

Physik II

Christian Schwanenberger

**Deutsches Elektronensynchrotron (DESY)
Hamburg**

christian.schwanenberger@desy.de

www-d0.fnal.gov/~schwanen

www.desy.de/~schwanen

Tel.: 040-8998-6004



Elektrodynamik und Optik



1858–1947

Max Karl Ernst Ludwig Planck, FRS was a German theoretical physicist whose work on quantum theory won him the Nobel Prize in Physics in 1918. [Wikipedia](#)

Noch früher als sein naturwissenschaftliches Interesse zeigte sich eine zweite Seite seiner reichen Begabung: Seine außergewöhnliche Musikalität. Er besaß das absolute Gehör, lernte hervorragend Klavier spielen, sang in mehreren Chören und komponierte später als Student für Hausmusikabende kleine Stücke und sogar eine Operette. Als Student betätigte er sich auch als Dirigent im Akademischen Gesangverein und spielte Orgel bei Studenten-Gottesdiensten.

Auch die Liebe zu den Bergen, die ihn sein ganzes Leben begleiten sollte, hatte ihre Wurzeln in den Eindrücken seiner frühen Jugendjahre. Die Sitte seines Vaters, in den Ferien mit der ganzen Familie in irgend ein einsames Tiroler Bergdorf zu ziehen und dort die ganze Umgebung zu erwandern, hat er bis ins hohe Alter beibehalten.

Mit noch nicht einmal 17 Jahren macht Max Planck das Abitur. Sieben Jahre am Gymnasium galten damals für Hochbegabte als ausreichend. Die Studienwahl fällt ihm schwer. Er schwankt zwischen Musik und Physik.

Ein Freund der Familie, der Physiker Professor Jolly, rät von der Physik ab - mit einer Begründung, die uns heute, wenn wir die fachlichen Leistungen Max Plancks im Auge haben, fast paradox anmutet. Jolly rät vom Physikstudium ab, weil "in dieser Wissenschaft schon fast alles erforscht sei". Und als Planck sich informiert, welche Aussichten ein Musikstudium eröffnen könnte, erhält er die harte Antwort: "Wenn Sie sich erst erkundigen, dann lassen Sie es besser bleiben."

→ wir machen hier
"klassische Physik"

Inhalt der Vorlesung – Teil 1

1 Einleitung	7	4 Statische Magnetfelder	35
1.1 Übersicht	7	4.1 Magnetismus und Ströme	35
1.2 Literatur zu Elektromagnetismus und Optik	9	4.2 Lorentz-Kraft	36
2 Elektrostatik	10	4.3 Biot-Savart Gesetz	38
2.1 Coulomb-Kraft und elektrische Ladung	10	4.4 Ampere'sches Gesetz	39
2.2 Das MKSA Einheitensystem	11	4.5 Leiterschleife und magnetischer Dipol	41
2.3 Die Elementarladung	12	4.6 Magnetfeld der Erde	43
2.4 Das Elektrische Feld	14	4.7 Hall-Effekt	44
2.5 Elektrisches Potential und Spannung	15	4.8 Das Vektorpotential	45
2.6 Influenz und Metalle	16	4.9 Materie im Magnetfeld	47
2.7 Ladungsverteilungen	18	5 Induktion	50
2.7.1 Superpositionsprinzip	18	5.1 Statische und zeitlich veränderliche Felder	50
2.7.2 Elektrischer Dipol in einem äußeren Feld	19	5.2 Faraday'sches Induktionsgesetz	51
2.7.3 Das Potential eines Dipols	19	5.2.1 Lenz'sche Regel	52
2.7.4 Flächenladungen, Kondensator und Kapazität	21	5.2.2 Stromerzeugung	53
2.7.5 Raumladungen und Multipole	22	5.2.3 Wirbelströme	53
2.8 Gauß'scher Satz	23	5.3 Selbst-Induktivität	54
2.8.1 Integrale und Differentielle Form	23	D Differentialgleichungen	119
2.8.2 Begründung des Gauß'schen Satzes	24	D.1 Herleitung der harmonischen Schwingung	119
2.8.3 Anwendung des Gauß'schen Satzes	25	D.2 Lösung für eine freie harmonische Schwingung	120
2.9 Energie des E -Feldes	27		
2.10 Dielektrika	28		
3 Elektrische Leitung	30		
3.1 Strom und Ladungserhaltung	30		
3.2 Mechanismen des Ladungstransports	31		
3.3 Stromkreise	33		

→ Prof. Schleper

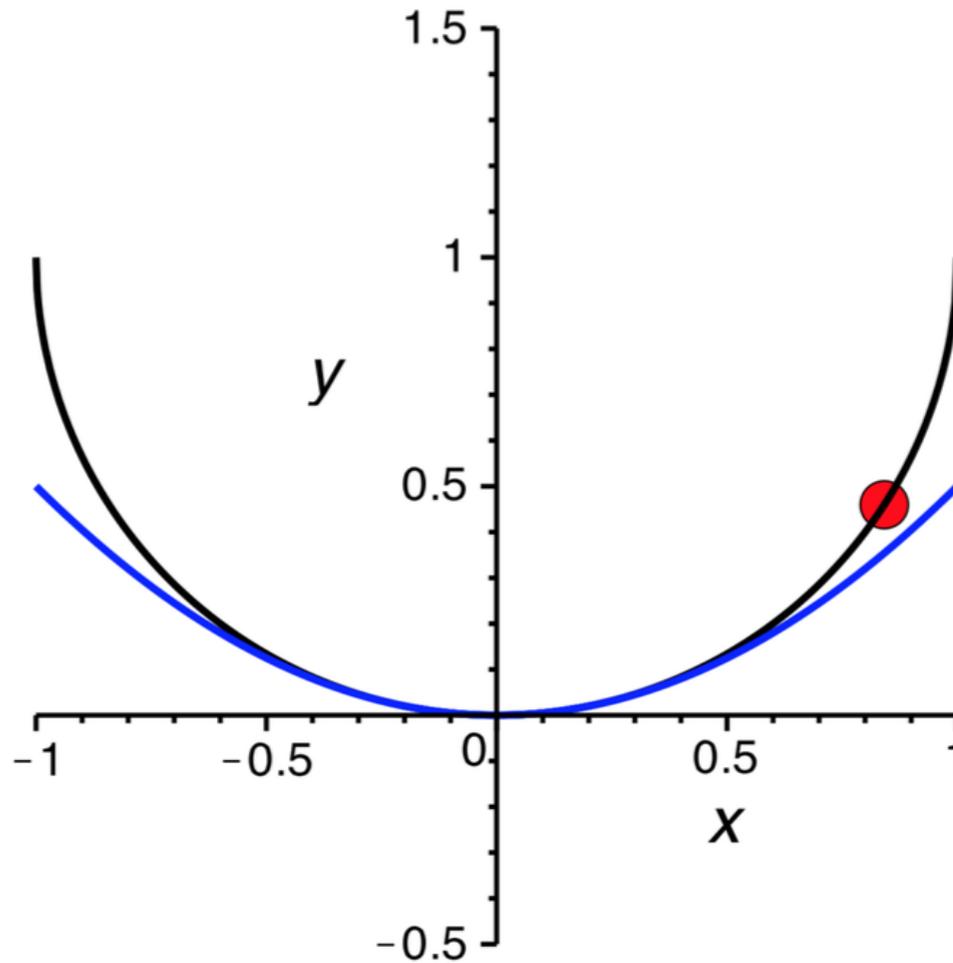
Inhalt der Vorlesung – Teil 2

D Differentialgleichungen	119		
D.3 Gedämpfte harmonische Schwingung	123		
D.4 Gedämpfter harmonischer Oszillator mit äußerer Anregung	124		
6 Schaltkreise	55		
6.1 Schaltvorgänge mit Spulen und Kondensatoren	55		
6.1.1 Einschalten einer Spule	55		
6.1.2 Einschalten eines Kondensators	56		
6.1.3 Ausschalten einer Spule	56		
6.2 Energiedichte des Magnetfelds	57		
6.3 Energie im Wechselstromkreis	58		
6.4 Komplexe Widerstände	59		
6.4.1 Ohm'scher Widerstand	60		
6.4.2 Kondensator	60		
6.4.3 Spule	60		
6.4.4 R-L-C Schaltungen	61		
6.5 Wechselstromschaltungen	62		
6.5.1 R-C Glied als Hochpass	62		
6.5.2 R-C Glied als Tiefpass	63		
6.6 R-C-L Serienschwingkreis als Frequenzfilter	63		
6.7 R-C-L als Parallelschwingkreis	64		
7 Maxwell - Gleichungen	66		
7.1 Der Verschiebungsstrom	66		
7.2 Zusammenfassung der Maxwell-Gleichungen	68		
7.3 Maxwell-Gleichungen in Materialien	69		
7.4 Skalares Potential und Vektorpotential	69		
7.4.1 Maxwell-Gleichungen und Potentiale	70		
7.4.2 Eichtransformationen	71		
7.4.3 Bedeutung der Potentiale	72		
C Wellen	114		
C.1 Harmonische Wellen	114		
C.2 Beispiele für Wellen	115		
C.3 Wellengleichung und Form der Lösungen	116		
C.4 Ebene Wellen und Kugelwellen	117		
C.5 Linearität und Superposition	117		
8 Elektromagnetische Wellen	74		
8.1 Ableitung	74		
8.2 Spektrum der elektromagnetischen Wellen	75		
8.3 Polarisation	75		
8.4 Energie und Poynting-Vektor	77		
8.5 Impuls und Druck	77		
8.6 Erzeugung elektromagnetischer Wellen	79		
9 Optik	83		
9.1 Huygens'sches Prinzip	83		
9.2 Reflexion und stehende Wellen	84		
9.3 Brechung und Totalreflexion	85		
9.4 Polarisation durch Brechung	86		
9.5 Dispersion	87		
9.6 Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	93		
9.7 Linsen und Abbildungen	94		
9.8 Kohärenz	96		
9.9 Interferenz	97		
9.10 Beugung	99		
9.11 Dopplereffekte	105		

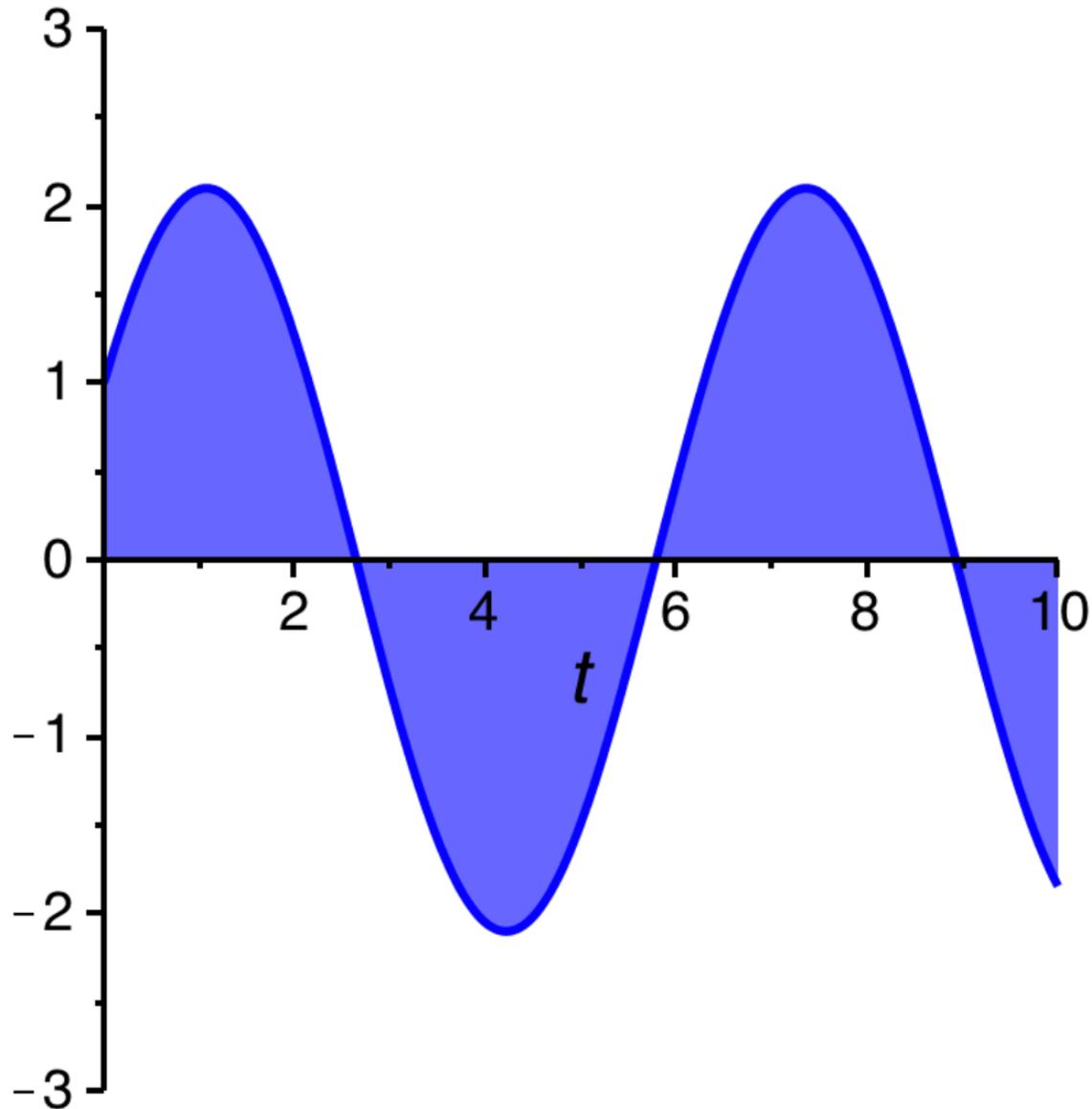
Anhang D: Differentialgleichungen

D	Differentialgleichungen	119
D.1	Herleitung der harmonischen Schwingung	119
D.2	Lösung für eine freie harmonische Schwingung	120
D.3	Gedämpfte harmonische Schwingung	123
D.4	Gedämpfter harmonischer Oszillator mit äußerer An- regung	124

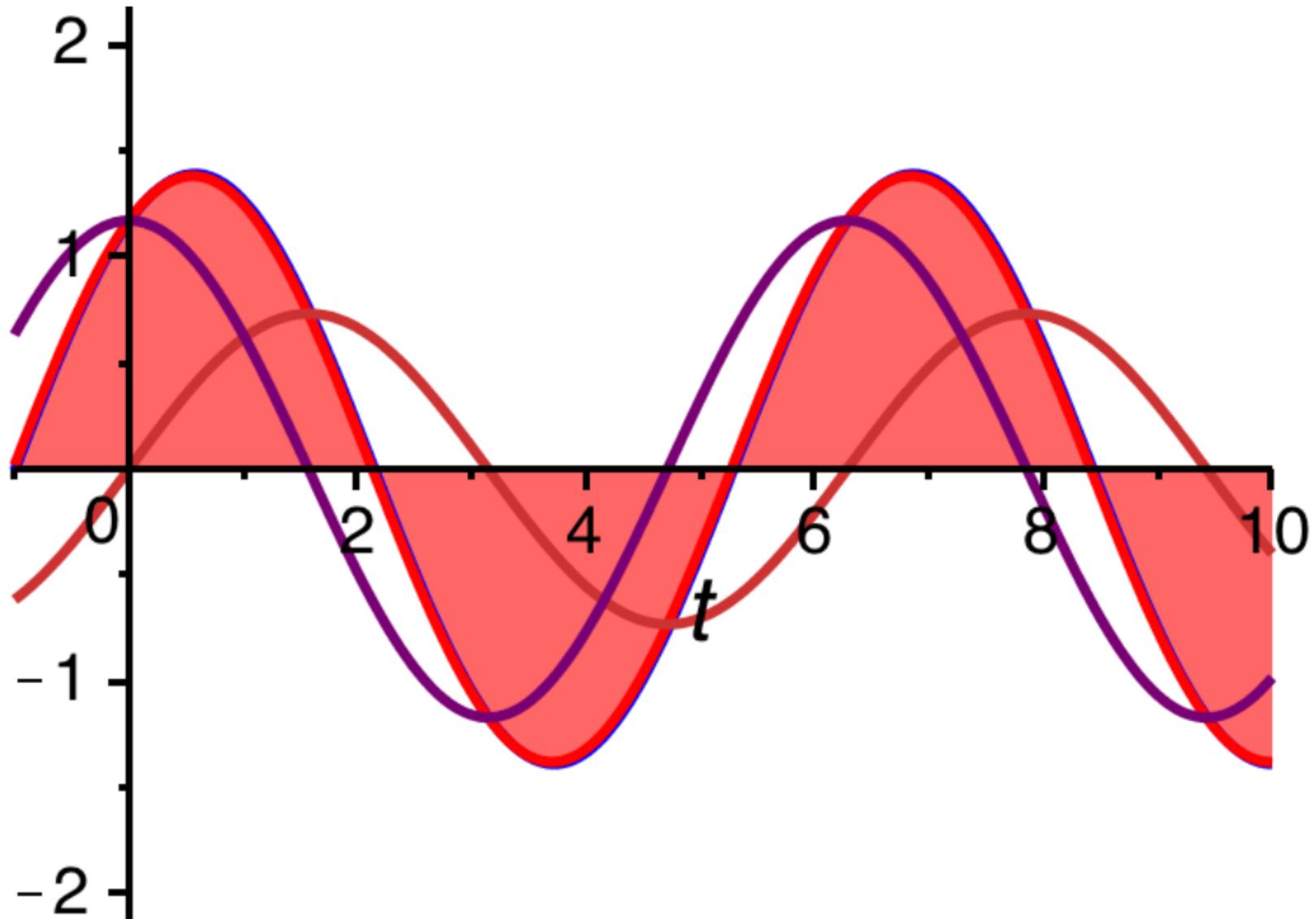
Harmonische Näherung



Schwingung mit Anfangsgeschwindigkeit

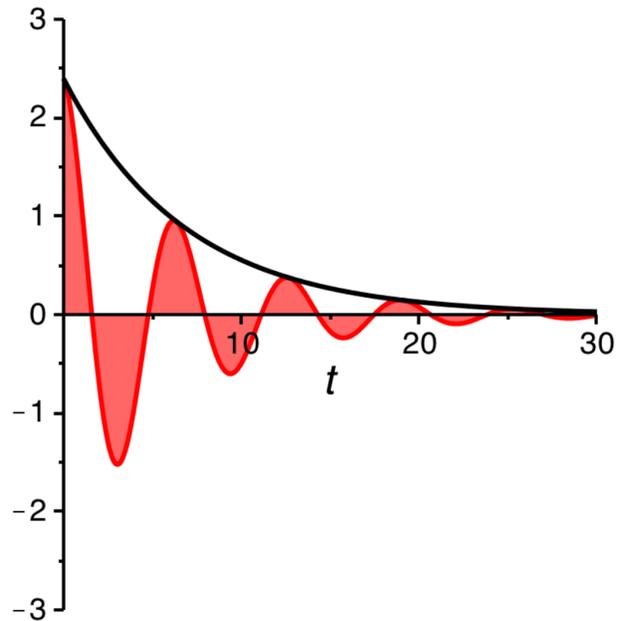


Summe einer sin und cos Funktion



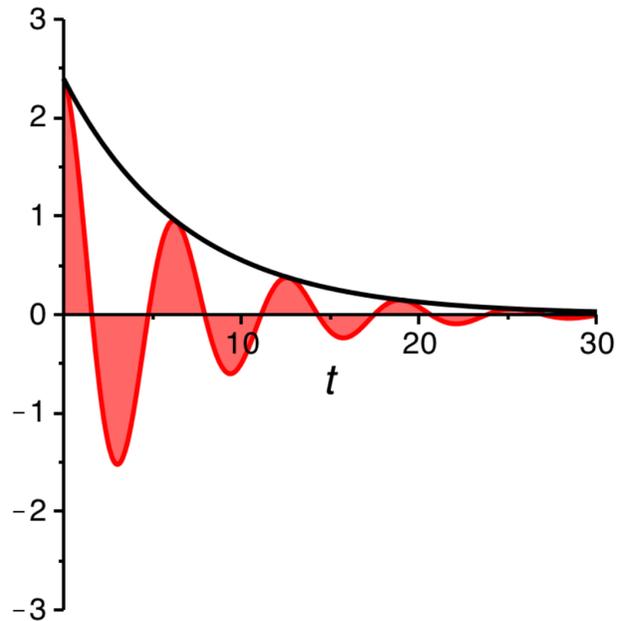
Gedämpfte harmonische Schwingung

Schwingfall

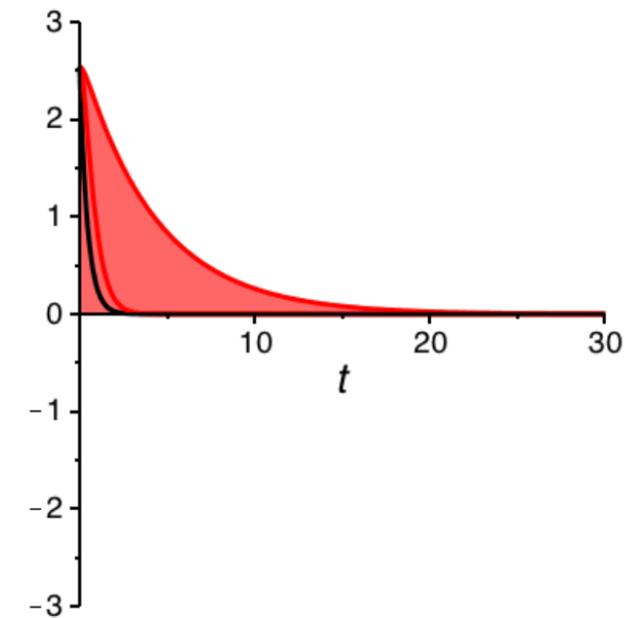


Gedämpfte harmonische Schwingung

Schwingfall

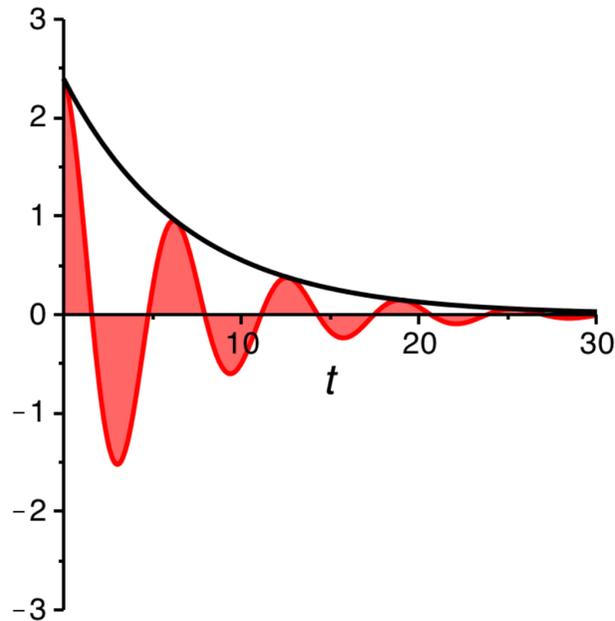


Kriechfall

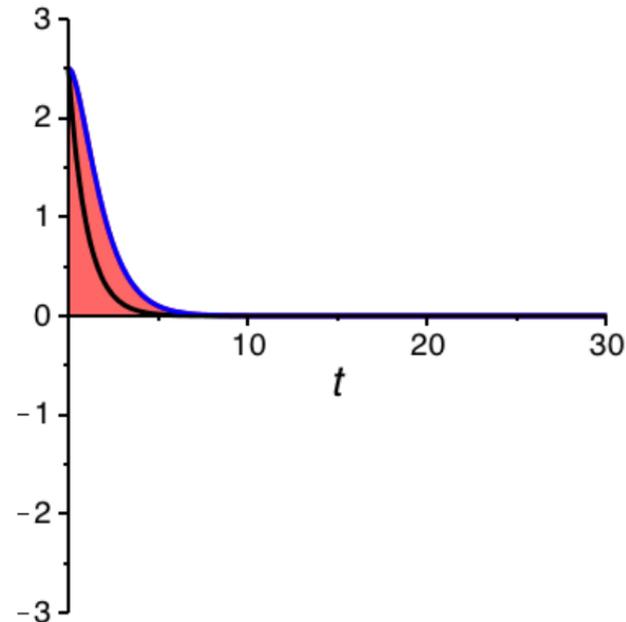


Gedämpfte harmonische Schwingung

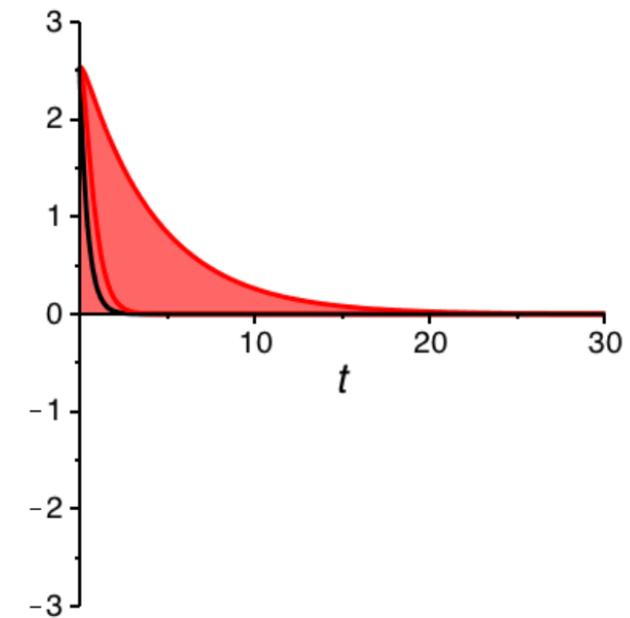
Schwingfall



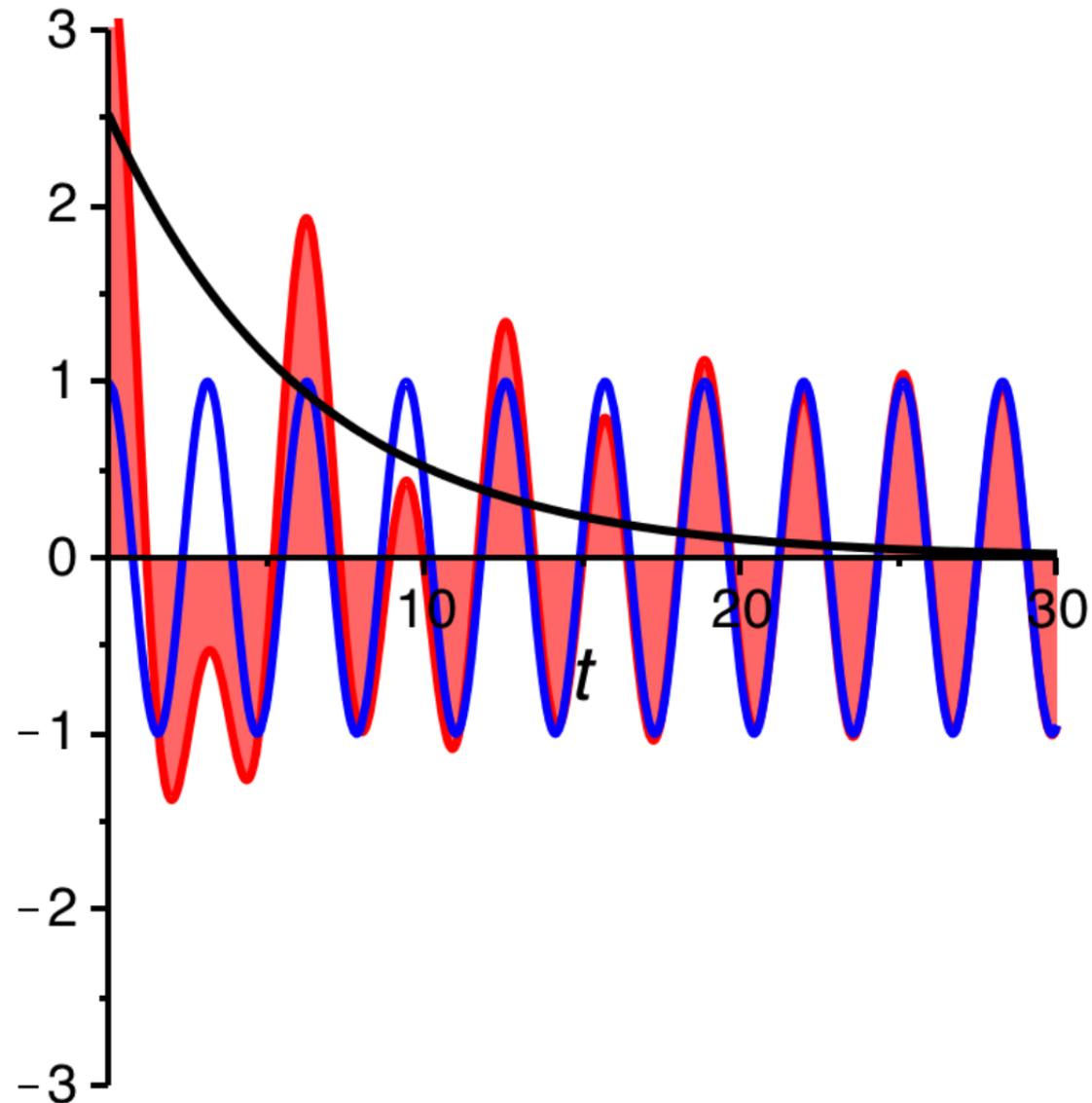
aperiodischer Grenzfall



Kriechfall



Gedämpfte Schwingung, periodische Anregung



Kapitel 6: Schaltkreise

6 Schaltkreise	55
6.1 Schaltvorgänge mit Spulen und Kondensatoren	55
6.1.1 Einschalten einer Spule	55
6.1.2 Einschalten eines Kondensators	56
6.1.3 Ausschalten einer Spule	56
6.2 Energiedichte des Magnetfelds	57
6.3 Energie im Wechselstromkreis	58
6.4 Komplexe Widerstände	59
6.4.1 Ohm'scher Widerstand	60
6.4.2 Kondensator	60
6.4.3 Spule	61
6.4.4 R-L-C Schaltungen	61
6.5 Wechselstromschaltungen	63
6.5.1 R-C Glied als Hochpass	63
6.5.2 R-C Glied als Tiefpass	63
6.6 Schwingkreise	64
6.6.1 R-C-L Serienschwingkreis als Frequenzfilter .	64
6.6.2 R-C-L als Parallelschwingkreis	65

Wechselstrom

Es gibt keinen Grund, der die Verwendung von hochgespannten Wechselströmen, sei es im wissenschaftlichen oder im kommerziellen Bereich, rechtfertigen würde. Man benützt sie lediglich, um an Investitionskosten für den Kupferdraht zu sparen.

Ich persönlich würde wünschen, daß der Gebrauch von Wechselstrom völlig verboten würde. Er ist genauso unnötig, wie er gefährlich ist. . . Ich kann daher keinen Grund für die Einführung eines Systems sehen, das keinerlei Zukunftsaussichten hat, jedoch ungeheure Gefahren für Leben und Eigentum birgt.

Ich habe stets und eindringlich vor Leitungsnetzen für hochgespannten Wechselstrom zur elektrischen Beleuchtung abgeraten, nicht nur wegen der damit verbundenen Gefahr, sondern auch wegen ihrer allgemeinen Unverlässlichkeit und ihrer Unbrauchbarkeit in größeren Leitungsnetzen.

