

# Kapitel 1

## Wellen

### 1.1 Versuchsziele

**Vorbemerkung:** Die Versuchsbeschreibung befasst sich hauptsächlich mit den in diesem Versuch zu messenden Phänomenen und behandelt deswegen nur deren Hintergrund. Zum Verständnis des Versuches ist aber oft auch die Kenntnis des gesamten Hintergrundes (z.B. die Herleitung der Wellengleichung) von Nöten. In dieser Anleitung werden einige Aufgaben gestellt, deren Lösen bei der Vorbereitung auf den Versuch hilfreich sind.

Vorsicht: Selbst in einigen guten Lehrbüchern sind gewisse Herleitungen und Aussagen (z.B. die Eulerschen Gleichungen, Lage der Maxima bei Einzelspalt) nicht richtig niedergeschrieben.

Es werden unterschiedliche Phänomene von Zentimeterwellen untersucht. Die Messungen werden entweder mit Ultraschallwellen ( $\lambda \approx 1\text{cm}$ ) oder mit elektromagnetischen Mikrowellen ( $\lambda \approx 3\text{cm}$ ) durchgeführt. Es stehen jeweils 4 Aufbauten zur Verfügung, und es empfiehlt sich, die Gruppenaufteilung vorab zu koordinieren.

Vorversuche zum Versuchsaufbau sind Kalibration der Strecken-, Winkel- und Intensitätsmessung. Danach folgen die Hauptmessungen:

- Bestimmung der Wellenlänge
- Beugungs- und Interferenzeffekte an Spalten
- Brechungs-, Reflexions- und Polarisationsphänomene

### 1.2 Grundlagen

*Kenntnisse: Wellengleichung mit Herleitung für Schall und elektromagnetische Wellen, Kugelwellen, ebene Wellen, Intensität, Überlagerung, Beugungs-, Brechungs- und Polarisationsphänomene*

Wellen sind Störungen einer Feldgröße  $a(\vec{x}, t)$ , die sich in Raum und Zeit fortschreiten. Bei ungedämpfter Ausbreitung werden sie durch folgende Wellengleichung beschrieben:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} a(\vec{x}, t) = c^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) a(\vec{x}, t) \quad (1.1)$$

Im Falle von **Schallwellen** sind die Feldgrößen der Schalldruck  $p$  und die Schallschnelle  $u$ . Da der Schalldruck eine skalare Größe ist und die Schallschnelle in Ausbreitungsrichtung liegt, handelt es sich bei Schall in Gasen um longitudinale Wellen. Grundlagen für die Herleitung der Wellengleichung und die funktionalen Zusammenhänge sind die Eulerschen Gleichungen:

$$\frac{\partial}{\partial x} p(x, t) = -\varrho \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) \quad \text{und} \quad \frac{\partial}{\partial x} u(x, t) = -\frac{1}{\kappa p_0} \frac{\partial}{\partial t} p(x, t) \quad (1.2)$$

mit Außendruck  $p_0$ , Adiabatenexponent  $\kappa = c_P/c_V$ , und Gasdichte  $\varrho$ .

Im Gegensatz dazu sind **elektromagnetische Wellen** transversal. Die Feldgrößen sind das elektrische Feld  $\vec{E}$  und das magnetische Feld  $\vec{H}$ , welche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen. Grundlagen der Wellengleichung sind die Maxwell'schen Gleichungen:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} + \vec{j} \quad (1.3)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}, \quad \text{bzw. in isotropen Medien} \quad \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

$\epsilon_0$  ist die Influenz-,  $\mu_0$  die Induktionskonstante des Vakuums.  $\epsilon_r$  ist die relative Dielektrizität und  $\mu_r$  die relative Permeabilität des Mediums. Im Vakuum – ohne polarisierbares oder magnetisierbares Medium – ist die Polarisation  $\vec{P} = 0$  und die Magnetisierung  $\vec{M} = 0$ , also  $\epsilon_r = \mu_r = 1$ . Außerdem gibt es keine freien Ladungen und Stromdichten, d.h.  $\rho = 0$  und  $\vec{j} = 0$ .

**Aufgabe:** Man zeige, daß die Phasengeschwindigkeit  $c$  folgendermaßen von den Eigenschaften des Mediums abhängt:

$$c_{\text{Schall, Gas}} = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho}}, \quad c_{\text{e.m. Welle}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (1.4)$$

Tip: Für eine Feldgröße die Wellengleichung aus den Euler- bzw. Maxwellgleichungen ableiten.

