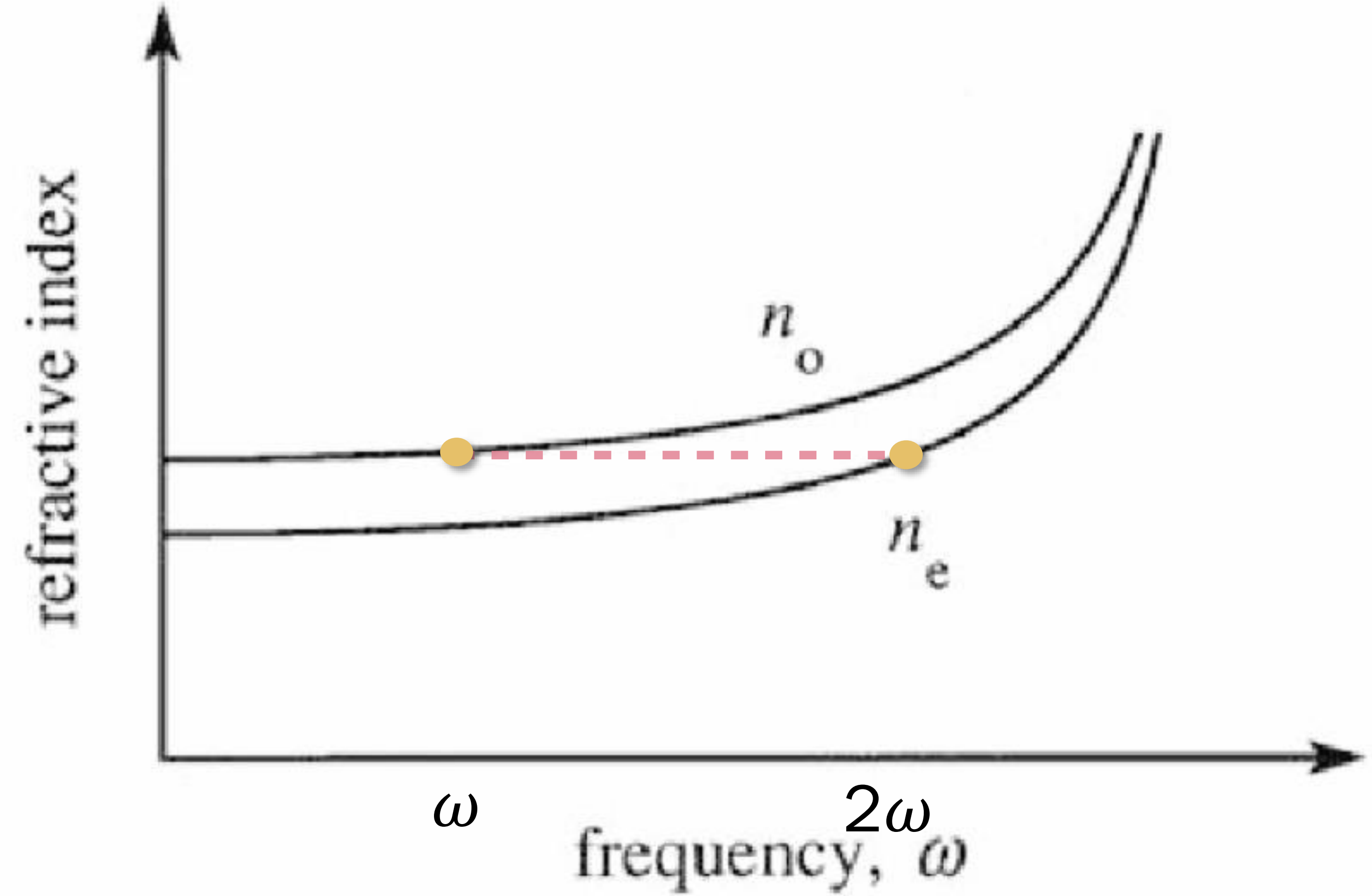
Brown university, Introduction to nonlinear optics, https://tinyurl.com/y64u3m9v

Doppelbrechung als Lösung

Brechungsindices eines Doppelbrechenden Materials,

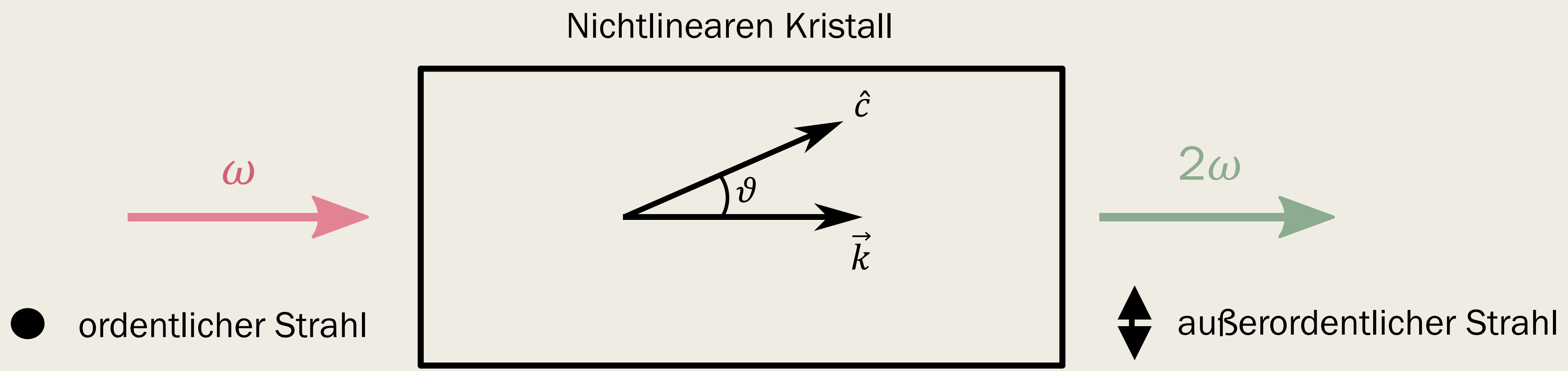
n_O - Brechungsindex vom ordentlichen Strahl,