Thomas A. Edison 1889



1847–1931

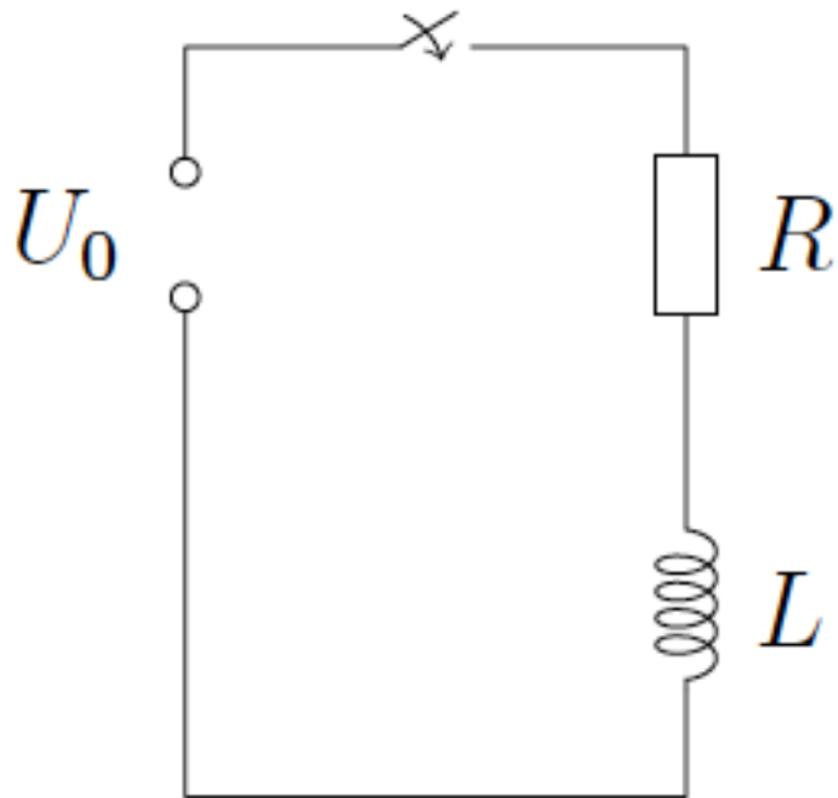
Thomas Alva Edison was an American inventor and businessman. He developed many devices that greatly influenced life around the world, including the phonograph, the motion picture camera, and the long-lasting, practical electric light bulb. [Wikipedia](#)

Robert L. Weber
Eric Mendoza

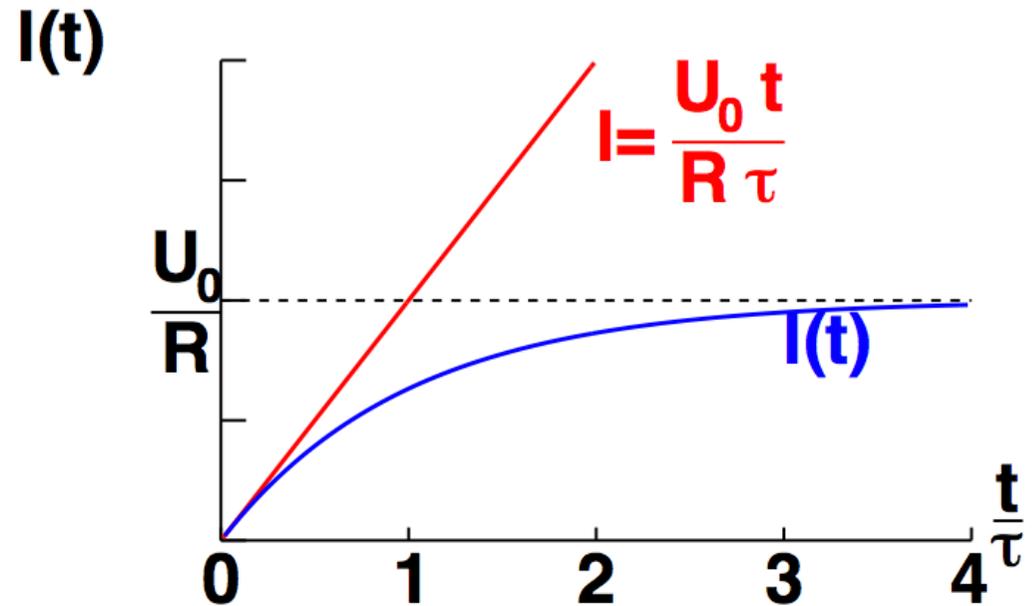
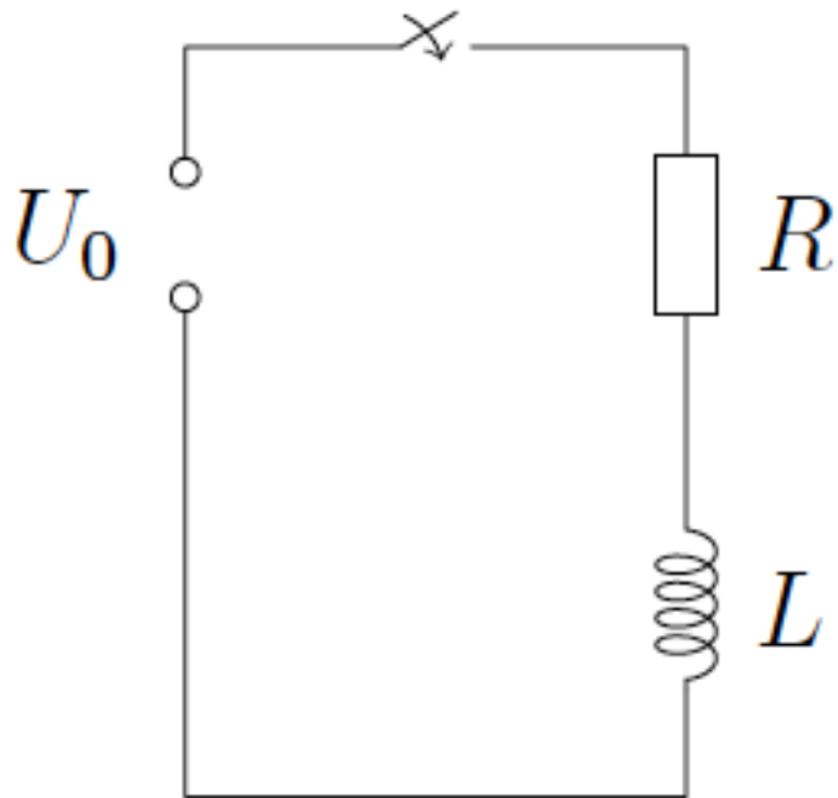
**Kabinett
physikalischer Raritäten**

Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden

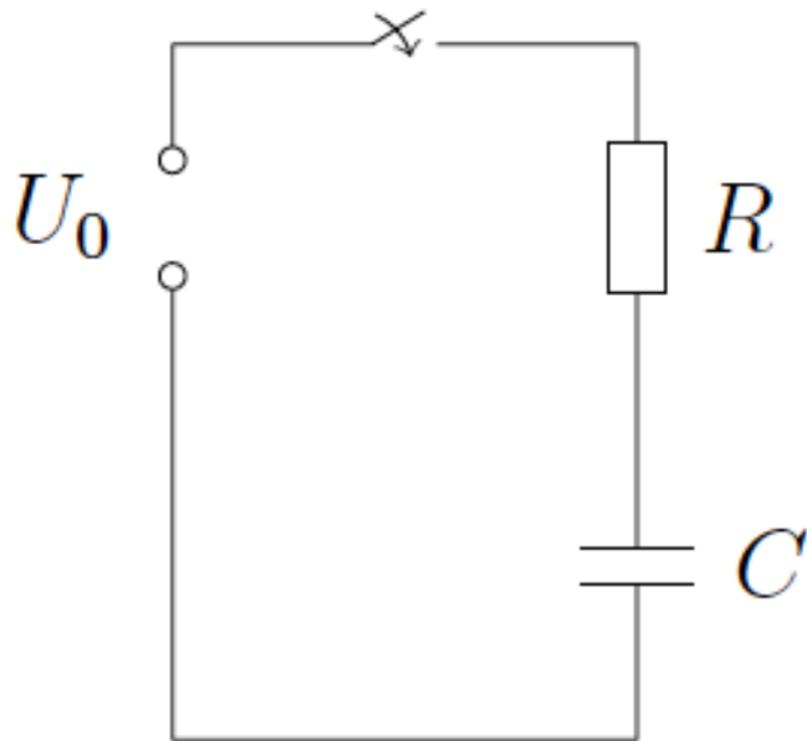
Einschalten einer Spule



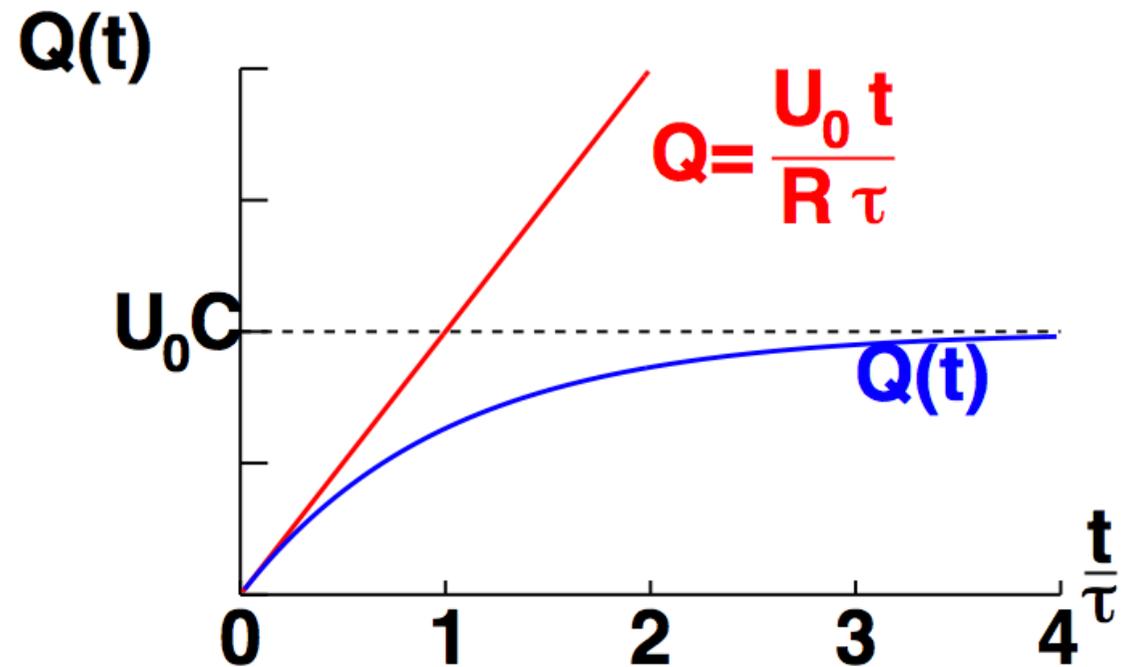
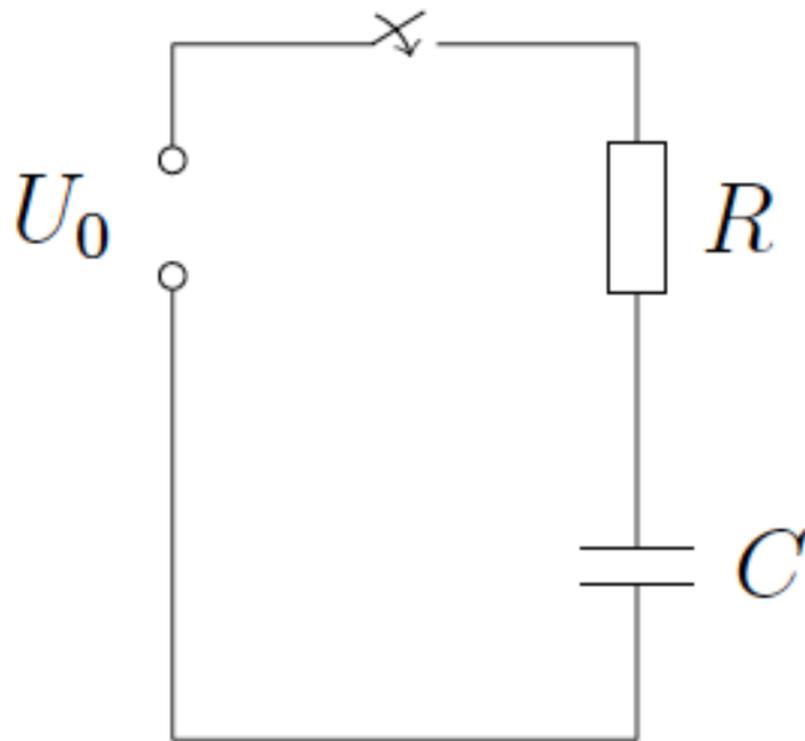
Einschalten einer Spule



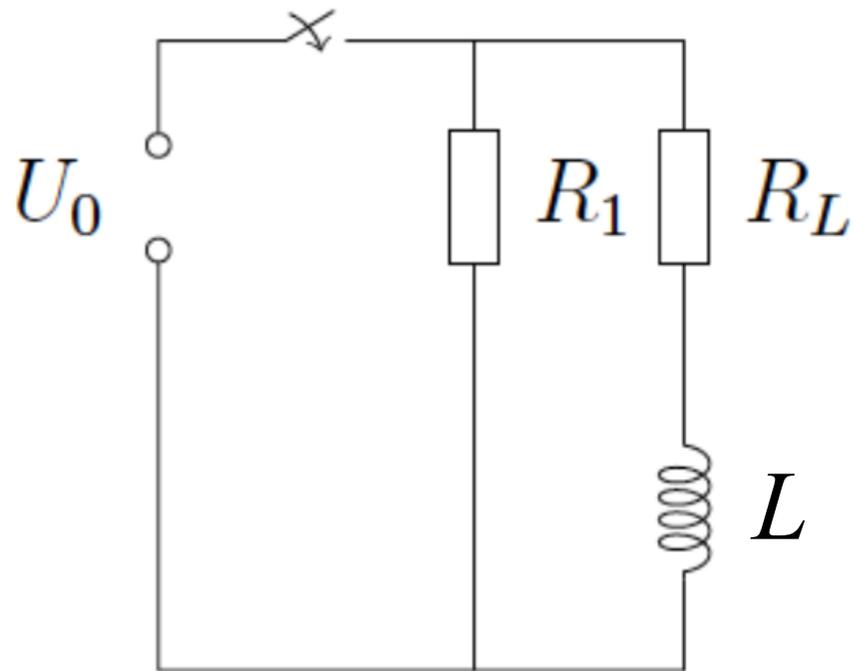
Einschalten eines Kondensators



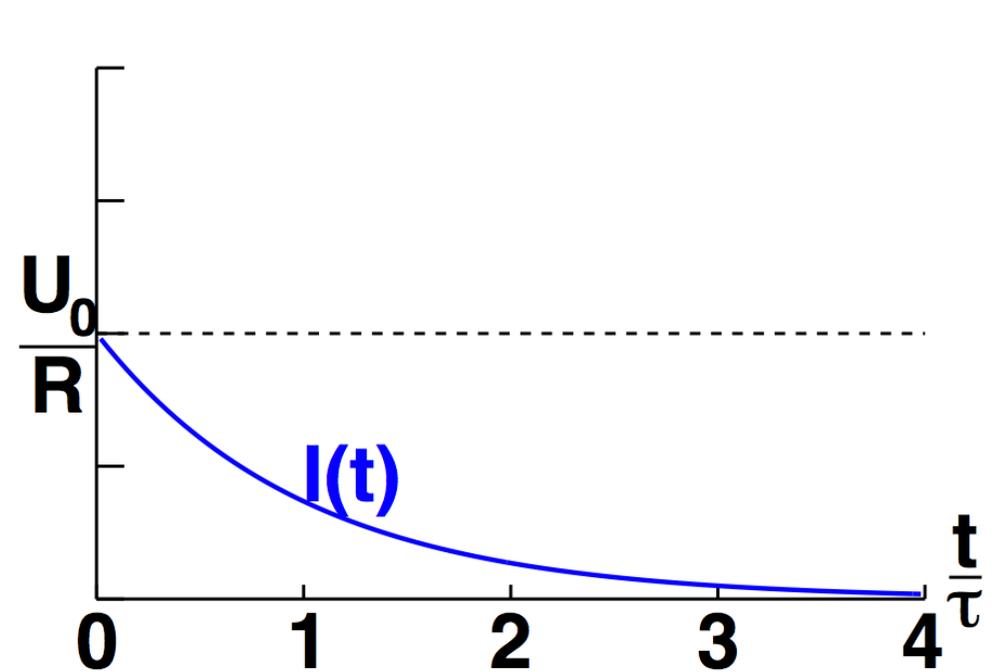
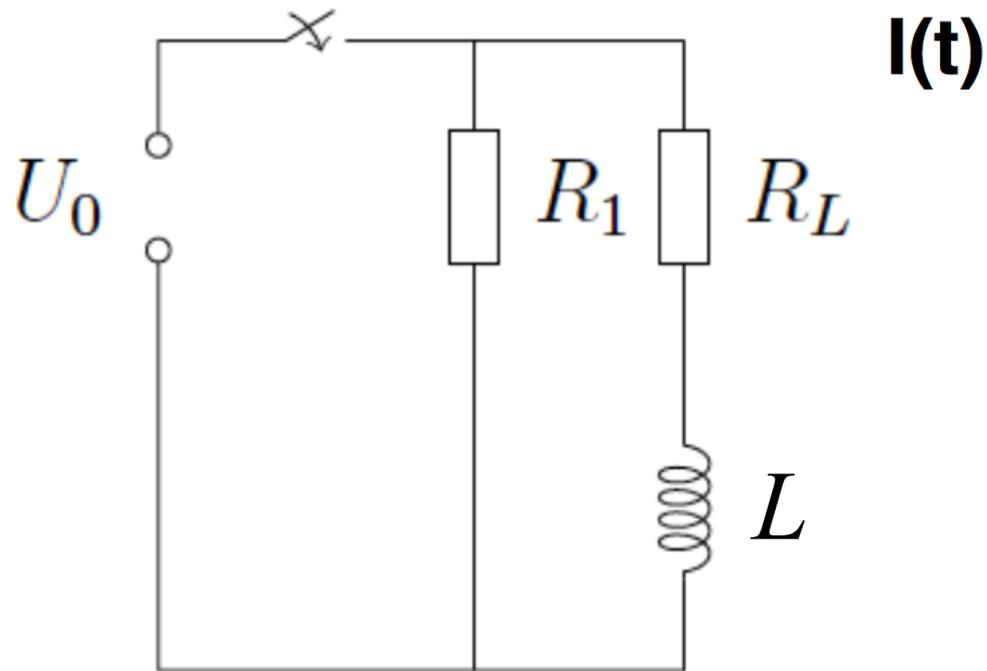
Einschalten eines Kondensators



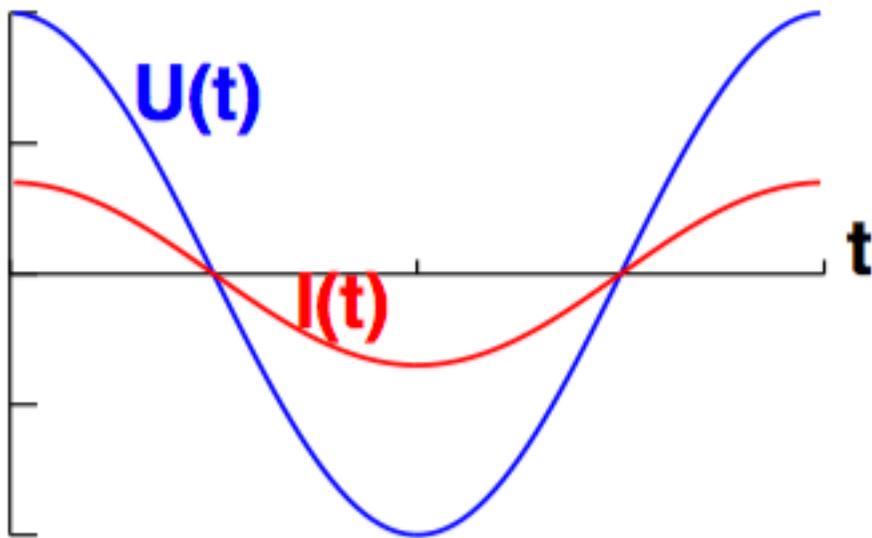
Ausschalten einer Spule



Ausschalten einer Spule

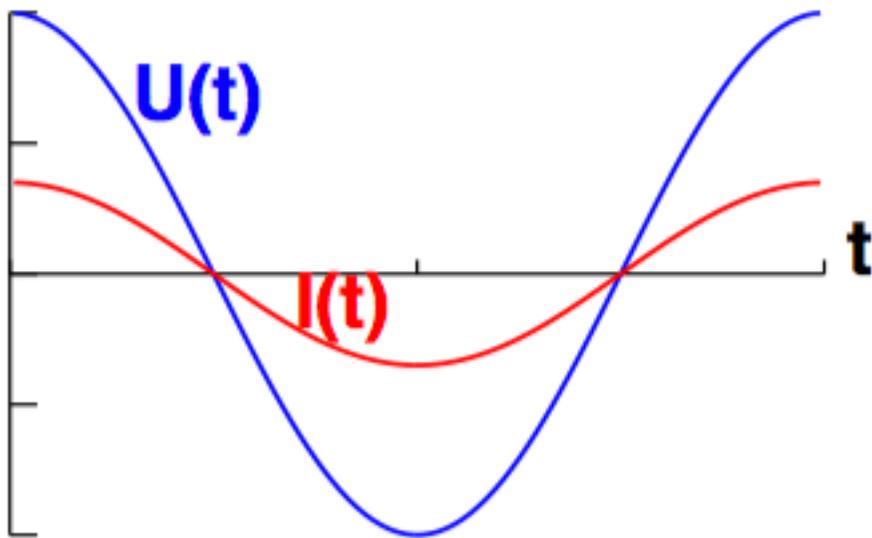


Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung

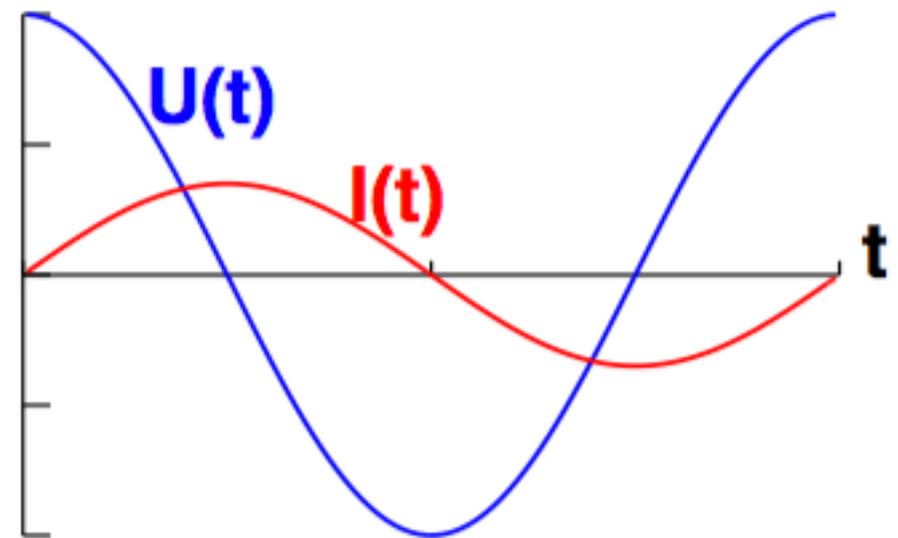


$$\varphi_U - \varphi_I = 0$$

Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung



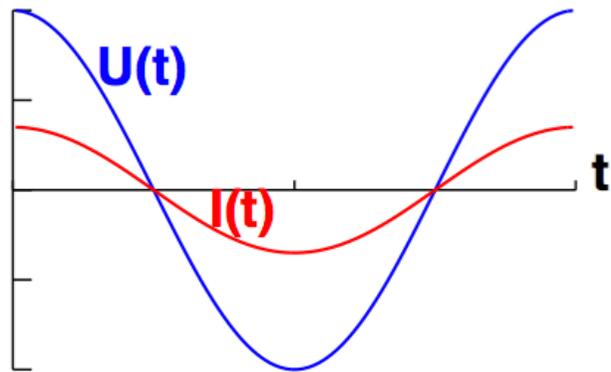
$$\varphi_U - \varphi_I = 0$$



$$\varphi_U - \varphi_I = \pm \pi/2$$

Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung

Ohm'scher Widerstand



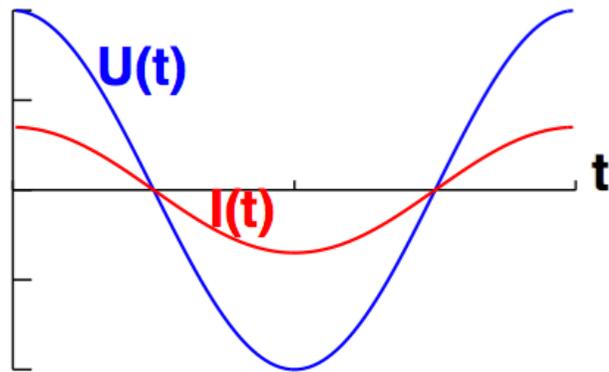
in phase

Komplexe Widerstände & Phasenverschiebungen

	Ohm'scher W.
Formel	$U = R I$
Z	R
Phase $\varphi_I - \varphi_U$	0
Leistung \bar{P}	$\frac{1}{2} U_0 I_0$

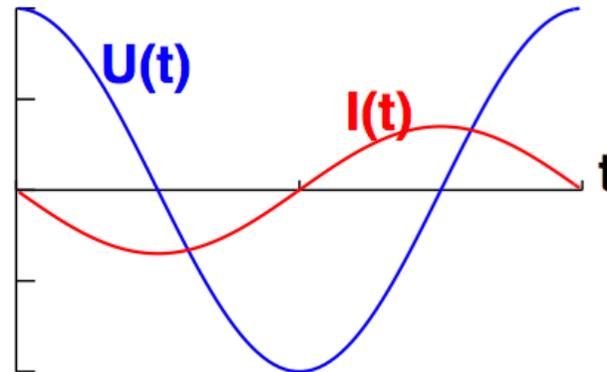
Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung

Ohm'scher Widerstand



in phase

Kondensator



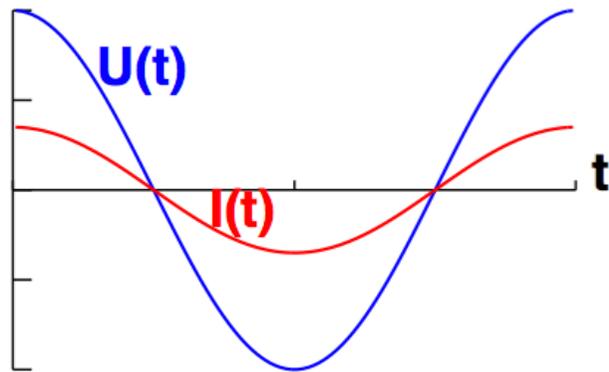
Strom eilt vor

Komplexe Widerstände & Phasenverschiebungen

	Ohm'scher W.	Kondensator
Formel	$U = R I$	$I = C \partial_t U$
Z	R	$\frac{1}{i\omega C}$
Phase $\varphi_I - \varphi_U$	0	$+\frac{\pi}{2}$, I vor
Leistung \bar{P}	$\frac{1}{2} U_0 I_0$	0

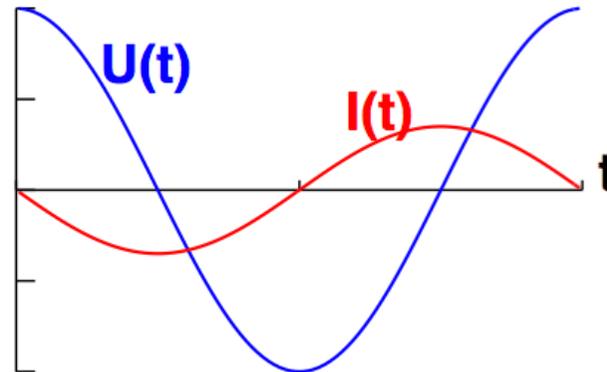
Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung

Ohm'scher Widerstand



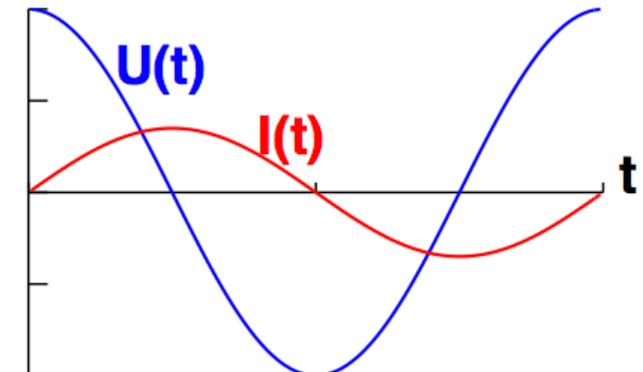
in phase

Kondensator



Strom eilt vor

Spule



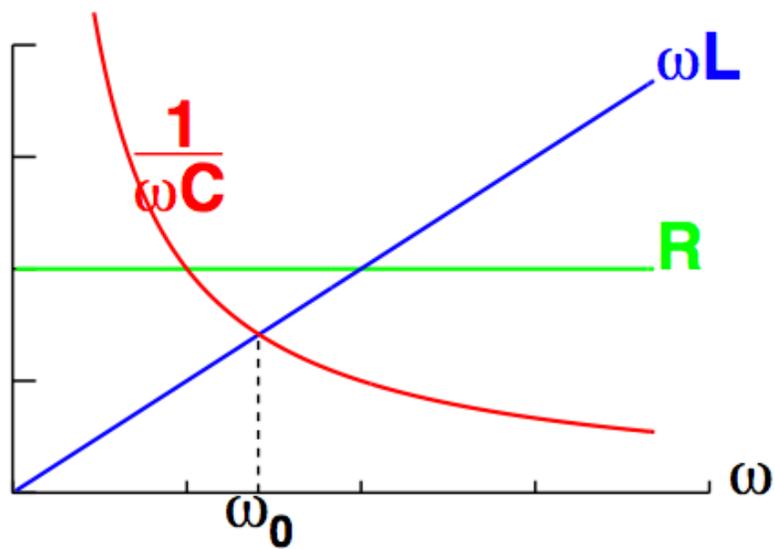
Strom kommt spät

Komplexe Widerstände & Phasenverschiebungen

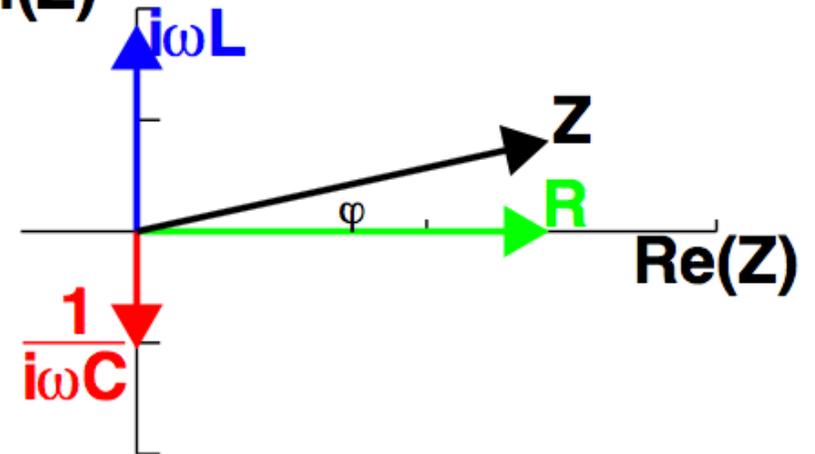
	Ohm'scher W.	Kondensator	Spule
Formel	$U = R I$	$I = C \partial_t U$	$U = L \partial_t I$
Z	R	$\frac{1}{i\omega C}$	$i\omega L$
Phase $\varphi_I - \varphi_U$	0	$+\frac{\pi}{2}$, I vor	$-\frac{\pi}{2}$, I spät
Leistung \bar{P}	$\frac{1}{2} U_0 I_0$	0	0

Komplexe Widerstände

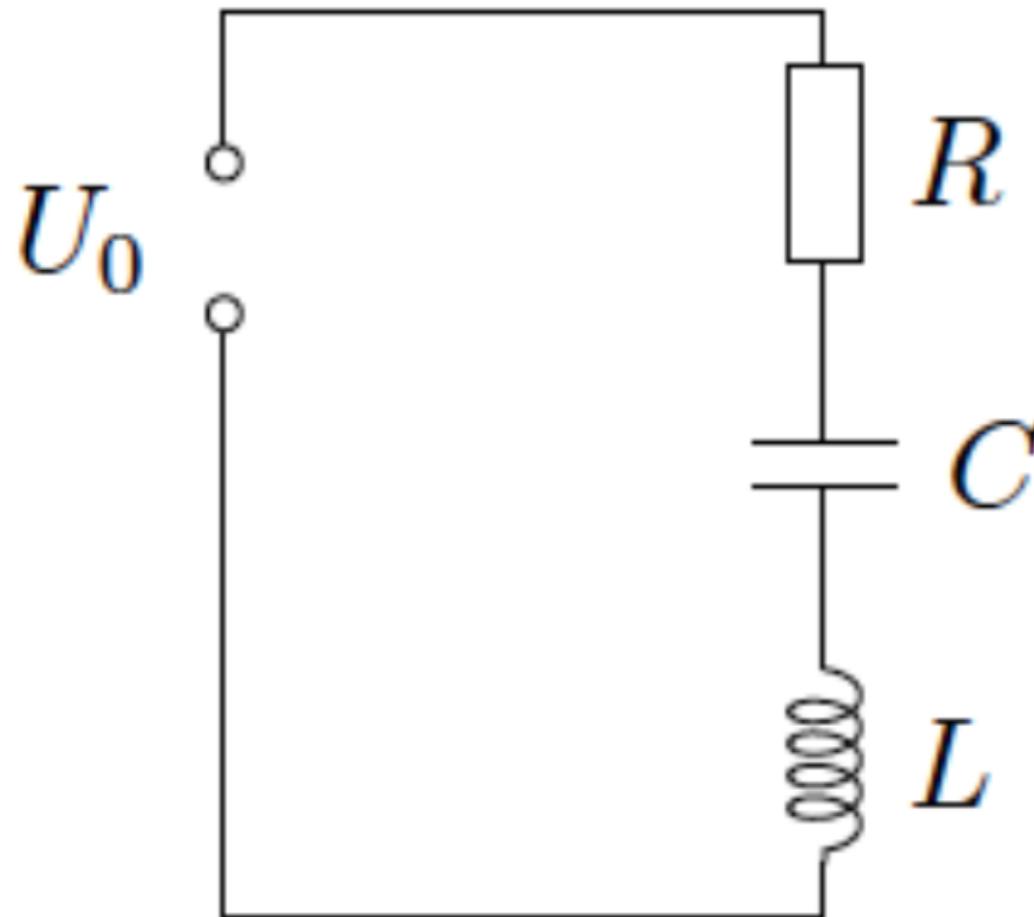
$|Z|$



$\text{Im}(Z)$



R-C-L Reihenschaltung

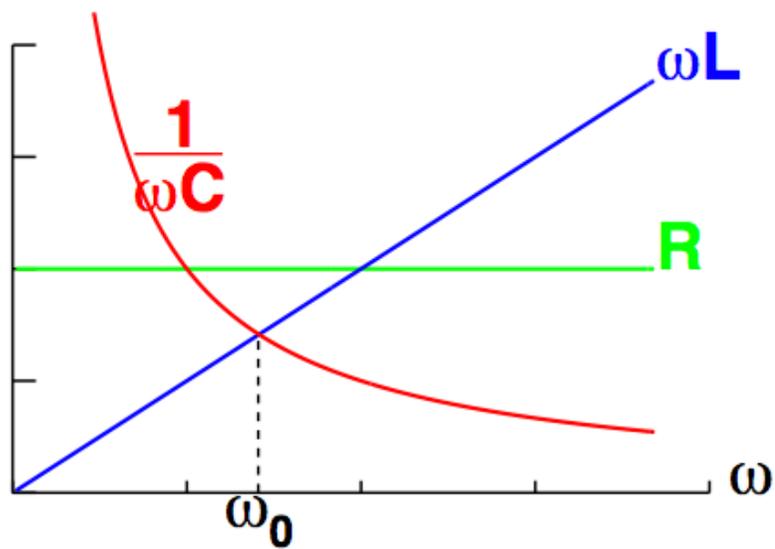


Komplexe Widerstände & Phasenverschiebungen

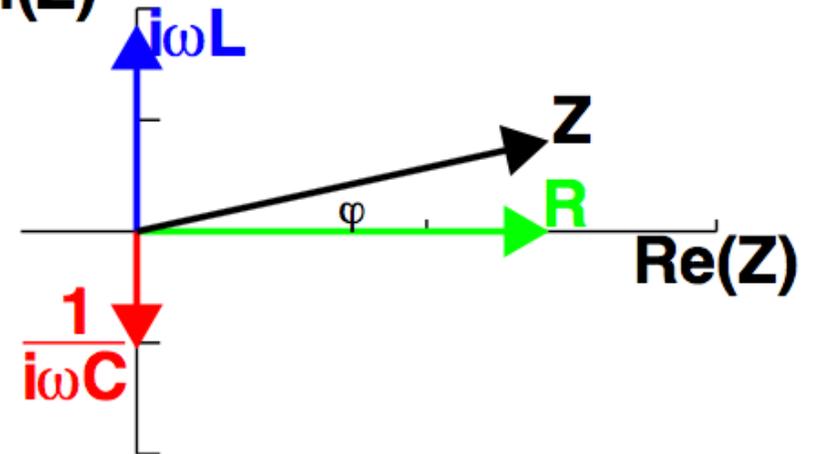
	Ohm'scher W.	Kondensator	Spule
Formel	$U = R I$	$I = C \partial_t U$	$U = L \partial_t I$
Z	R	$\frac{1}{i\omega C}$	$i\omega L$
Phase $\varphi_I - \varphi_U$	0	$+\frac{\pi}{2}$, I vor	$-\frac{\pi}{2}$, I spät
Leistung \bar{P}	$\frac{1}{2} U_0 I_0$	0	0

