

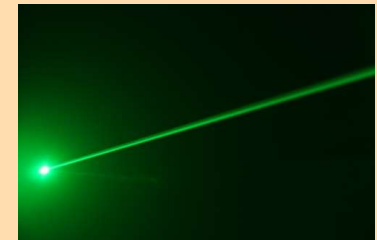
Lasertechnik VL-1

Mechatronik 4.tes Semester

Vorlesung Sommersemester 2023

VL: Prof. Dr. Thomas Hebert (thebert@fb2.fra-uas.de)

Labor: Hans-Peter Tögel, Lutz Zimmermann, Prof. Kurt Jansen



Fachbereich 2 Informatik und Ingenieurwissenschaften

Vorstellung

Dr. Thomas Hebert, thebert@fb2.fra-uas.de

- Diplom Physik 1986 – TU Berlin
 - Lasertechnik: Farbstofflaser, Frequenzverdopplung, Laserspektroskopie an Atomen
- Promotion 1989 – FHI & TU Berlin
 - Spektroskopie an Edलगaskristallen mit Synchrotronstrahlung
- Post-Doc 1989-1990 – IBM Research USA
 - Erzeugung von blauem Laserlicht durch „Up-Conversion“ in dotierten Kristallen
- 1992-2019 – IBM Deutschland
 - Lead Architekt Server & Speicher Infrastruktur für Lösungen mit der Unternehmenssoftware von SAP
- Lehrbeauftragter am FB2 seit 2017, Vertretungsprofessor seit WS 2021
 - VL und Labor Physik 1 und 2
 - Labor Technische Optik
 - Labor & VL Lasertechnik
 - EwtP Übung



Allgemeine Einführung / Organisatorisches

Vorlesung, Labor, Klausur

Ablauf der Veranstaltung

1. Vorlesung:
 - 1x wöchentlich 90 min, MI 08:15 - 09:45, Raum 8/104
 - Folien und ggf. sonstiges Material werden jeweils in campUAS abgelegt
 - Mix: Vorlesung, Selbststudium, Übungsaufgaben
 - VL am 17.05. fällt aus → Ersatzprogramm zum Selbststudium
2. Labor:
 - Siehe campUAS Bereich Kurs: Hebert, Th.: Lasertechnik - SoSe 23 (frankfurt-university.de)
Labor: insgesamt 5x Versuche, in 2er Gruppen, Raum 7/15
 - Je Versuch soll eine Auswertung/Laborbericht erstellt werden
3. **Anmeldung Labor im HIS beachten!!! + Gruppeneinteilung via campUAS Kurs Lasertechnik**
 - Weitere Details zum Labor via Kurt Jansen, Hans-Peter Tögel, Lutz Zimmermann
4. Klausur: Mix aus „Erklär- und Rechenaufgaben“
 - Genauer Ablauf und Termin: to be defined
5. **Sprechstunde:** DO 12.00-12.45, 7/202 oder Termin per email anfragen: thebert@fb2.fra-uas.de

Themenübersicht / Semesterplanung

1. Laser: Genereller Überblick / Historie / Anwendungsgebiete
Licht als Elektromagnetische Welle
2. Erzeugung von Licht: Klassisches Modell / Quantenansatz
Energiezustände von Atomen (Bohr Modell)
Lichtquanten und Energiezustände
3. WW von Licht und atomare Gaswolke
Absorption, Spontane Emission, Induzierte Emission
Lichtverstärkung / Besetzungsinversion
3-Niveau, 4-Niveau Laserschema
4. **Übersicht Lasertypen / Pumpmethoden**
HeNe Laser Basics
CO₂ Laser Basics
Rolle des Resonators / Longitudinale Moden
5. **Materialbearbeitung I**
Grundprozesse am Werkstück
Einfluß Intensität, Fokus, Pulse
6. (17.05.) Sonderthema Selbststudium
7. **Materialbearbeitung II**
Schweißen, Schneiden, Gravieren, ...
Besuch Demo: Laser Gravierer
8. Erzeugung von Laserpulsen
Ultrakurzpulse
Nd:YAG Laser
Scheibenlaser
9. Transversale Moden im Resonator,
Strahldurchmesser, Gauss'sche Strahlen,
typische Strahlengänge mit Lasern
10. **Halbleiterlaser / Photodiode Basics**
Halbleiterlaser Arrays / Blauer Halbleiterlaser
/ VCSEL Laser
11. **Laserbasierte Entfernungsmessungen u.v.m**
LIDAR: ToF, Triangulation, Modulation /
Anwendungsbeispiele
12. **Laser im Alltag: CD/BlueRay, und/oder**
Laserpointer, und/oder Laserdrucker,
und/oder Barcode Leser, und/oder Laser für
Bühnenshows
13. **Vergleich Laserlicht / Thermisches Licht**
Übungsaufgaben
14. Wiederholung / Übungsaufgaben /
Klausurvorbereitung

Literatur: Lasertechnik WS2022/23

Laser/Optik

1. * EICH_LAS2015: Laser – Bauformen, Strahlführung, Anwendungen, J. Eichler, H.J. Eichler (2015, 8. Auflage, Springer ISBN 978-3-642-41438-1 (eBook)
2. * BLMÜBA_LAS2013: Lasermaterialbearbeitung, J. Bliedtner, H. Müller, A. Barz, Fachbuchverlag Leipzig, 2013, E-Book-ISBN 978-3-446-42929-1
3. Lasertechnik Skript K. Jansen, FRA-UAS (2009-2019) →im Moodle Kurs zum herunterladen
4. DOHL_LAS2015: Lasertechnik, R. Dohlus, De Gruyter e-ISBN (PDF) 978-3-11-035140-8
5. SIGR_LAS2018: Laser: Theorie, Typen und Anwendungen, M.W. Sigrist, Springer, 8. Auflage 2018, ISBN 978-3-662-57515-4 (eBook)
6. MESCH_2008: Optik, Licht und Laser, D. Meschede, Vieweg-Teubner 2008
7. HECHT_OPTIK: Optik, Eugene Hecht, (2018, 7.Auflage, De Gruyter, ISBN 978-3-11-052664-6) (an der U.A.S nur als Printausgabe verfügbar)
8. TRAD_LAS1983: Laser, K. Tradowsky, (1983, Vogel Verlag, 4. Auflage ISBN 3-8023-0021-1)
9. * LÖFF_2012: Optische Sensorik, Martin Löffler-Mang. Vieweg+Teubner, 2012, ISBN 978-3-8348-1449-4
10. <https://www.leifiphysik.de/>
11. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kategorie:Laserphysik>