Allgemeine Lösungen der Wellengleichung 1.1 sind:

a) Ebene Wellen, die sich – senkrecht zu einer Ebene – in eine Raumrichtung ausbreiten:

$$a(\vec{x}, t) = a_0 \cdot f\left(\frac{\vec{c} \cdot \vec{x}}{c} \pm c \cdot t\right) \quad (1.5)$$

b) Kugelwellen, die sich – ausgehend von Punktquellen – in den Raum ausbreiten:

$$a(r, t) = a_0 \cdot \frac{r_0}{r} f(r \pm c \cdot t) \quad \text{mit} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = |\vec{x}| \quad (1.6)$$

Für die Intensität  $I := P/A$  einer Welle gilt allgemein:  $I \sim a^2$

**Harmonische ebene Wellen** sind eine spezielle Lösung der Wellengleichung 1.1:

$$a(x, t) = a_0 \cdot \sin(\omega t \pm kx + \varphi) \quad \text{Kreisfrequenz } \omega = 2\pi f \quad \text{Kreiswellenzahl } k = 2\pi/\lambda \quad (1.7)$$

Die Phasengeschwindigkeit  $c$  (hier in Richtung der  $x$ -Achse) steht mit der Wellenlänge  $\lambda$  und der Frequenz  $f$  in folgendem Zusammenhang:

$$c = \omega/k = f \cdot \lambda \quad (1.8)$$

Ohne Dispersion ist  $c$  unabhängig von  $\omega$  und gleich der Gruppengeschwindigkeit  $c_{gr} = \partial\omega/\partial k$ .

**Aufgabe:** Die Schallwellen werden mit einem Piezo-Kristall, die Mikrowellen mittels einer Gunn-Diode erzeugt. In welchem Frequenzbereich werden diese Bauteile hier betrieben?

Die Phasenlage  $\varphi$  und die Amplitude  $a_0$  werden durch die Anfangsbedingungen, die die Lösung erfüllen muß, bestimmt. Die Anfangsbedingungen werden durch den jeweiligen Aufbau bestimmt, z.B. durch weiche oder harte Reflexionswände, etc. Während die Phasenlage bei gewissen Untersuchungen keine Auswirkung hat (z. B. bei der Abstandsabhängigkeit der Intensität einer Kugelwelle), spielt sie bei Interferenzen die entscheidende Rolle.

Erreichen mehrere Wellen einen Ort im Raum, so wird die Gesamtwirkung durch die Addition der Einzelamplituden bestimmt. Diese Superposition führt z.B. zu stehenden Wellen vor Reflektoren, Beugungsmustern an Einzel- und Mehrfachspalt, etc.

In diesem Versuch sollen mehrere Phänomene von Wellen untersucht werden. Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Formeln gegeben, die für eine Auswertung der Versuche notwendig sind. Auf eine Herleitung wird hier verzichtet.

Die **stehende Welle** ist die einfachste Form der Überlagerung von Wellen.

Trifft eine ebene harmonische Welle auf einen geeigneten Reflektor, so überlagern sich die einfallende und die reflektierte zu einer stehenden Welle.

**Aufgabe:** Man zeige durch Superposition, daß für  $u$  bzw.  $|\vec{E}|$  gilt:

$$a(x, t) = 2a_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(kx) \quad \text{mit Reflektor bei } x = 0 \quad (1.9)$$

Tip: Die Phasendifferenz zwischen ein- und auslaufender Welle ergibt sich aus der Randbedingung für  $u(x = 0, t)$  bzw.  $|\vec{E}|(x = 0, t)$  am passenden Reflektor.

Die zeitlichen und räumlichen Periodizitäten sind entkoppelt, und es gibt Orte (sog. Knoten), an denen zu jeder Zeit  $a(x) = 0$  ist. Diese Positionen haben einen Abstand von  $\lambda/2$  zueinander, und mit ihrer Messung wird die Wellenlänge bestimmt.

**Beugung** Trifft eine ebene Welle senkrecht auf ein Gitter äquidistanter Spalte im Abstand  $d$  zueinander, mit gleicher Einzelspaltbreite  $b$ , so ergibt sich aus der Superposition der Einzelwellen mit unterschiedlicher Phasenlage  $\Delta\varphi = \Delta \cdot k$  hinter dem Gitter ein Beugungsbild. Die nebenstehende Abbildung illustriert den Gangunterschied  $\Delta$  für zwei einlaufende Wellenzüge.