Komplexe Widerstände

$|Z|$

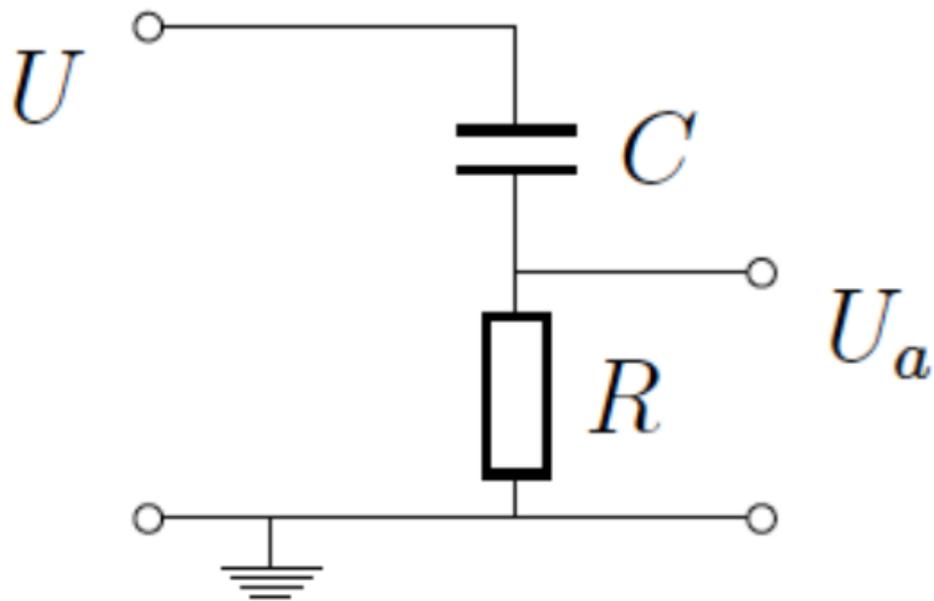


$\text{Im}(Z)$



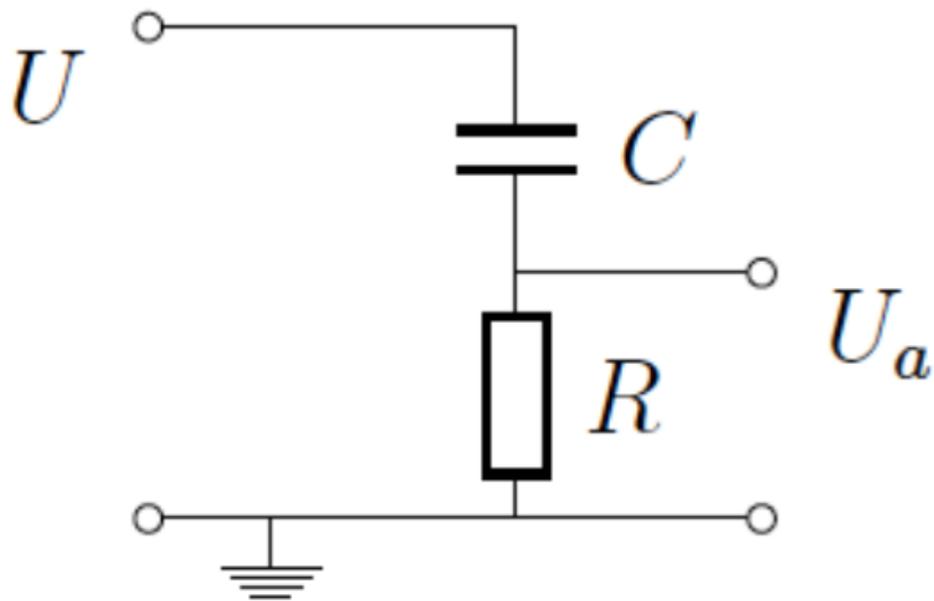
Hochpass und Tiefpass

Hochpass

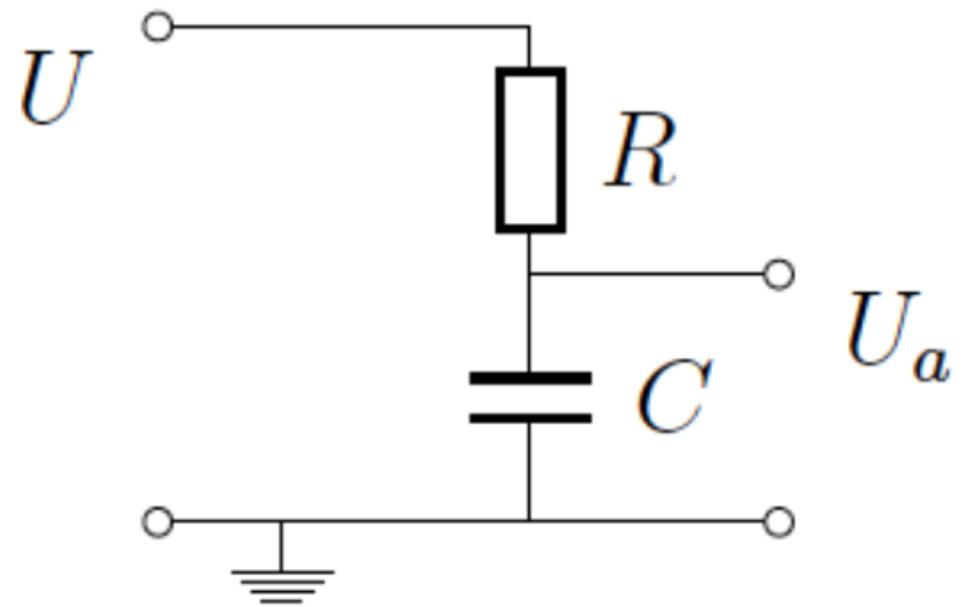


Hochpass und Tiefpass

Hochpass

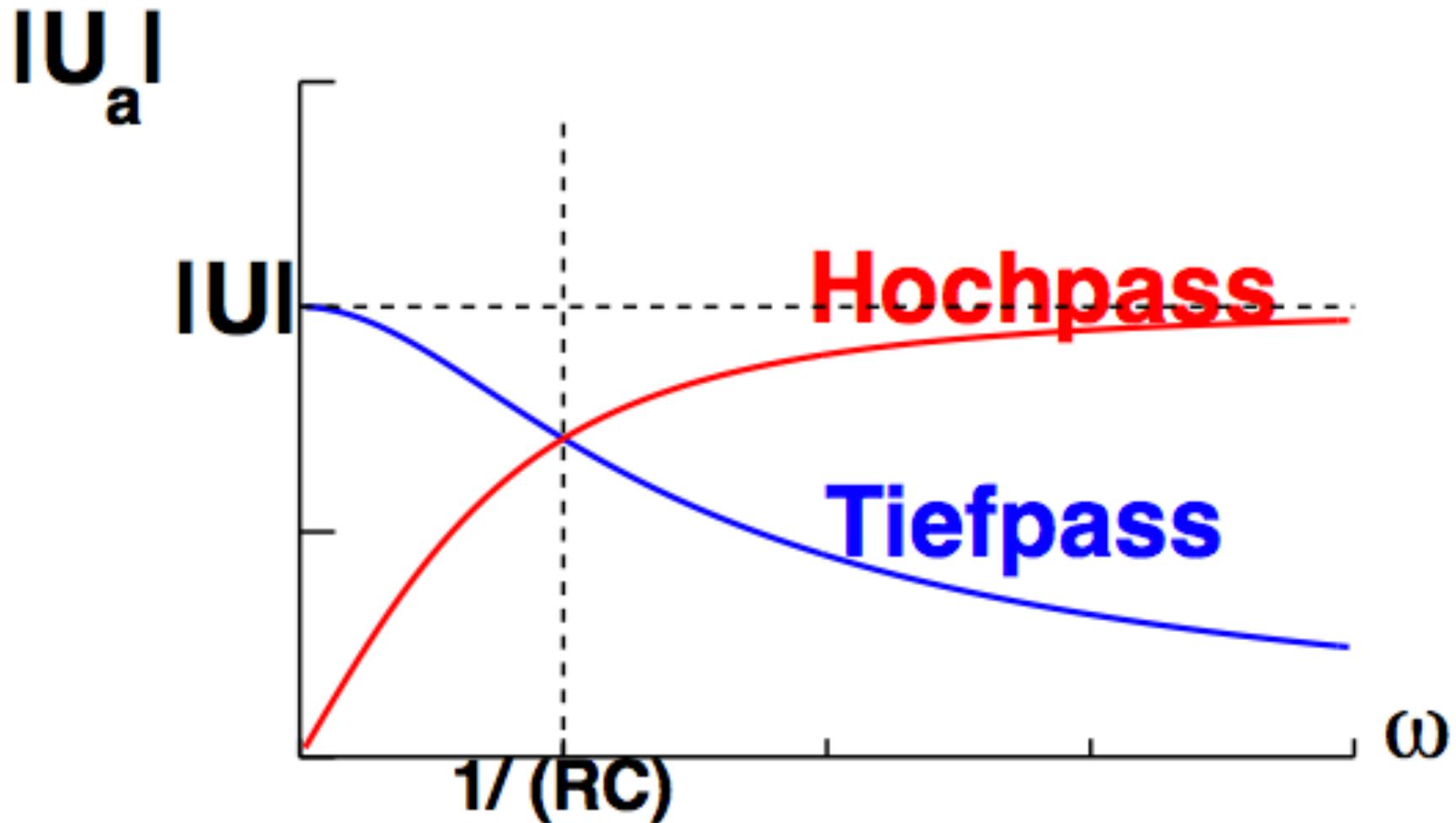


Tiefpass



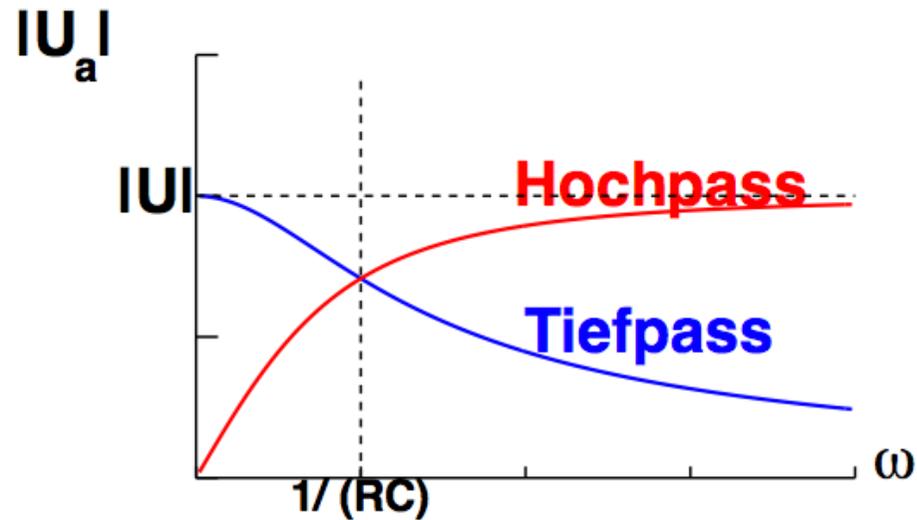
Hochpass und Tiefpass

Ausgangsspannung

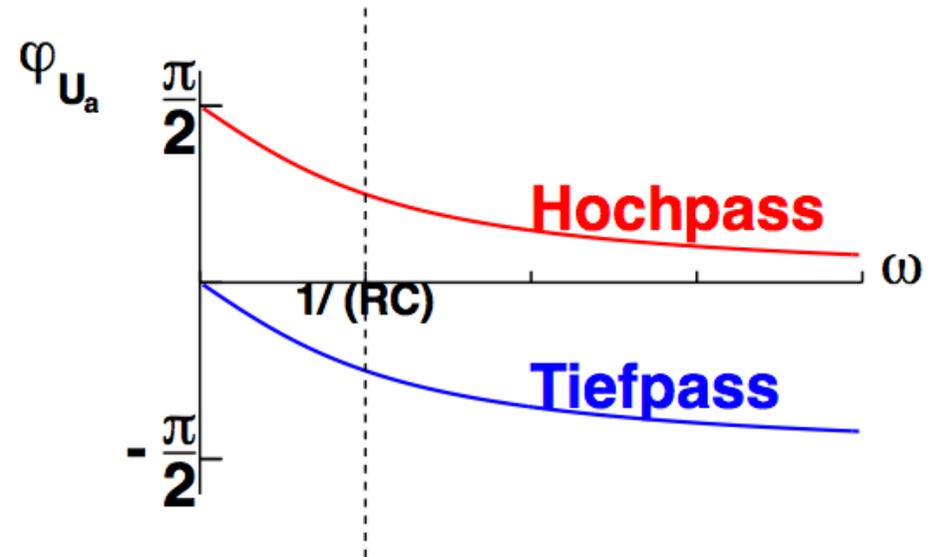


Hochpass und Tiefpass

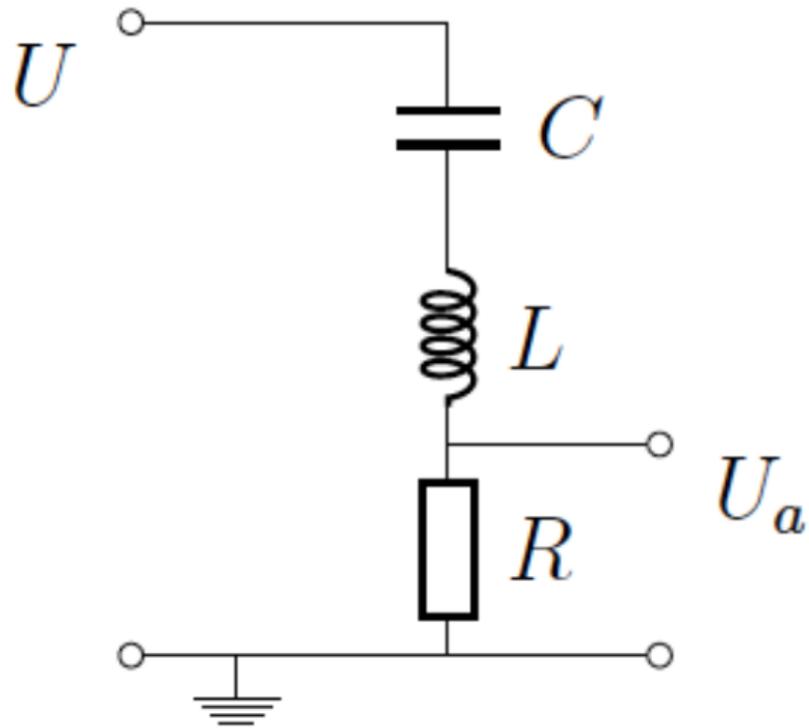
Ausgangsspannung



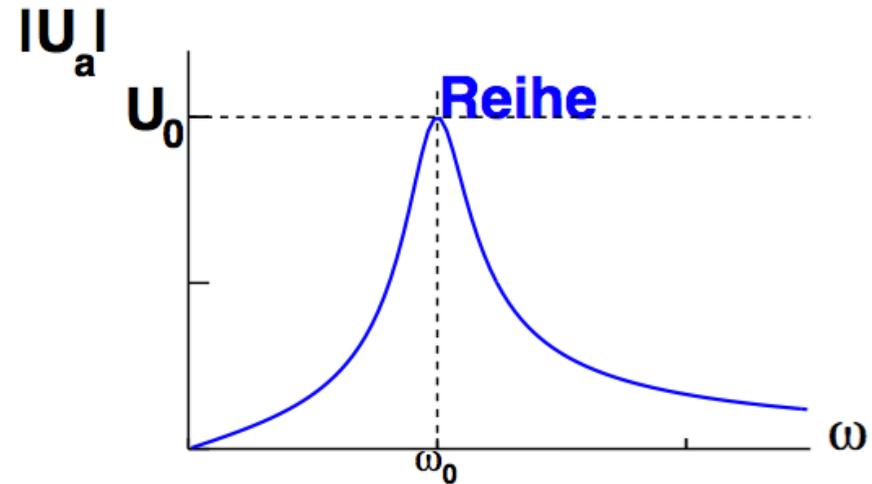
Ausgangsphase



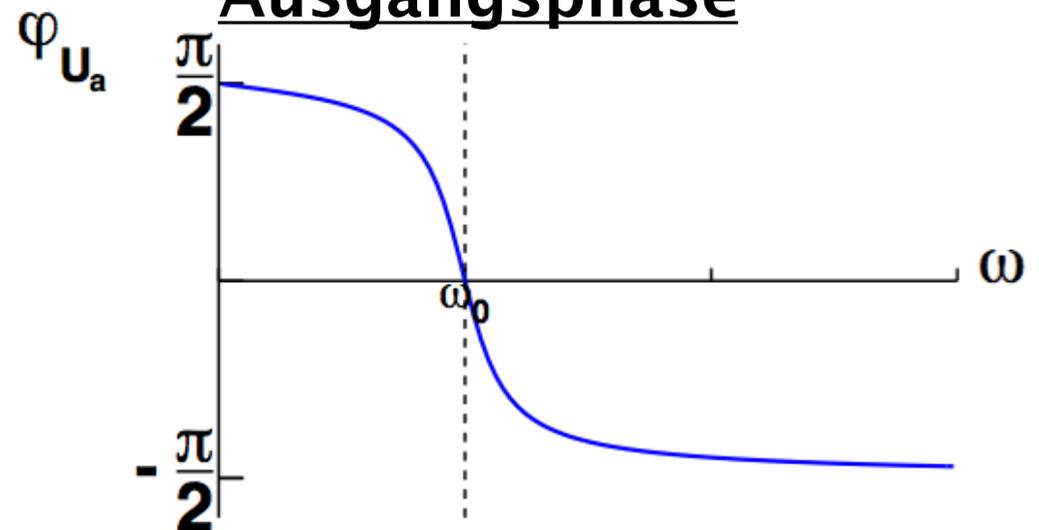
R-C-L-Reihenschwingkreis



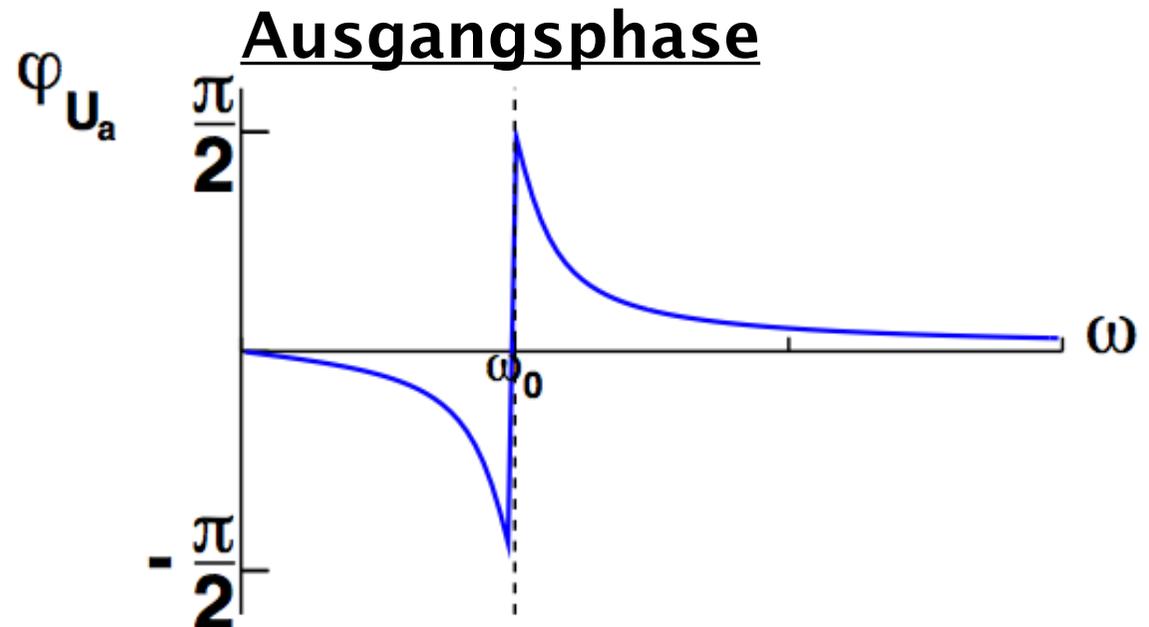
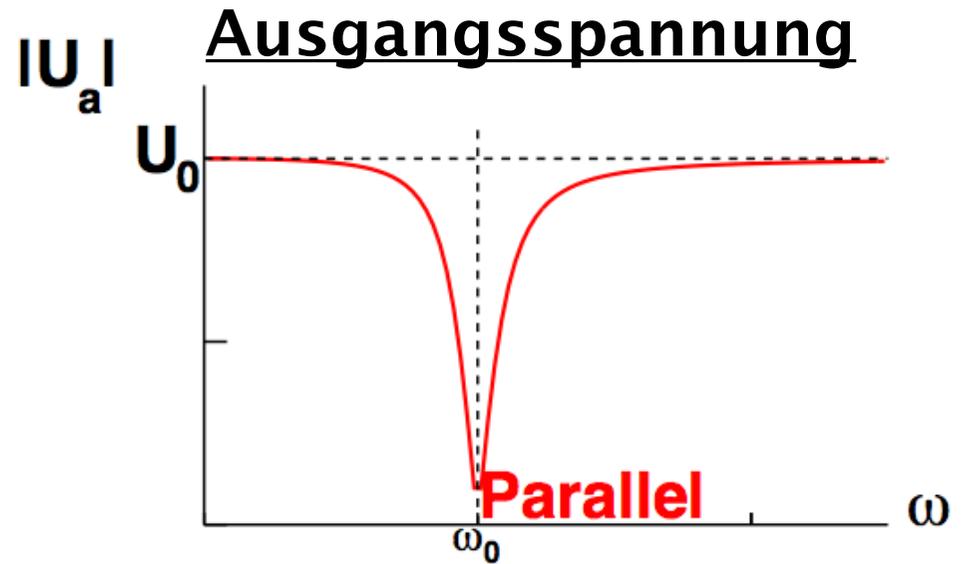
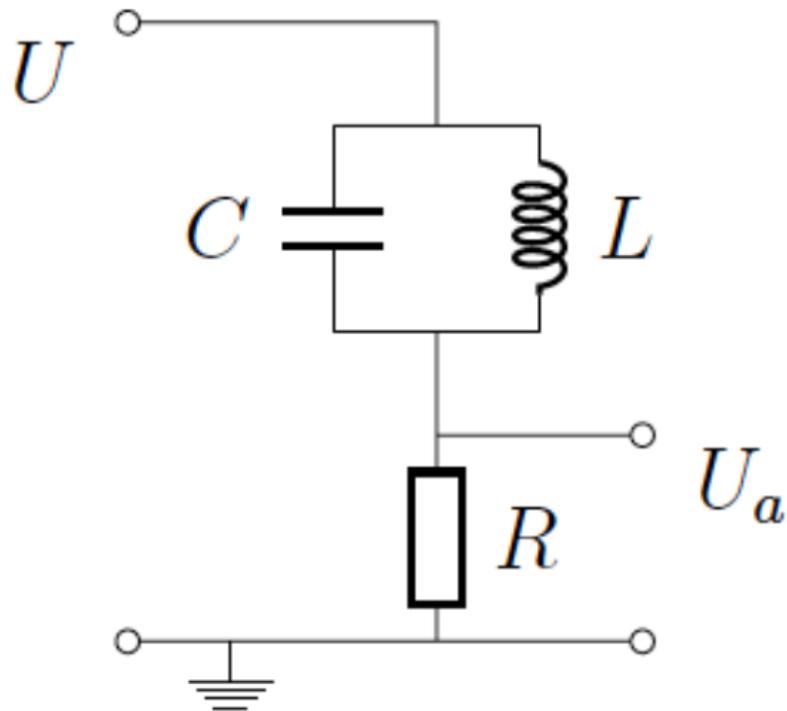
Ausgangsspannung



Ausgangsphase

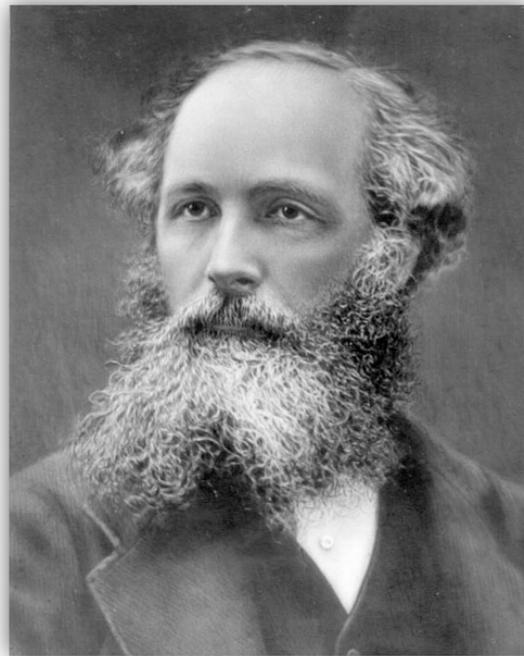


R-C-L-Parallelschwingkreis



Kapitel 7: Maxwell-Gleichungen

7 Maxwell - Gleichungen	67
7.1 Der Verschiebungsstrom	67
7.2 Zusammenfassung der Maxwell-Gleichungen	69
7.3 Maxwell-Gleichungen in Materialien	70
7.4 Skalares Potential und Vektorpotential	70
7.4.1 Maxwell-Gleichungen und Potentiale	71
7.4.2 Eichtransformationen	72
7.4.3 Bedeutung der Potentiale	73



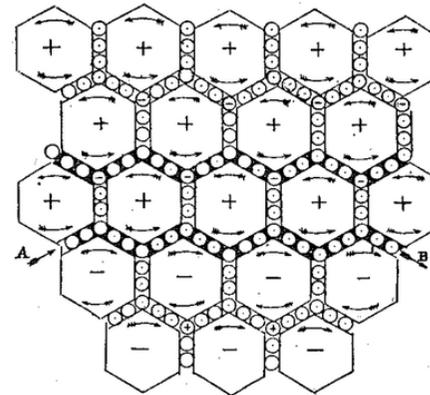
James Clerk Maxwell FRS FRSE was a Scottish scientist in the field of mathematical physics. His most notable achievement was to formulate the classical theory of electromagnetic radiation, bringing ... [Wikipedia](#)

1831–1879

Maxwells Äther

Heutzutage präsentieren wir die elektromagnetische Theorie in abstrakter Weise, doch ist dies nicht die Methode, die ihre Erfinder angewandt haben. Maxwell begann mit einem Modell des Äthers, das aus Wirbeln von submolekularer Größe zusammengesetzt war, die sich alle in derselben Richtung drehten, um so die Zirkulation des Magnetfeldes hervorzurufen. Im Geiste seiner Zeit nahm er das Modell sehr ernst.

Es hat mir große Schwierigkeiten bereitet, mir die Existenz von Wirbeln in einem Medium vorzustellen, die sich nebeneinander in der selben Richtung um parallele Achsen drehen. Die angrenzenden Teile aufeinander folgender Wirbel müssen sich in entgegengesetzten Richtungen drehen. So ist es schwierig zu verstehen, wie die Bewegung eines Teiles des Mediums mit einer entgegengesetzten Bewegung eines Teiles, der damit in Kontakt steht, koexistieren und sie sogar hervorrufen kann.

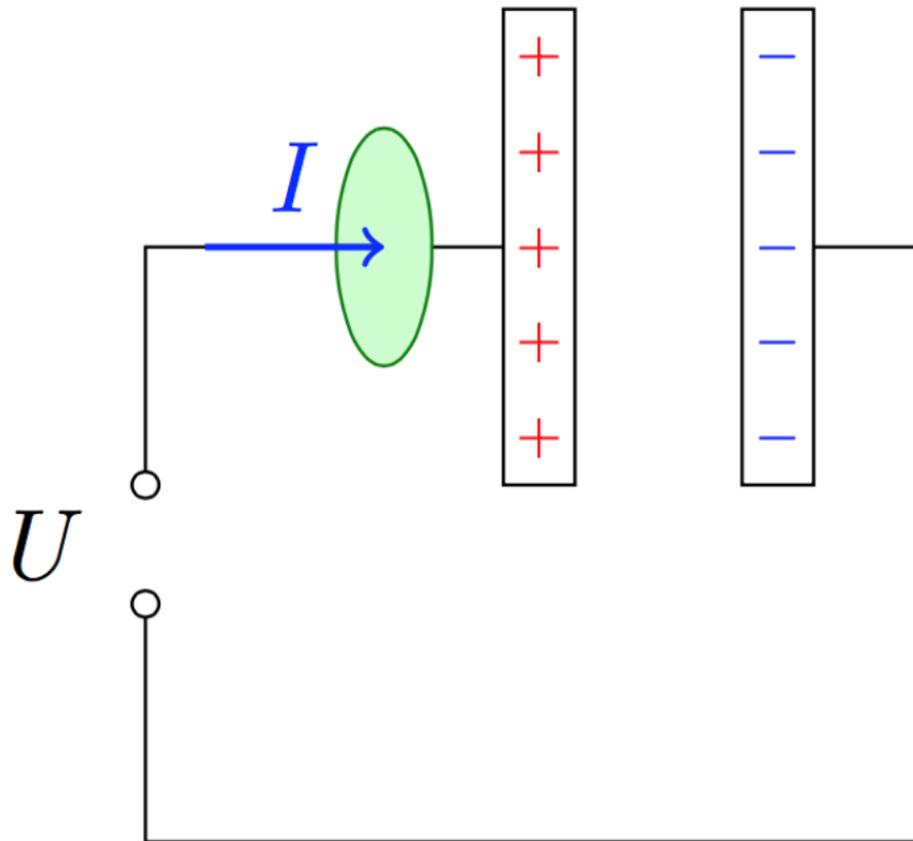


Die einzige Vorstellung, die mir dabei geholfen hat, diese Art von Bewegung zu veranschaulichen, ist jene von Wirbeln, die durch eine Schicht von Teilchen getrennt sind, von denen sich jedes um seine eigene Achse in der zur Wirbelrichtung entgegengesetzten Richtung dreht, so daß die Berührungsoberflächen der Teilchen und der Wirbeln die gleiche Bewegung haben. In mechanischen Geräten, in denen sich zwei Räder in der gleichen Richtung drehen sollen, wird ein drittes Rad zwischen ihnen angebracht, das mit beiden im Eingriff steht und dieses Rad wird ein Zwischenrad genannt. Die Hypothese über die Wirbel, die ich vorschlagen möchte, ist jene einer Schicht von Teilchen, die als Zwischenräder wirken und zwischen jedem Wirbel und seinem Nachbarn angebracht sind, so daß jeder Wirbel die Tendenz hat, sich in der gleichen Richtung wie seine Nachbarn zu drehen.

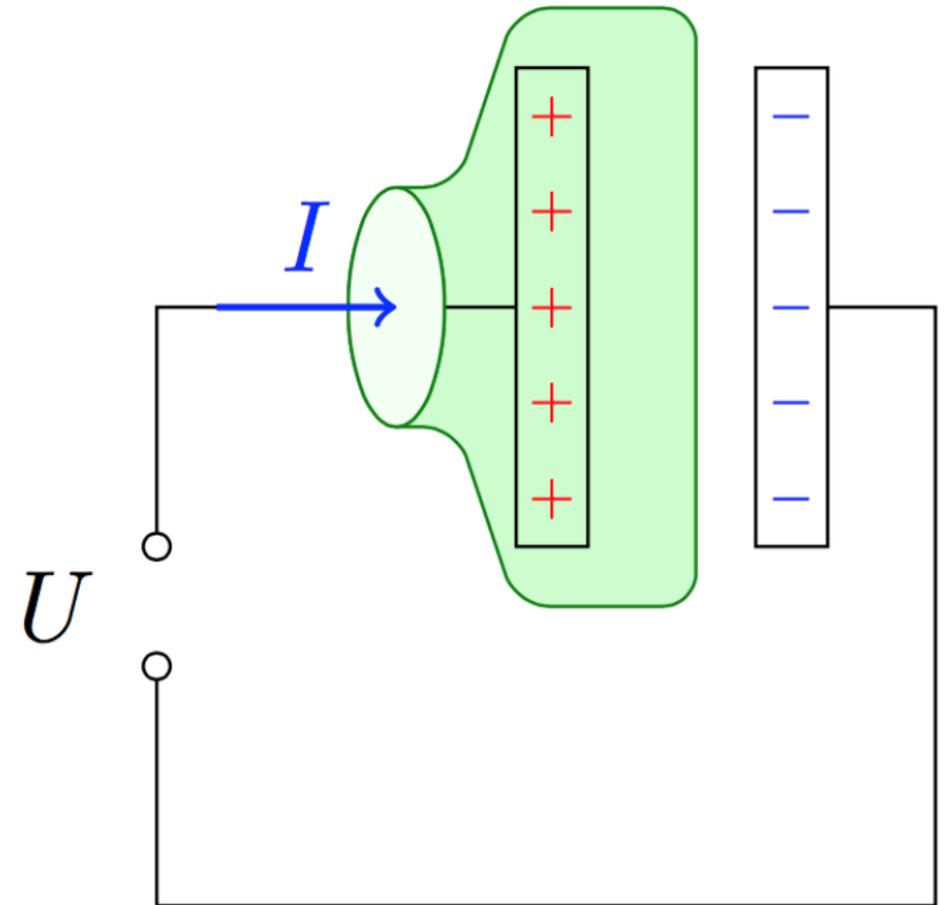
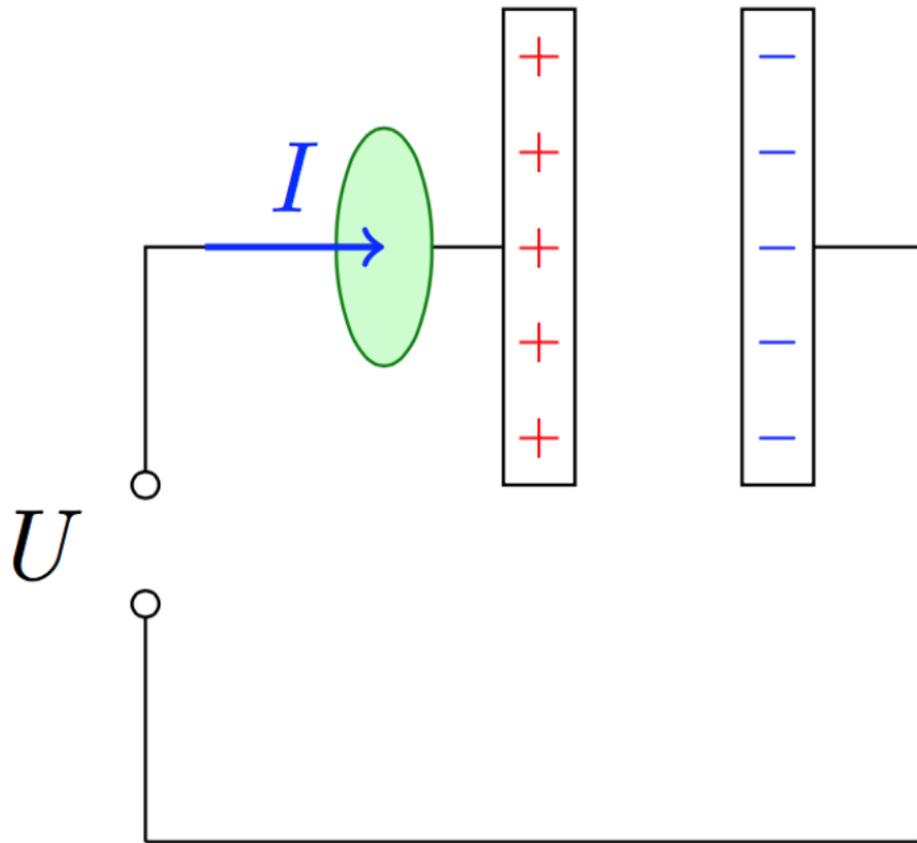
Die Zwischenräder waren Elektrizitätspartikel. Maxwell leitete die elektromagnetischen Gleichungen auf der Grundlage dieser Vorstellungen ab.

Dieses Bild dient dazu, die tatsächlichen mechanischen Zusammenhänge zwischen den bekannten elektromagnetischen Phänomenen darzustellen. Ich wage daher zu behaupten, daß für alle, die den vorläufigen Charakter dieser Hypothese verstehen, die Hypothese eher eine Hilfe als ein Hindernis sein wird, wenn sie nach der wahren Interpretation der Erscheinungen suchen.