Physik Allgemein

12. EICH_PHYS2007: Physik – Grundlagen für das Ingenieurstudium, J. Eichler (2007, 3. Auflage, Vieweg ISBN 978-3-8348-0223-1)
13. PITK_PHYS2013: Physik – Der Grundkurs, R. Pitka (2013, 5. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel ISBN 978-3-8085-5621-4)
14. DOHL_PHYS2018: Physik - Basiswissen für Studierende technischer Fachrichtungen, R. Dohlus (2018, 2. Auflage, Springer ISBN 978-3-658-22779-1)
15. OSTE_PHYS2018: Eine Rundreise durch die Physik - Ein kompakter Überblick von der Kinematik zum Quantencomputer, W.W. Osterhage (2018, 2. Auflage, Springer ISBN 978-3-662-57836-0)

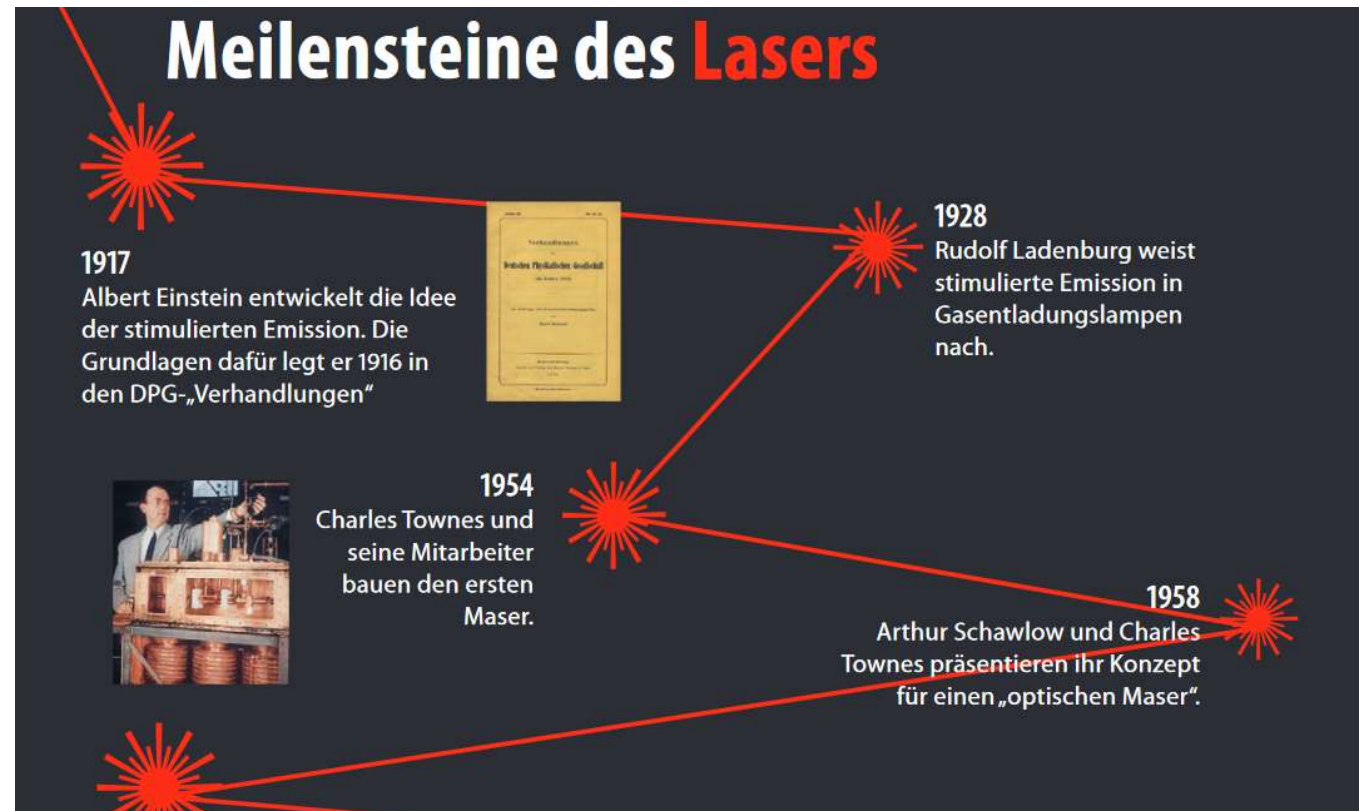
Die fett markierten Bücher sind als z.B. e-Book in der U A S Bibliothek verfügbar

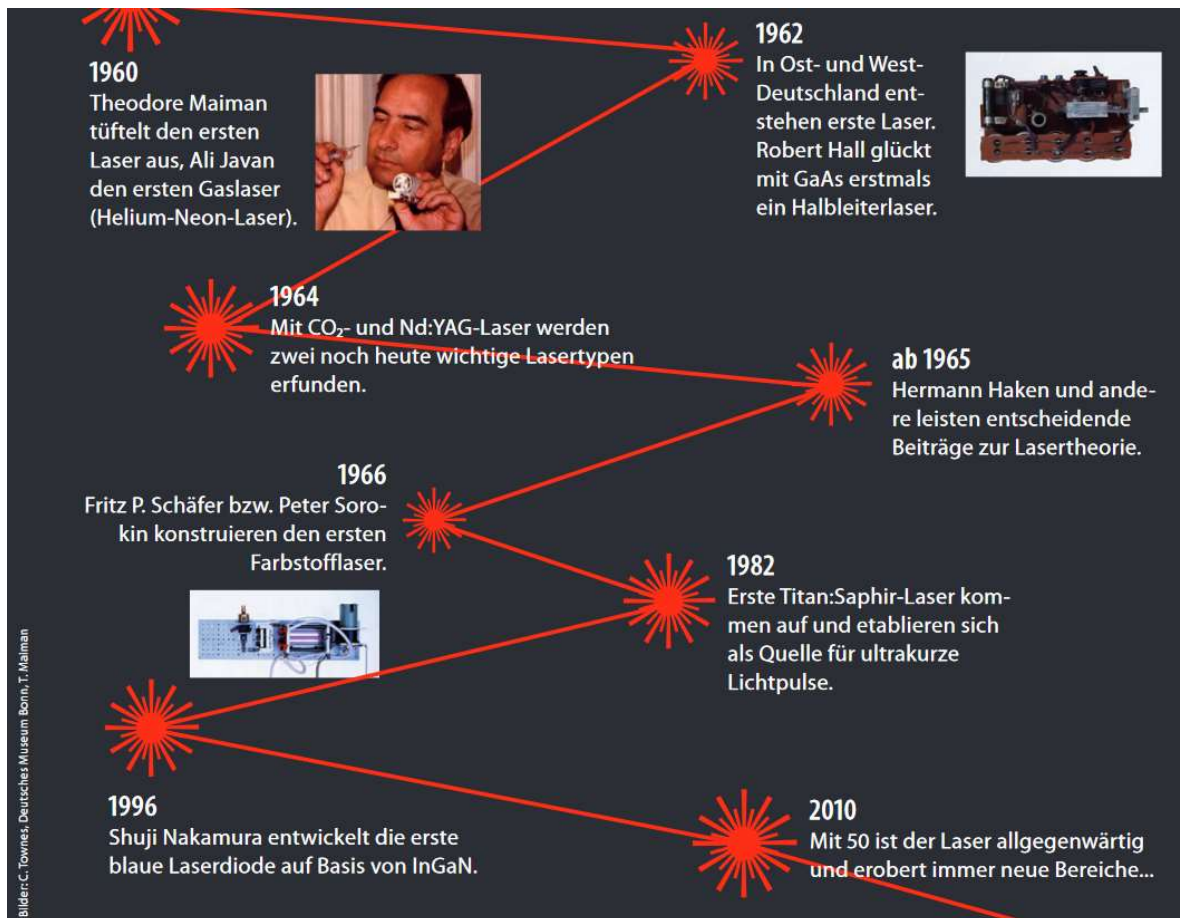
Laser Allg. Einführung

Was bedeutet der Begriff: Laser?