Bei großen Empfängerabständen  $r_0 \gg d^2/\lambda$  ist die Fraunhofer-Näherung zulässig.

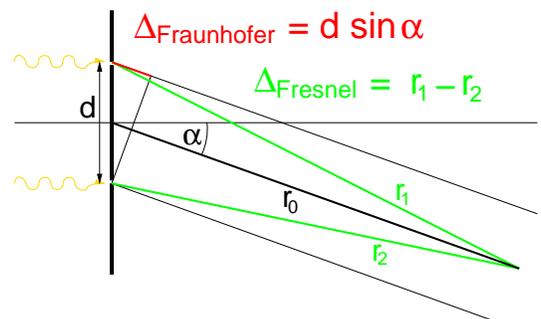


Abbildung 1.1: Fraunhofer-Näherung

Unter dem Winkel  $\alpha$  zur Einfallrichtung ergibt sich in Fraunhofer-Näherung:

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \left[ \frac{\sin(\pi \frac{b}{\lambda} \sin \alpha)}{\pi \frac{b}{\lambda} \sin \alpha} \right]^2 \cdot \left[ \frac{\sin(N \pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha)}{\sin(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha)} \right]^2 \quad (1.10)$$

Der erste Term beschreibt die Einhüllende, die durch die Beugung am Einzelspalt zustande kommt, der zweite Term die Interferenz durch die  $N$  bestrahlten Spalten.

**Aufgabe:** Folgende Extremwerte sind ohne numerische Näherung berechenbar:

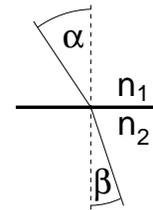
$$\text{Einzelspalt Minima:} \quad \sin \alpha_n = n \cdot \lambda / b \quad n = 1, 2, \dots \quad (1.11)$$

$$\text{N-fachspalt Maxima:} \quad \sin \alpha_m = m \cdot \lambda / d \quad m = 1, 2, \dots \quad (1.12)$$

**Brechung** Wellen werden beim Übergang von verschieden dichten Materialien wie in nebenstehender Abbildung gebrochen. Es gilt das Gesetz von Snellius:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad \text{mit} \quad n_i = c_{\text{vakuum}} / c_i \quad (1.13)$$

Im Medium  $i$  mit Brechungsindex  $n_i$  ist die Phasengeschwindigkeit  $c_i$ .



**Polarisation** Transversale Wellen können mit geeigneten Hilfsmitteln polarisiert werden. Im Allgemeinen ist eine 'Einzelwelle' elliptisch polarisiert, mit den beiden Extremfällen zirkularer und linearer Polarisation. Bei linear polarisierten Wellen kann durch Polarisationsfilter die Schwingungsebene quasi gedreht werden und die Intensität sinkt gemäß dem Gesetz von Malus:

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad (1.14)$$

$\alpha$  ist hier der Winkel zwischen den Polarisations Ebenen der einfallenden Welle und des Polarisators.

Elektromagnetische Wellen sind transversal und somit polarisierbar. Beim Abstrahlen der Welle von einer ortsfesten Antenne liegt die Schwingungsebene in der Ausdehnungsrichtung des Antennendipols, im benutzten Aufbau der Gunn-Diode.

**Aufgabe:** Ist auch der Empfänger eine zum Sendedipol parallel stehende Dipolantenne, so wirkt er als Analysator ebenfalls polarisierend. Man zeige anhand geeigneter Orthogonal-Zerlegung der Feldvektoren, daß sich dann folgender Intensitätsverlauf ergibt:  $I(\alpha) = I_0 \cdot \cos^4 \alpha$ .

**Kalibration des Weg- bzw. Winkelaufnehmers** Bei diesen Versuchen werden in fast allen Fällen Signalstärken gegen Strecken oder Winkel aufgezeichnet. Zur Orts- und Winkelmessung wird ein Mehrgang-Drehpotentiometer verwendet, dessen gemessener Widerstand in eine Strecke bzw. einen Winkel umgerechnet werden muß. Wegen der Bauteiltoleranz solcher Potentiometer im Prozentbereich muß der Weg- bzw. Winkelaufnehmer in einem Vorversuch kalibriert werden. Dazu werden die mit dem Bandmaß gemessenen Orte  $S$  bzw. an dem Drehtisch abgelesene Winkel gegen den Widerstand  $R_{b1}$  des Potentiometers wie in Abb. 1.2 aufgezeichnet. Bei