n_e - Brechungsindex vom außerordentlichen Strahl



Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

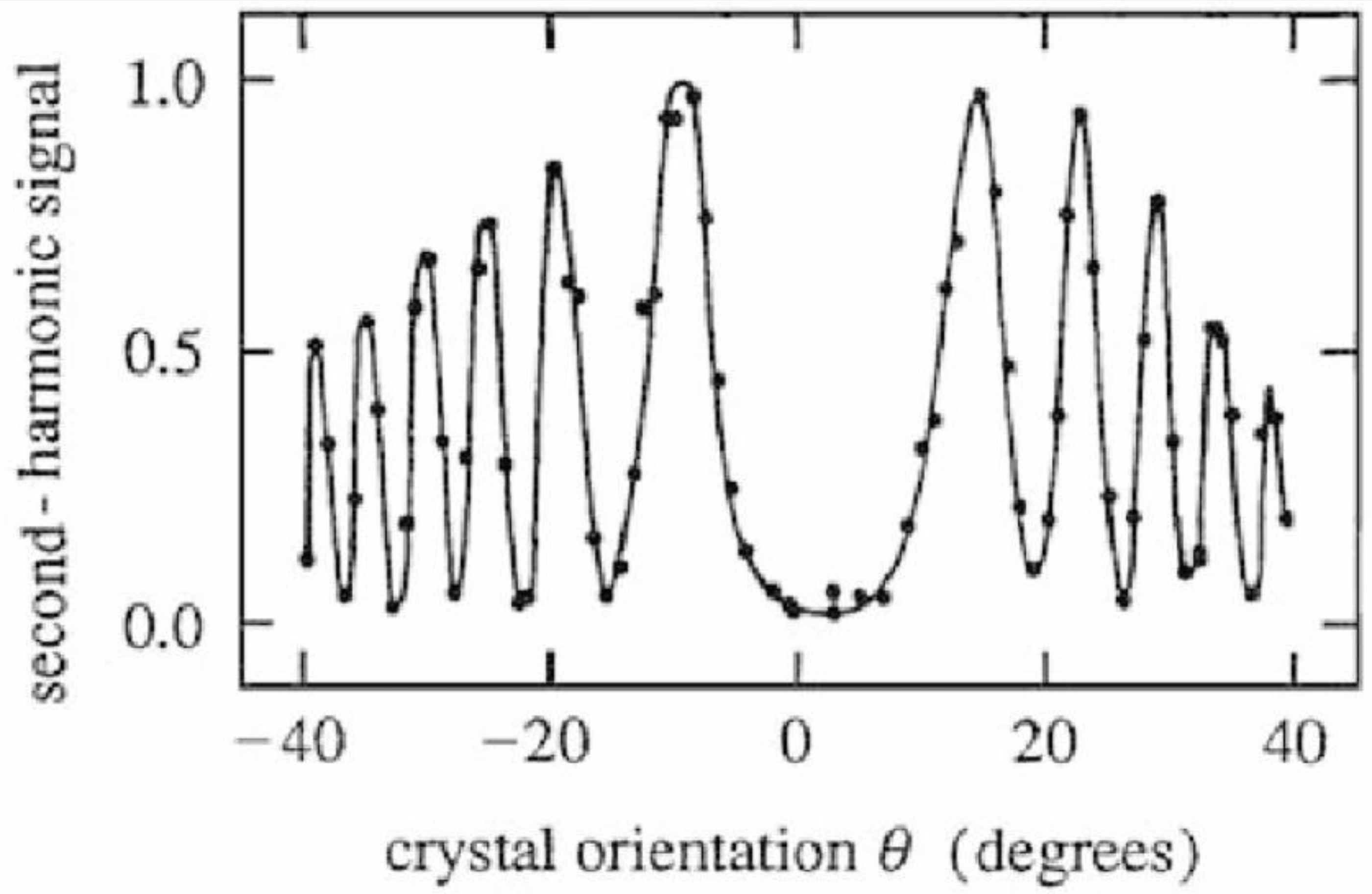
Anwendung für Phase-matching



$\hat{c}$ - Kristallachse, ϑ – Drehwinkel des Kristalls

Abbildung nach: Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

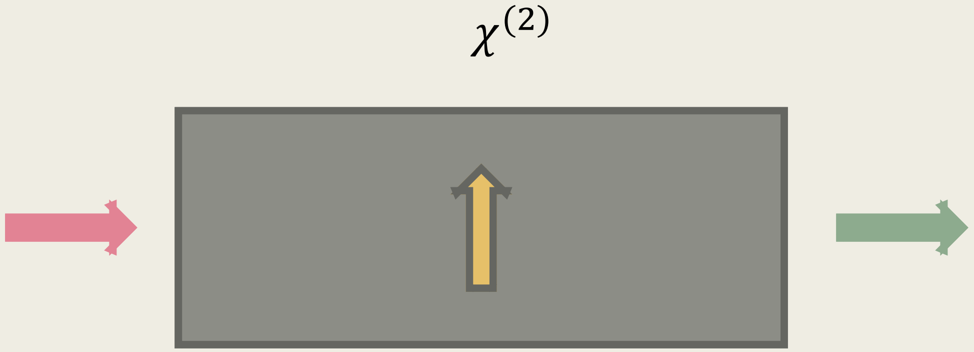
Resultat - Drehmethode



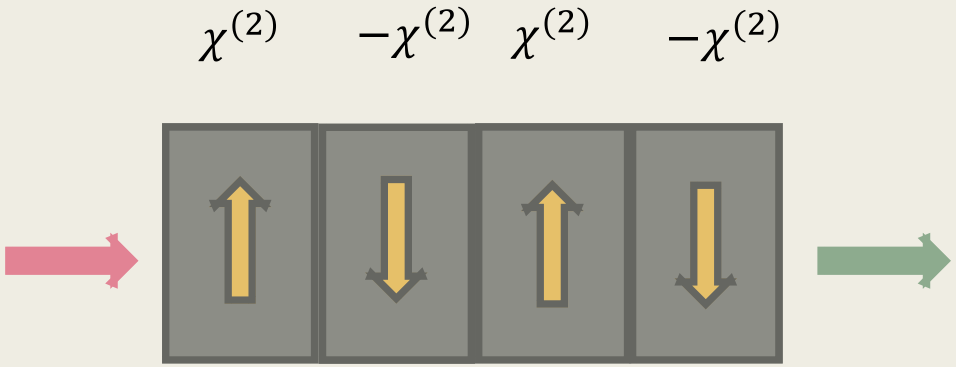
Auswirkung der Drehung des Kristalls auf die Intensität der zweiten Harmonischen

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Quasi phase matching



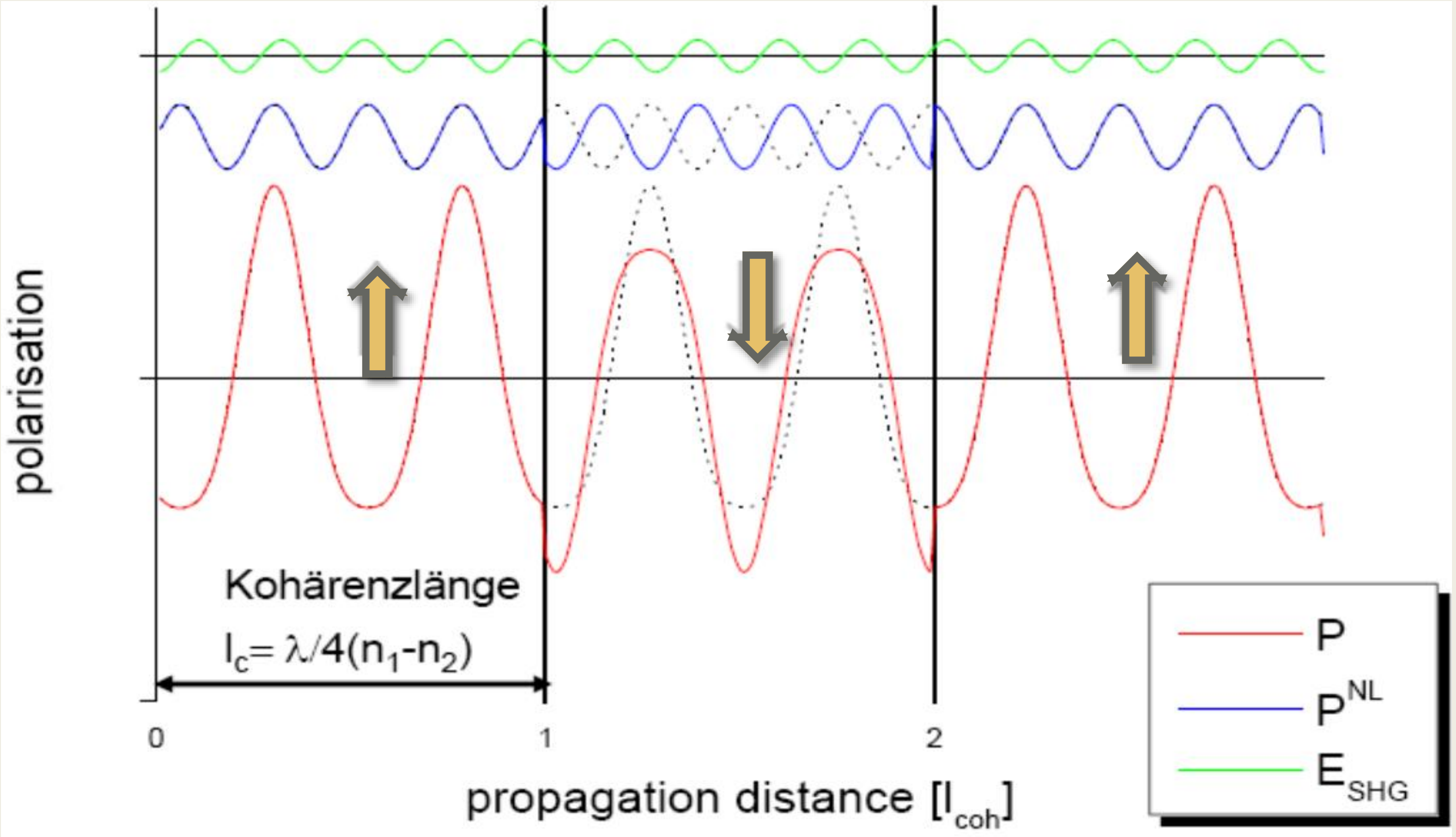
Kristall mit einer
Polarisationsrichtung