L
A
S
E
R

Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation

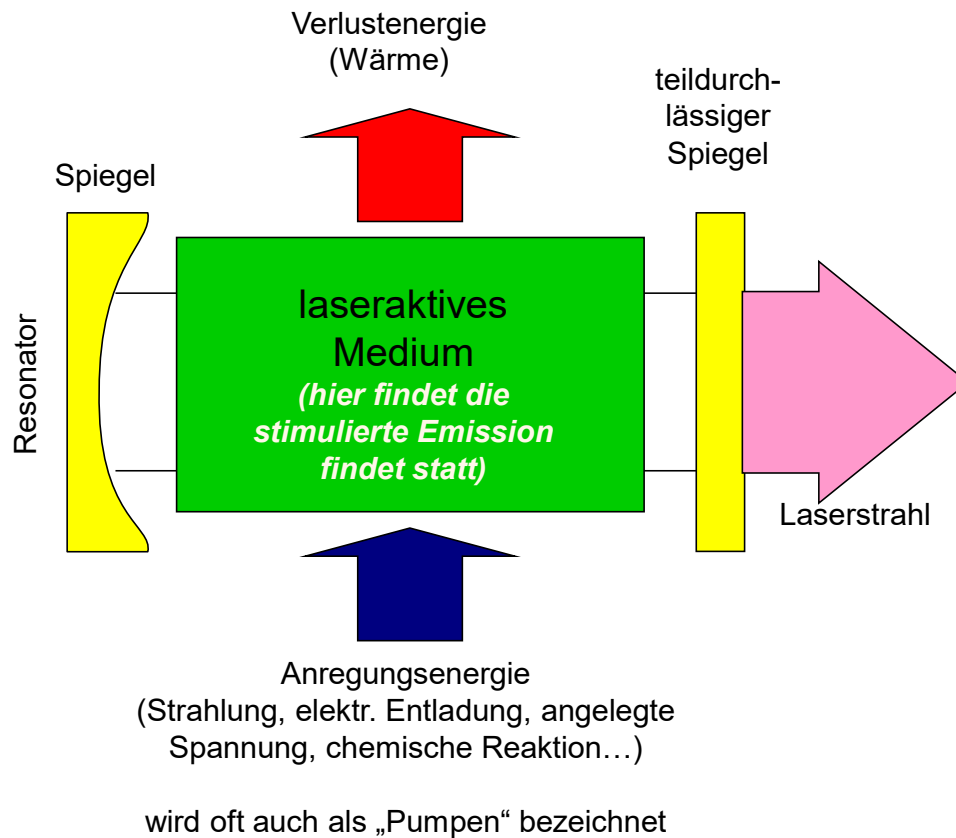




Quelle: Physik Journal, Juli 2010

<https://www.pro-physik.de/physik-journal/juli-2010>

Allgemeiner Laser Aufbau



Aufbau:

1. **Laseraktives Medium**
2. **Resonator**
3. **Quelle zur Anregung**

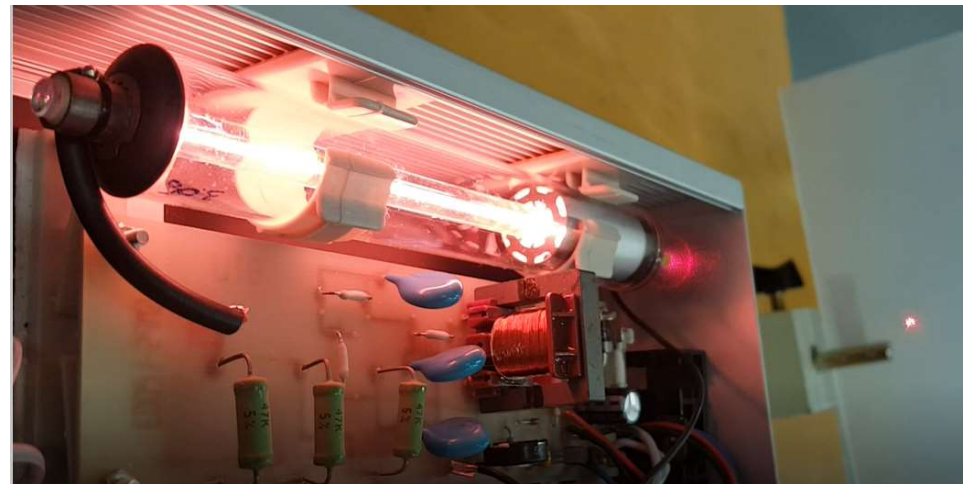
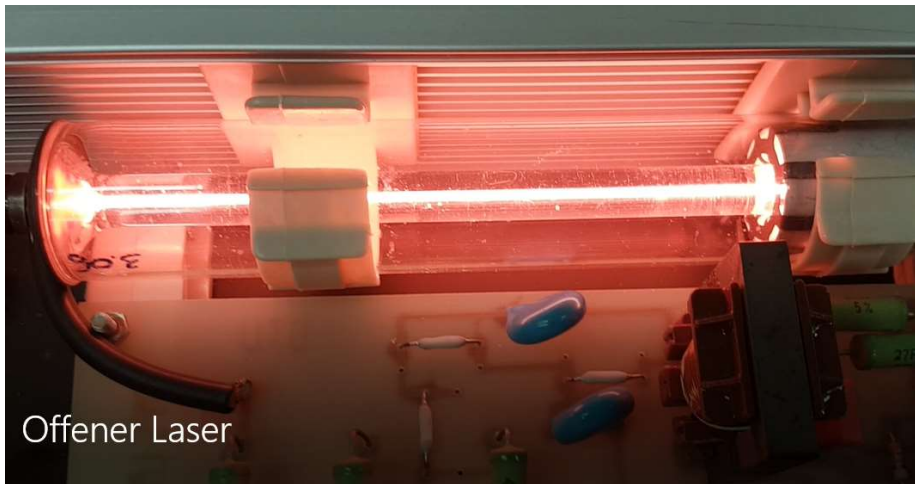
Anregung erzeugt
Besetzungsinversion im laseraktiven
Medium