äquidistanten Kalibrationspunkten mit ähnlichen Einzelfehlern reduziert die Parametrisierung  $S - S_0 = K \cdot (R - R_0)$  die Anpassung auf eine Ursprungsgerade ( $S_0$  und  $R_0$  sind die mittleren Orte und Widerstände). Die Steigung der Ausgleichsgeraden liefert den Kalibrationsfaktor  $K$  zur Umrechnung von Widerstandseinheiten auf Längen- bzw. Winkeleinheiten. Wie bei allen

CASSY / Kanal B / Strombox  
 Widerstand Rb1, 0-10kOhm,  
 gemittelt 1000 ms

Meßparameter / manuell

Formel / neue Größe  $S = 5 \cdot n + 3$   
 (Messungen bei 8,13,...)

Darstellung / X-Achse Rb1  
 Y-Achse S

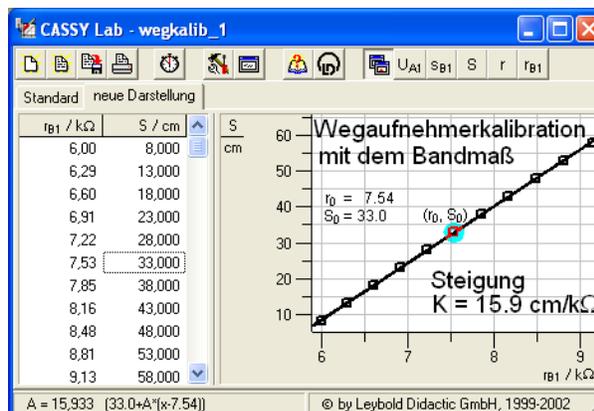


Abbildung 1.2: CASSY-LAB Kalibration des Wegaufnehmers.

Ausgleichsrechnungen sind die Einzelfehler auf der x- und y-Achse zu berücksichtigen. Liefert die Geradenanpassung ein  $\chi^2$  von etwa 1 pro Freiheitsgrad, so ist die Fehlerabschätzung – und damit auch der Fehler des Steigungsfaktors – sinnvoll. Diese Unsicherheit von  $K$  muß bei den folgenden Messungen als systematischer Fehler berücksichtigt werden, d.h. er liefert unabhängig von den jeweiligen Einzel-Meßwerten einen zusätzlichen Beitrag als Skalenfehler bei der Umrechnung des Endergebnisses von  $k\Omega$  auf  $m$  bzw. Grad.

**Fehlerabschätzung** Die Messungen der Welleneigenschaften werden mit Sensor-CASSY aufgezeichnet. Dabei kommen verschiedene Meßaufnehmer zum Einsatz, die vor der Messung kalibriert werden (Weg/Winkelaufnehmer und Ultraschallwandler bzw. Mikrowellenantennen mit nachgeschalteten Verstärkern). Neben diesen systematischen Fehlerquellen beeinflussen Umweltbedingungen die Messungen (z.B. die Raumtemperatur während der Ultraschallmessungen). Die Schätzung der statistischen Fehler geschieht durch Mehrfachmessungen (Mittelwert/RMS) oder durch Variation der Meßwertintervalls z.B. für Peakwertbestimmungen. Mittels Fehlerfortpflanzung wird schließlich die Güte der Messung (Vertrauensbereich) ermittelt. I. A. reduziert sich der Fehler durch eine sinnvolle Verteilung der Meßwerte (kleinere Abstände und damit mehr Meßwerte an kritischen Stellen wie z.B. Beugungsminima/maxima oder Knoten der stehenden Wellen).

Um die begrenzte Meßzeit effektiv auszunutzen, ist es sinnvoll, schon während der Messung die einzelnen Fehlerbeiträge getrennt zu bestimmen. Dominiert ein Beitrag den Meßfehler, sollte der weitere Aufwand in dessen Reduzierung investiert werden.

**Hinweis:** Die im CASSY-Handbuch angegebenen Fehler beziehen sich auf Toleranzen von Gerät zu Gerät. Die Wiederholgenauigkeit bei Benutzung eines Geräts – nach evtl. Kalibration – ist wesentlich höher und kann mit der Ablesegenauigkeit abgeschätzt werden.