Kristall mit alternierenden
Polarisationsrichtungen

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

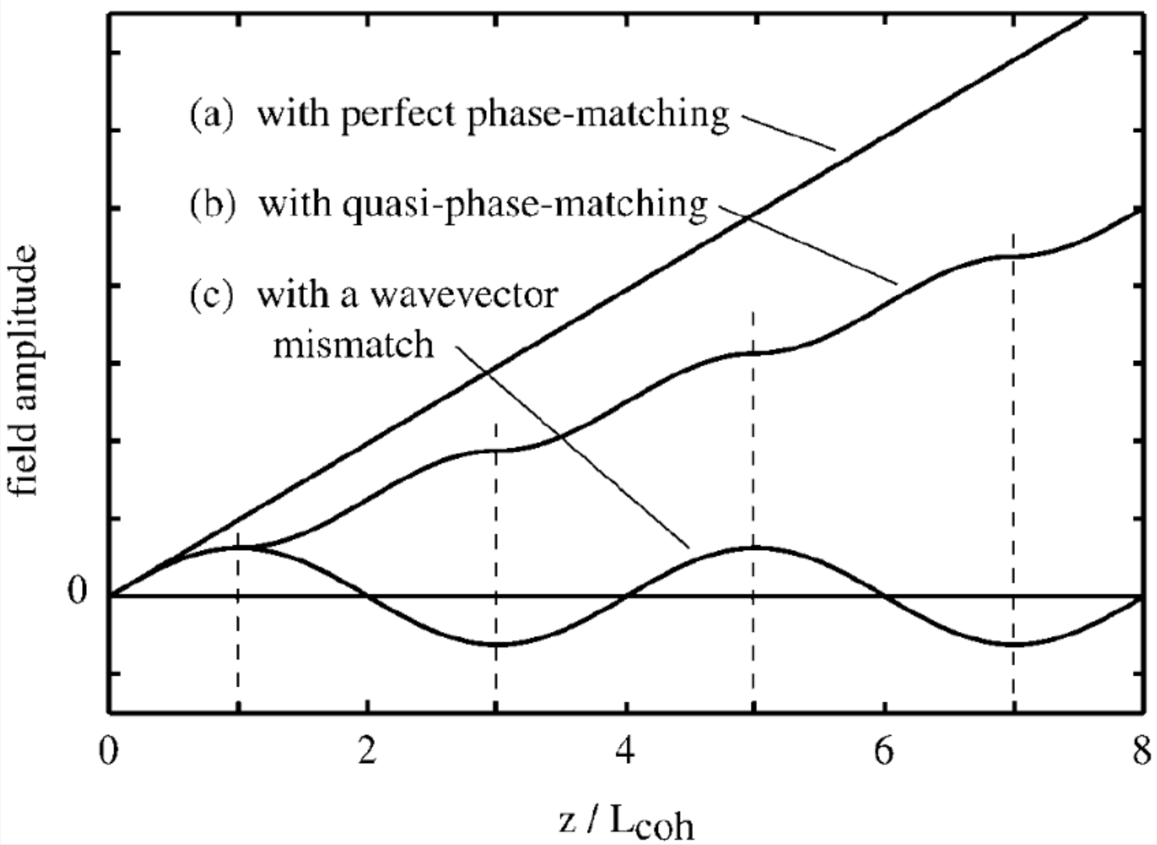
Quasi phase matching



Auswirkung der alternierenden Vorzugsrichtungen auf die Polarisation

Prof. Markus Betz, Quantenoptik: Laserphysik und nichtlineare Optik, 2010

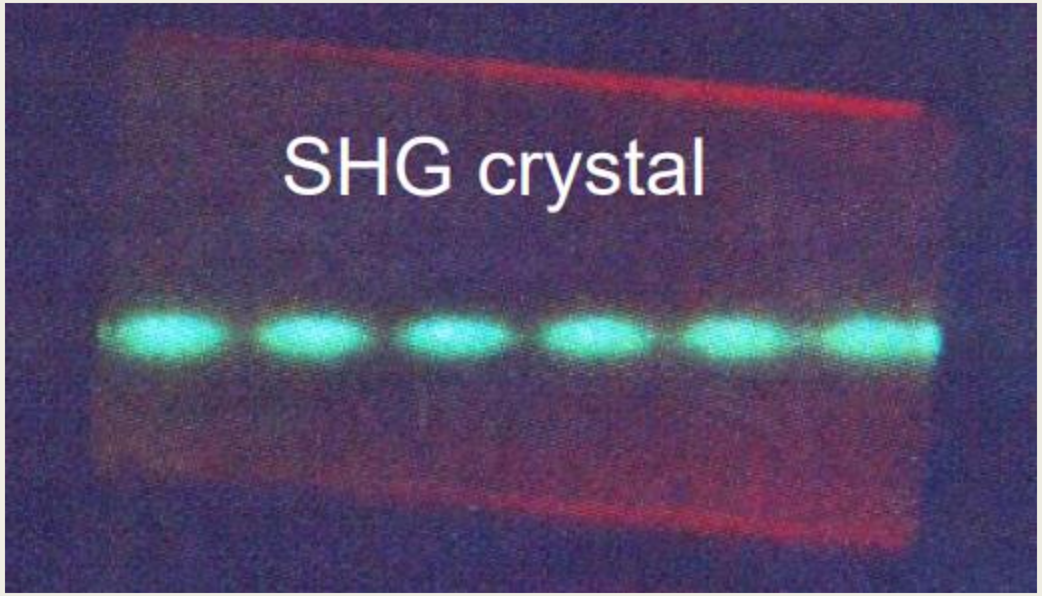
Vergleich der Methoden



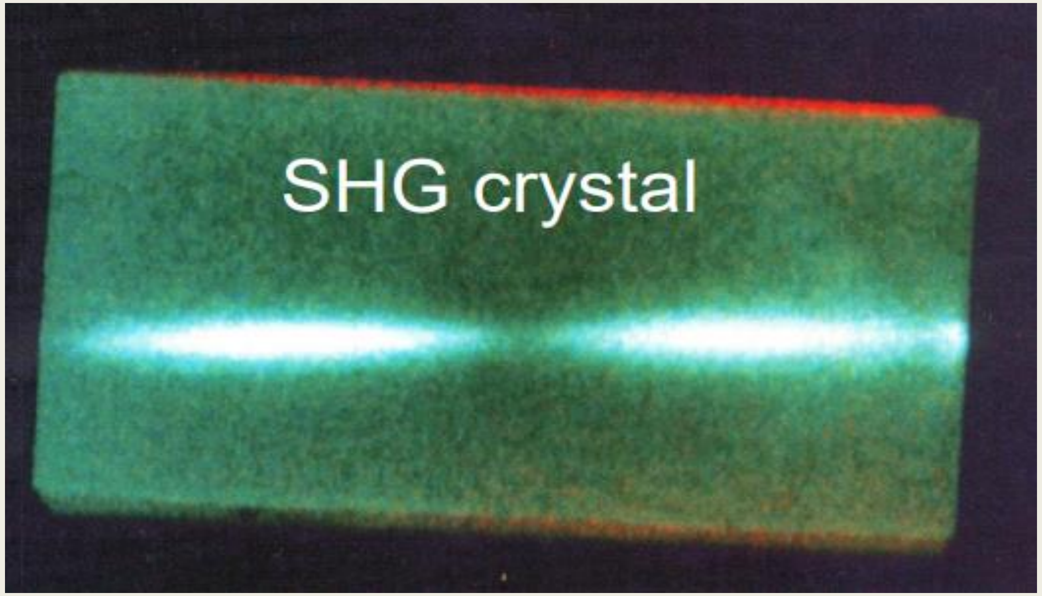
Vergleich der verschiedenen Phase matching methoden

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Auswirkung phase matching



Geringes phase matching



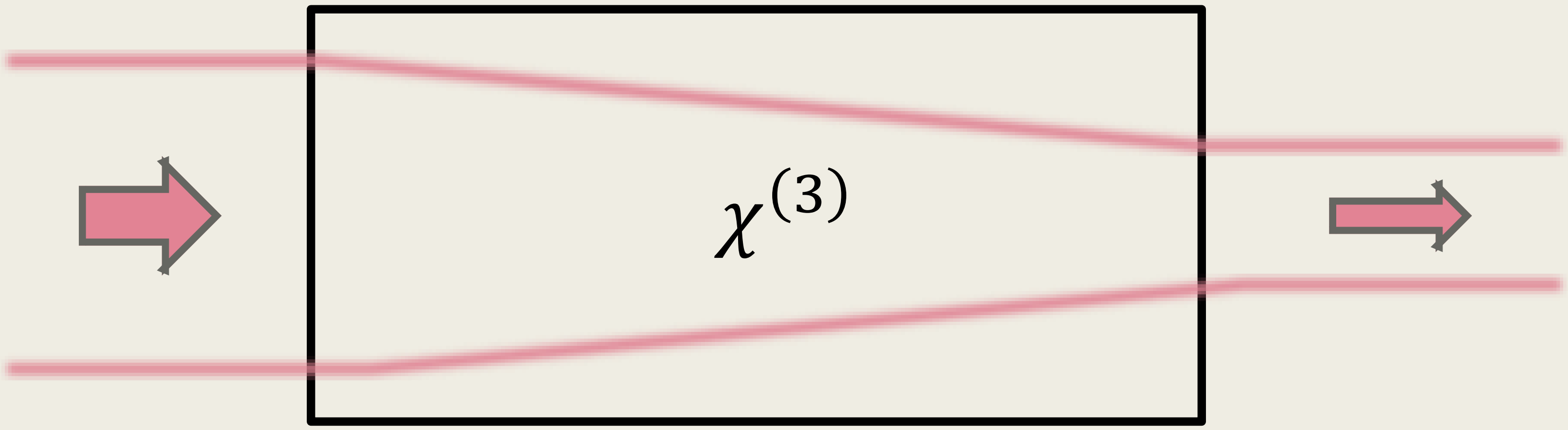
Hohes phase matching

Brown university, Introduction to nonlinear optics, https://tinyurl.com/y64u3m9v

Dritte Ordnung

$$\vec{P} = \epsilon_0\left(\chi^{(1)}\vec{E} + \chi^{(2)}\vec{E}^2 + \chi^{(3)}\vec{E}^3 + \cdots\right)$$