Verschiebungsstrom: Integrationswege



Verschiebungsstrom: Integrationswege



Maxwell-Gleichungen

MG1 $\nabla \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ $\oiint \vec{E} d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$

MG2 $\nabla \vec{B} = 0$ $\oiint \vec{B} d\vec{A} = 0$

MG3 $\nabla \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B}$ $\oint \vec{E} d\vec{s} = -\partial_t \iint \vec{B} d\vec{A}$

MG4 $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \partial_t \vec{E}$ $\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \partial_t \iint \vec{E} d\vec{A}$

Lorentzkraft: $\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

Maxwell-Gleichungen in Materie

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

$$\vec{H} \equiv \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M}$$

MG1

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_{frei}$$

$$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{A} = q_{frei}$$

MG2

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

MG3

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\partial_t \iint \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

MG4

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}_{frei} + \partial_t \vec{D}$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I_{frei} + \partial_t \iint \vec{D} \cdot d\vec{A}$$

linearer Fall: $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{B}$$

Wellengleichungen der Potentiale

in der Lorentz-Eichung:

WG1

$$\left(\nabla^2 - \epsilon_0 \mu_0 \partial_t^2 \right) \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

WG2

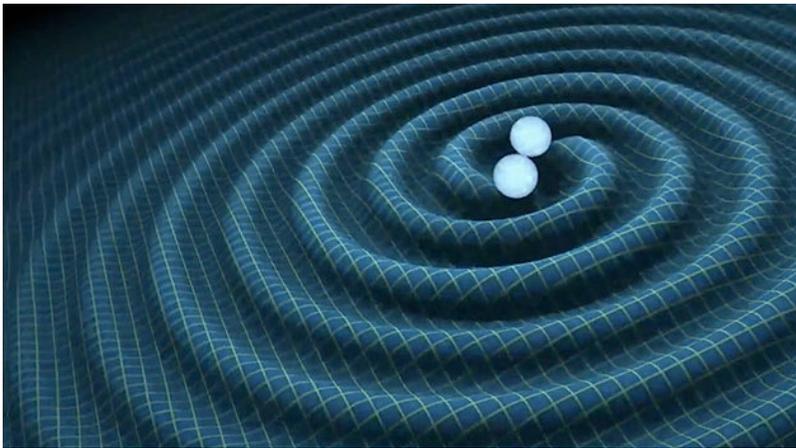
$$\left(\nabla^2 - \epsilon_0 \mu_0 \partial_t^2 \right) \vec{A} = -\mu_0 \vec{j}$$

Lichtgeschwindigkeit:

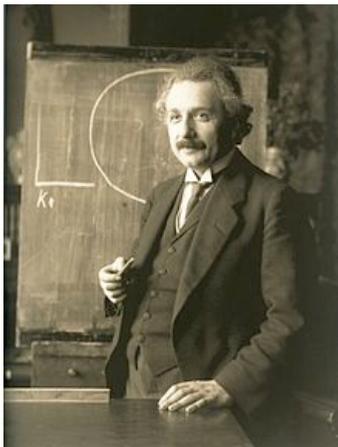
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Anhang C: Wellen

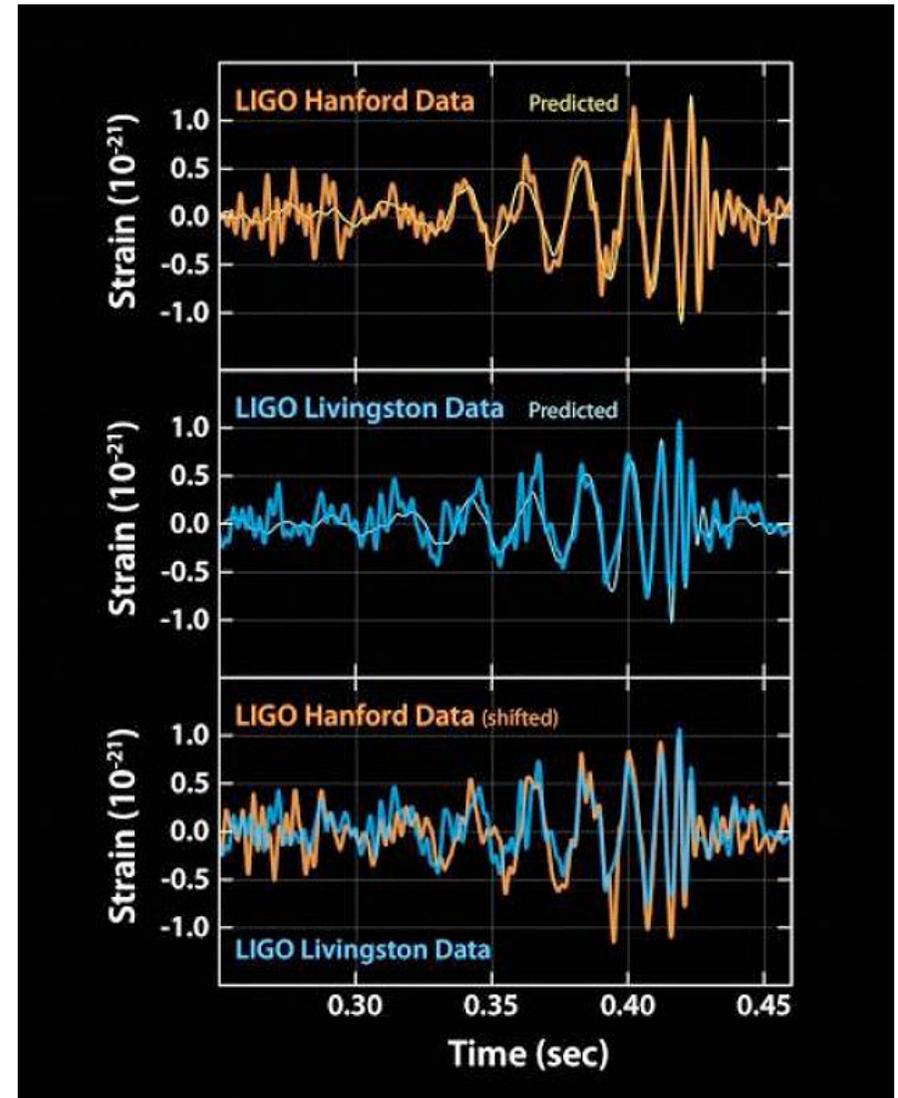
C Wellen	113
C.1 Harmonische Wellen	113
C.2 Beispiele für Wellen	114
C.3 Wellengleichung und Form der Lösungen	115
C.4 Ebene Wellen und Kugelwellen	116
C.5 Linearität und Superposition	116



Computersimulation der von zwei sich umkreisenden Schwarzen Löchern ausgelösten Gravitationswellen in der Raum-Zeit (Illu.)

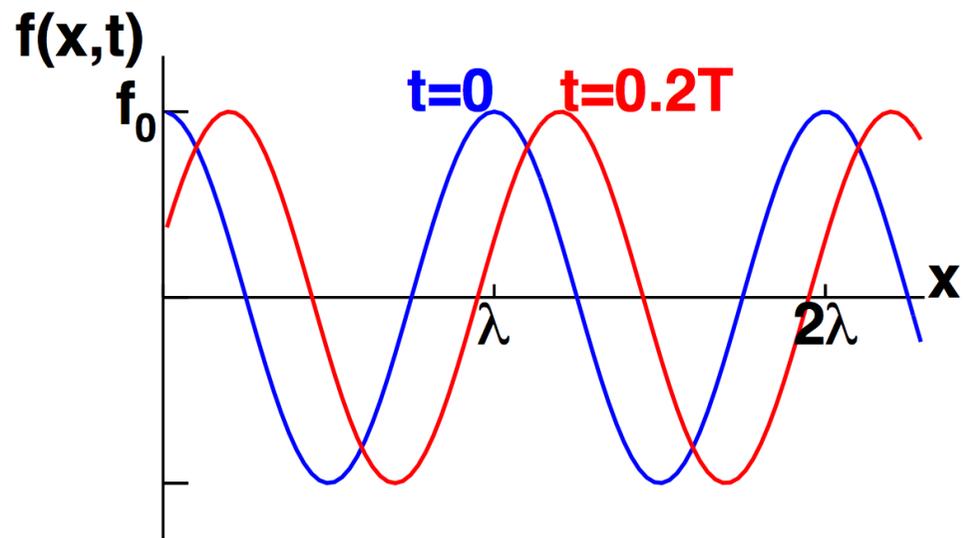


Albert Einstein
1879–1955

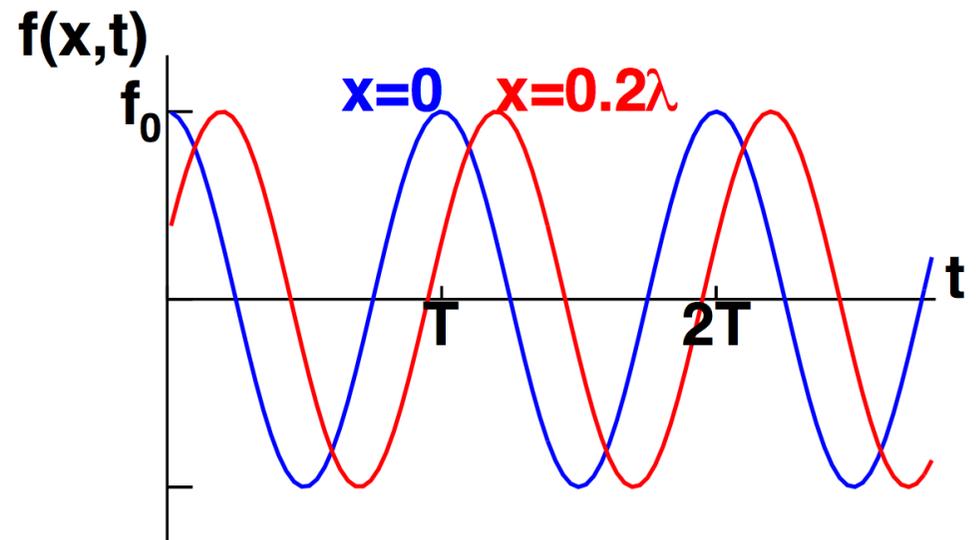
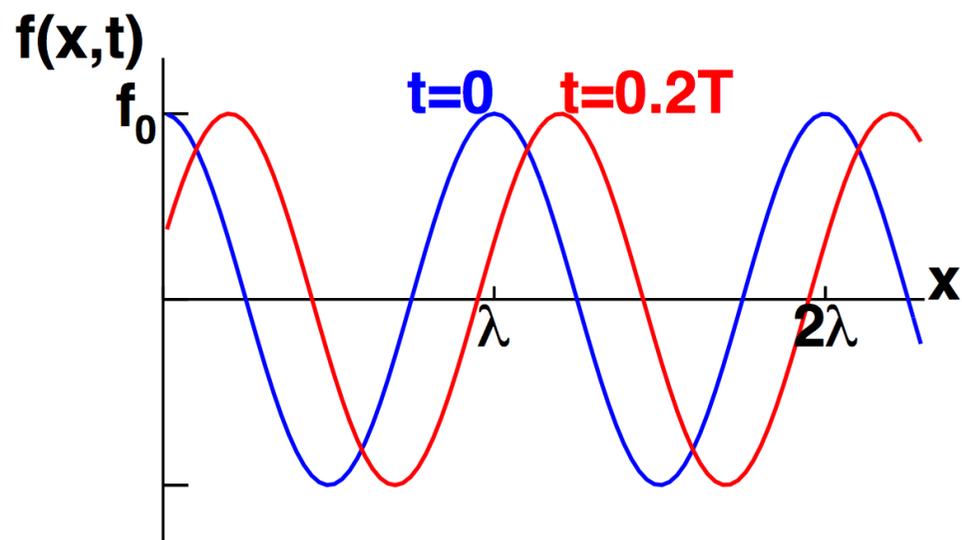


- vorhergesagt 1916 (Albert Einstein)
- Entdeckung 2016 (LIGO-Kollaboration)

Welle in Raum und Zeit

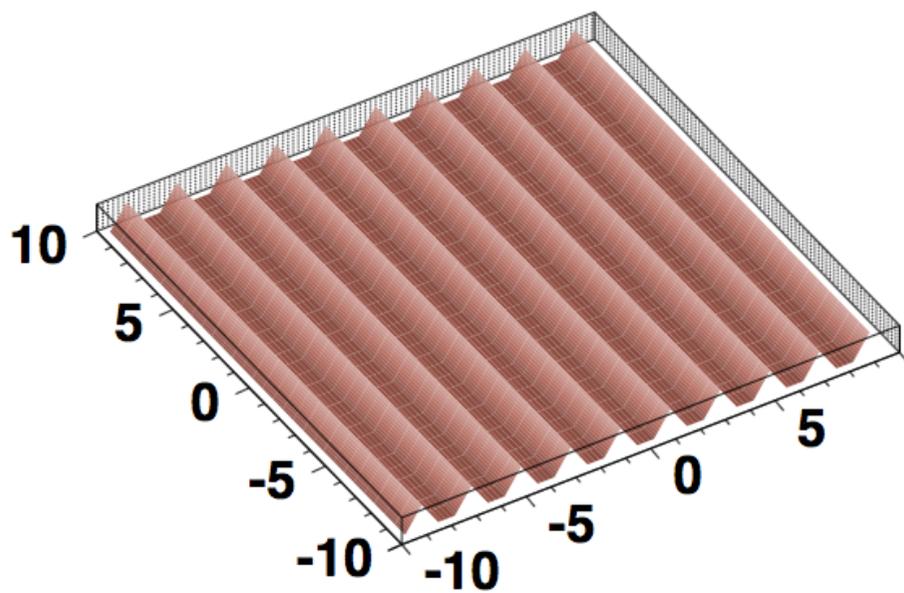


Welle in Raum und Zeit

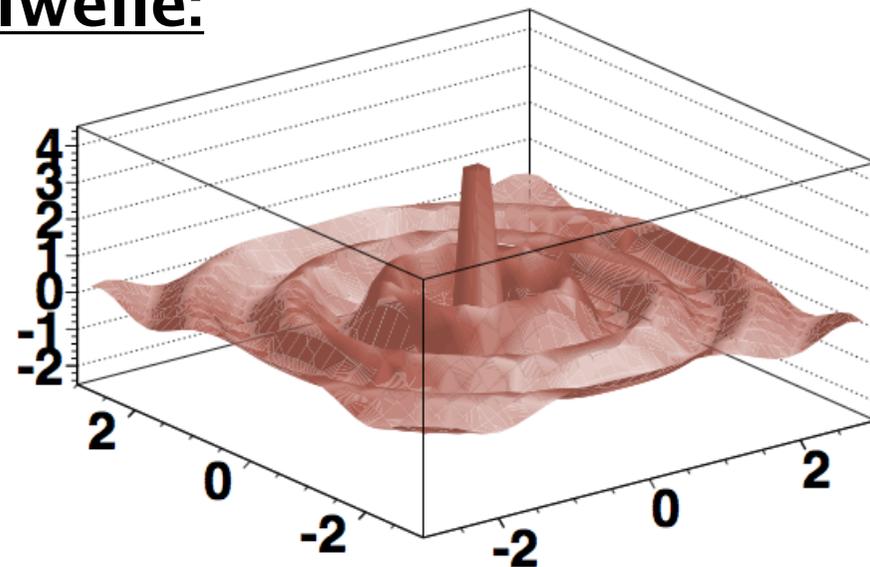


Wellenfronten

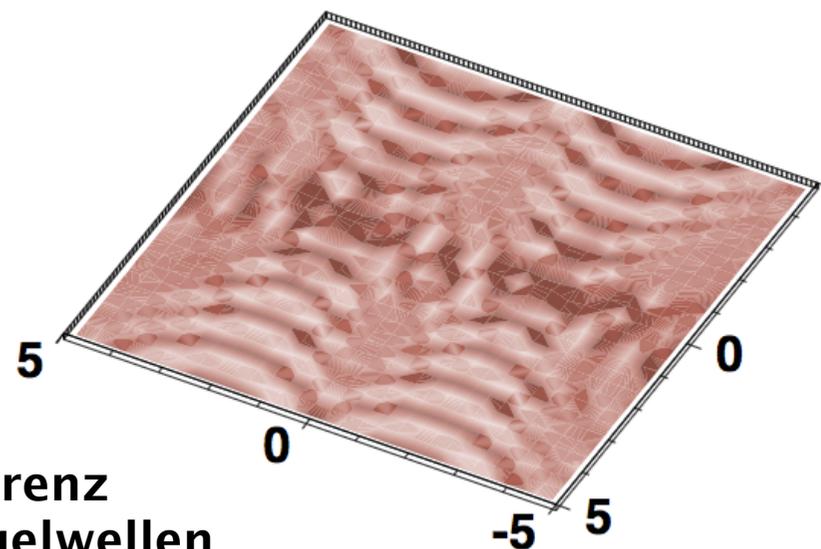
ebene Welle:



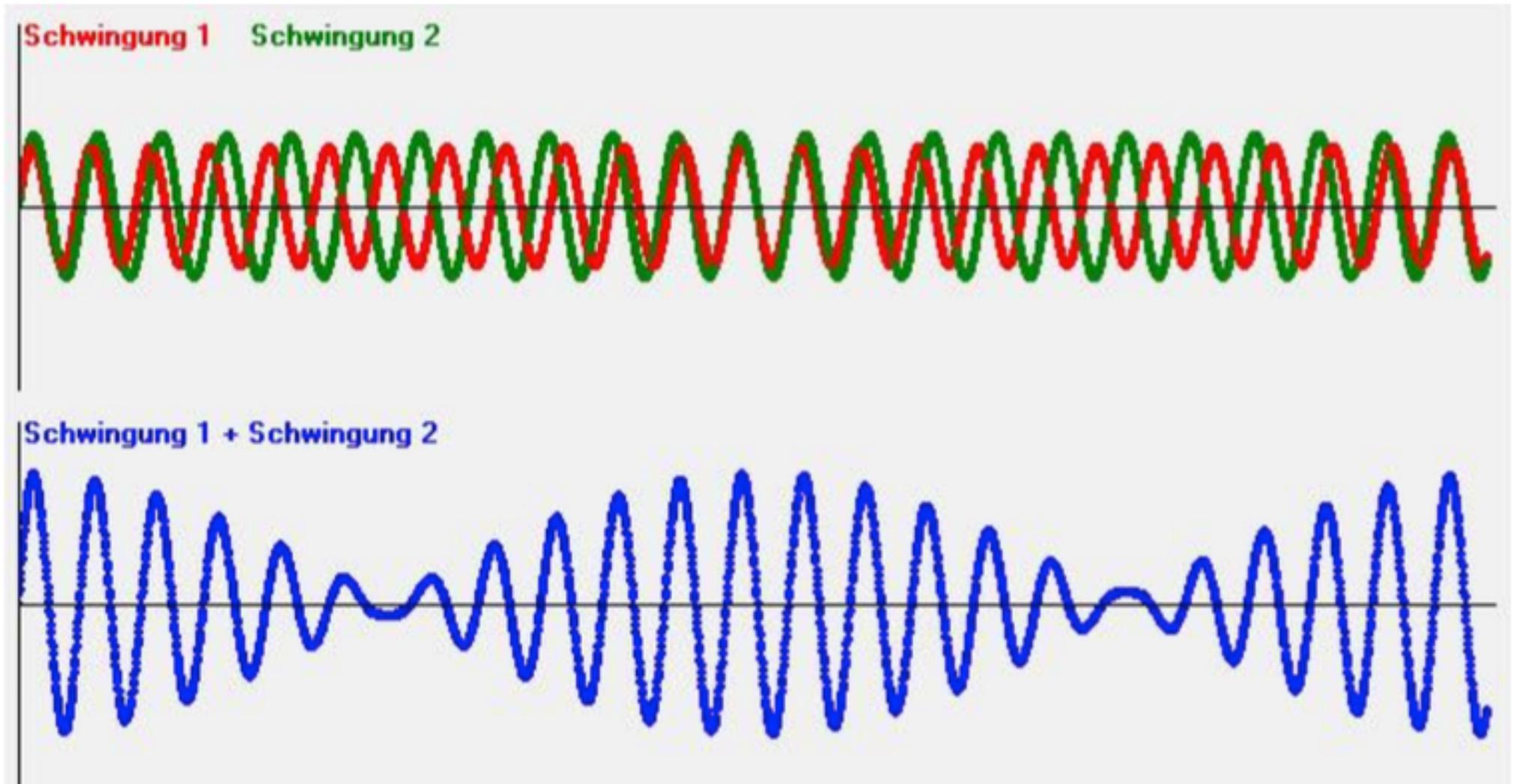
Kugelwelle:



Interferenz
zweier Kugelwellen



Wellengruppe



Kapitel 8: Elektromagnetische Wellen

8 Elektromagnetische Wellen	75
8.1 Ableitung	75
8.2 Spektrum der elektromagnetischen Wellen	77
8.3 Polarisation	78
8.4 Energie und Poynting-Vektor	79
8.5 Impuls und Druck	79
8.6 Erzeugung elektromagnetischer Wellen	81
8.6.1 Hertz'scher Dipol	81
8.6.2 Strahlung einer beschleunigten Ladung	84



Armin Hermann

**Weltreich
der
Physik**

1857–1894

Heinrich Rudolf Hertz was a German physicist who first conclusively proved the existence of electromagnetic waves theorized by James Clerk Maxwell's electromagnetic theory of light. [Wikipedia](#)

Die Universität Berlin stellte damals alljährlich Preisaufgaben. 1878 wählte die Philosophische Fakultät eine Frage aus der elektromagnetischen Theorie: die träge Masse der elektrischen Ladung.

Ende des 18. Jahrhunderts hatte man vergeblich versucht, ein Gewicht des »elektrischen Fluidums« festzustellen und deshalb von einer »unwägbaren Substanz« gesprochen. Jetzt ging es um eine eng mit dem Gewicht verbundene Eigenschaft, um die »Trägheit«. Bei den gewöhnlichen Körpern ist die »Masse« sowohl für das Gewicht verantwortlich wie für die Trägheit. Wie ist es bei der elektrischen Materie?

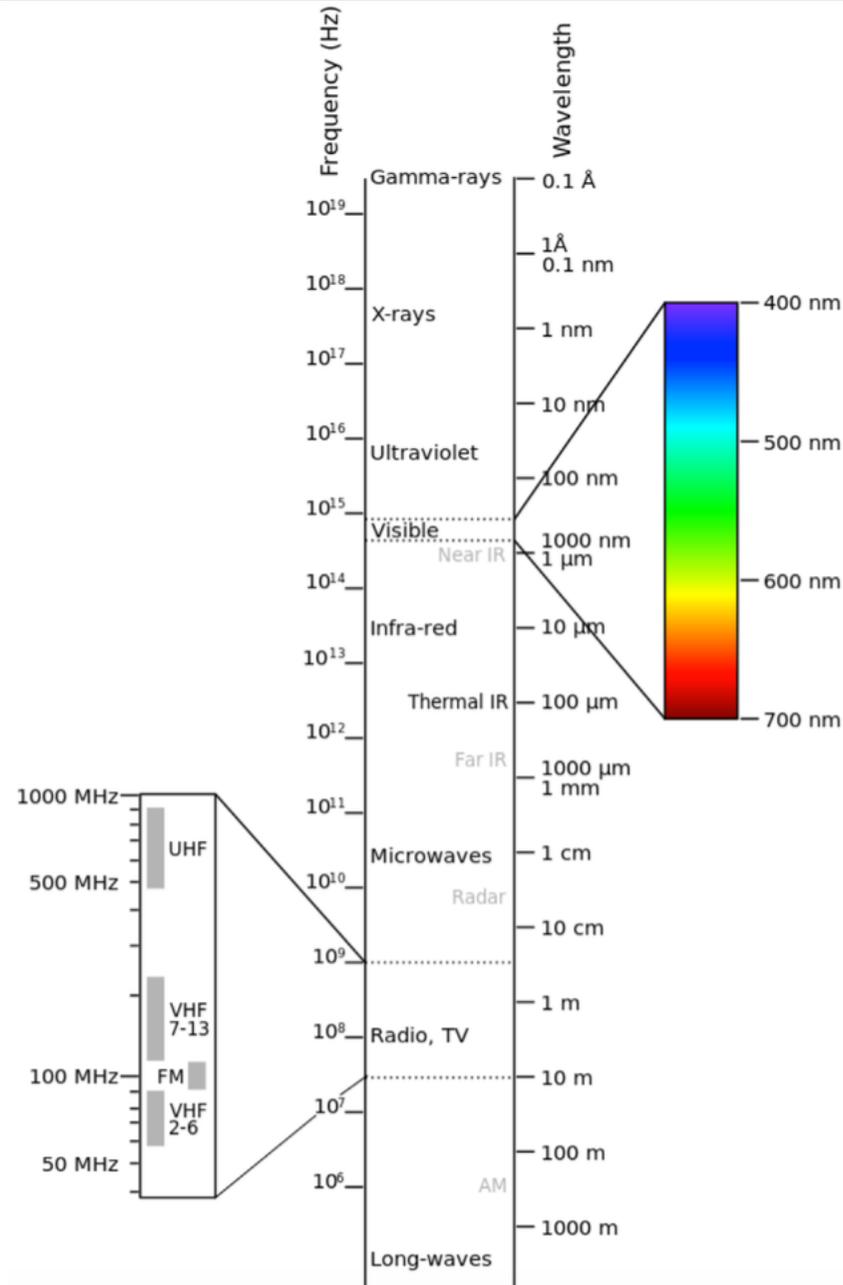
Die Preisaufgabe hatte Hermann von Helmholtz gestellt. Wenn eine »träge Masse« der elektrischen Ladung vorhanden sein sollte, mußte das auf das elektrische Verhalten einen Einfluß haben. Zur Bearbeitung am besten befähigt hielt Helmholtz seinen neuesten Schüler, den einundzwanzigjährigen Heinrich Hertz, der eben erst in sein Praktikum eingetreten war, und ermunterte ihn, das Thema anzufassen.

»Ich habe den Preis erhalten«, schrieb Hertz ein paar Monate später an seine Eltern: »Das Urteil war so lobend abgefaßt, daß mir das den Wert auf das Doppelte erhöht. Die meisten anderen Arbeiten, auch die gekrönten, wurden als Schülerarbeiten behandelt.«

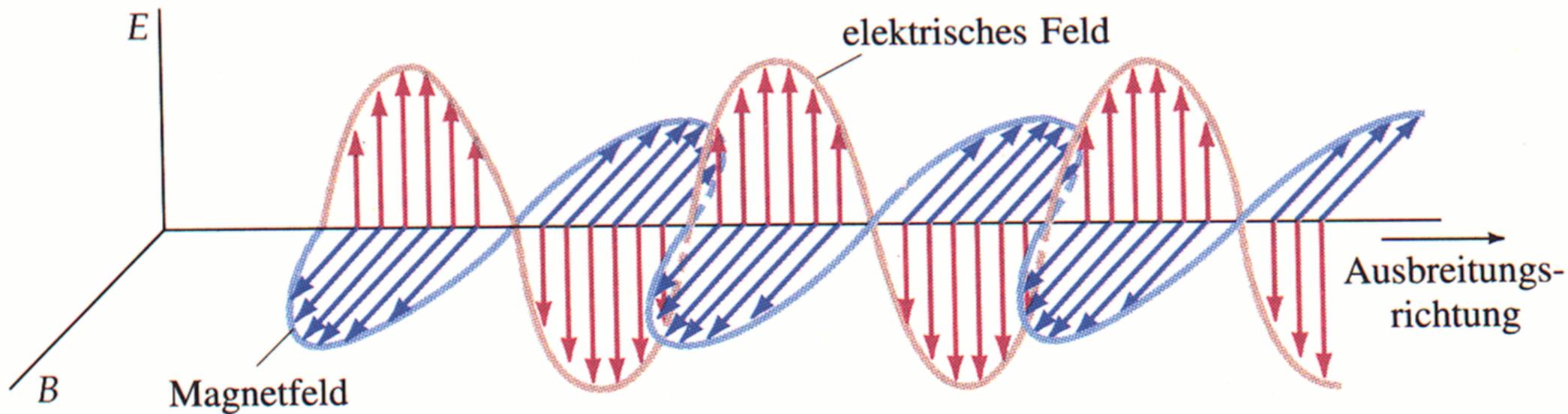
Für die Eltern bestätigten sich die hohen Erwartungen. Während der Schulzeit hatte er Lehrer und Kameraden immer wieder in Staunen gebracht. Der Direktor der Gewerbeschule wollte ihn unbedingt Mathematik studieren lassen, denn seine Begabung sei unerhört. Der Lateinlehrer rühmte seine Fähigkeiten in den alten Sprachen. Homer zu übersetzen ist für den Durchschnittsschüler harte Arbeit; er las und verstand mit großem Vergnügen. Auch später liebte er es, für sich Homer zu deklamieren, wie übrigens auch Dante. Das Italienische hatte er sich nebenbei angeeignet.

Zufällig fand er einmal – er war 17 Jahre alt – auf der Karre eines Straßenhändlers eine arabische Grammatik. Als der Vater seinen Eifer sah, schickte er ihn zu einem Arabisten. Nach den ersten Stunden kam der Gelehrte und bestürmte die Eltern, der Junge müsse Orientalist werden: »Ein solches Talent ist mir noch nicht vorgekommen.«

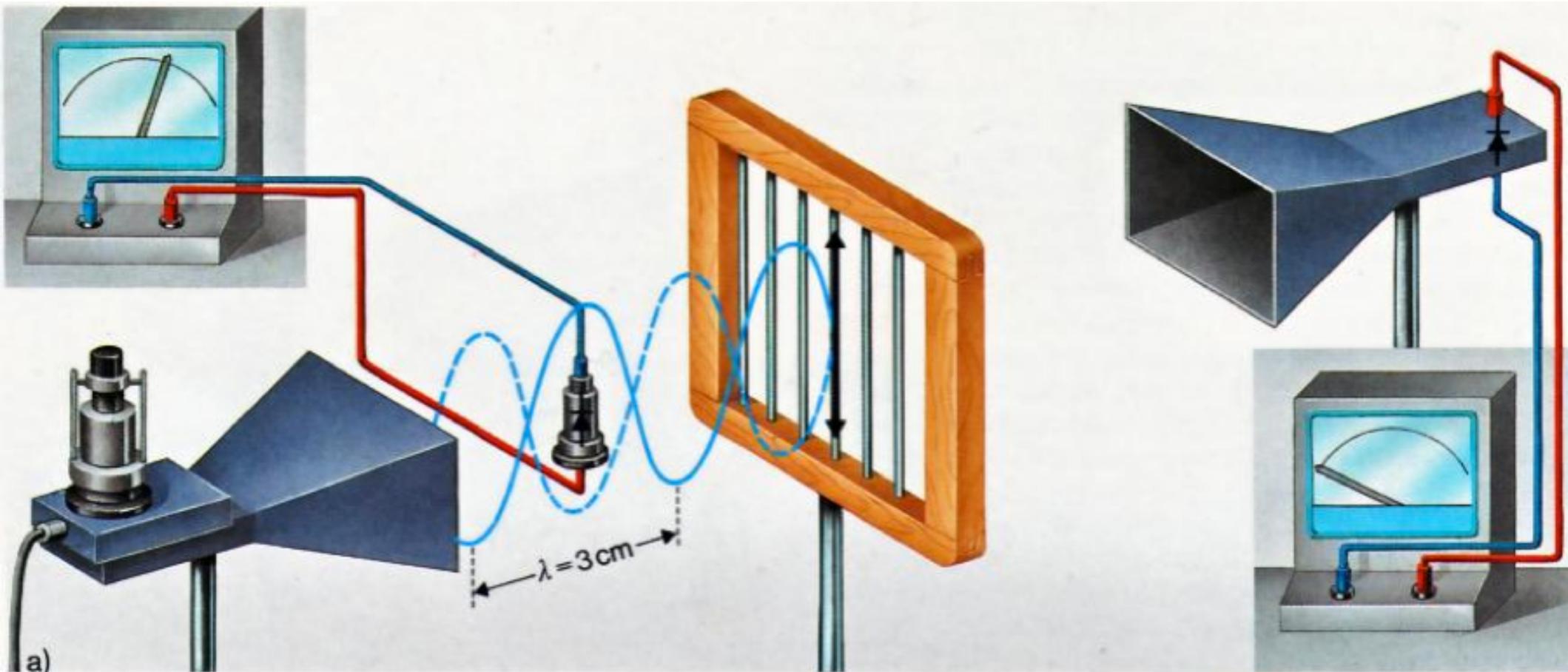
Spektrum: elektromagnetische Wellen



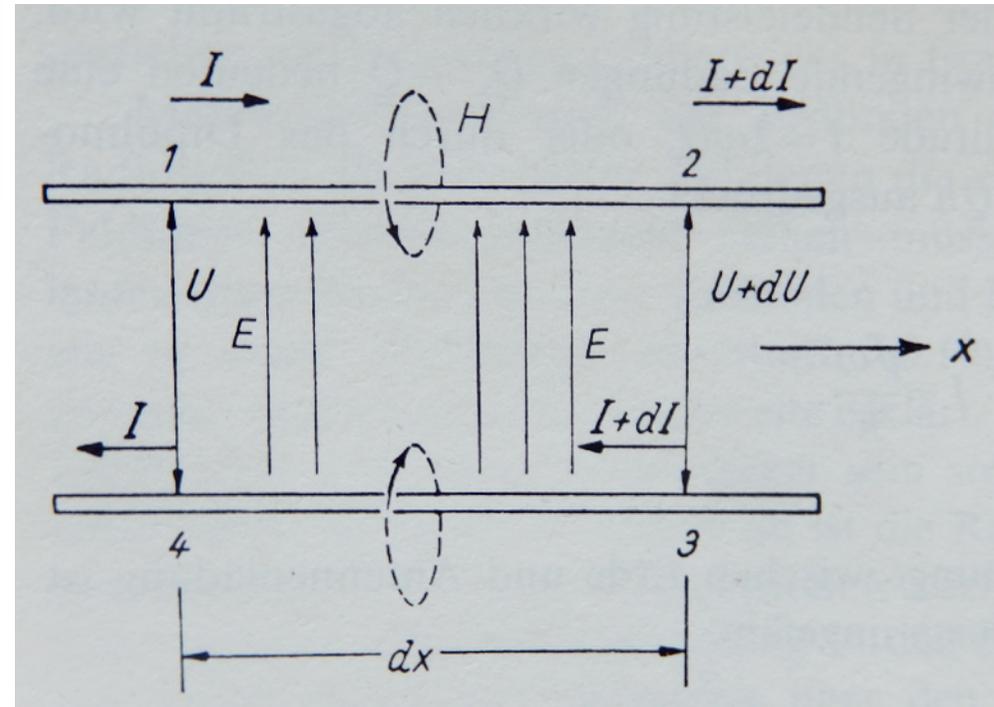
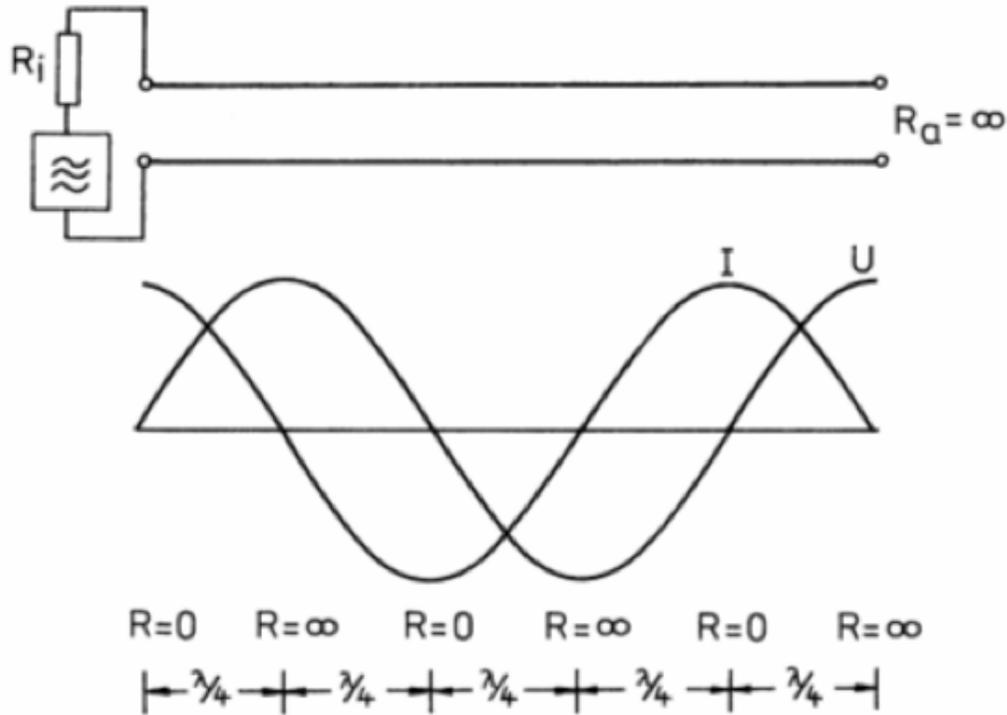
Polarisation und Phase bei EM Wellen