Stimulierte Emission
findet statt

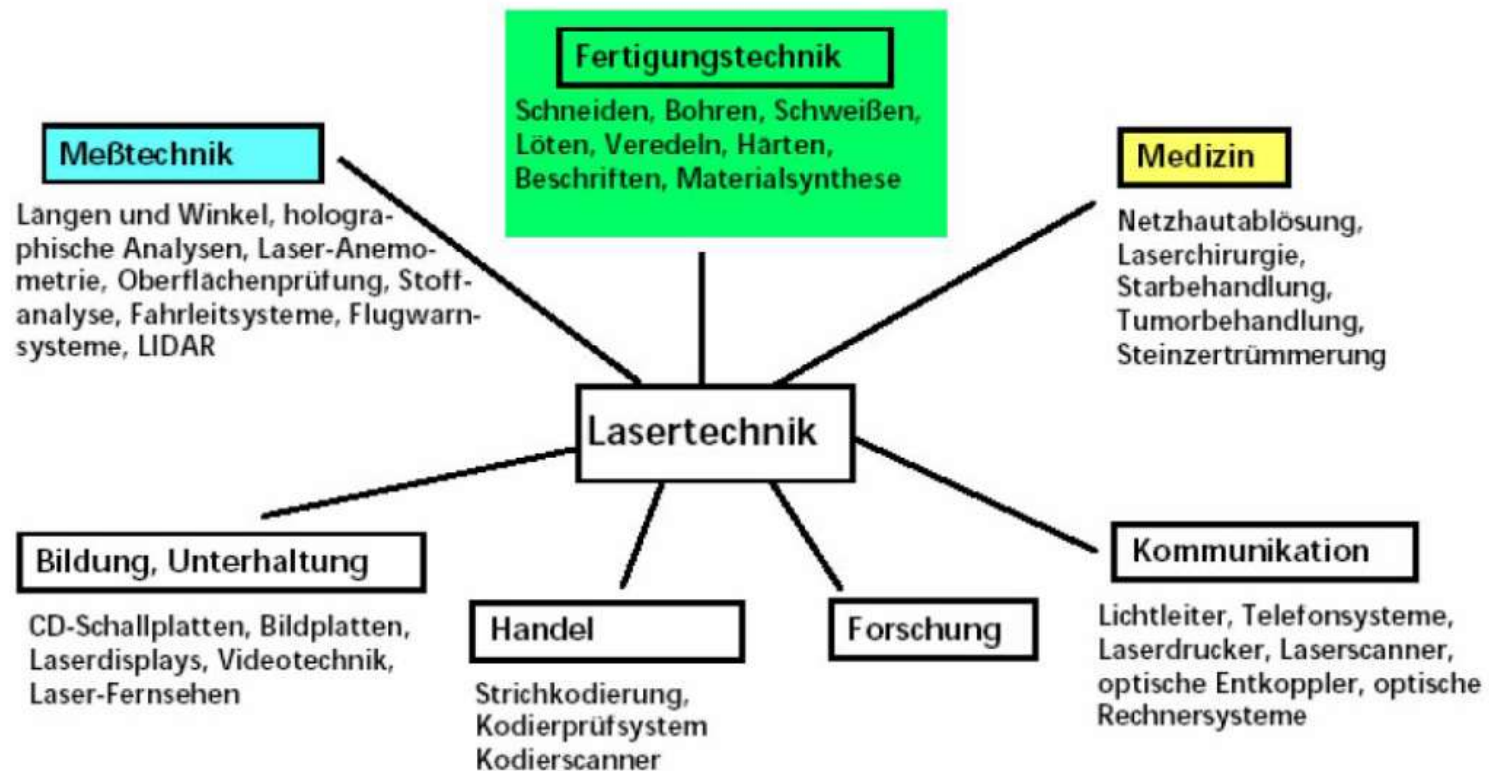
**Verstärkung der Strahlung im
Resonator** bis zur Überschreitung der
Laserschwelle

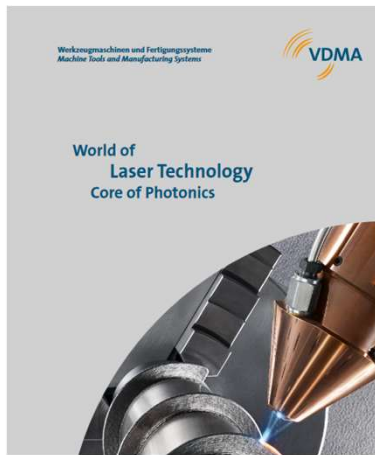
Teil der Strahlung
wird durch teildurchlässigen Spiegel
ausgekoppelt

Helium-Neon-Laser



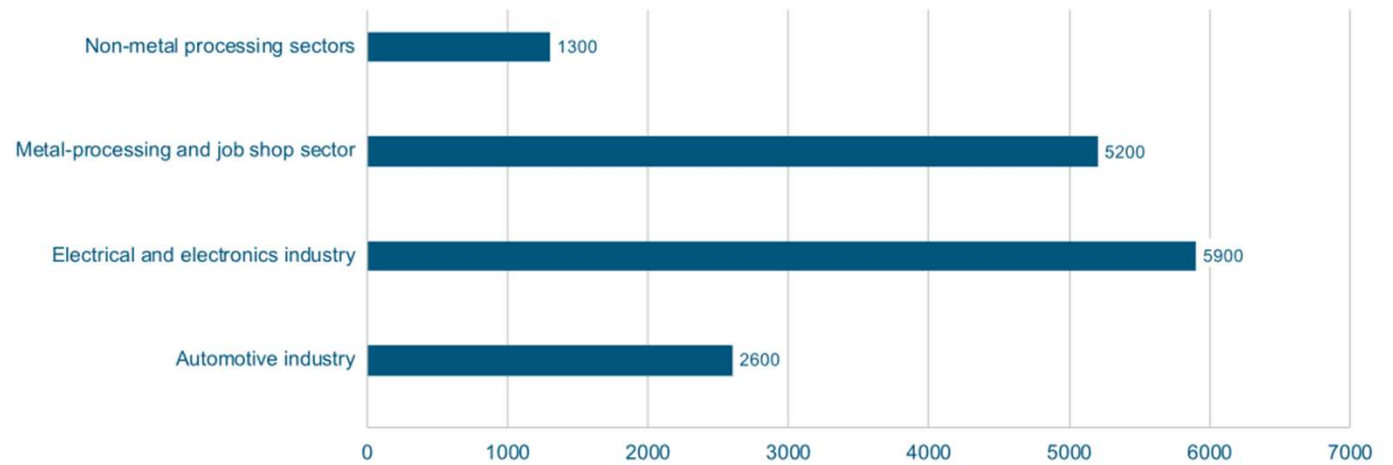
Übersicht: Laser Anwendungen





https://www.vdma.org/documents/34570/4884804/pub_VDMA_2021_World_of_Laser_Technology.pdf/2607f453-a2f6-5872-b424-9c6688c3f660?t=1627291992830