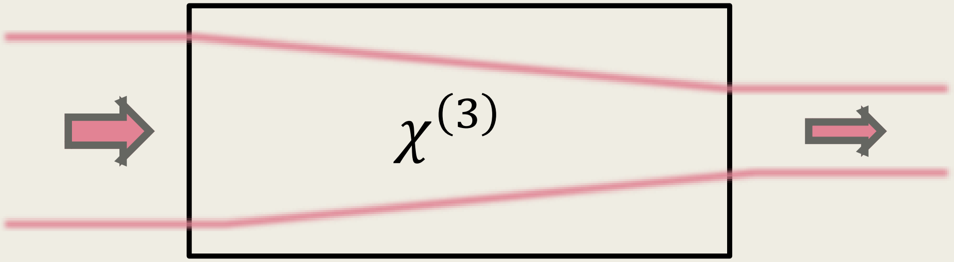
Optischer Kerr-Effekt



Selbstfokussierung eines Laserstrahls hoher Intensität

Nach: Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Optischer Kerr-Effekt



$$n = n_0 + 2n_2 I$$

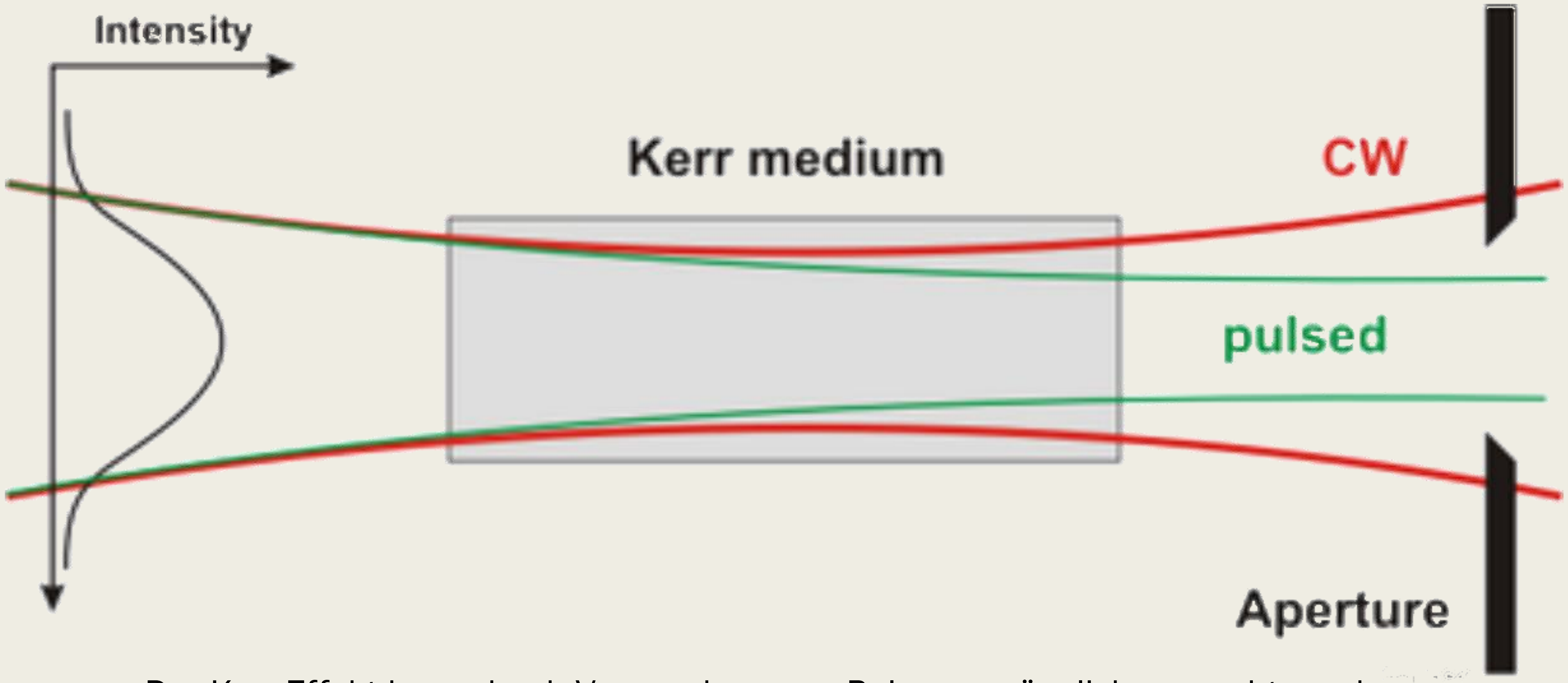
mit

$$n_0 = \sqrt{1 + \chi^{(1)}}, \qquad n_2 = \frac{3\chi^{(3)}}{4n_0}$$

Für Kohlenstoffdisulfid: $n_2 = 3 \cdot 10^{-14}\ \frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{W}}$

Nach: Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

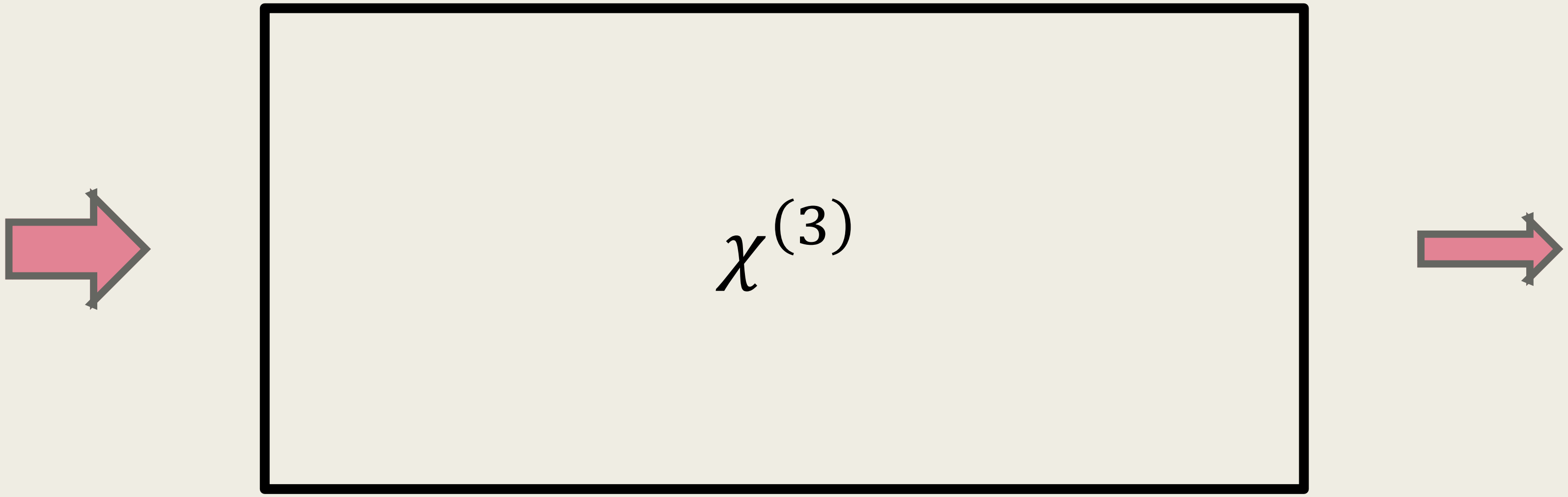
Pulsed Laser



Der Kerr-Effekt kann durch Verwendung von Pulsen zugänglich gemacht werden.