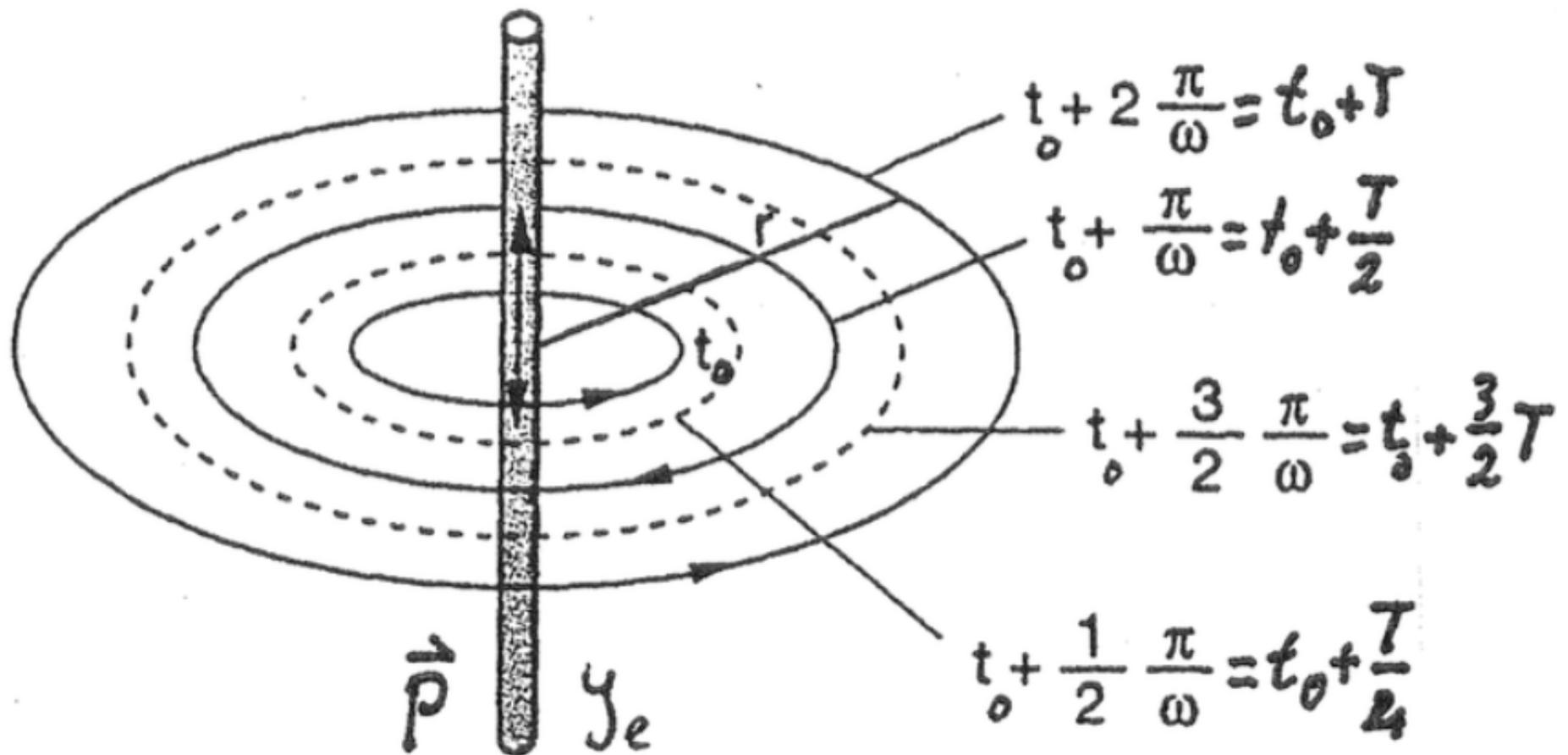
Polarisation bei Mikro-Wellen



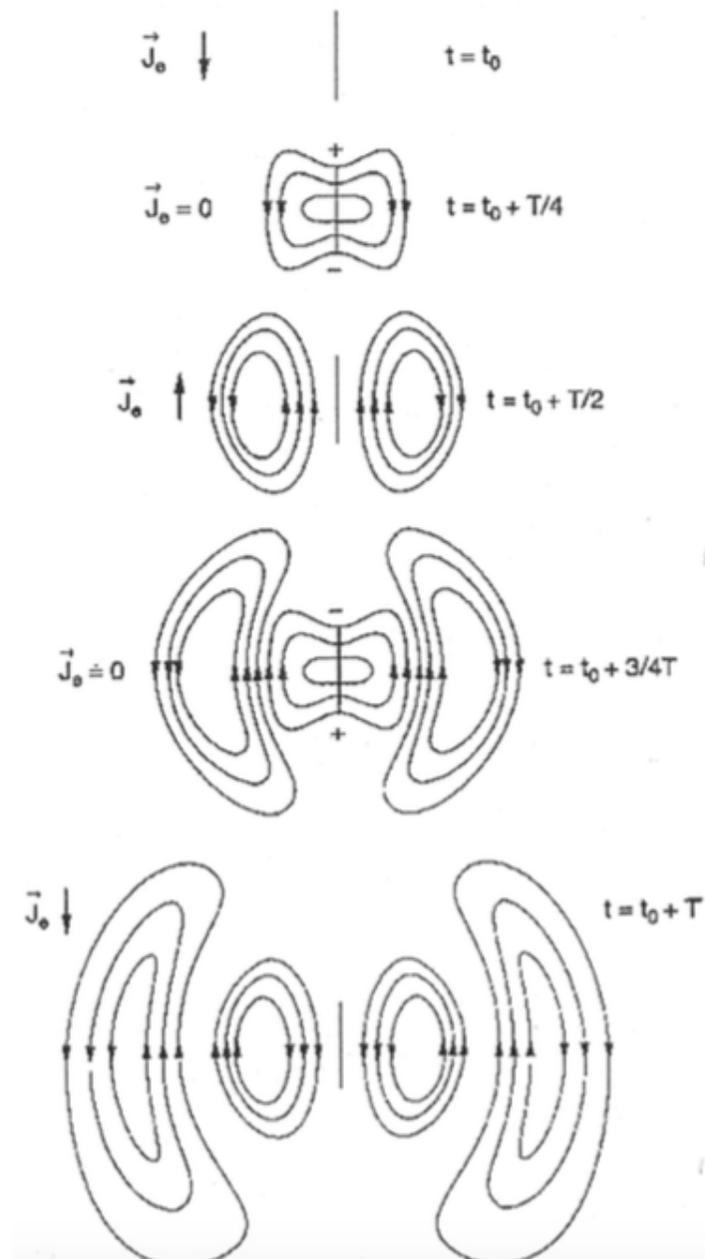
Lecherleitung



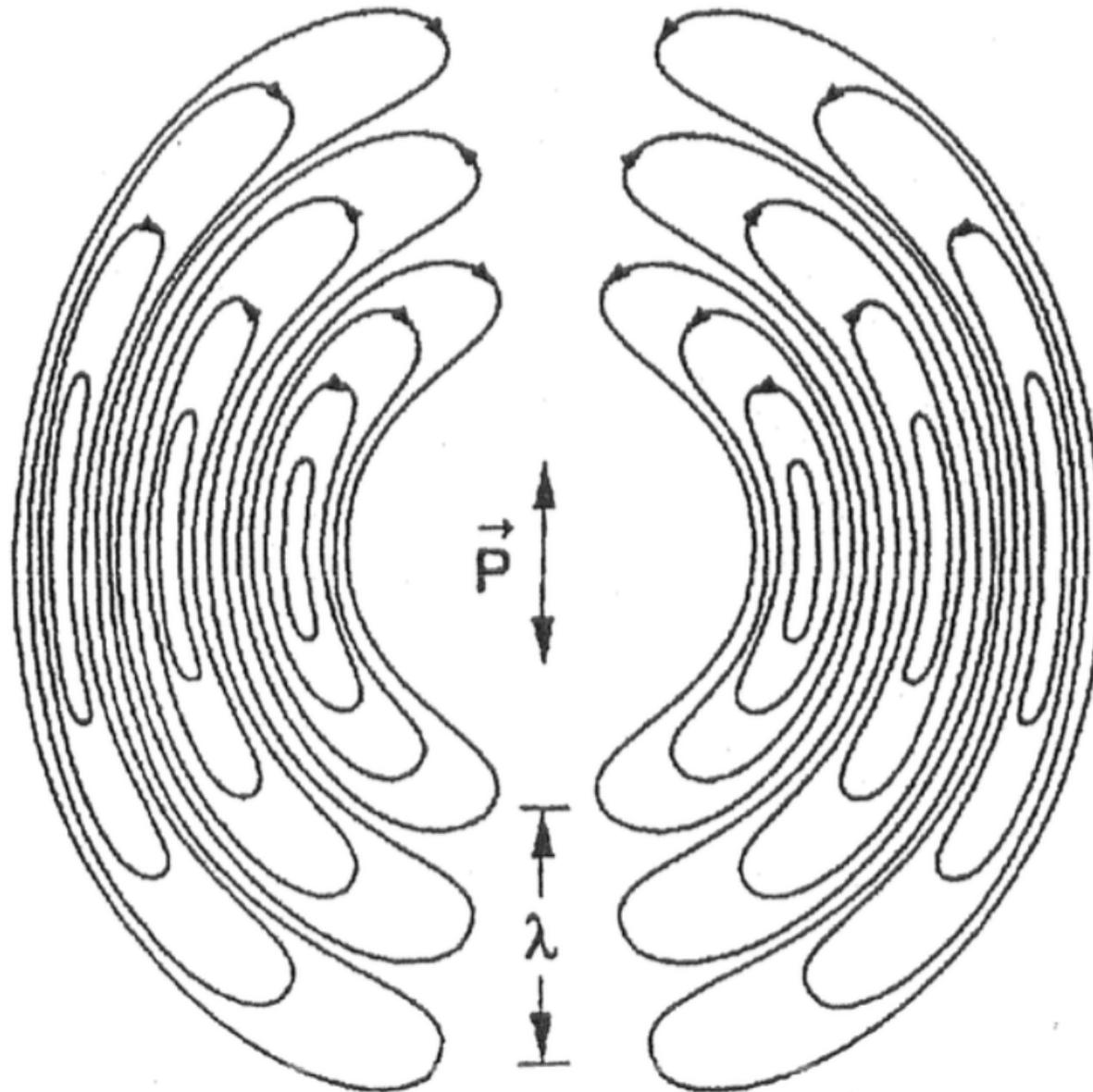
Magnetfeld um eine Antenne



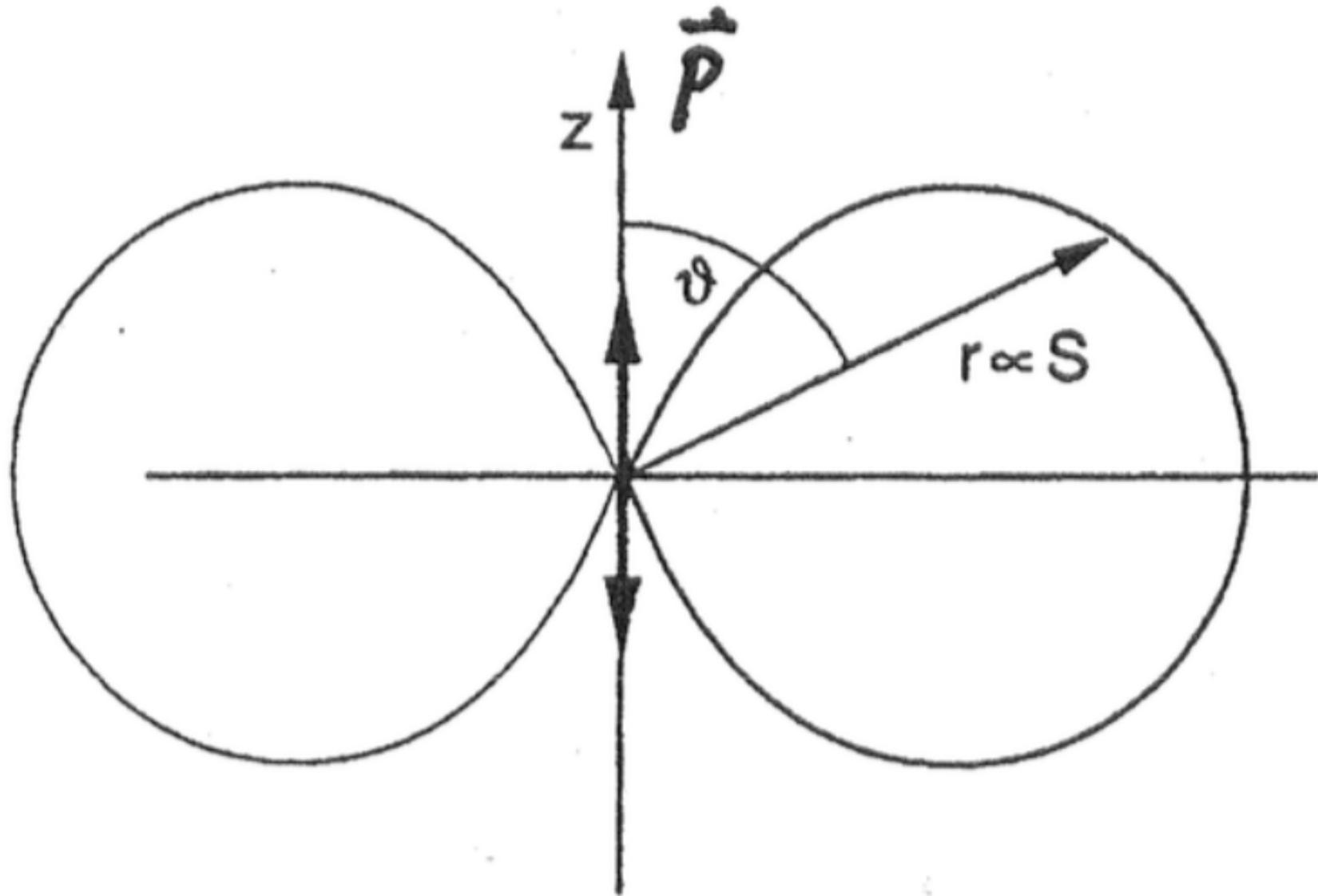
Retardiertes skalares Potential



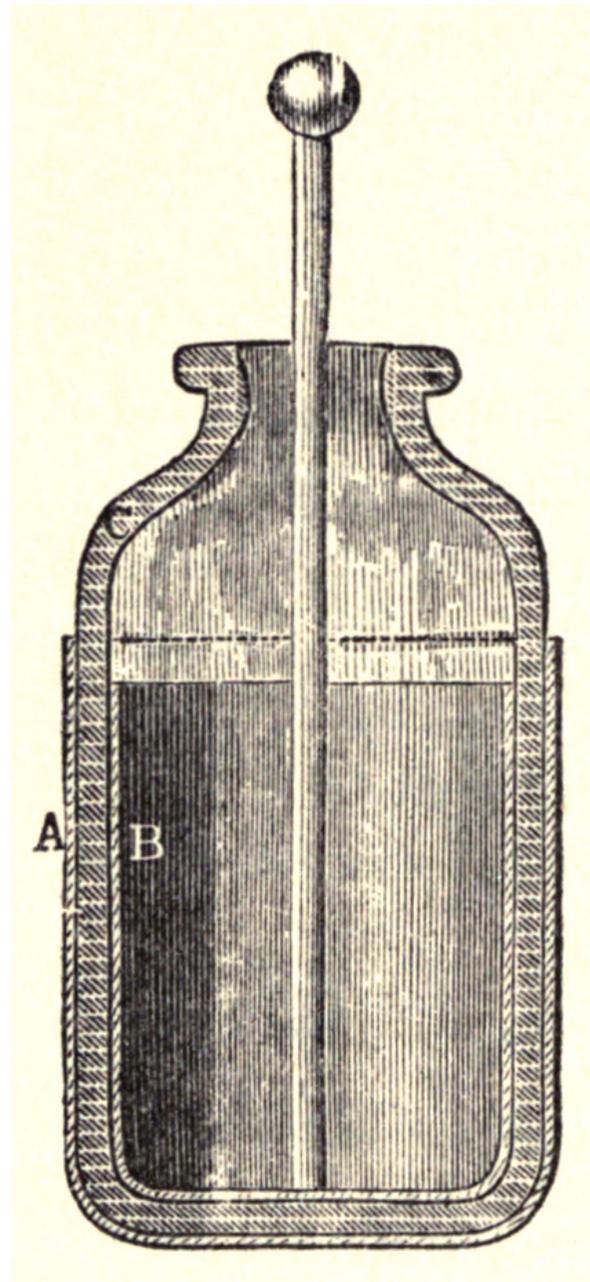
Elektrisches Fernfeld um eine Antenne



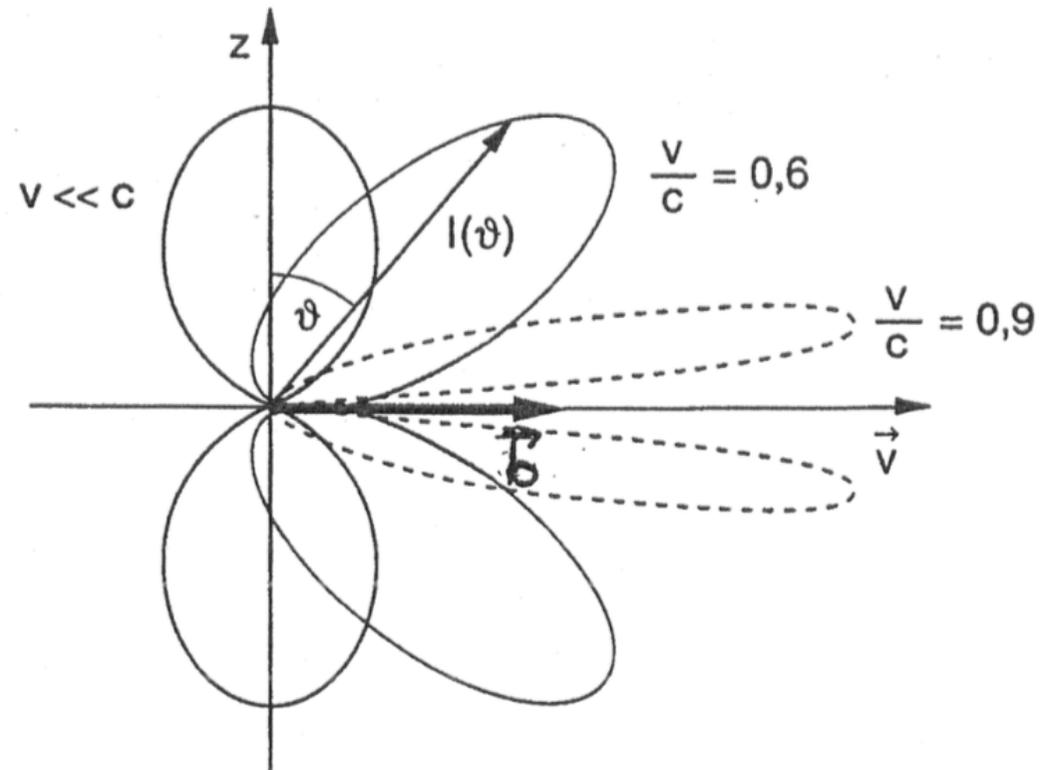
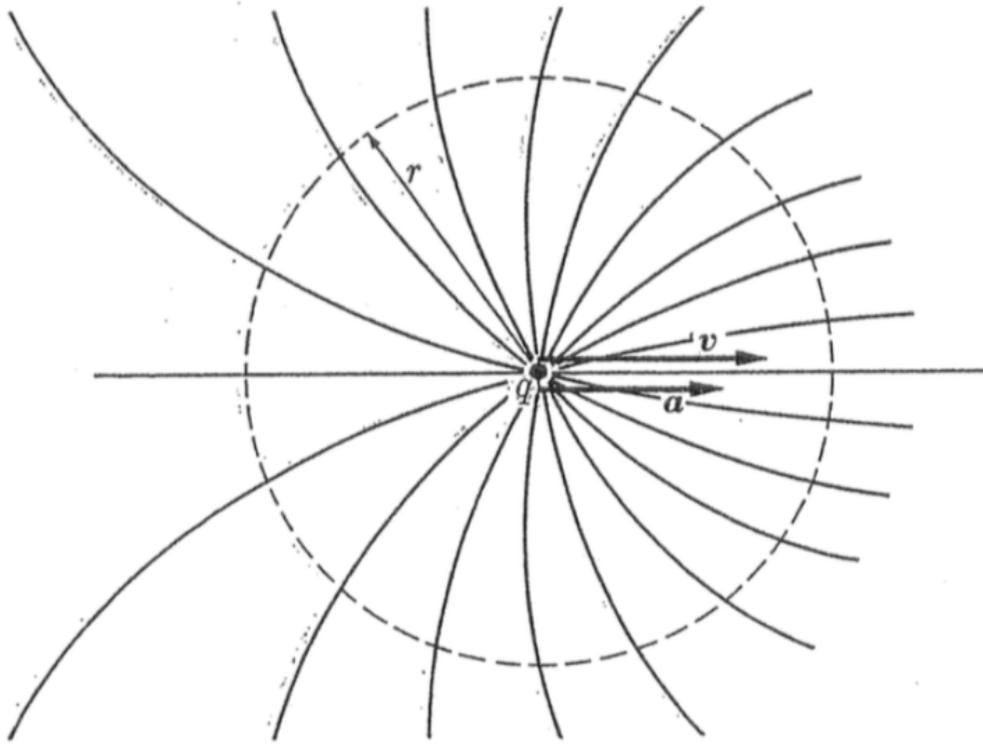
Dipol: Polardiagramm des Poynting-Vektors



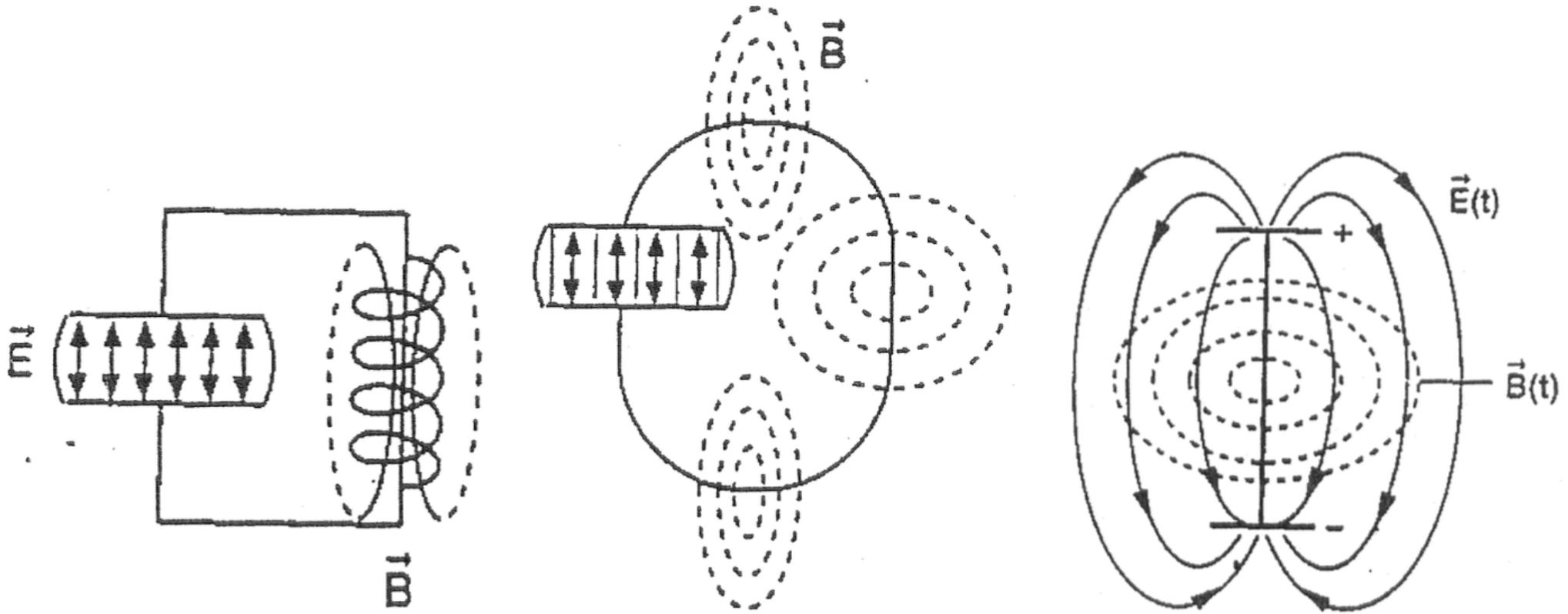
Leidener Flasche



Synchrotronstrahlung



Übergang Schwingkreis – Stabantenne



Kapitel 9: Optik

9 Optik	85
9.1 Huygens'sches Prinzip	85
9.2 Reflexion und stehende Wellen	86
9.3 Brechung und Totalreflexion	87
9.4 Polarisierung durch Brechung	88
9.5 Dispersion	89
9.6 Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	94
9.7 Linsen und Abbildungen	95
9.8 Kohärenz	97
9.9 Interferenz	98
9.10 Beugung	100
9.11 Dopplereffekte	105



Sir Isaac Newton war ein englischer Naturforscher und Verwaltungsbeamter. In der Sprache seiner Zeit, die zwischen natürlicher Theologie, Naturwissenschaften, Alchemie und Philosophie noch nicht scharf trennte, wurde Newton als Philosoph bezeichnet.
[Wikipedia](#)

1643–1727

Isaac Newton porträtiert von [Godfrey Kneller, London 1702](#), Bestand der [National Portrait Gallery](#)

Sir Isaac Newton, kurze Zeit vor seinem Tode

Robert L. Weber
Eric Mendoza

**Kabinett
physikalischer Raritäten**

Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden

„Ich weiß nicht, als was ich der Welt erscheinen mag, doch mir schein ich nur wie ein Knabe gewesen zu sein, der an der Küste spielt und hin und wieder einen glatteren Kiesel oder eine schönere Muschel als gewöhnlich findet, während doch der große Ozean der Wahrheit gänzlich unentdeckt vor mir lag.“

Sowohl HUYGENS als auch NEWTON haben ein Buch über ihre Arbeiten zur Optik geschrieben, und beide Werke gehören zu den „großen Büchern“ der Wissenschaftsgeschichte. Auch vor ihrem Erscheinen haben beide Bücher ein recht ähnliches Schicksal gehabt. Beide Autoren haben ihre Untersuchungen in den siebziger Jahren begonnen, aber das Erscheinen der Bücher hat sich aus verschiedenen Gründen verzögert. HUYGENS hatte sein Buch zunächst in französischer Sprache verfaßt und dann beabsichtigt, es irgendwann ins Lateinische zu übersetzen, um es einem breiteren Leserkreis zugänglich zu machen, „...aber das beglückende Gefühl der Neuheit verging, und ich schob die Verwirklichung meiner Pläne mehr und mehr hinaus“. Es ist dann schließlich 1691 unter dem Titel *Traité de la lumière* erschienen. NEWTON hat 1672 und 1675 über seine Untersuchungen vor der Royal Society berichtet, wobei er jedoch – vor allem seitens HOOKES – so heftigen Angriffen ausgesetzt gewesen ist, daß er sein Buch erst 1704, ein Jahr nach HOOKES Tod, in englischer Sprache unter dem Titel *Opticks or a Treatise of the Reflections, Refractions and Colours of Light* publiziert hat. Die Arbeiten von HUYGENS und NEWTON sind zeitlich stark miteinander verflochten, und in der Tat beziehen sich beide des öfteren aufeinander. HUYGENS war einer der wenigen, der von NEWTON als Persönlichkeit anerkannt und geachtet worden ist.

Es ist heute üblich, die Wellentheorie des Lichtes mit dem Namen HUYGENS und die Korpuskulartheorie mit dem NEWTONS in Verbindung zu bringen.

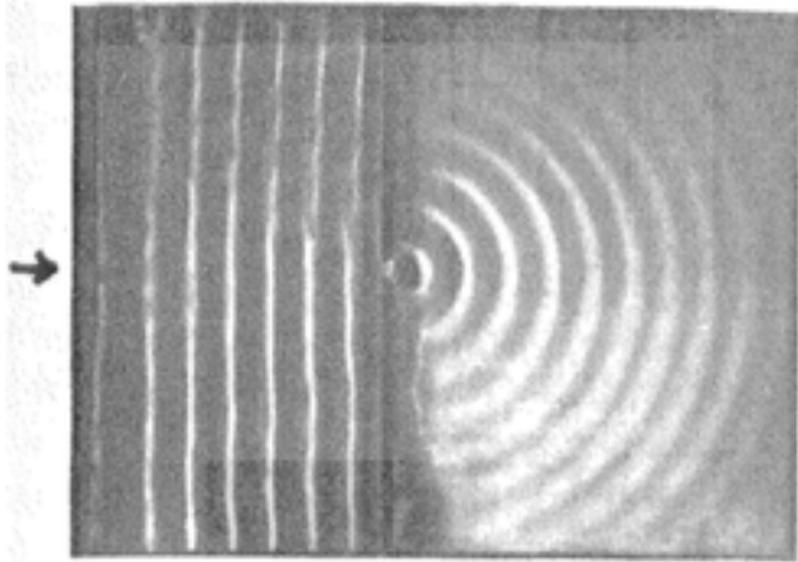
Christiaan Huygens, auch Christianus Hugenius, war ein niederländischer Astronom, Mathematiker und Physiker.
[Wikipedia](#)

1629–1695

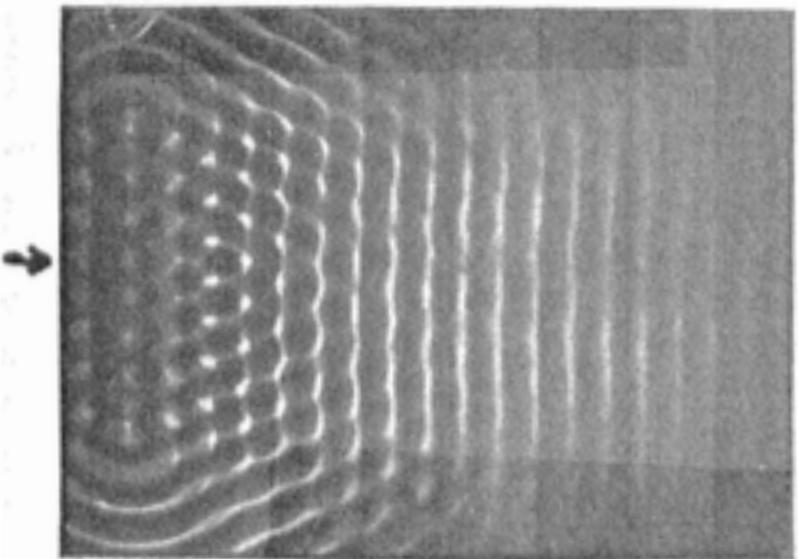
Christiaan Huygens by [Caspar Netscher, Museum Hofwijck, Voorburg](#)



Huygens'sches Prinzip

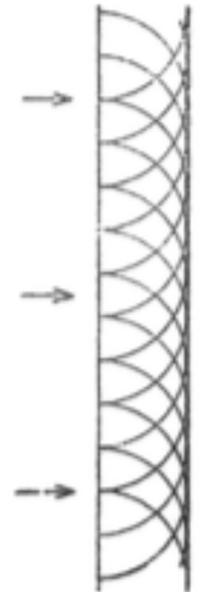


Kugelwelle hinter einem schmalen Spalt (Wasser).

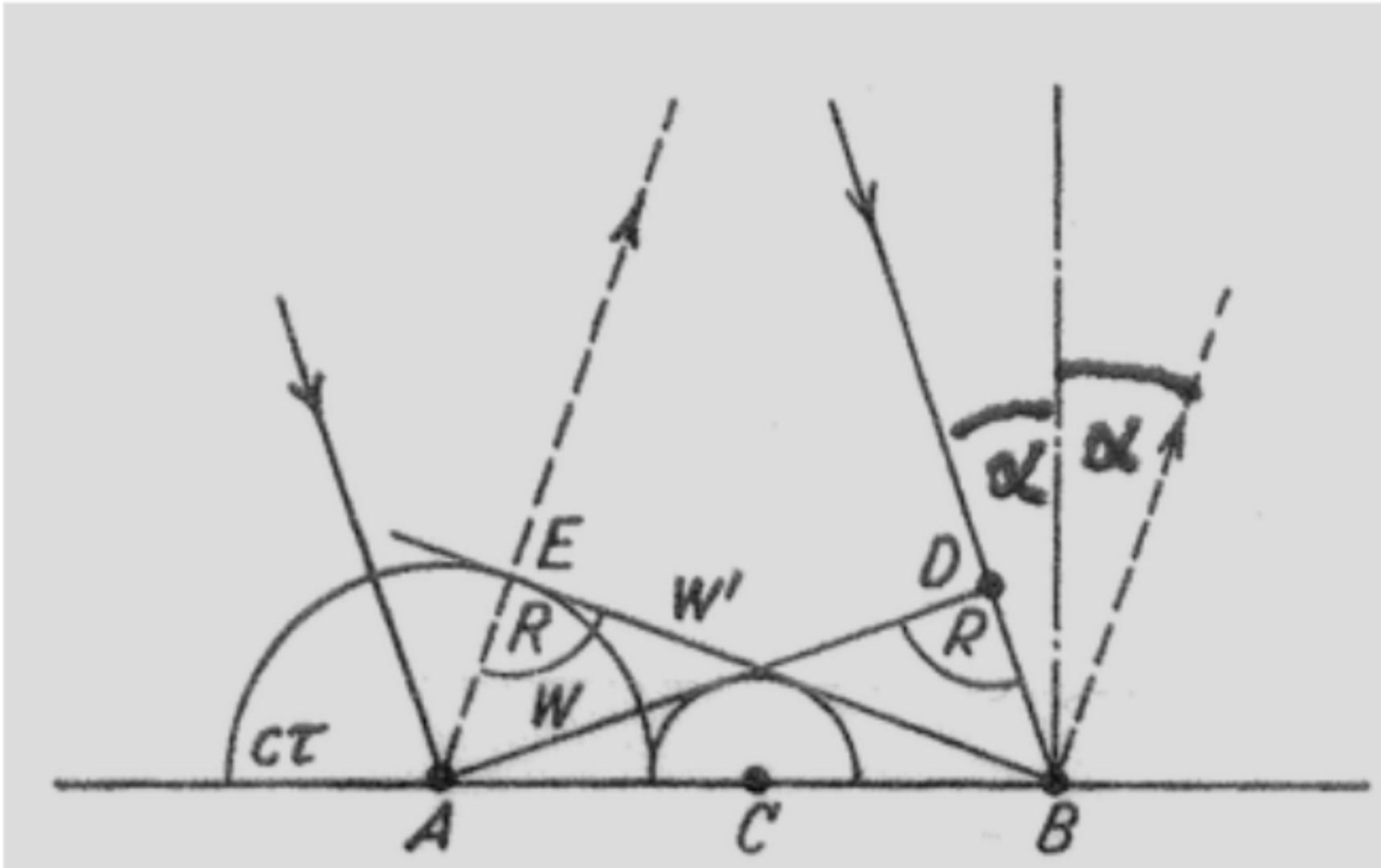


Acht Kugelwellen hinter acht schmalen Spalten (Wasser).