World market structure for laser systems 2020 by user industry



Quelle: Optech Consulting

Licht Grundlagen

Licht als Elektromagnetische Welle

Grundgrößen der EM-Welle

Wellengleichung

Erzeugung von Licht

elektromagnetisches Gesamtspektrum

Teilgebiete der Physikalischen Optik

... und
gelb markiert =
Bereiche mit
besonderer
Relevanz für die
Lasertechnik

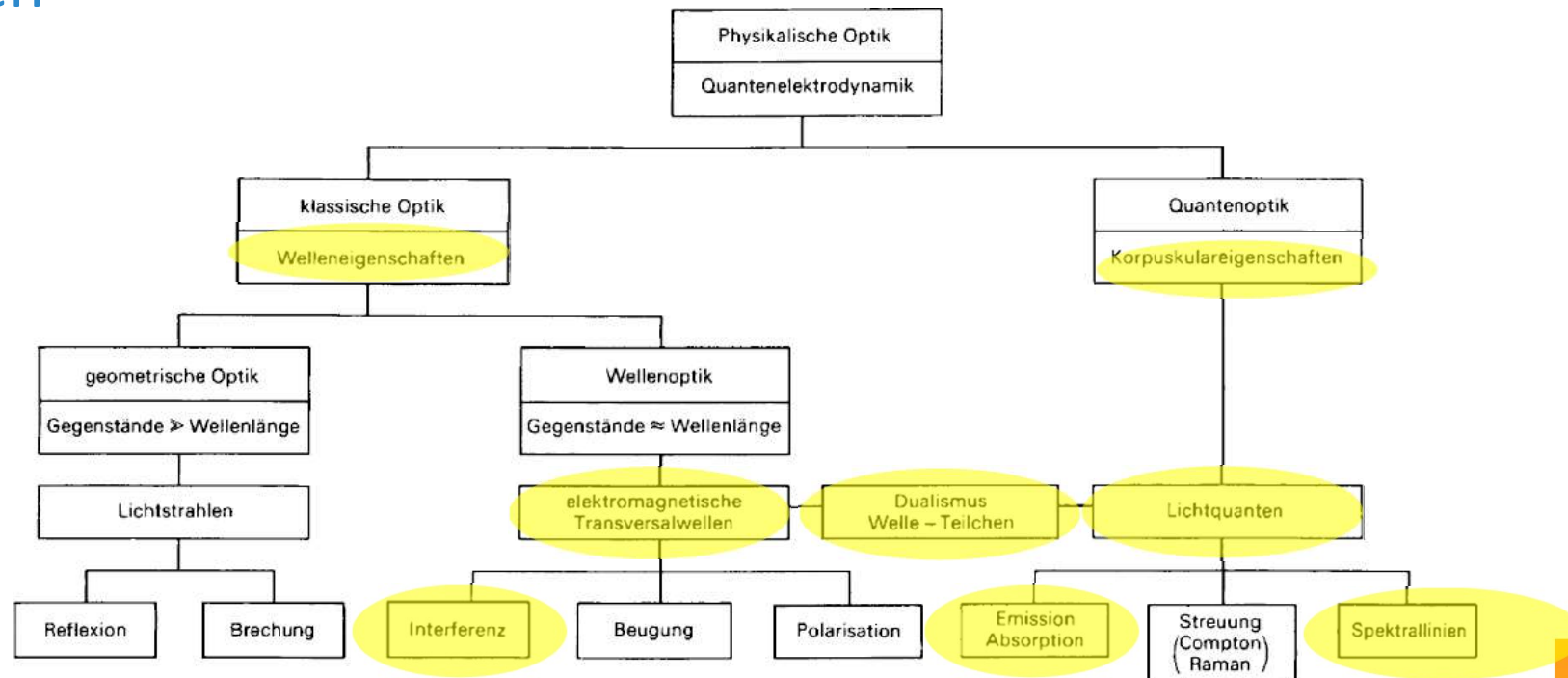


Abb. 6.1 Strukturbild physikalische Optik

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
E. Hering, R. Martin, M. Stohrer, *Physik für Ingenieure*, https://doi.org/10.1007/978-3-662-63177-5_6

Licht als Welle oder als Teilchen

Wellentheorie:

- Licht = Elektromagnetische Welle
- Erklärt: Typische Optische Phänomene wie: Interferenz, Beugung, Polarisation etc.

Teilchentheorie:

- Licht = Teilchen, Photonen
- Erklärt: Effekte auf atomarer Ebene wie „spontane Emission“, „Absorption“ und die „Stimulierte Emission“
➔ Laser

Licht als elektromagnetische Welle

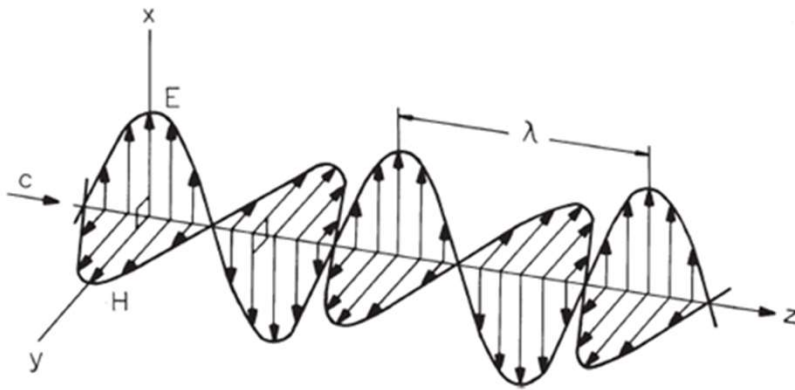


Bild 1.1. Elektrische (E) und magnetische Feldstärke (H) in einer Lichtwelle zu einem festen Zeitpunkt. Die Welle breitet sich in z -Richtung aus. Der Abstand zur Lichtquelle ist als groß angenommen (Fernfeld)

Wellenlänge: λ [nm] (Entfernung von Wellenberg zu Wellenberg)

Frequenz: ν [Hz] (griechischer Buchstabe nu) E-Feld oszilliert mit dieser Frequenz)

Zusammenhang: $c = \nu \lambda$ (c = Lichtgeschwindigkeit)

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-wellen/grundwissen/ausbreitung-elektromagnetischer-wellen>

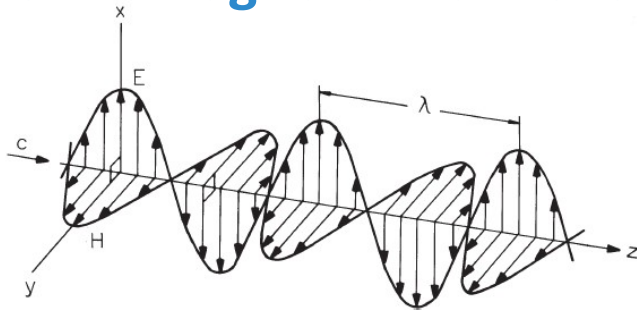
Schöne Animation im Internet:
Hier klicken um die Animation zu sehen