Zwei Strahl Ansatz

Probe Welle

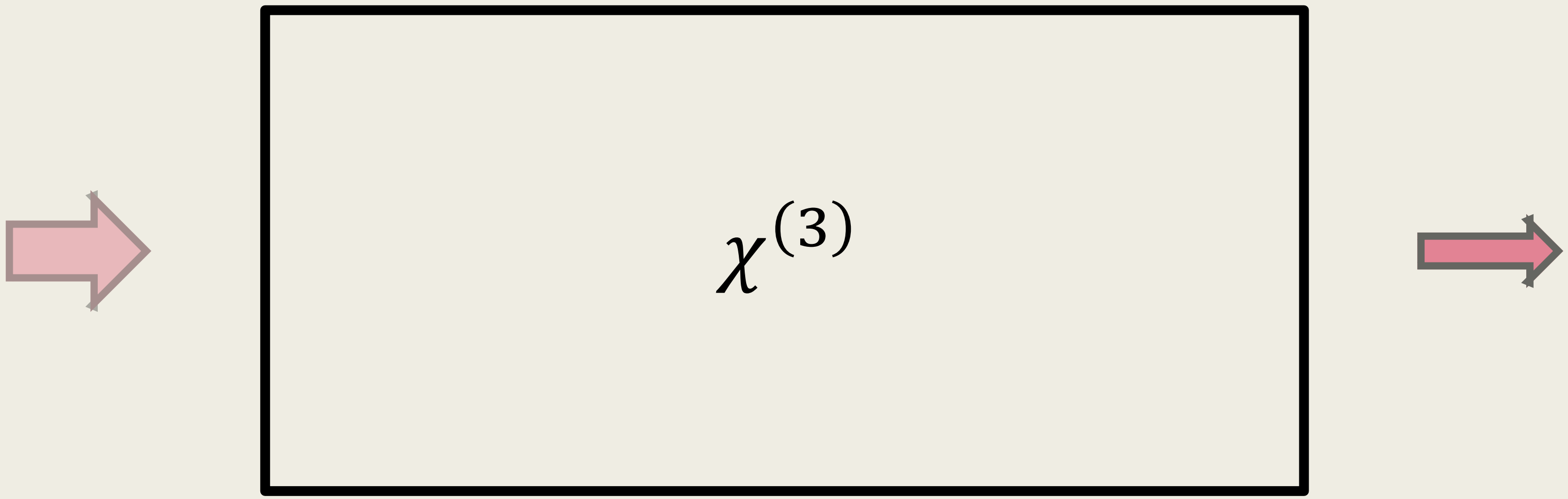


Selbstfokussierung mit einem einfallenden Strahl

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Zwei Strahl Ansatz

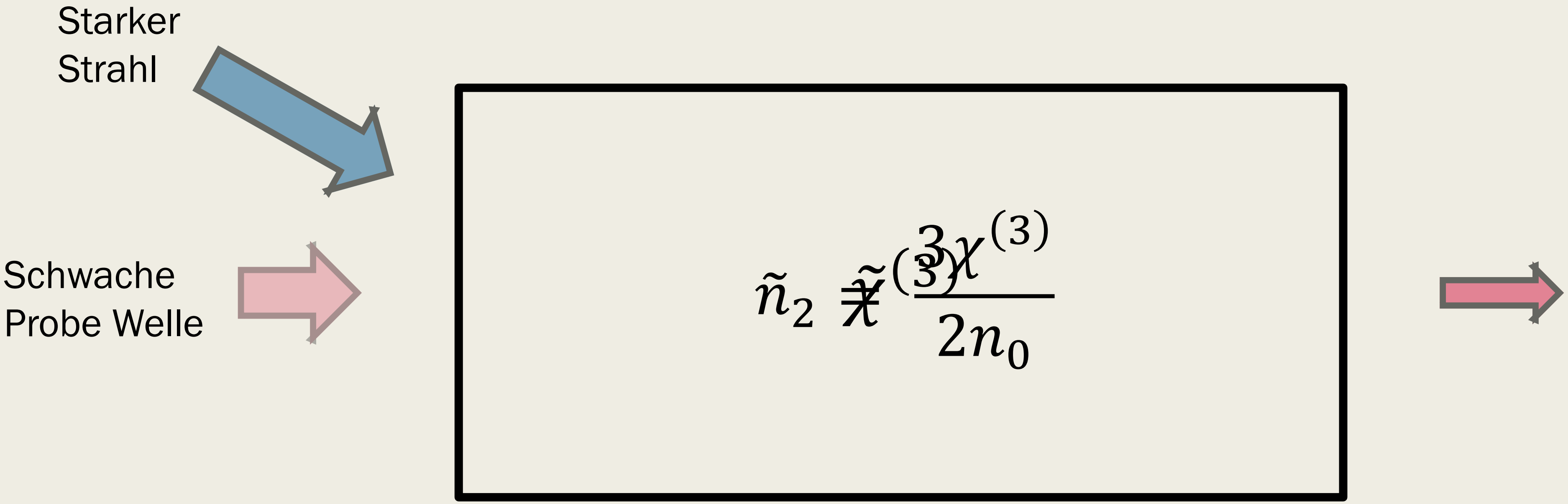
Schwache
Probe Welle



Selbstfokussierung mit einem einfallenden Strahl

Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706