## 1.3 Versuche mit Ultraschall

### 1.3.1 Versuchsaufbau

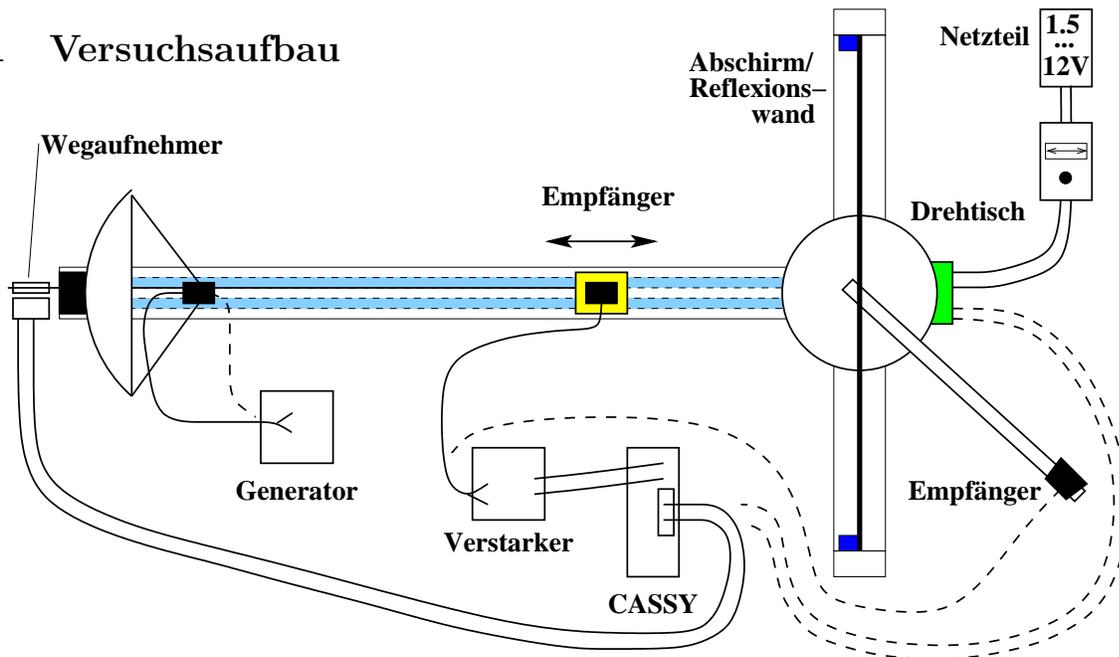


Abbildung 1.3: Prinzipieller Versuchsaufbau Ultraschall. Die durchgezogene Verkablung entspricht Teil a), die gestrichelte nachfolgenden Versuchsteilen

Benötigte Geräte:

- Sensor-CASSY mit Stromquellenbox LEYBOLD 542 031
- 3 Piezoelemente ELWE/NEVA als Ultraschallwandler. Durch den Piezoelektrischen Effekt führen mechanische Deformation bei polaren Kristallen zu Dipolverschiebungen mit – an den Außenflächen abgreifbaren – meßbaren Potentialdifferenzen. Umgekehrt führt eine außen angelegte Spannung zu Kristalldeformation. Damit sind sie als Sender und Empfänger einsetzbar – wegen der kleinen Auslenkungen z.B. als Fuß in Rastertunnelmikroskopen oder umgekehrt als Kristalltonabnehmer in Plattenspielern. Hier benutzt man sie wegen ihrer niedrigen Trägheit als Hochfrequenztonwandler mit einer Resonanzfrequenz von ca. 40 kHz, die allerdings leicht von der Kristallgeometrie abhängt.
- Generator LEYBOLD 416 014 Mit Hilfe des Drehpotentiometers kann die Anregungsfrequenz zwischen 35-40kHz variiert werden. Ein Umschalter ermöglicht die Wahl zwischen kontinuierlichem und gepulstem Betrieb. Bei allen Versuchsteilen wird der kontinuierliche Modus beibehalten. Das Gerät besitzt einen Zeitschalter, der nach längerem Betrieb den Generator automatisch abstellt. Von Zeit zu Zeit sollte geprüft werden, ob das Gerät noch aktiv ist (rote Kontroll-LED).
- Verstärker (AC-Amplifier) LEYBOLD 416 013 mit regelbarer Verstärkung. Dieser Verstärker kann das Signal sowohl als Wechselspannung (z.B. für Messungen mit einem Oszilloskop) als auch als Gleichspannung ausgeben. In diesem Versuch wird stets der Gleichspannungsausgang (Schalterstellung =) auf den Spannungseingang des Sensor-CASSYs gegeben. Der

Verstärker besitzt einen Zeitschalter, der nach längerem Betrieb das Gerät automatisch abstellt. Von Zeit zu Zeit sollte geprüft werden, ob das Gerät noch aktiv ist (rote Kontroll-LED).