Überlagerung zu einer ebenen Welle nach Huygens.



Reflexion



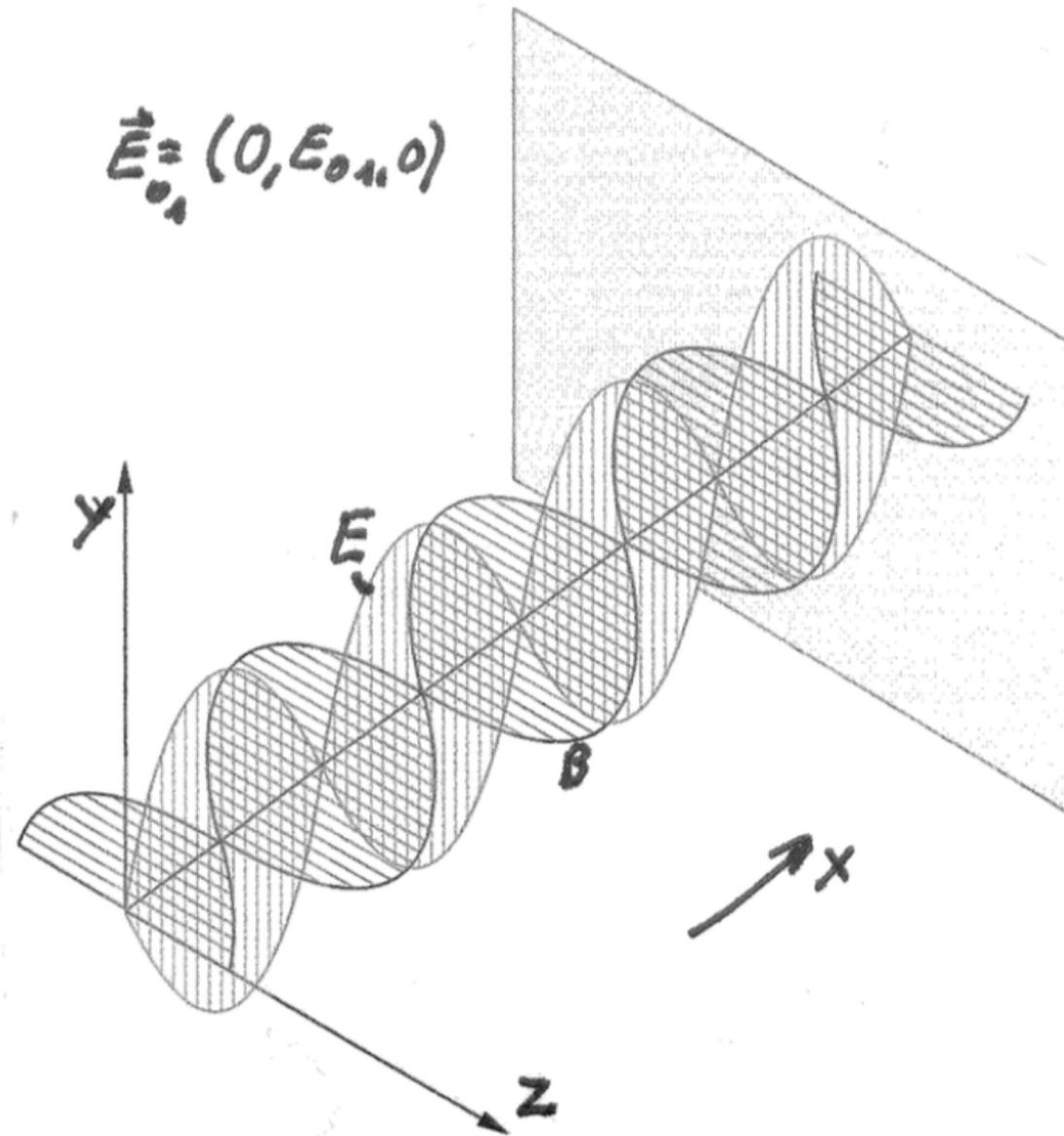
Reflexion nach Huygens.

Radioteleskop

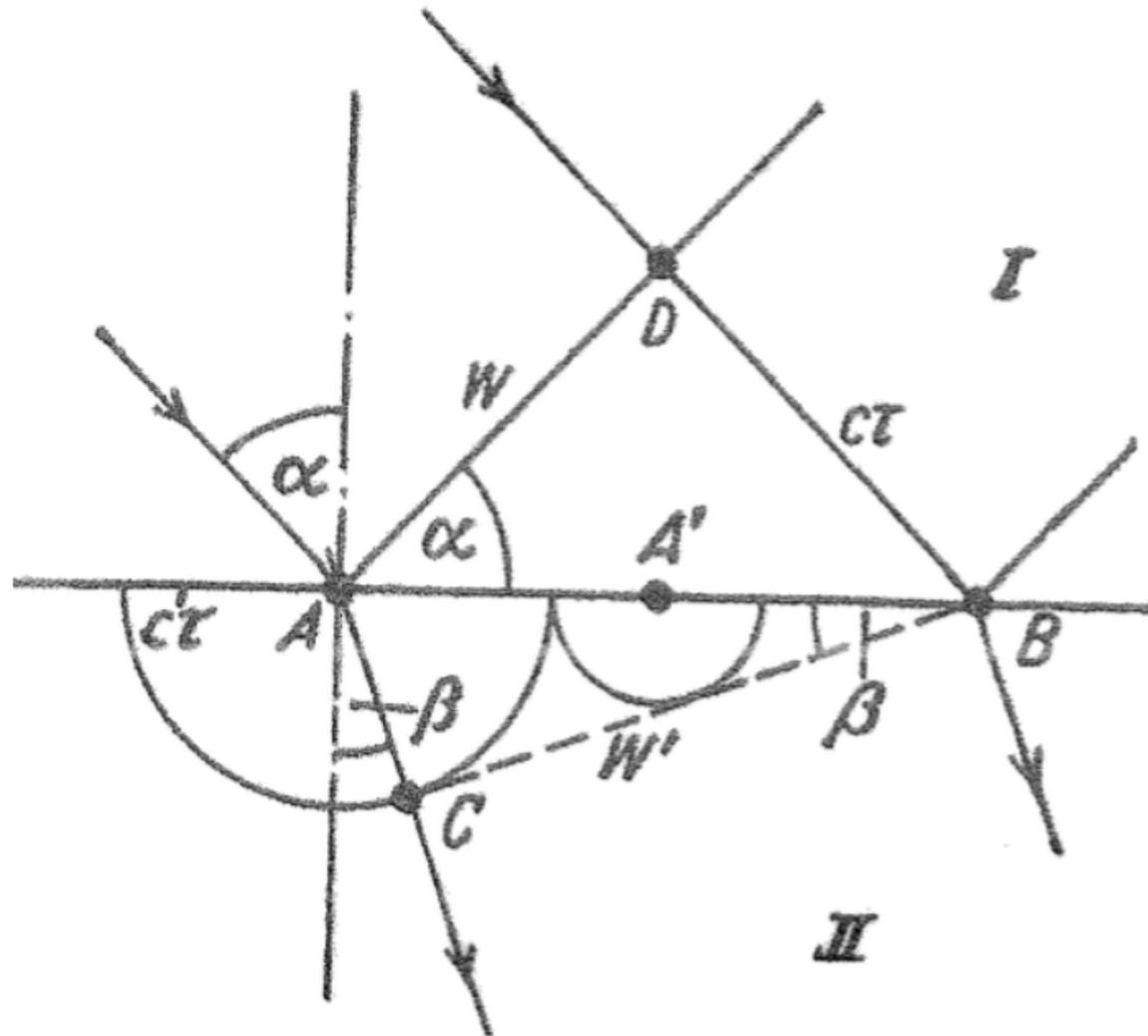


Foto eines Radioteleskops
(Wikipedia).

Stehende EM-Welle vor Metallplatte

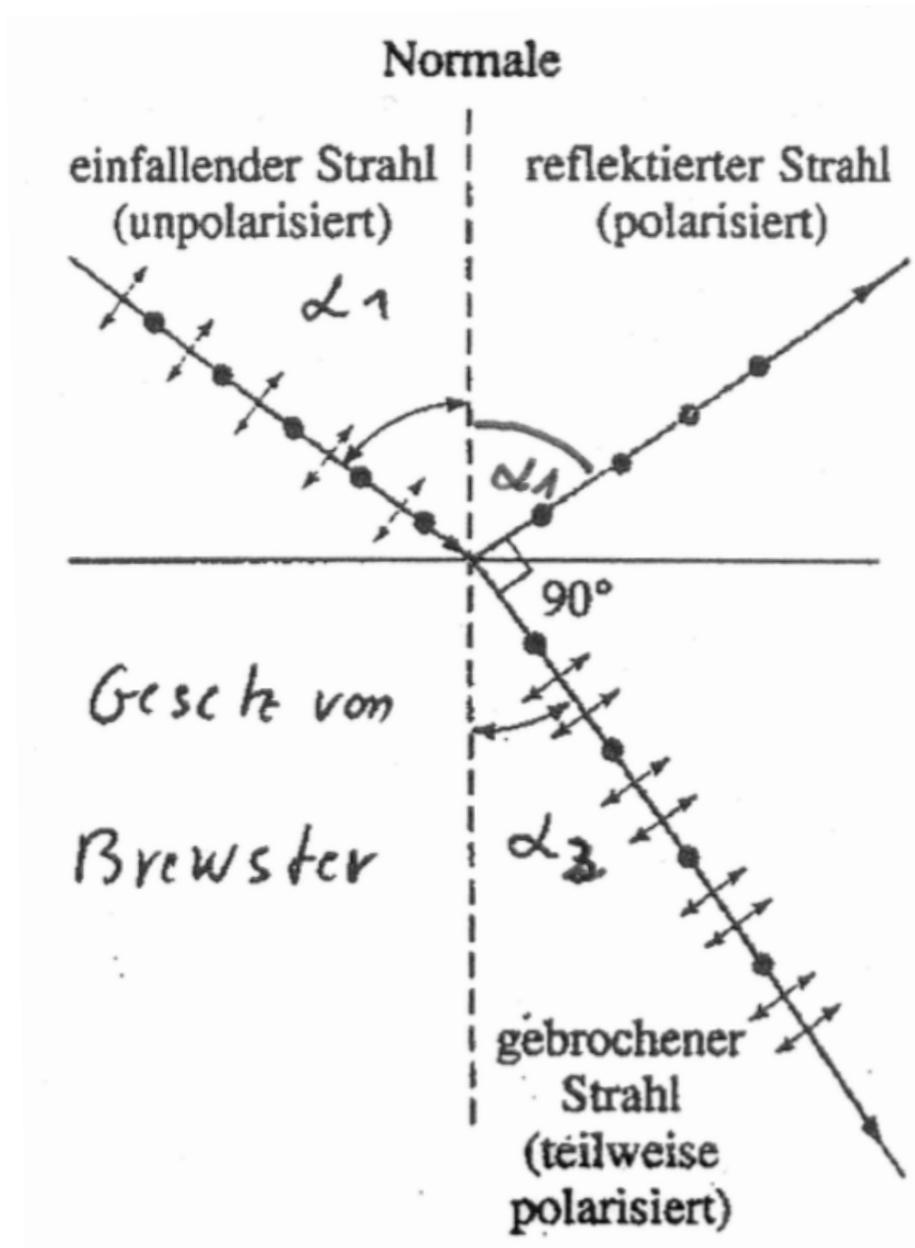


Lichtbrechung nach Huygens

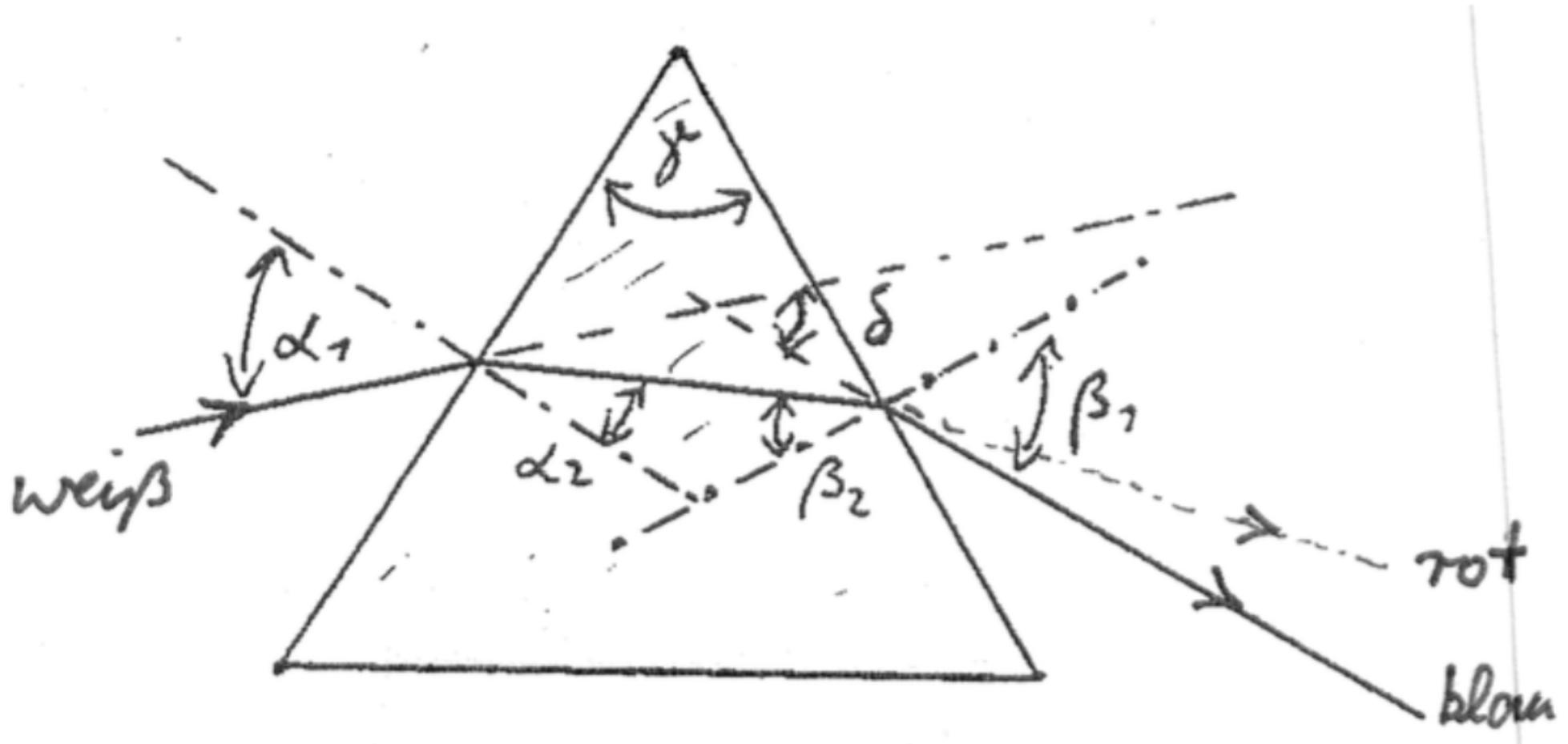


$$\alpha_1 = \alpha, \quad \alpha_2 = \beta$$

Polarisation durch Brechung

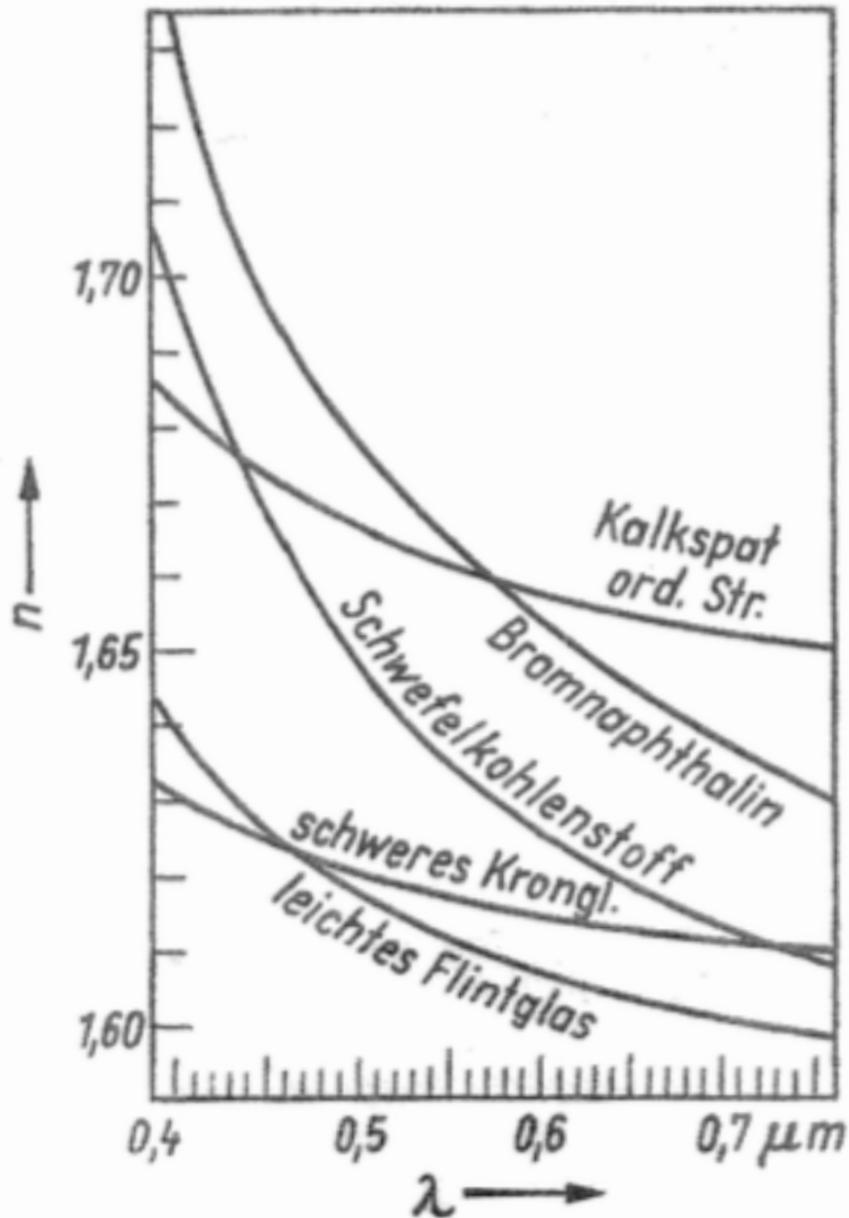


Dispersion



Messung der Dispersion durch ein Prisma.

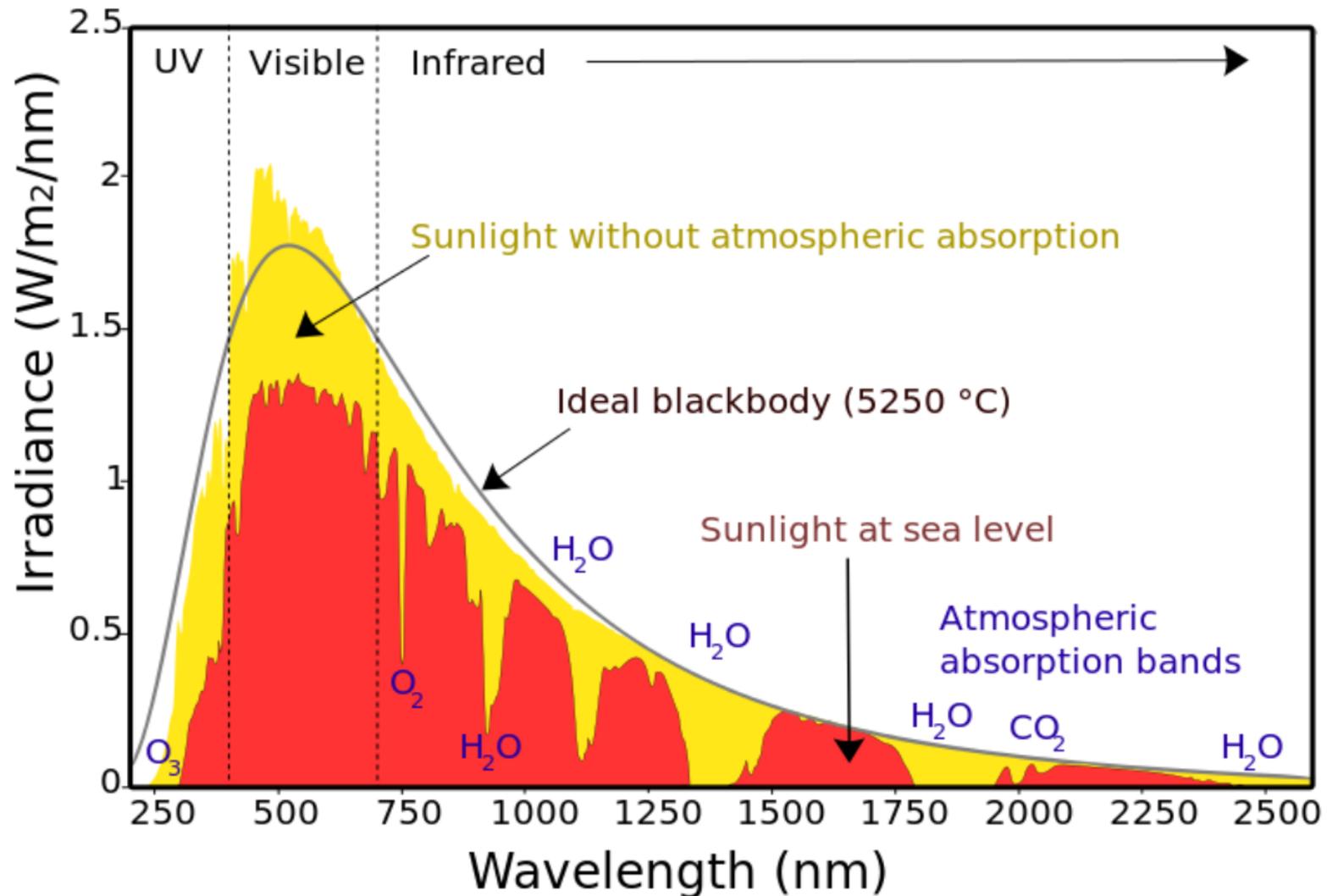
Dispersion



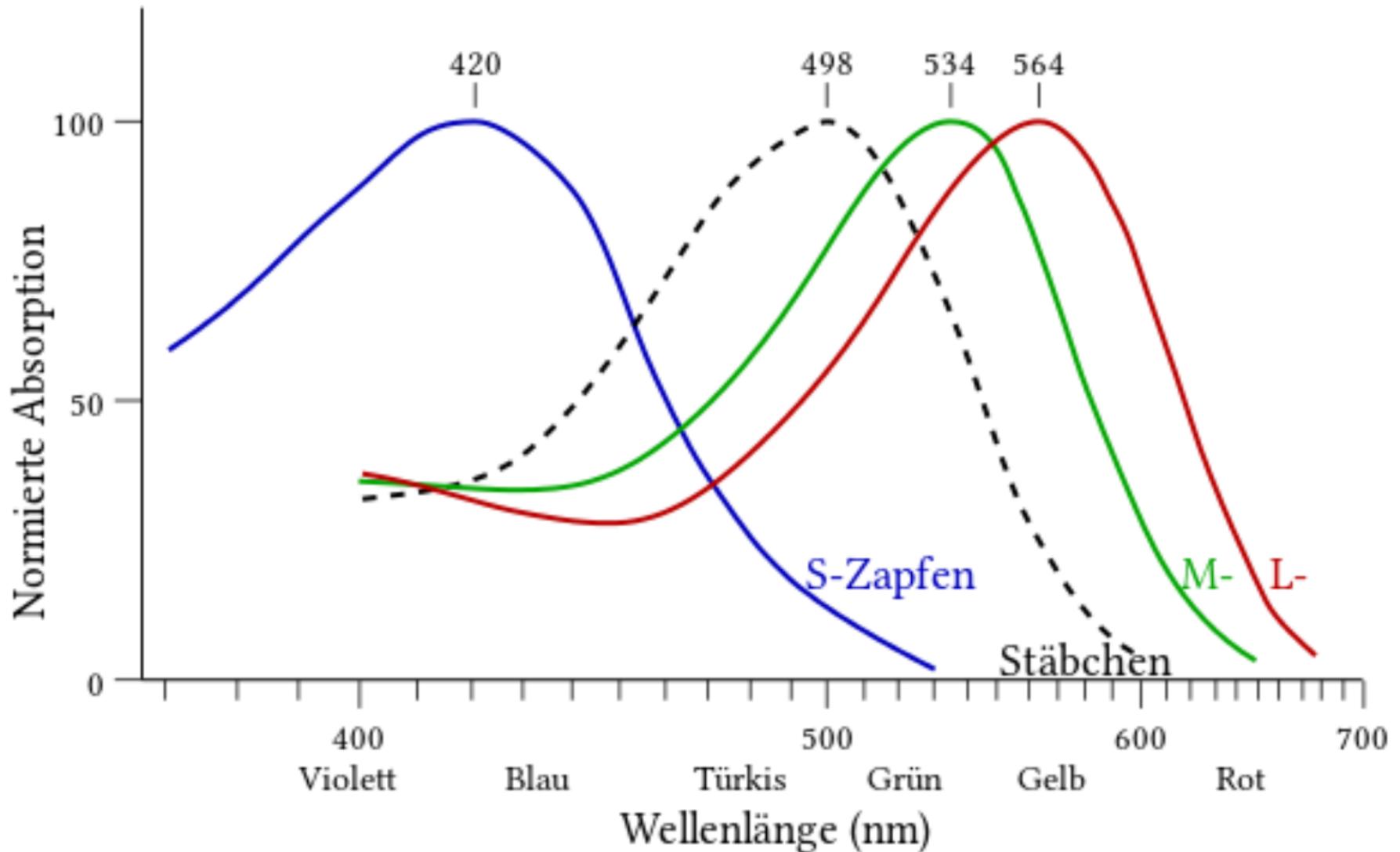
Brechungsindex n als Funktion der Wellenlänge im Vakuum.

Intensität des Sonnenlichts

Spectrum of Solar Radiation (Earth)



Empfindlichkeit der Rezeptoren im Auge



Natrium-Lampe

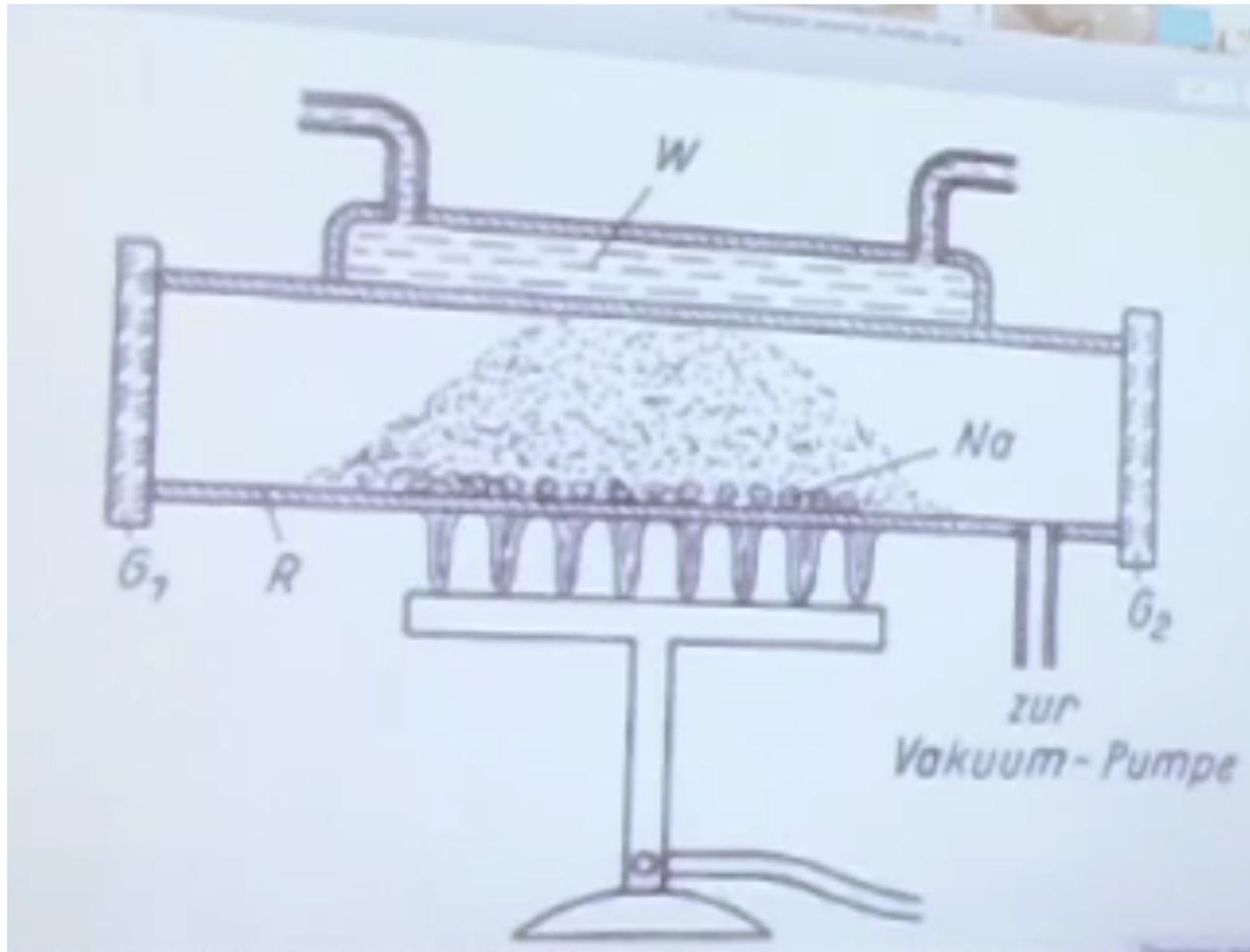


Abbildung an einer Halbkugel

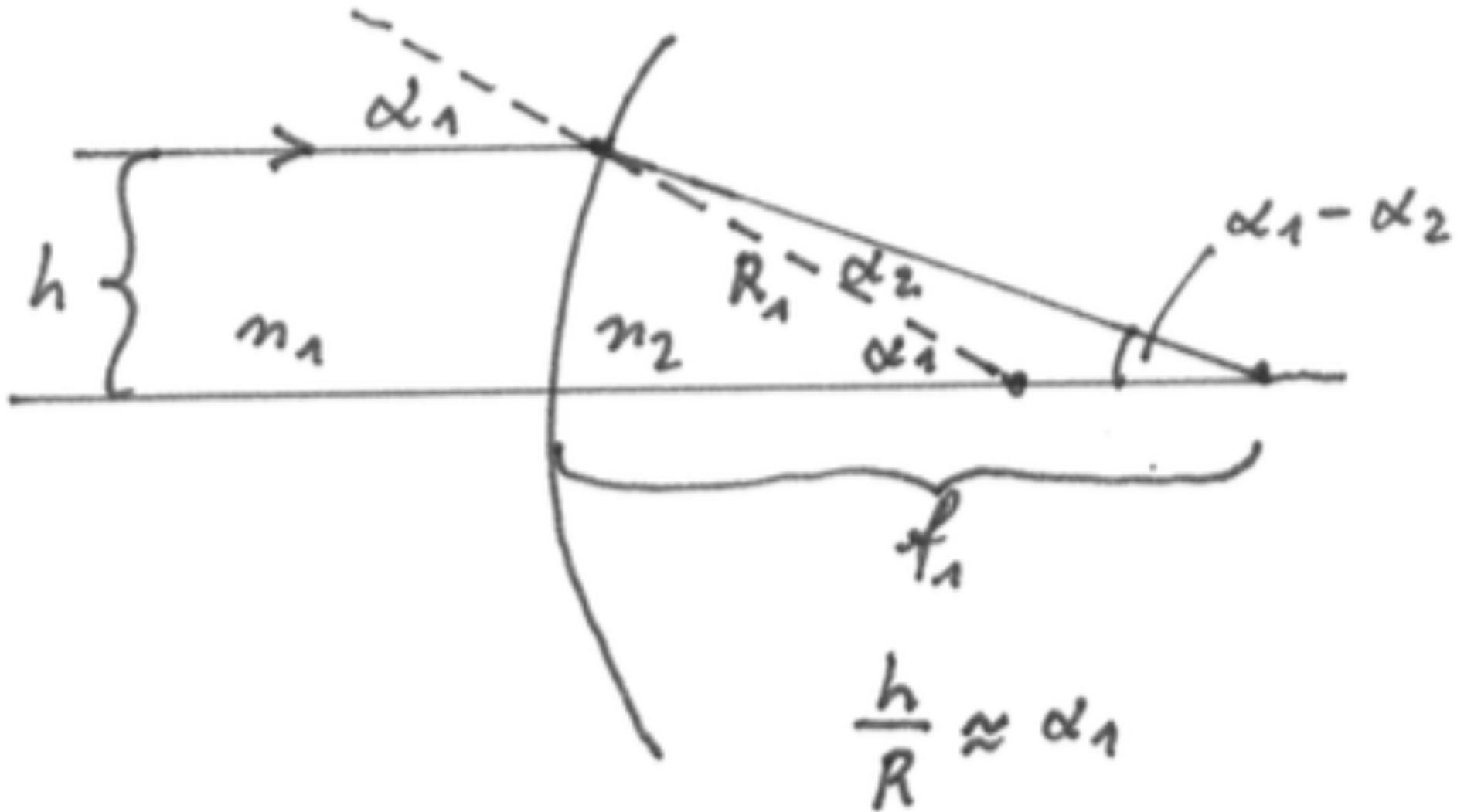
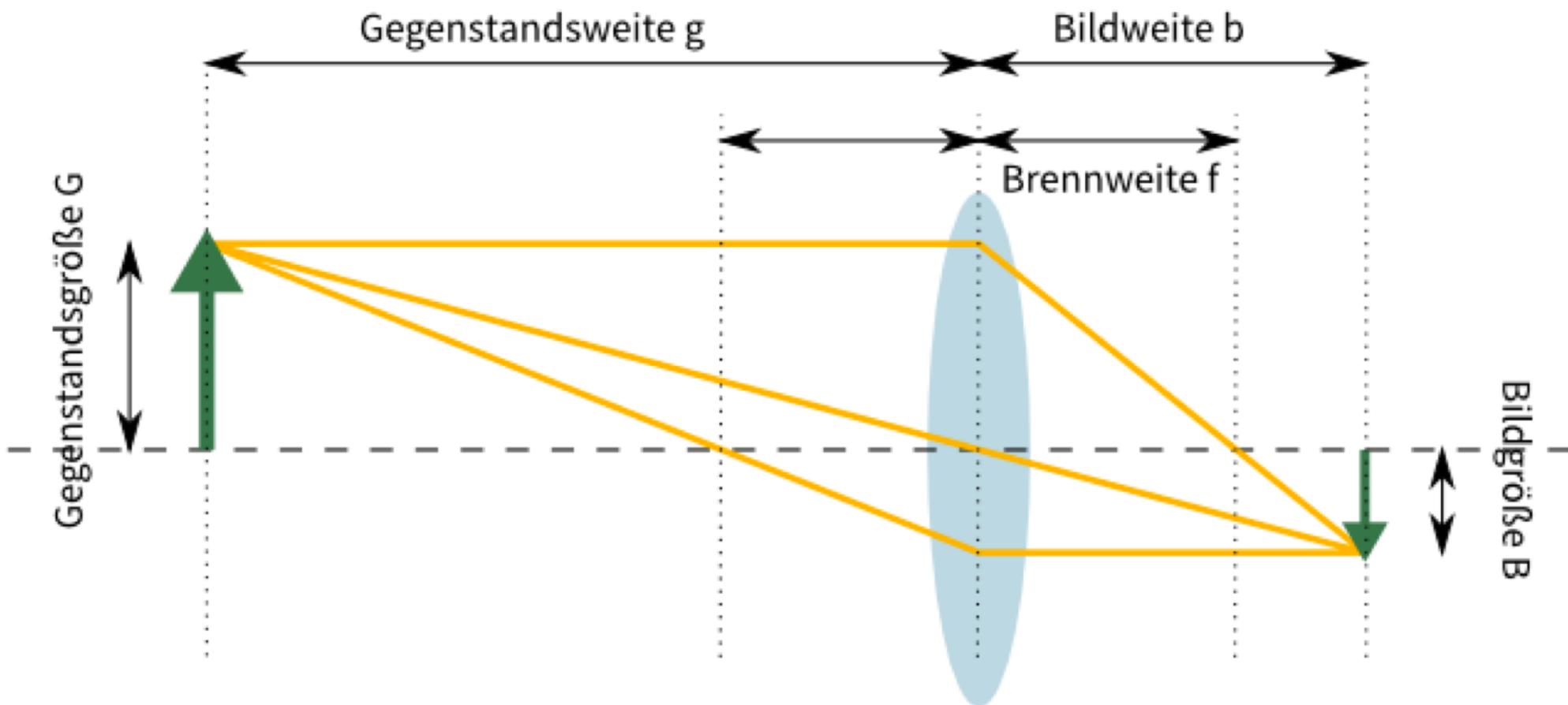
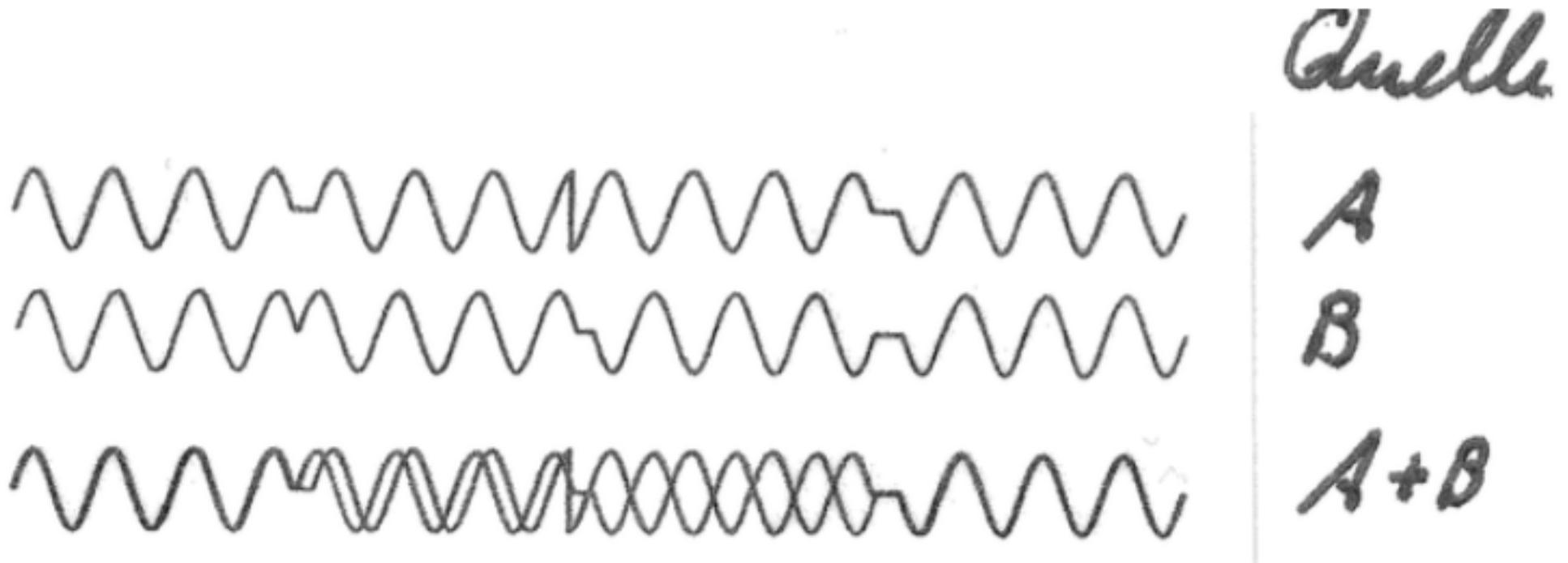