Zwei Strahl Ansatz



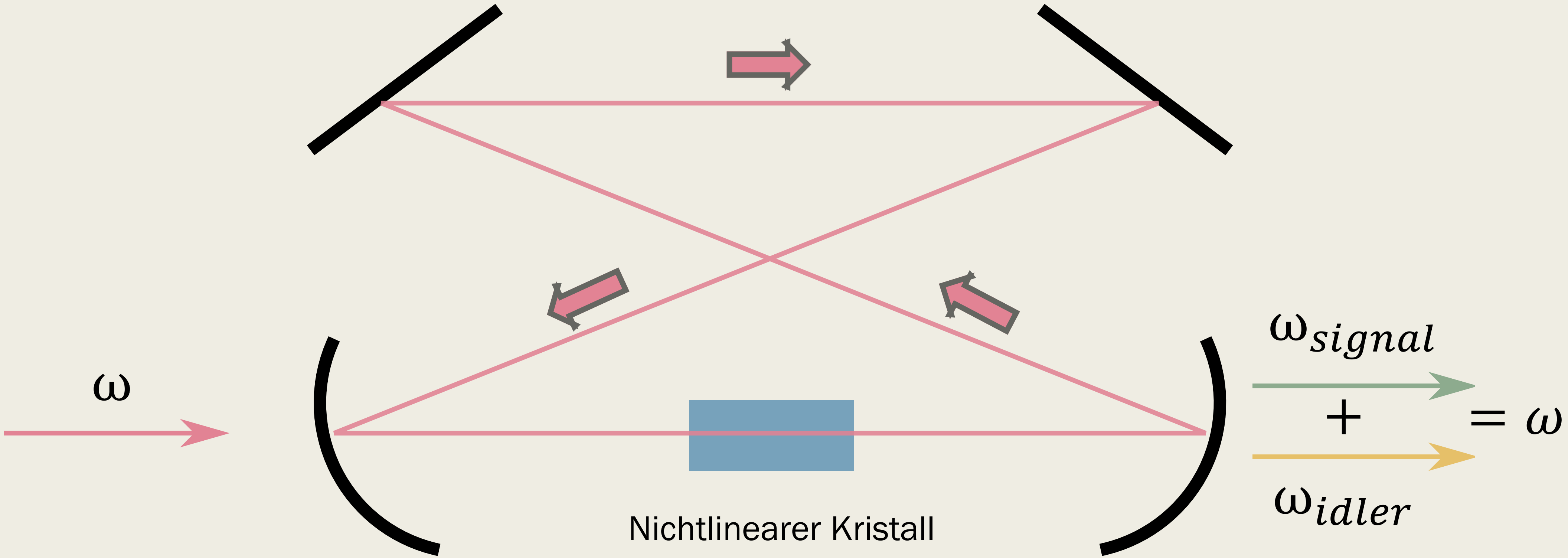
$$\tilde{n}_2 = \tilde{\chi}^{(3)} \frac{3\chi^{(3)}}{2n_0}$$

Selbstfokussierung mit einem zwei Strahlen

Ausblick

$$\vec{P} = \epsilon_0\left(\chi^{(1)}\vec{E} + \chi^{(2)}\vec{E}^2 + \chi^{(3)}\vec{E}^3 + \cdots\right)$$

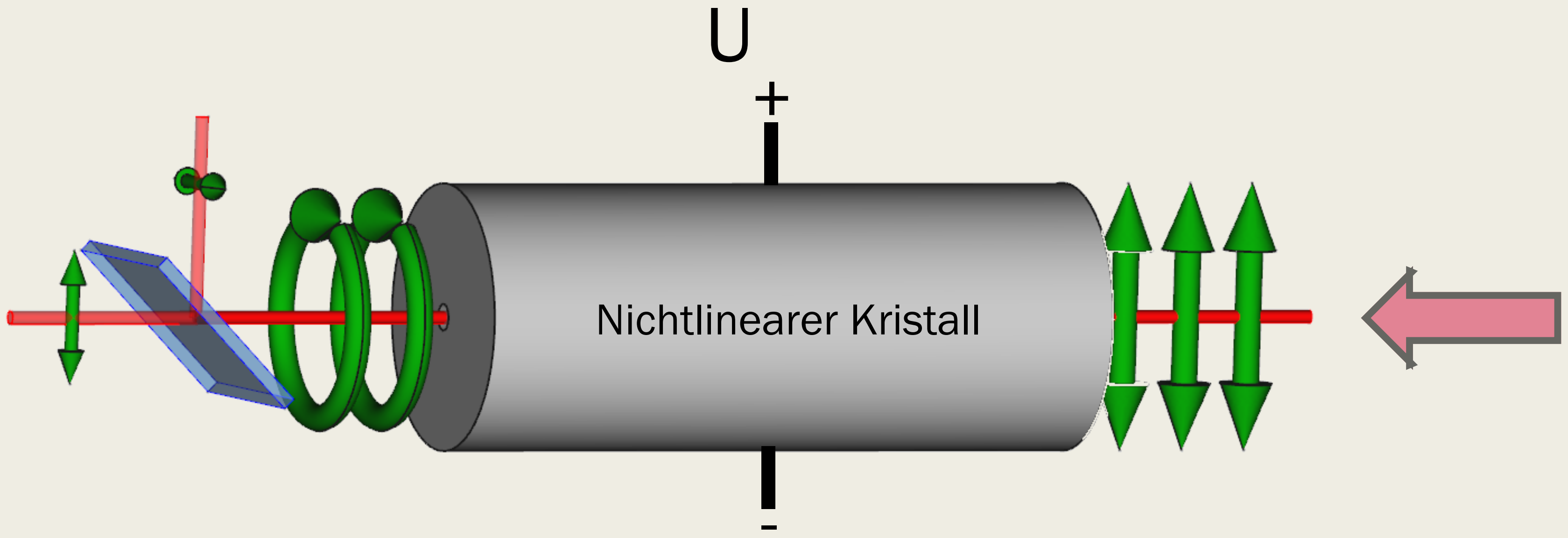
Ausblick - Parametrischer Oszillator (OPO)