Licht im Wellenbild

- Zeitlich und örtlich veränderliches elektrisch und magnetisches Wechselfeld
- Vektoren der elektrischen Feldstärke $E_{xy}(z,t)$ und der magnetischen Feldstärke $H_{xy}(z,t)$
- E und H stehen immer senkrecht zueinander und **immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung = Transversalwelle**
- Zusammenhang lässt sich aus den Grundgleichungen der Elektrodynamik (J. Maxwell Gleichungen) und der Wellengleichung herleiten

Lösung der Wellengleichung: Die ebene, lineare elektromagnetische Welle und ihre Kenngrößen



Darstellung einer ebene Welle, die sich in z-Richtung ausbreitet und deren E-Feld in x-Richtung zeigt:

$$(1) \quad \vec{E}_x(z, t) = E_{x0} \cos(kz - \omega t + \varphi)$$

(hier dann $E_y = E_z = 0$)

Alternative Schreibweise

$$(2) \quad \vec{E}_x(z, t) = E_{x0} e^{i(kz - \omega t + \varphi)}$$

mit $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$

Übereinkunft: physikalische Größen $\leftrightarrow$ Realteil

Beide Schreibweisen (1) und (2) erfüllen die Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} * \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} \right)$$

Analog könnte man auch das B-Feld oder H-Feld darstellen.

Da aber die meisten physikalischen Effekte sich besser über das E-Feld erklären lassen, wird die EM Welle üblicherweise über das E-Feld dargestellt.

- **Amplitude:** E_{x0}
- **Frequenz:** $f = 1/T$ bzw. **Kreisfrequenz:** $\omega = 2 * \pi * f$
(mit T = Schwingungsdauer, ω = Kreisfrequenz)
[1/s oder Hz]
- **Anfangsphase (bei $z=0$ und $t=0$):** φ
- **Wellenlänge:** λ (Lambda) [m]
- **Wellenzahl:** $k = \frac{2 * \pi}{\lambda}$ (Anzahl der Wellenzüge pro m mal $2 * \pi$ [1/m])
- **Ausbreitungsgeschwindigkeit / Phasengeschwindigkeit:**
 $c = \frac{\omega}{k}$ [m/s] (Licht im Vakuum: c = Lichtgeschwindigkeit)
- **Lichtgeschwindigkeit Vakuum:** $c_{\text{vak}} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 * \mu_0}}$
- **Zusammenhang c , f , λ :** $c = f * \lambda$

Maxwell Gleichungen (1873) (James Clerk Maxwell 1831-79)

Integralschreibweise

1. Ursprung eines elektrischen Felds ist eine elektrische Ladung(sverteilung)
2. Magnetische Felder B sind in sich geschlossen (haben keine Quellen)
3. Ein zeitlich veränderliche magnetische Flußdichte dB/dt induziert ein E-Feld
4. Ein Strom j oder eine zeitlich veränderliche elektr. Flußdichte dD/dt erzeugen ein H-Feld (Magnetfeld)

$$\epsilon_r \epsilon_0 \oint_A \vec{E} \cdot \vec{n} dA = \int_V \rho(\vec{r}) dV$$

$$\oint_A \vec{B} \cdot \vec{n} dA = 0$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_A \vec{B} \cdot \vec{n} dA$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot \vec{n} dA$$

Siehe Dohlus, Kap 4.3.8

Differentialschreibweise

$$(1) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$(2) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$(3) \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$(4) \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} = \text{Nabla - Operator}$$

Magnetisches Feld H hier dargestellt durch die magnetische Flußdichte B mit $B = \mu_0 * H$ und μ_0 = Permeabilitätskonstante (im Vakuum) (sonst: $\mu = \mu_0 \mu_r$)

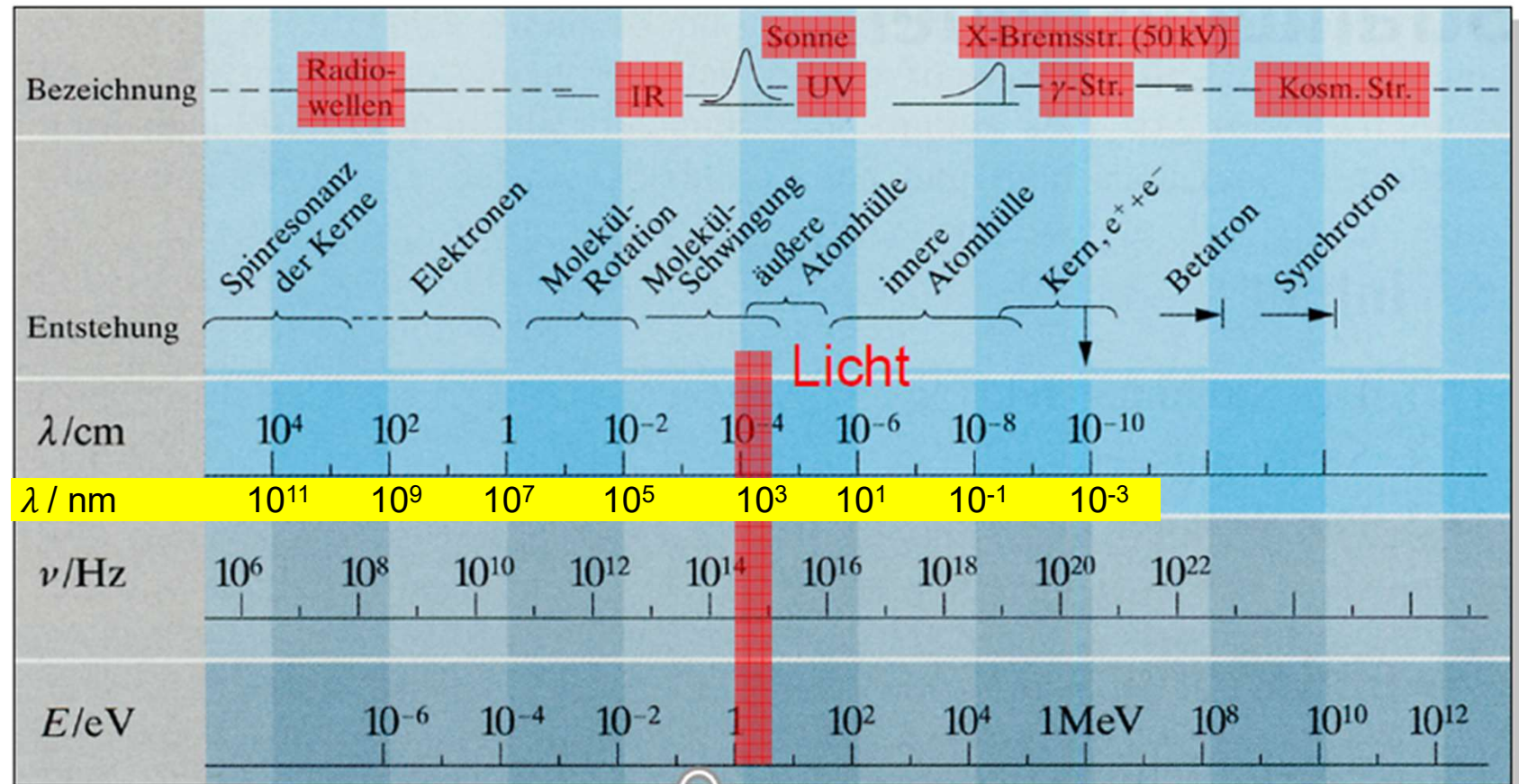
Aus den Maxwell-Gleichungen lässt sich die **Wellengleichung** für das E-Feld (und ebenso das B-Feld) herleiten