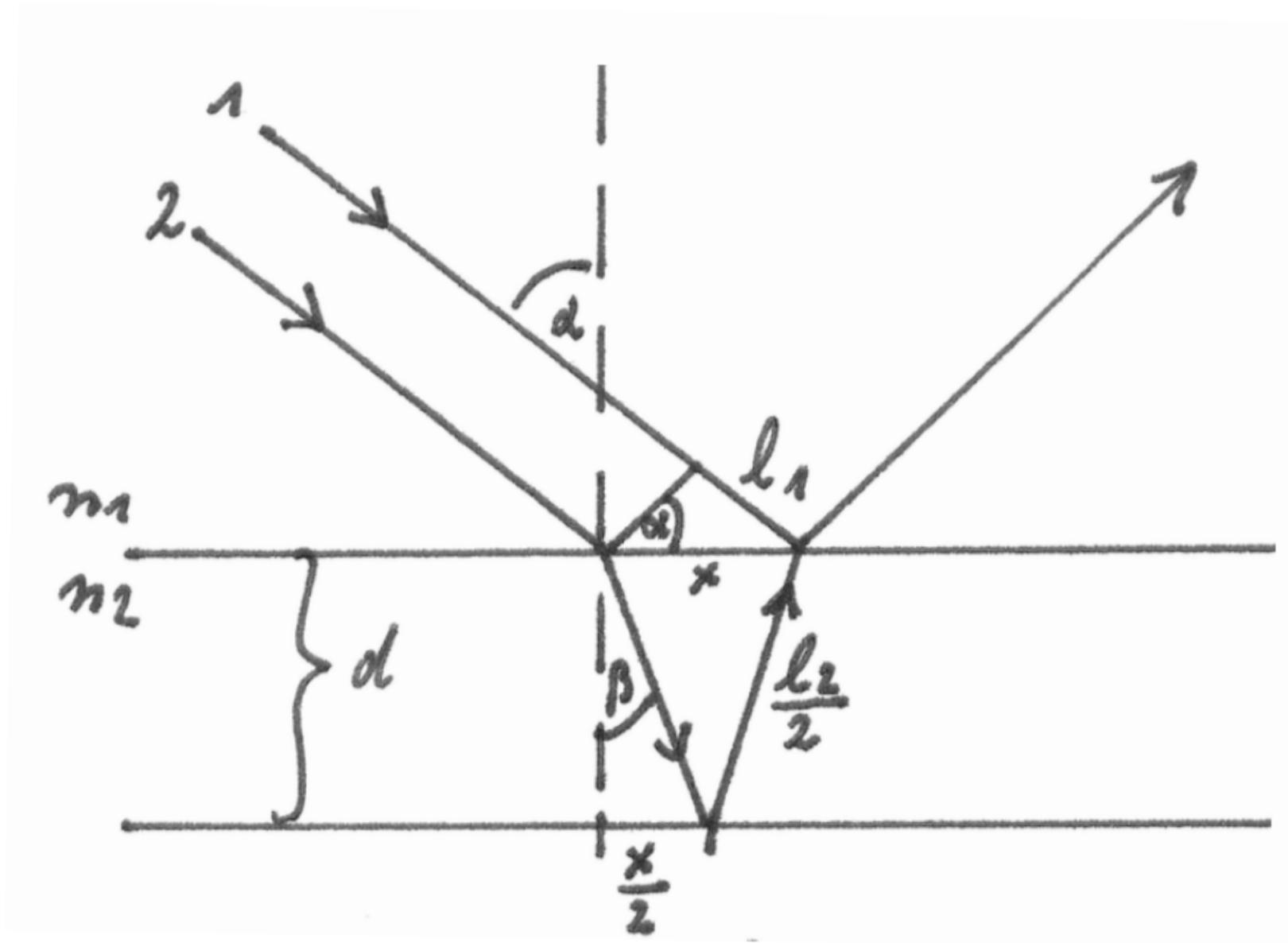
Abbildung an einer dünnen Linse



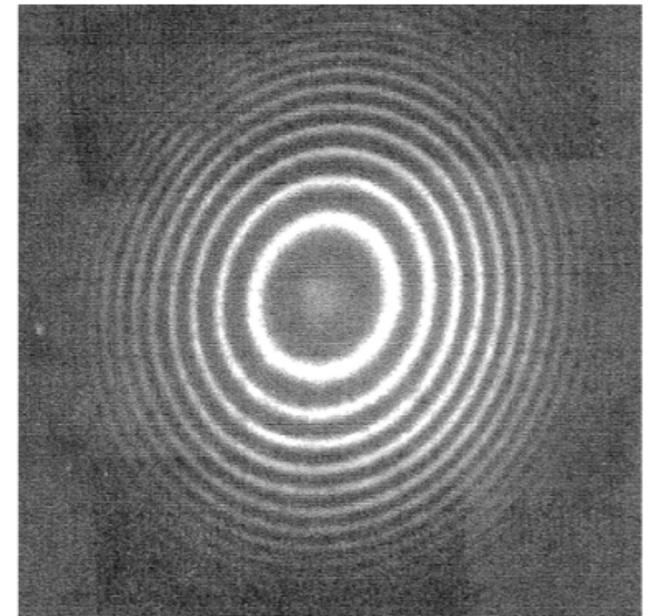
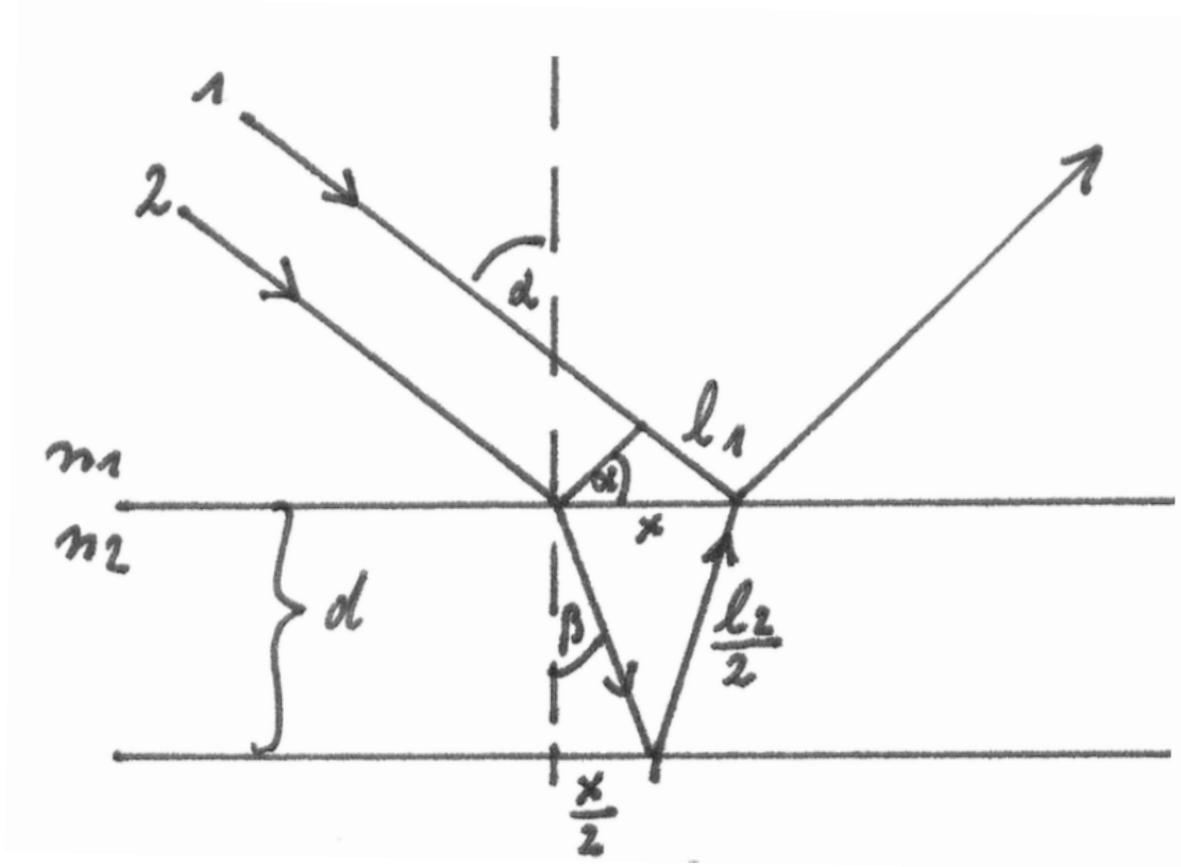
Überlagerung inkohärenter Wellen



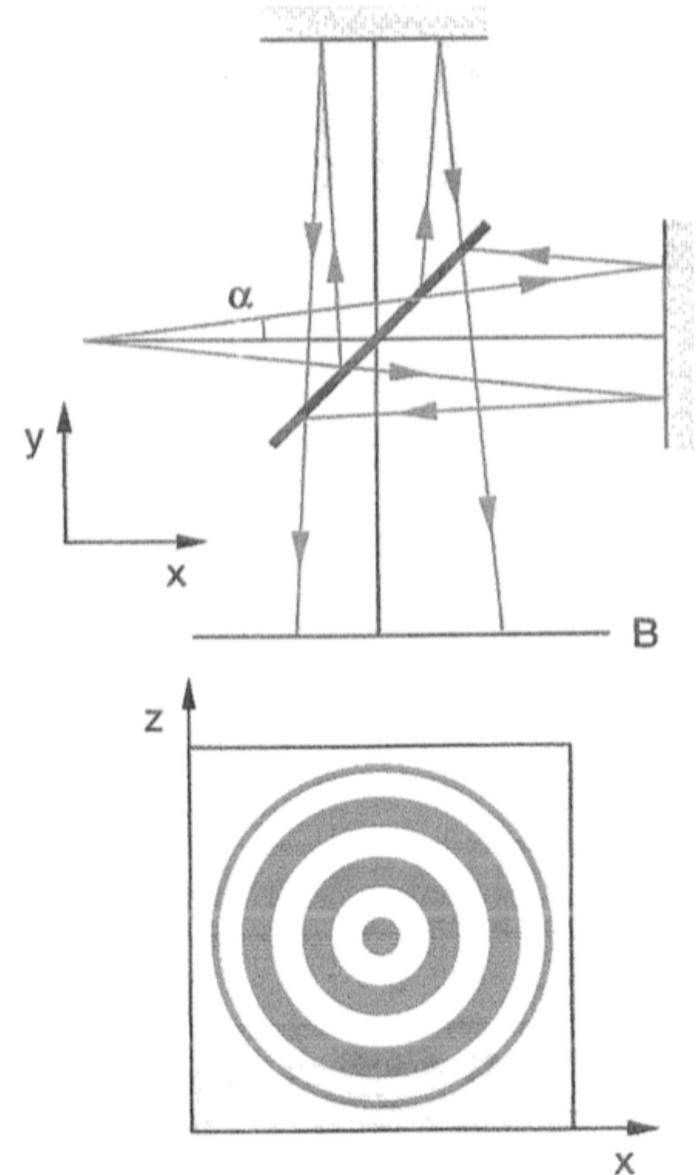
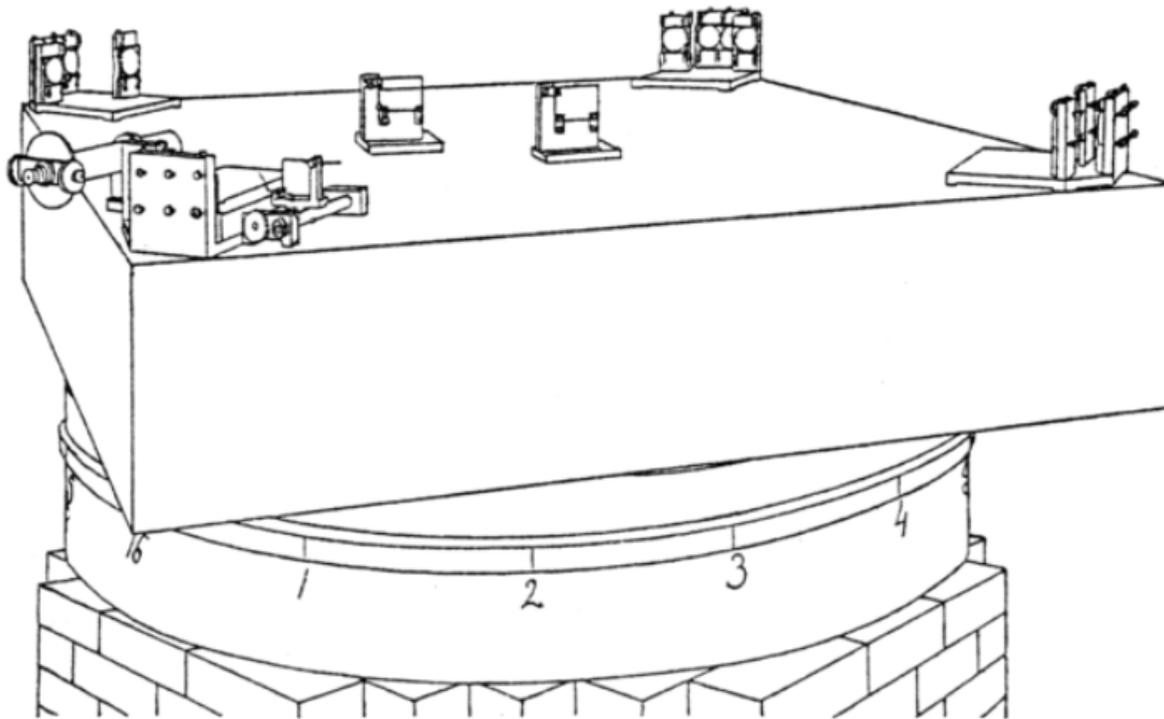
Interferenz an planparallelen Platten



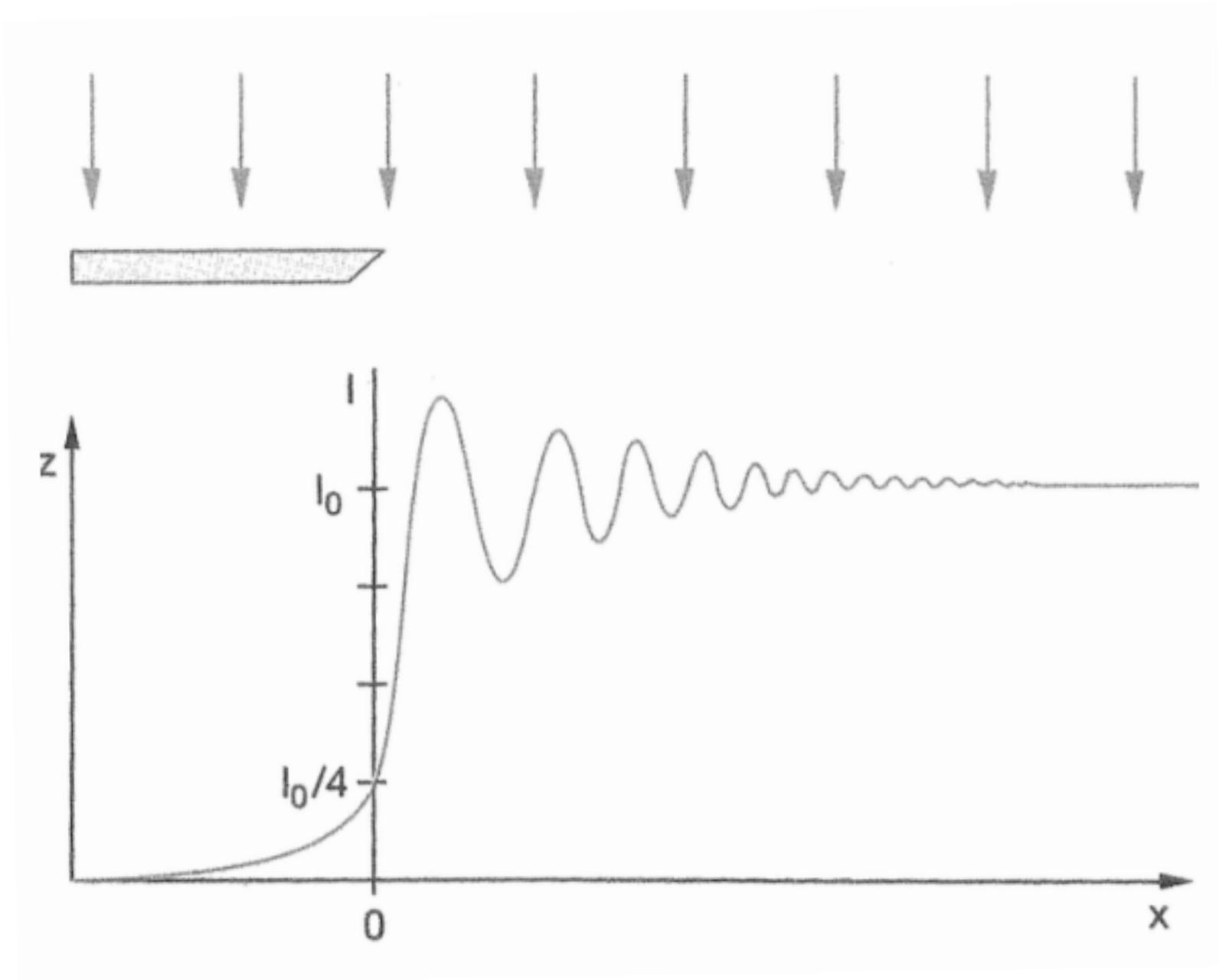
Interferenz an planparallelen Platten



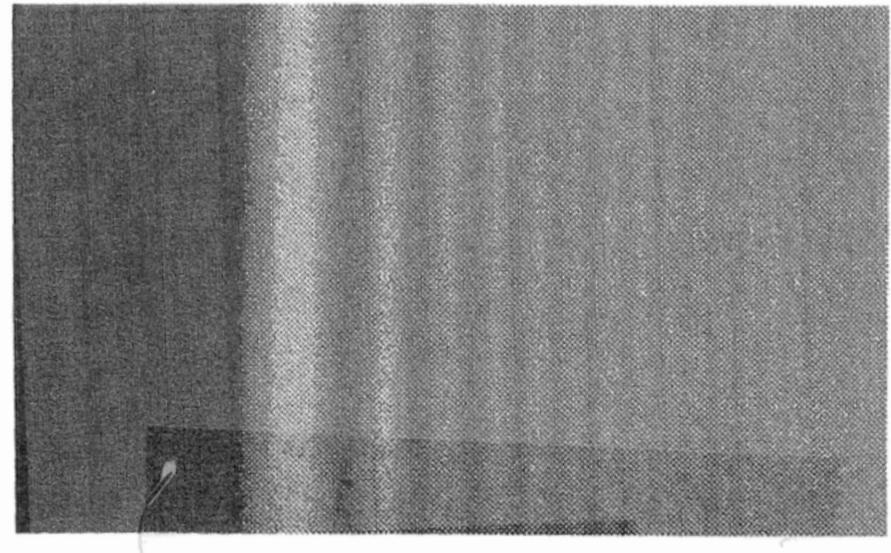
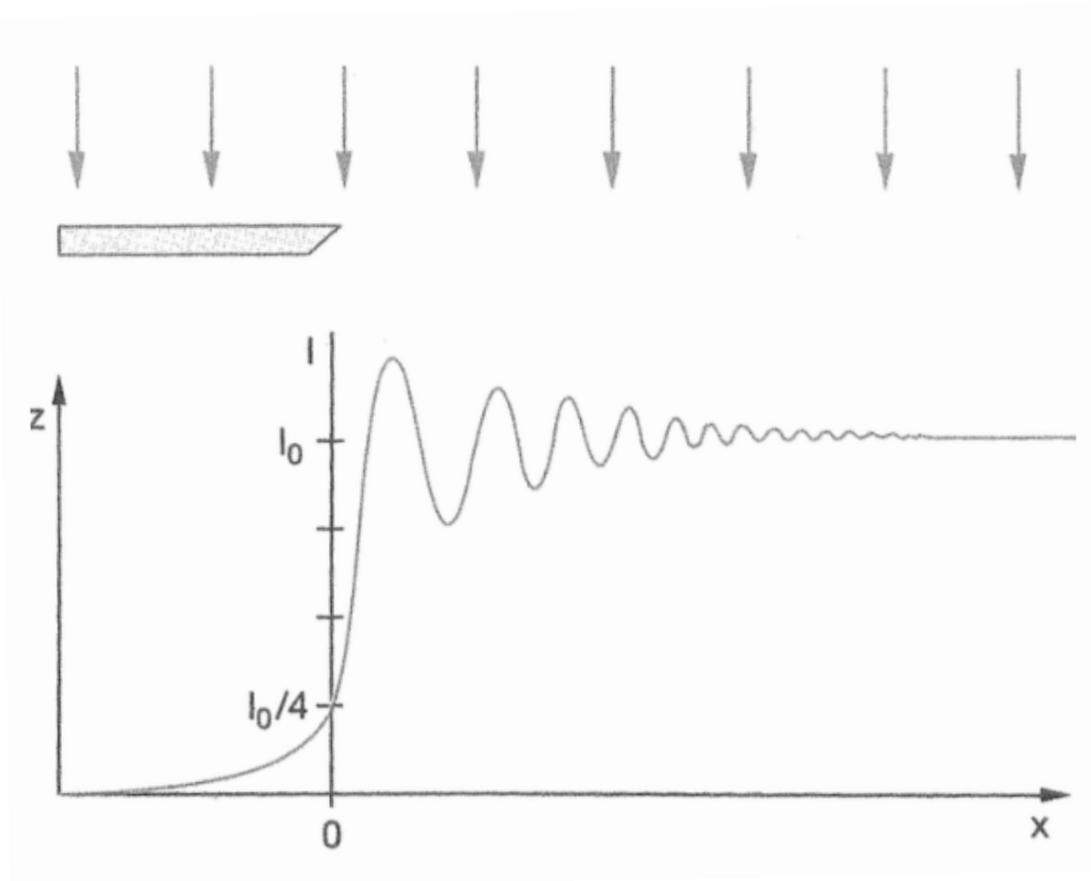
Michelson-Morley-Experiment (1887)



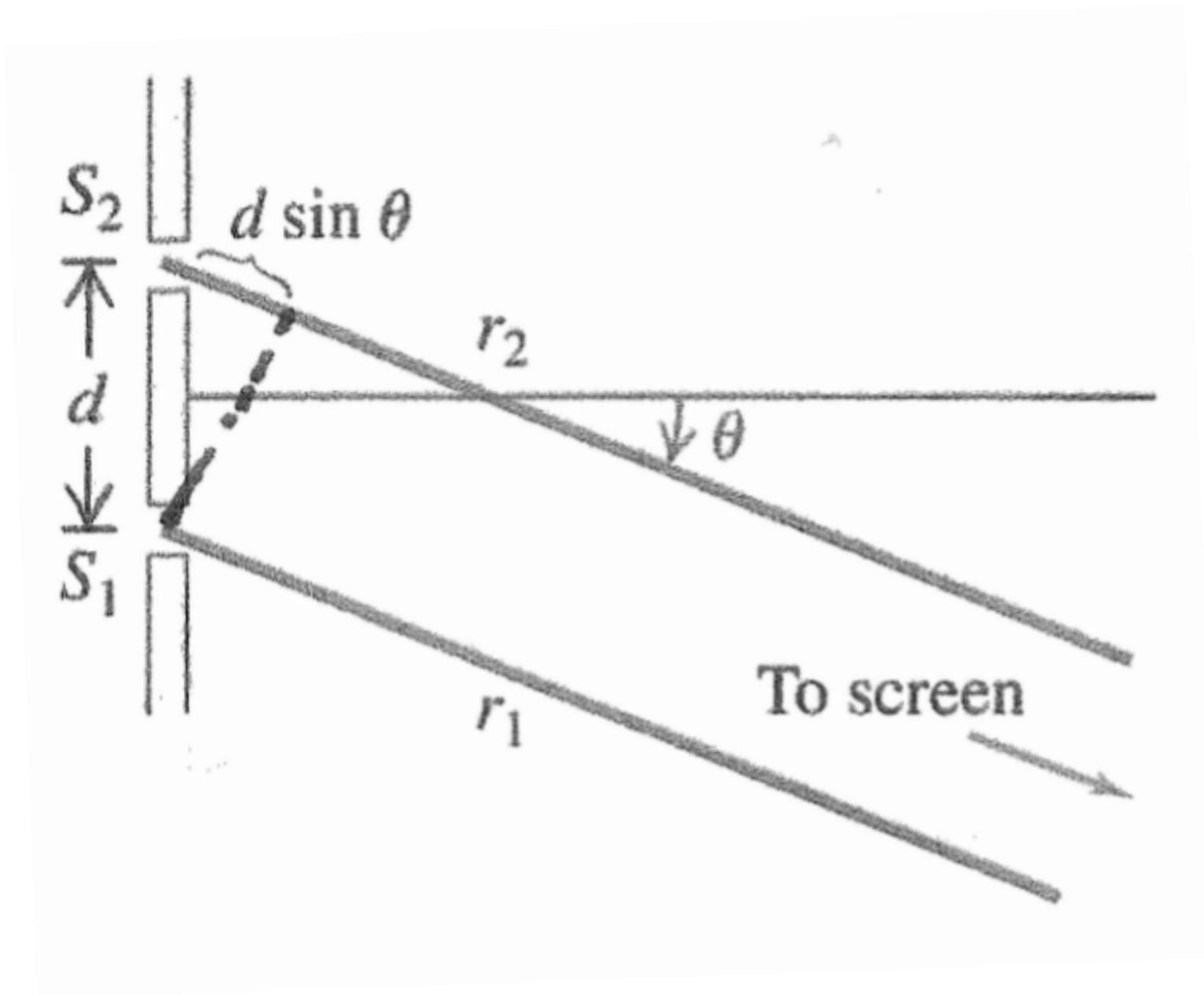
Beugung an scharfer Kante



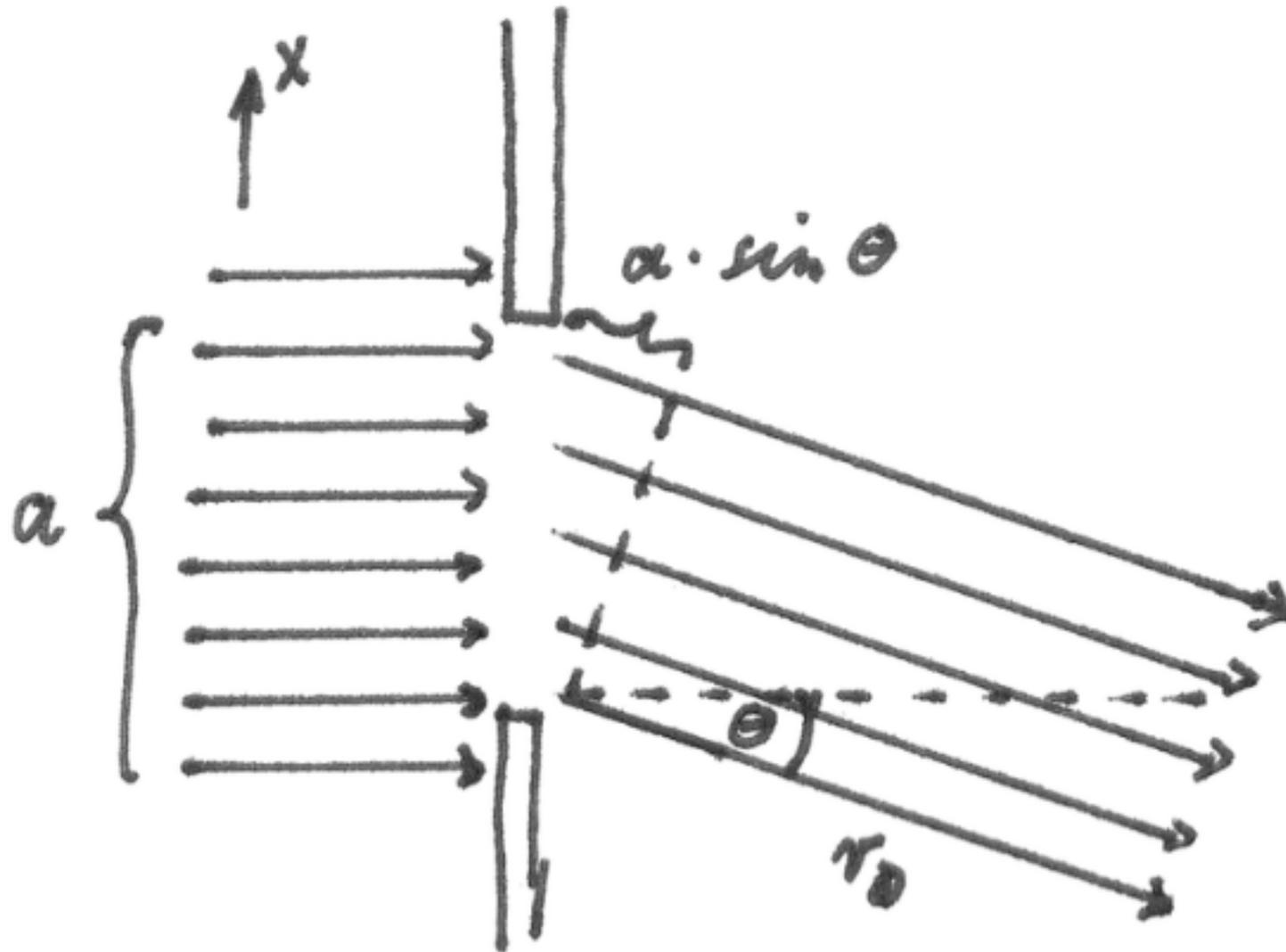
Beugung an scharfer Kante



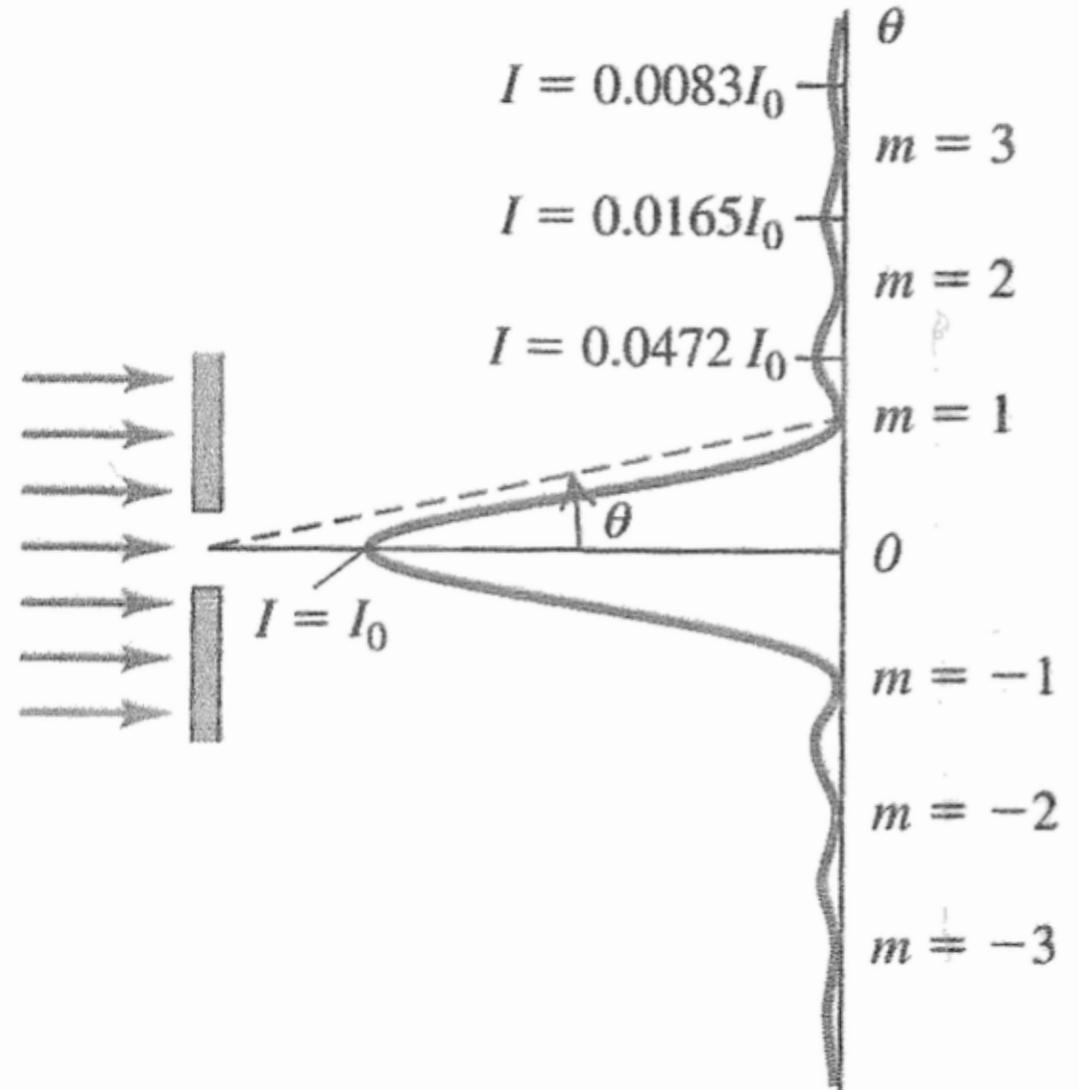
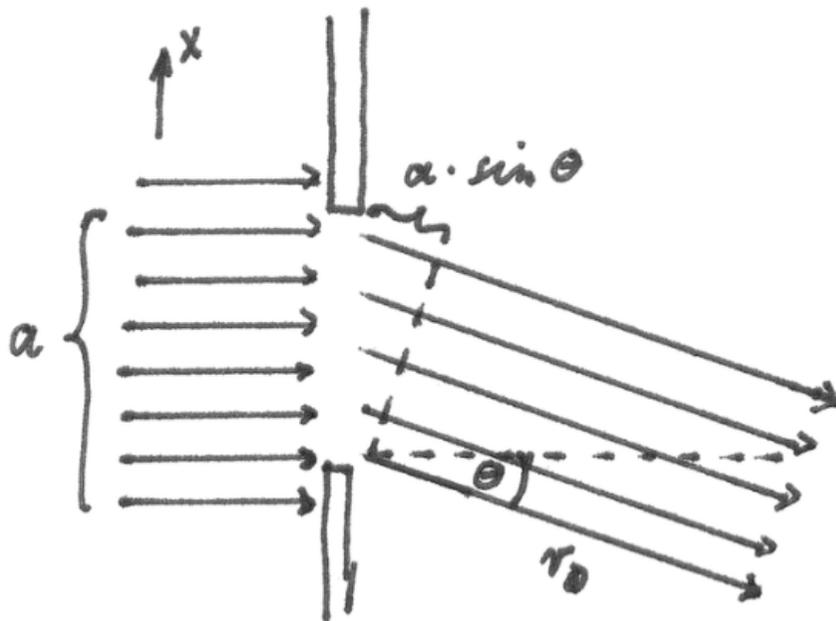
Beugung am Doppelspalt