Schematische Darstellung eines parametrischen Oszillators

Nach: Dr. Rüdiger Paschotta, Optical Parametric Oscillators, RP Photonics Encyclopedia, https://tinyurl.com/y66493ln

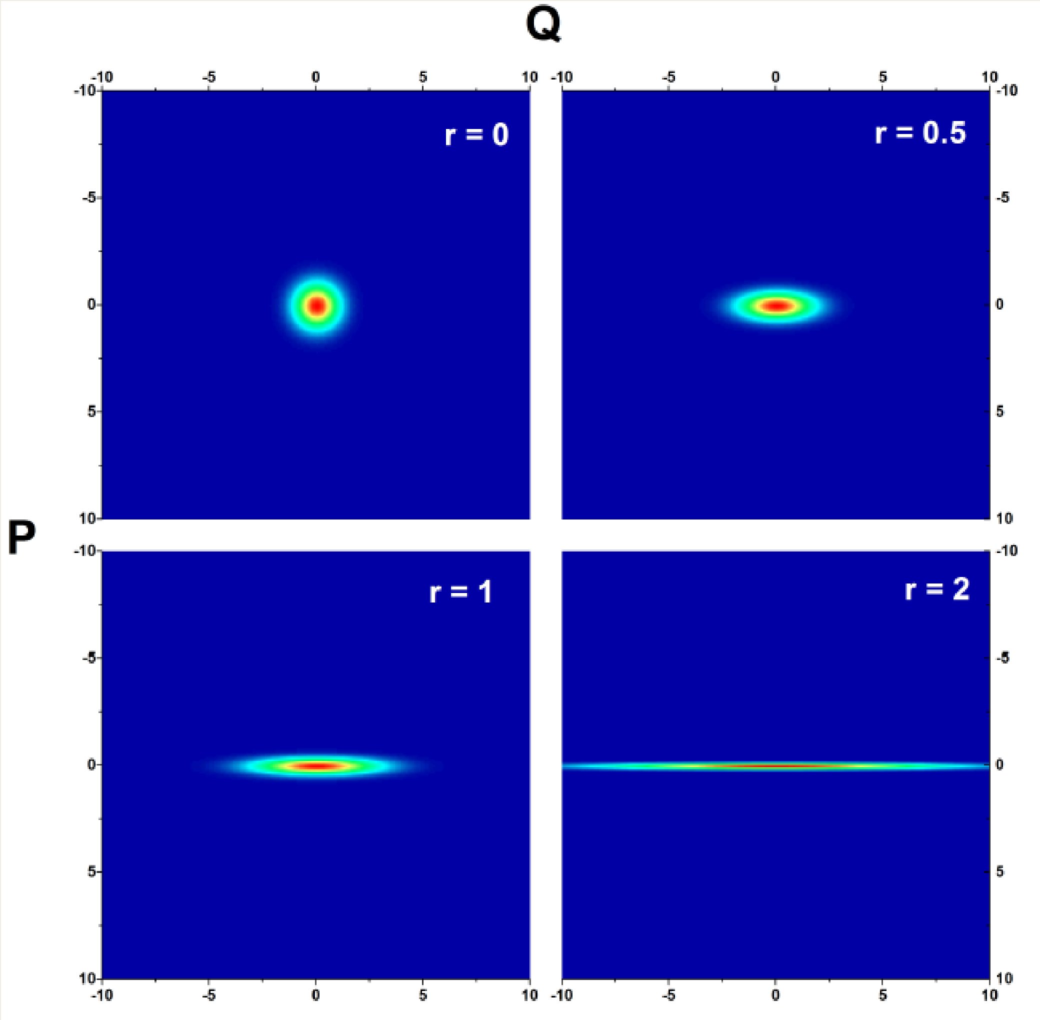
Ausblick – Pockels-Zelle



Schematische Darstellung einer Pockels-Zelle

Ben Smith, Pockels cell modulaliing light polarization, 2017, https://tinyurl.com/y3bke7zx

Ausblick – Squeezed Light



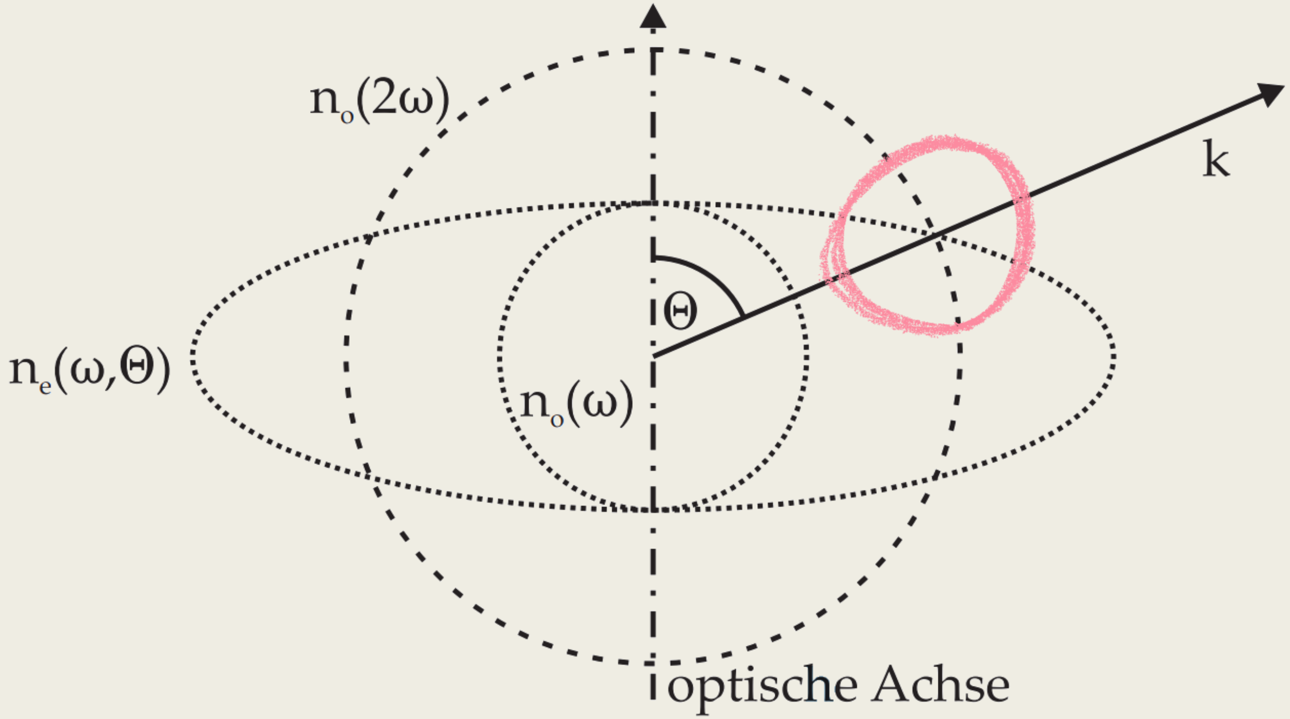
Anwendung des Squeezing Operators auf das Lichtfeld

VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT!