Allg. Wellengleichung

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 * \mu_0} * \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\epsilon_0 * \mu_0} = c^2$$

Gesamtspektrum der elektromagnetischen Strahlung - das sichtbare Licht ist nur ein Teil dieses Spektrums



Experimentalphysik für Biologen und Chemiker, O. Benson & A. Peters, Humboldt-Universität zu Berlin

Sichtbares Spektrum

Licht als Teilchen

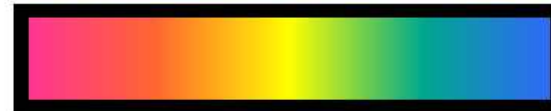
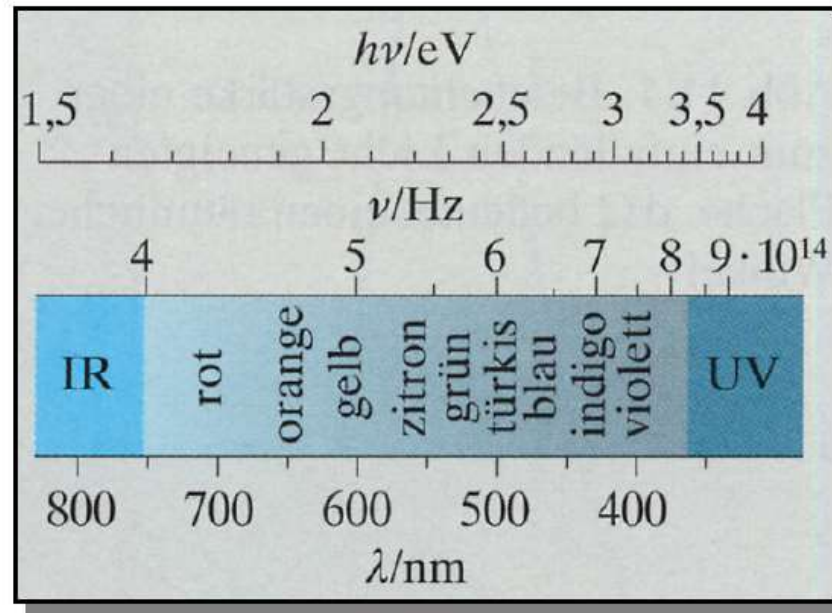
Energie [eV]:

Frequenz [Hz]:

Wellenlänge [nm]:

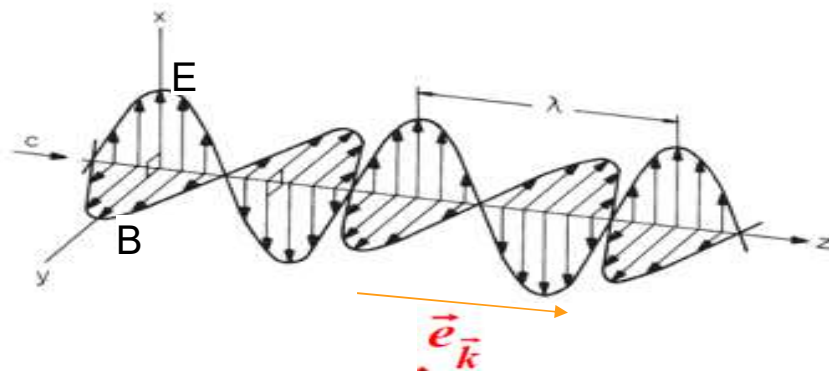
Licht als Welle

Licht als Welle



$$\lambda = c/f$$

Elektromagnetische Wellen (EM-Wellen) sind **Transversalwellen** und die Schwingungsrichtung des E-Vektors bestimmt die **Polarisation**



Einsetzen der Lösungen in die Maxwellgleichungen liefert zusätzliche Erkenntnisse:

- E-Feld (und B-Feld) stehen beide senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
 $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
→ EM-Welle ist eine Transversalwelle

- E-Feld und B-Feld stehen immer senkrecht zueinander** und sind zueinander proportional
→ $E = c \cdot e_k \times B$

- Wichtiges Beispiel (siehe Zeichnung):
E-Feld schwingt nur in einer festen Richtung (hier x)
→ diese EM-Welle ist linear polarisiert (in x-Richtung) (andere Richtungen in der xy-Ebene oder Drehung der Schwingungsrichtung (zirkular polarisiertes Licht) sind ebenfalls möglich)

$$\mathbf{E}(x,y,z,t) = \begin{pmatrix} E_0 \cdot \cos(\omega t - kz) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Und analog

$$\mathbf{B}(x,y,z,t) = \begin{pmatrix} 0 \\ B_0 \cdot \cos(\omega t - kz) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Wir beobachten in der Regel die (Licht)-intensität I –

Die Intensität lässt sich aus der **Energiestromdichte** der EM-Welle ableiten

- EM-Wellen transportieren auch Energie. Die **Energiestromdichte** ist definiert durch den sog. Poynting Vektor

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

- Man kann (durch Einsetzen in Maxwell- und Wellen-Glg) zeigen, dass

- $\mathbf{E} = c * \mathbf{e}_k \times \mathbf{B}$

- bzw. mit $\mathbf{E} = (E_x, 0, 0)$ und $\mathbf{B} = (0, B_y, 0)$: $E_x = c * B_y$

- Weiter gilt $c^2 = 1/(\epsilon_0 \mu_0)$

- $\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \rightarrow |\mathbf{S}| = \frac{1}{\mu_0} E_x * B_y = \frac{1}{c \mu_0} E_x * E_x = c \epsilon_0 E_x^2$ Einheiten: $\frac{\frac{m}{s} \frac{As}{Vm}}{\frac{m}{m}} = VA/m^2 = W/m^2$