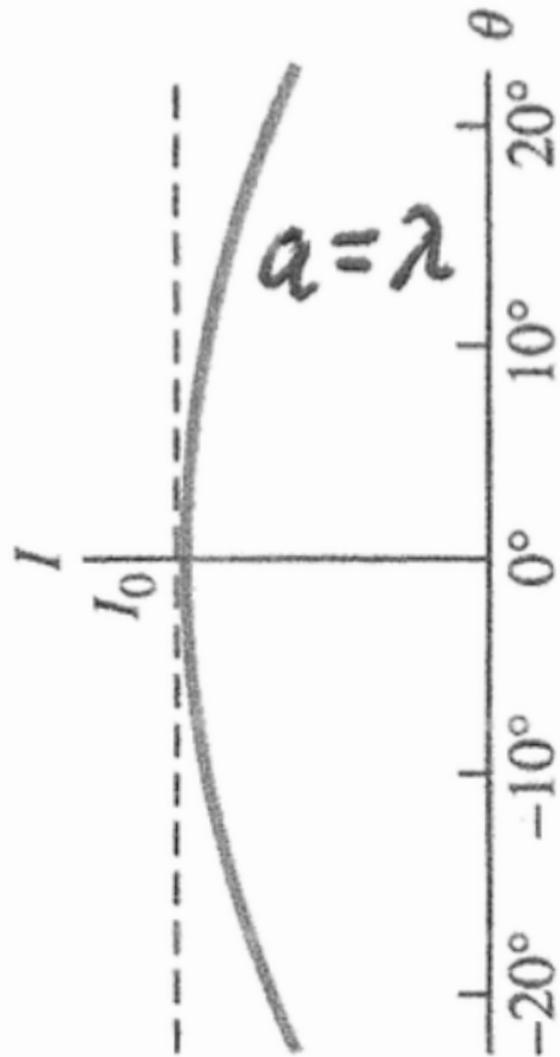
Beugung am Einzelspalt



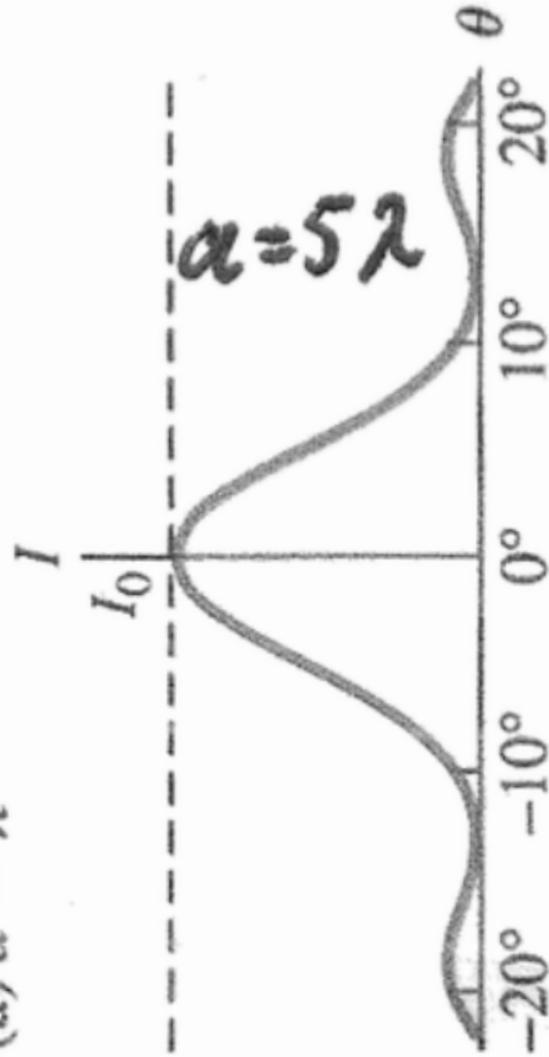
Beugung am Einzelspalt



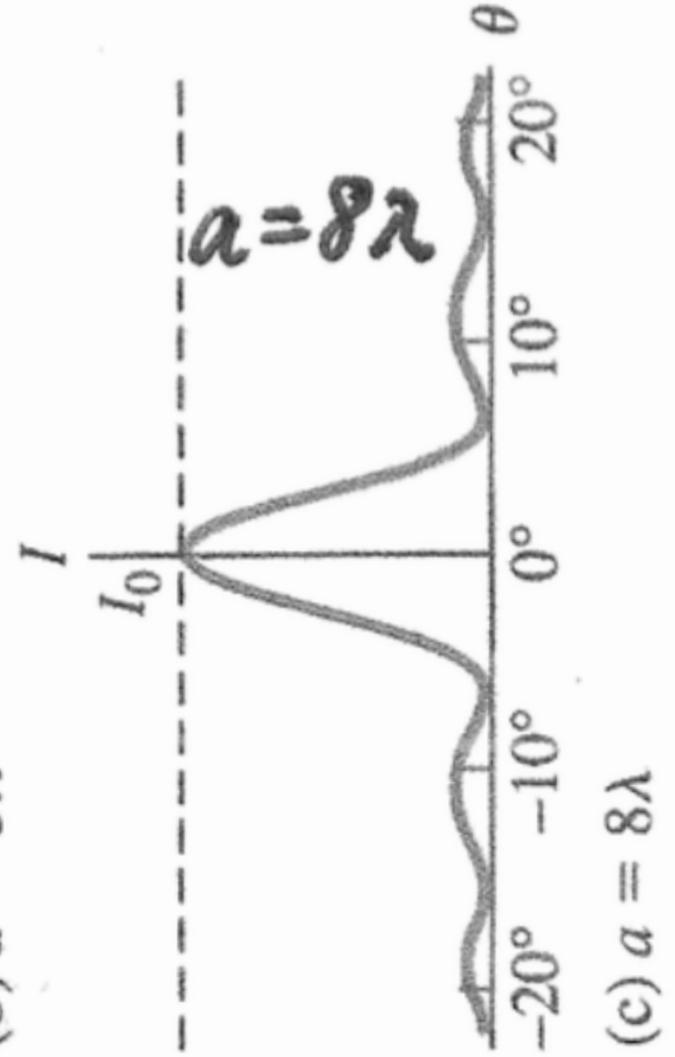
Beugung am Einzelspalt mit versch. Breiten



(a) $a = \lambda$

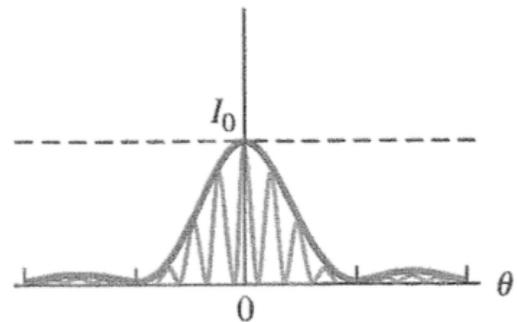
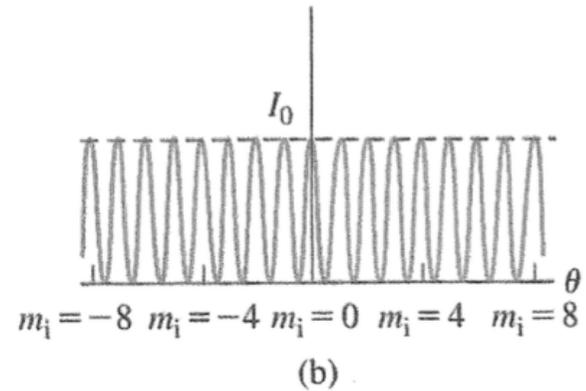
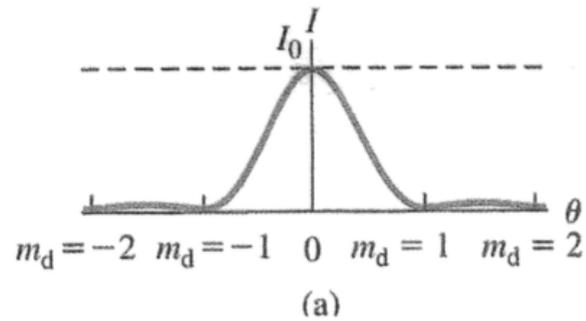


(b) $a = 5\lambda$

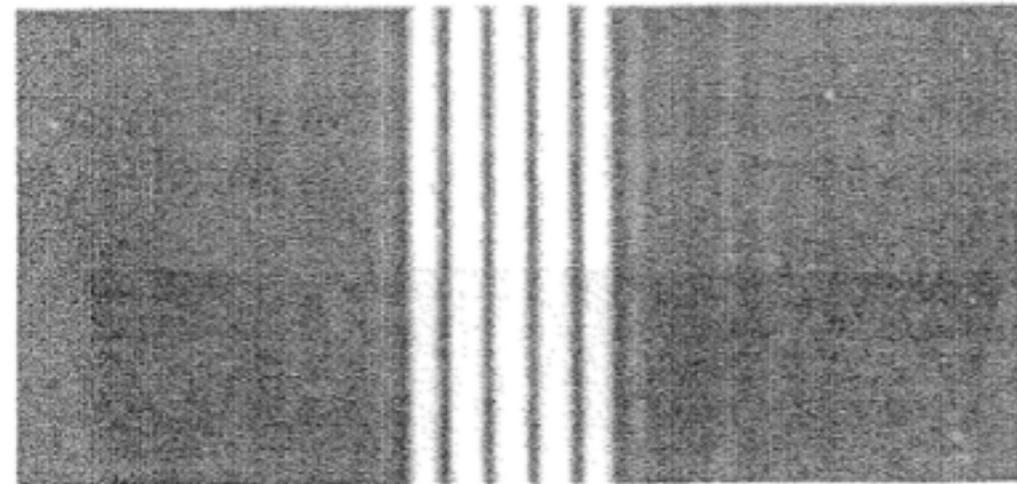


(c) $a = 8\lambda$

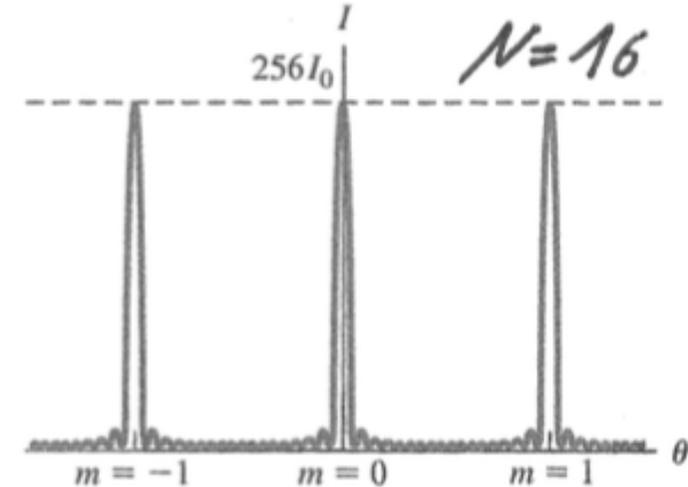
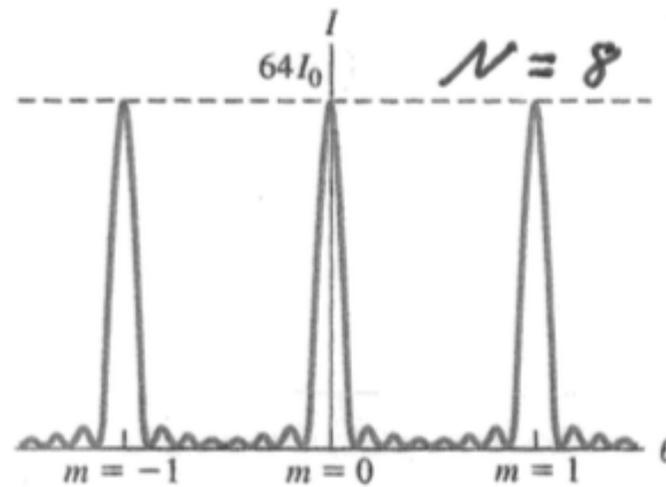
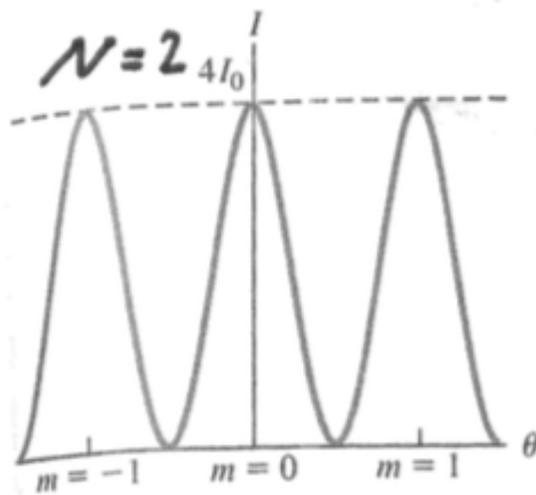
Beugung am Doppelspalt allgemein



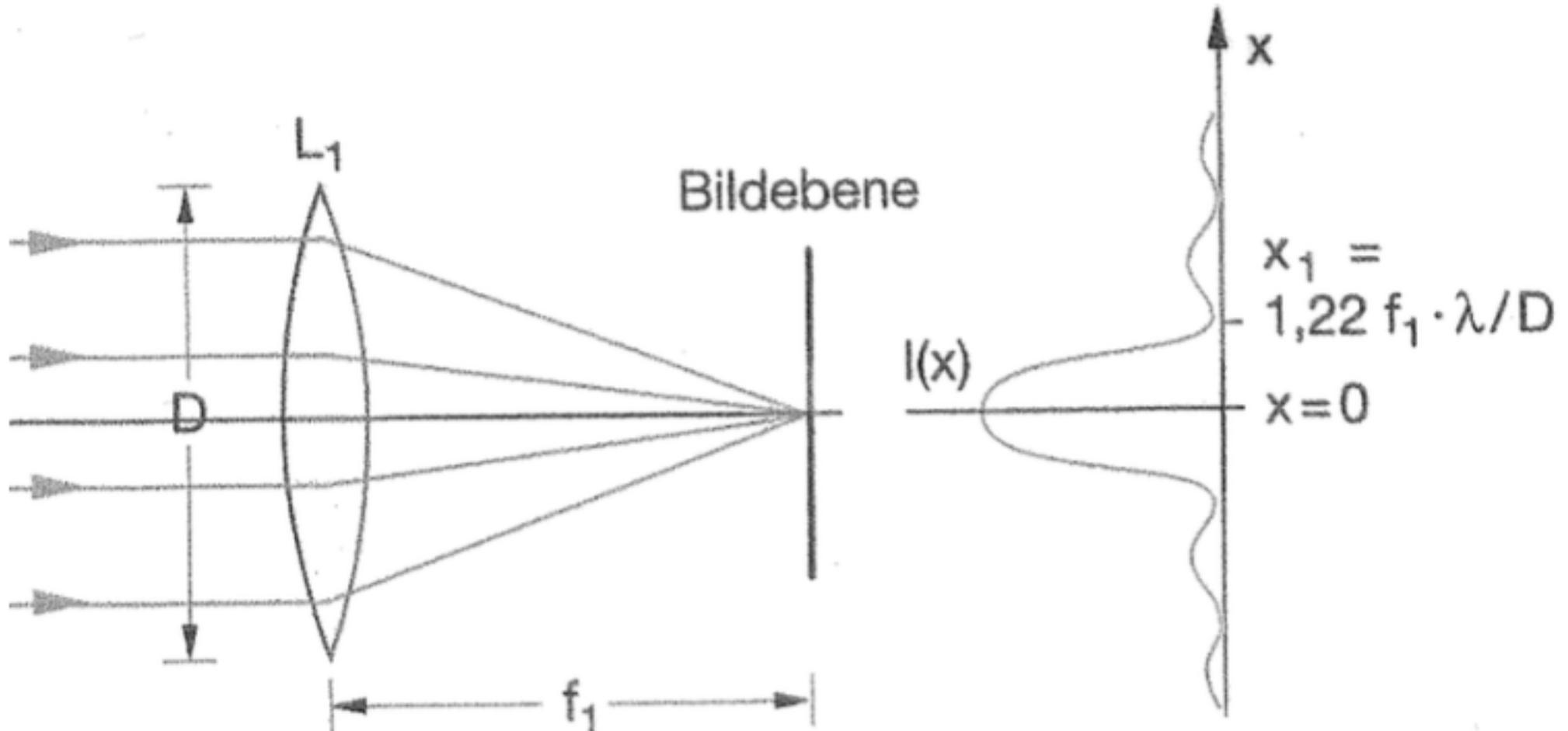
(c) Red = calculated intensity
Purple = "envelope" of intensity function



Beugung am Gitter



Beugung an einer Blende



Beugung an Lochblende und Scheibe

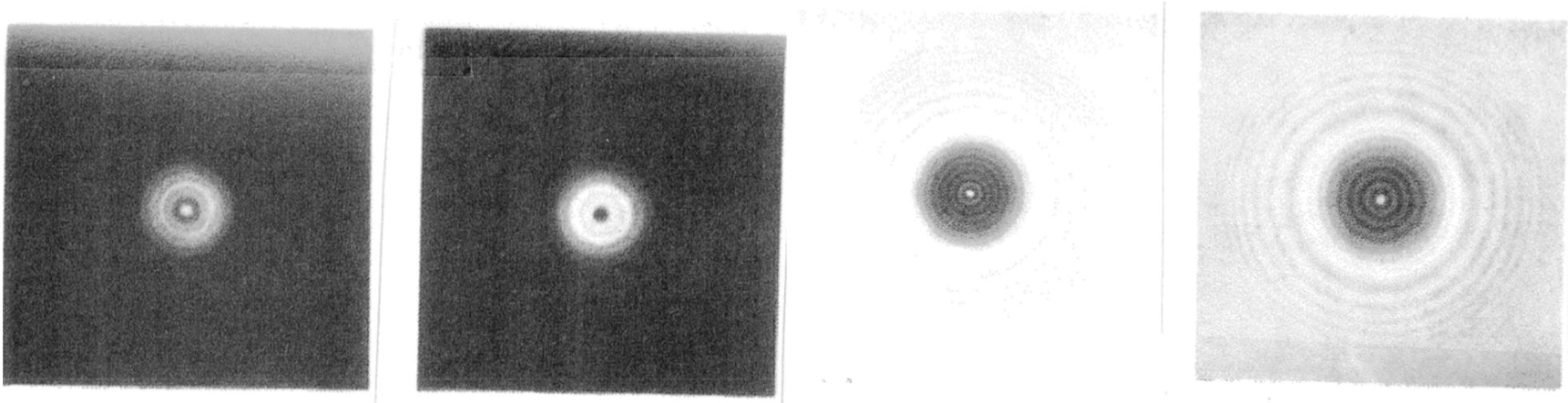
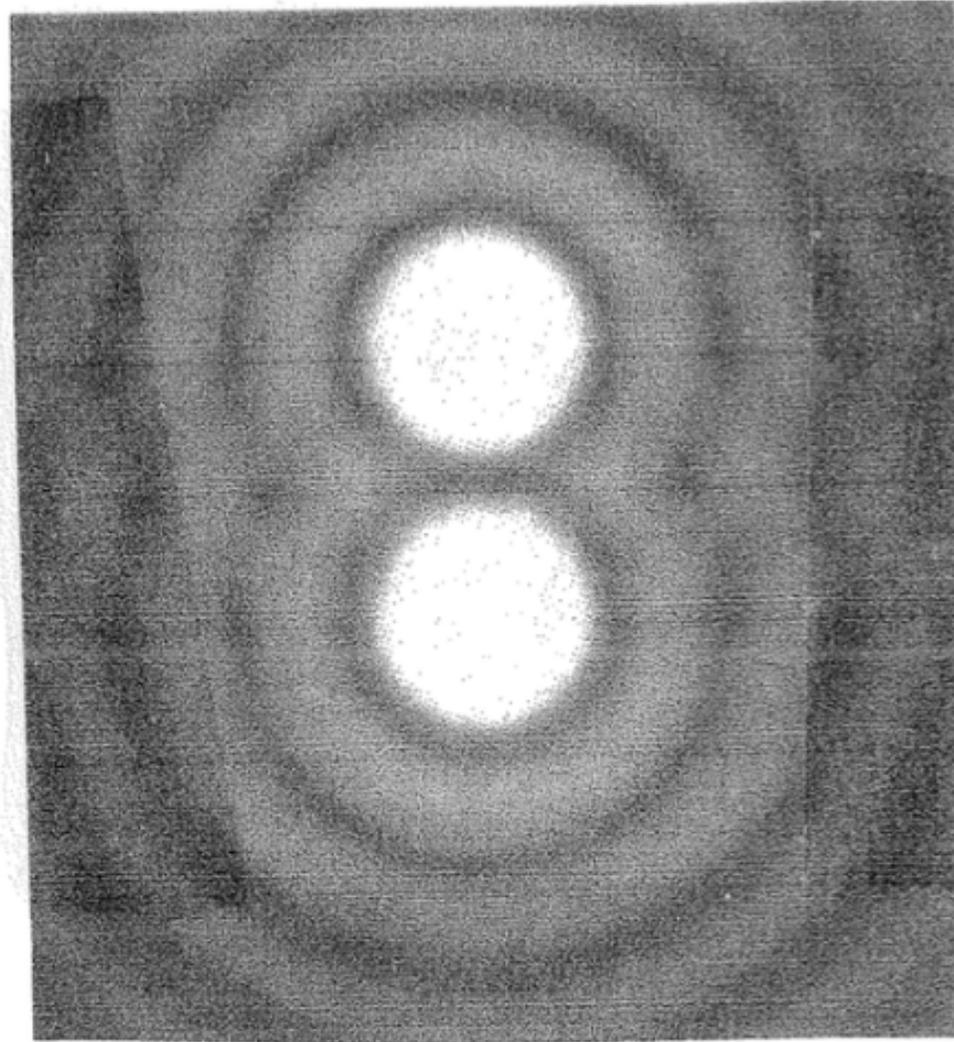
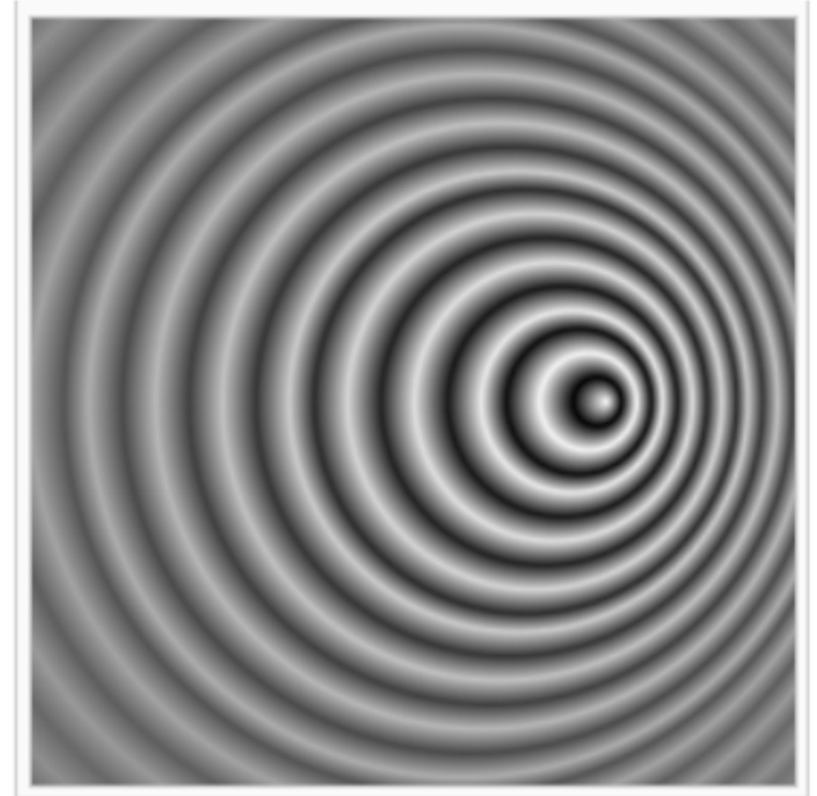
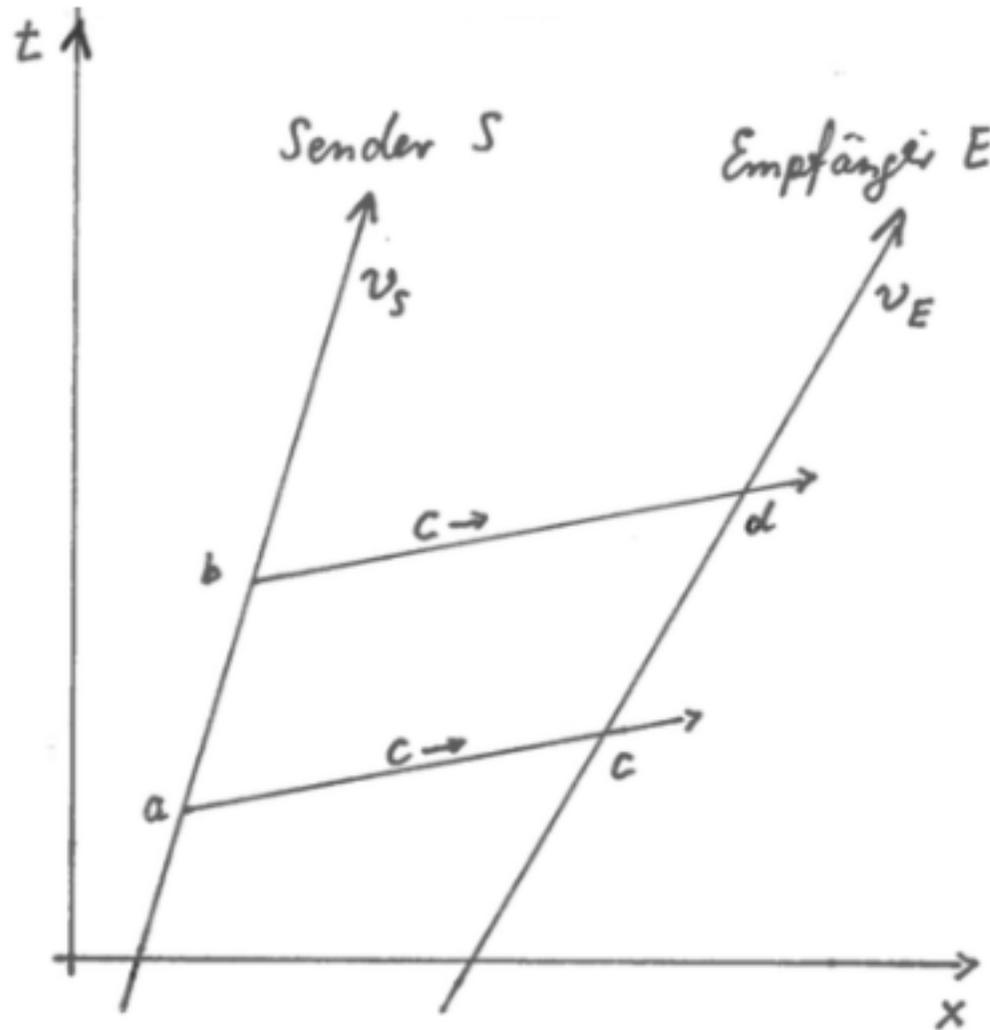


Abb. 9.32 Beugung an einer kreisförmigen Lochblende (links) und an einer kreisförmigen Scheibe (rechts).

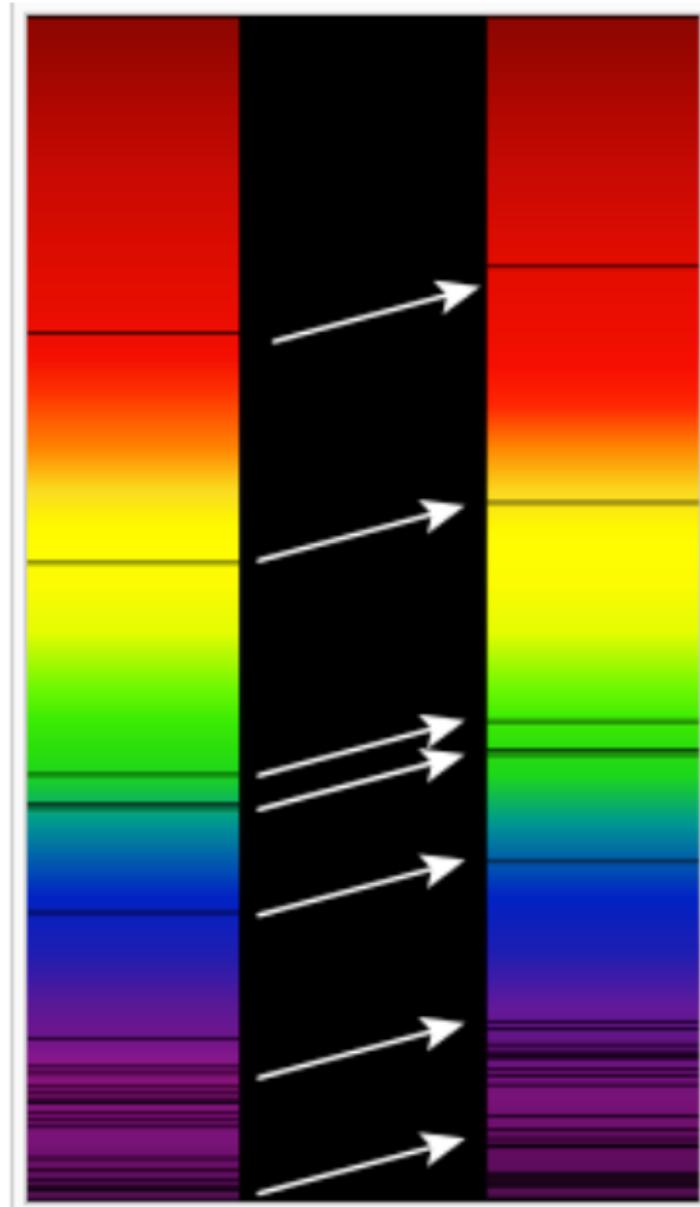
Auflösungsvermögen von 2 Sternen



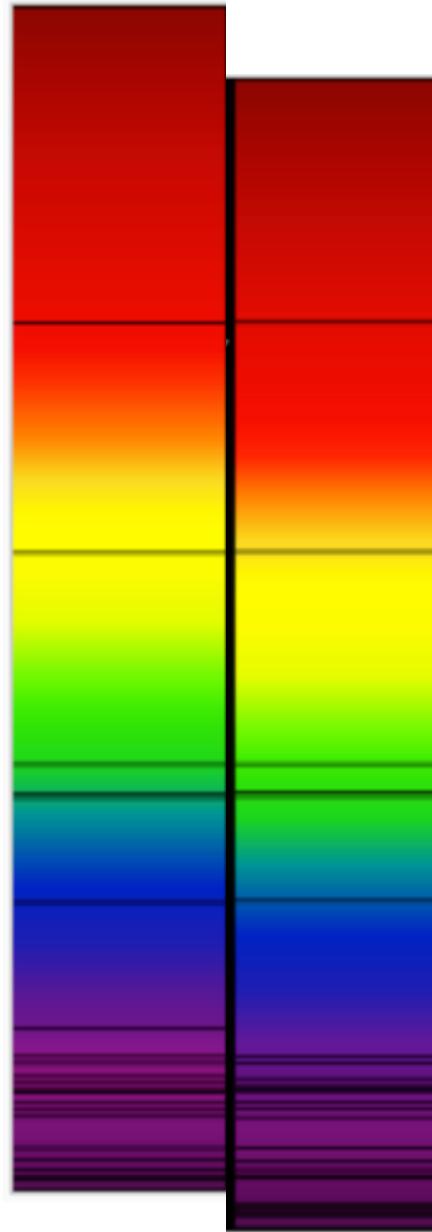
Dopplereffekt



Rotverschiebung eines Galaxienhaufens



Rotverschiebung eines Galaxienhaufens



BACKUP

Probeklausur

Teilnehmer: 123

angemeldet: 210

Mittlere Punktezahl 13.9

Bonus: ≥ 9 Punkte