APPENDIX

Phasenanpassung Drehmethode

$$\frac{1}{n_e(\Theta)} = \frac{\sin^2(\Theta)}{\widetilde{n_e}^2} + \frac{\cos^2(\Theta)}{n_0^2}$$



Die dritte Ordnung

$$P(\omega_1) = \epsilon_0 \chi^{(3)} (3E_1E_1^* + 6E_2E_2^* + 6E_3E_3^*)E_1,$$

$$P(\omega_2) = \epsilon_0 \chi^{(3)} (6E_1E_1^* + 3E_2E_2^* + 6E_3E_3^*)E_2,$$

$$P(\omega_3) = \epsilon_0 \chi^{(3)} (6E_1E_1^* + 6E_2E_2^* + 3E_3E_3^*)E_3,$$

$$P(3\omega_1) = \epsilon_0 \chi^{(3)} E_1^3, \qquad P(3\omega_2) = \epsilon_0 \chi^{(3)} E_2^3, \qquad P(3\omega_3) = \epsilon_0 \chi^{(3)} E_3^3,$$

$$P(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) = 6\epsilon_0 \chi^{(3)} E_1E_2E_3,$$

Zwei Strahl Methode

$$P(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3) = 6\epsilon_0 \chi^{(3)} E_1E_2E_3^*,$$

$$P(\omega_1 + \omega_3 - \omega_2) = 6\epsilon_0 \chi^{(3)} E_1E_3E_2^*,$$

$$P(\omega_2 + \omega_3 - \omega_1) = 6\epsilon_0 \chi^{(3)} E_2E_3E_1^*,$$

$$P(2\omega_1 + \omega_2) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_1^2E_2, \qquad P(2\omega_1 + \omega_3) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_1^2E_3,$$

$$P(2\omega_2 + \omega_1) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_2^2E_1, \qquad P(2\omega_2 + \omega_3) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_2^2E_3,$$

Ein Strahl Methode

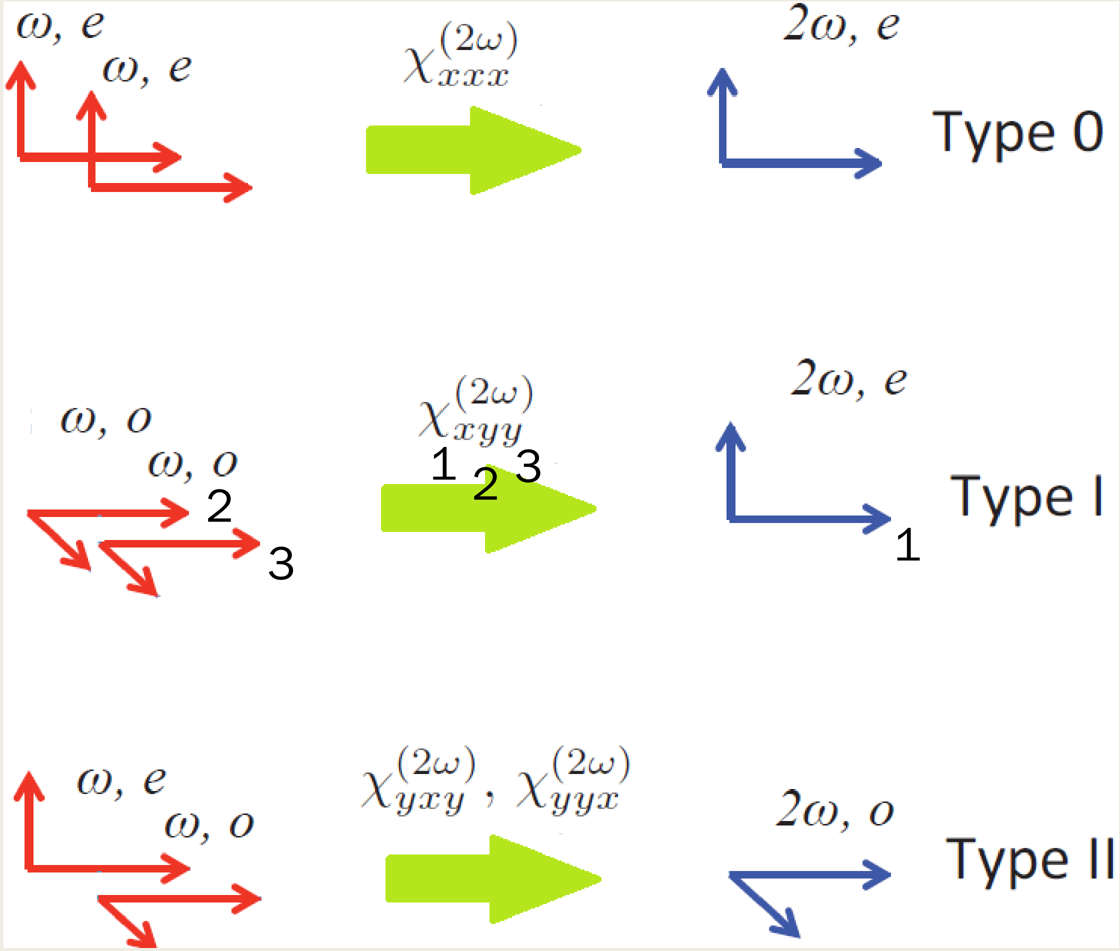
$$P(2\omega_3 + \omega_1) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_3^2E_1, \qquad P(2\omega_3 + \omega_2) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_3^2E_2,$$

$$P(2\omega_1 - \omega_2) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_1^2E_2^*, \qquad P(2\omega_1 - \omega_3) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_1^2E_3^*,$$

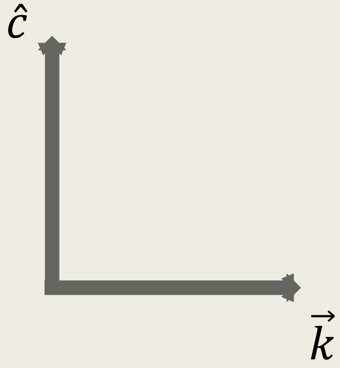
$$P(2\omega_2 - \omega_1) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_2^2E_1^*, \qquad P(2\omega_2 - \omega_3) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_2^2E_3^*,$$

$$P(2\omega_3 - \omega_1) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_3^2E_1^*, \qquad P(2\omega_3 - \omega_2) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} E_3^2E_2^*$$

Zweite Harmonische - Polarisation



In dem Beispiel:



Robert Boyd, Nonlinear Optics, ELSEVIER, 3te Auflage, 2008, ISBN: 9780123694706