- E_x^2 schwingt mit $E_x^2 = \cos^2(\omega t)$

→ Ein realer Sensor (z.B. Photodiode, Camera, Auge) misst das zeitliche Mittel

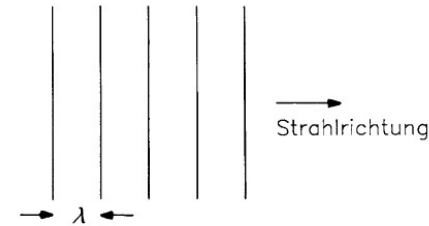
→ **Intensität $I = \langle |\mathbf{S}| \rangle$ (zeitlicher Mittelwert) = $c * \epsilon_0 E_0^2 \langle \cos^2(\omega t) \rangle$** mit Mittelwert von $\cos^2(\omega t) = \frac{1}{2}$

- → gemessene Intensität: $I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$ [Einheit: $\frac{W}{m^2}$] Leistung pro Fläche

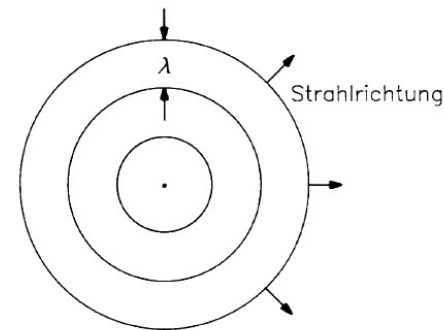
Ebene vs. Kugelwelle, Lineare Welle

Im Zusammenhang mit Interferenzmessungen spricht man oft von der „ebenen, linearen“ Welle?

- **„ebene Welle“**: die Wellenfronten sind Ebenen (im Gegensatz zur Kugelwelle: dort sind es Kugelschalen)
- **„lineare Welle“**: es gilt das sog. **Superpositionsprinzip**, d.h. mehrere Einzelwellen können zu einer Gesamtwelle überlagert werden (z.B. Interferenz)



Ebene Welle
(hier in 2D)



Kugelwelle al
Welle (hier in
2D)

$$E_{ges} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

Zu beachten: Wir beobachten i.d.R. nicht
direkt das E-Feld sondern die
INTENSITÄT: $I \sim |E^2|$

Zusammenhang c , ϵ , μ , n

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum: $c_{\text{vakuum}} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

ϵ_0 Elektrische Feldkonstante $8,854\,187\,8128(13) \cdot 10^{-12} \frac{\text{A s}}{\text{V m}}$

μ_0 Magnetische Feldkonstante $1,256\,637\,062\,12(19) \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$

Im einem Medium gilt: $c_{\text{medium}} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$, dabei sind ϵ_r und μ_r die relative Permittivität (ϵ_r) und die relative Permeabilität (μ_r)

ϵ_r und μ_r sind im Vakuum = 1 und sonst >1, daher ist die Lichtgeschwindigkeit im Medium geringer als im Vakuum
 $c_{\text{medium}} < c_{\text{vakuum}}$ und es gilt

$c_{\text{medium}} = \frac{c_{\text{vakuum}}}{n}$ mit $n = \text{Brechungsindex}$, $n = \sqrt{\epsilon_r}$ in nicht magnetischen Materialien (mit $\mu_r = 1$)

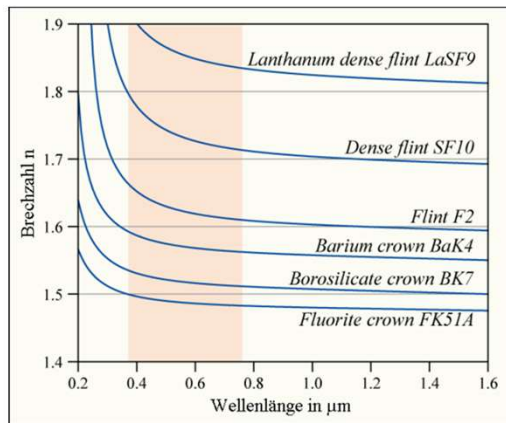
ACHTUNG: ϵ_r und μ_r können sich in Abhängigkeit von **Lichtwellenlänge**, Intensität, Richtung, Polarisation etc. ändern
→ dann gilt z.B.: $\epsilon_r = \epsilon_r(\lambda)$ bzw. $n = n(\lambda)$ → das nennt man Dispersion

Brechungsindex einiger Materialien

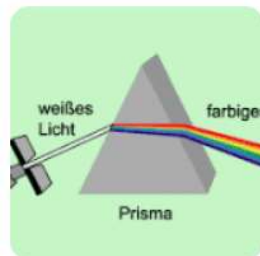
n = Brechungsindex,
 $n^2 = \epsilon_r$

$\epsilon_{r,\text{Glas}} = 2.1 - 4.57$

Hier gelten die n -Werte für Licht
 Der Wellenlänge 589 nm,
 bzw ca. $5 \cdot 10^{14}$ Hz



Hier spielt die **Dispersion** eine Rolle, d.h. $n = n(\lambda)$ und $\epsilon_r(\lambda)$ sind abhängig von der Lichtwellenlänge λ



Brechungsindex ausgewählter Stoffe bei der Wellenlänge
 589 nm (gelb-orange) der Natrium-D-Linie.^{[8][9]}

Material	Brechungsindex n
Vakuum	exakt 1
Helium (Normbedingungen)	1,000 034 911
Luft (Normbedingungen)	1,000 292
Schwefelhexafluorid (Normbedingungen)	1,000 729
Aerogel	1,007 ... 1,24
Eis	1,31
Wasser (liqu.) 20 °C	1,3330
menschl. Augenlinse	1,35 ... 1,42
Ethanol ^[10] (liqu.)	1,3614
Magnesiumfluorid	1,38
Flussspat (Calciumfluorid)	1,43
menschliche Epidermis	1,45
Tetrachlorkohlenstoff (liqu.)	1,4630
Quarzglas	1,46
Glycerin (liqu.)	1,473 99
Celluloseacetat (CA)	1,48
PMMA (Plexiglas)	1,49
Kronglas	1,46 ... 1,65
Benzol (liqu.)	1,5011
Fensterglas	1,52 ^[11]
Mikroskopische Deckgläser	1,523
COC (ein Kunststoff)	1,533
PMMA (ein Kunststoff)	1,534
Quarz	1,54
Halit (Steinsalz)	1,54

Polystyrol (PS)	1,58
Polycarbonat (PC)	1,585
Epoxidharz	1,55 ... 1,63
Flintglas	1,56 ... 1,93
Kohlenstoffdisulfid (liqu.)	1,6319
Kunststoffglas für Brillen	bis 1,76
Diiodmethan (liqu.)	1,7425
Rubin (Aluminiumoxid)	1,76
Mineralglas für Brillen (polarisierend)	bis 1,9 (1,5)
Glas	1,45 ... 2,14
Bleikristall	bis 1,93
Zirkon	1,92
Schwefel	2,00
Zinksulfid	2,37
Diamant	2,42
Titandioxid (Anatas)	2,52
Siliciumcarbid	2,65 ... 2,69
Titandioxid (Rutil)	3,10