- Parabolspiegel mit Halter
- Wegaufnehmer LEYBOLD 529 031 mit Faden und Befestigungsmuffe
- Mechanischer Aufbau mit motorgetriebenem Drehtisch, Reflexionswand
- verschiedene Aufsätze für mechanischen Aufbau: Schiebetisch mit Sensorhalterung, Dipolhalter, verstellbarer Reflexionswandhalter
- diverse Netzgeräte und Kabel

Der Versuchsaufbau besteht aus einem (in Versuchsteil **e**) zwei Ultraschallwandler(n) als Sender und einem Ultraschallwandler als Empfänger. Der Sender bleibt während einer Messung ortsfest, der Empfänger wird je nach Versuchsteil auf verschiedene Weise bewegt oder auch ortsfest gehalten. Außer in den Versuchsteilen **a**) (Abstandsmessung) und **e**) (aktiver Dipol) wird ein Parabolspiegel zur Erzeugung von homogenen, ebenen Wellen benutzt. Zur Fixierung des Senders bzw. Führung des Empfängers wird ein T-förmiges Schienenkreuz mit aufgesetztem motorgetriebenem Drehtisch verwendet. Abb. 1.3 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau. Man baue die Grundschaltung (Versorgung Sender, Verstärker Empfänger, Strombox für Bewegungsmessung) einschließlich Sensor-CASSY auf. Jeder Versuchsteil ist durch seine eigene Variante des Versuchsaufbaus charakterisiert, welche im nächsten Kapitel beschrieben werden. Es ist darauf zu achten, daß die Intensität der Welle am Messort stark vom Aufbau abhängt (offensichtlich ist die maximale Intensität hinter einem Doppelspalt größer als hinter einem Einfachspalt der gleichen Breite). Somit muß bei jeder Messung der Messbereich und die Verstärkung angepasst werden, um eine optimale Ausnutzung des CASSY-Messbereichs ('Binningeffekte' der Digitalisierung) zu erzielen. Die Frequenz sollte einmal eingestellt und danach nicht mehr verändert werden, da sich sonst die Wellenlänge ändert. Der Drehtischmotor ist für Spannungen bis 6V ausgelegt. Ein Vorwiderstand ermöglicht das Betreiben mit dem stufenweise regelbaren 12V-Netzgerät. Die Drehgeschwindigkeit kann durch Umschalten der Ausgangsspannung am Netzgerät verändert werden. Die Messungen sollten bei möglichst kleiner Drehgeschwindigkeit erfolgen, damit die Mittelungszeit des Sensor-CASSY die Messung minimal beeinträchtigt. (Warum?) Mit dem Umschalter kann die Drehrichtung gewählt werden. Läuft der Drehteller nicht von alleine an, so kann mit dem Taster der Vorwiderstand kurzzeitig überbrückt werden.

### 1.3.2 Versuchsdurchführung

#### a) Abstandsmessung

Der Piezowandler liefert ein zum Schalldruck  $p$  proportionales Signal, das im Verstärker durch Quadrieren gleichgerichtet wird. Das Gleichspannungsausgangssignal  $U$  sollte somit proportional zur Schallintensität sein:  $U \sim p^a$  mit  $a = 2$ . Um diesen Exponenten  $a$  zu bestimmen, wird das Empfängersignal  $U$  in Abhängigkeit des Abstands  $r$  zum Sender gemessen. Bei einer Kugelwelle gilt gemäß Gl. 1.6 für den Schalldruck:  $p(r) \sim 1/r$  und damit  $U \sim r^{-a}$ . Mit dem Kalibrationsexponenten  $a$  kann dann von Signalspannung  $U$  auf Intensität umgerechnet werden:  $I \sim U^{2/a}$

Für diese Messung wird der Sender direkt auf den Empfänger gerichtet und letzterer auf dem Schlitten auf der Schiene montiert. Der Parabolspiegel und die Abschirm/Reflexionswand werden hier nicht benutzt, damit nicht ungewollt stehende Wellen, etc. erzeugt werden. Der Wegaufnehmer ist ein Mehrgang-Drehpotentiometer und wird an die Strombox angeschlossen. Nach der Kalibration des Wegaufnehmers (vgl. Abb. 1.2 ) kann die Abstandsabhängigkeit des Schalldrucks aufgezeichnet werden. Abb. 1.4 zeigt eine solche Messung:

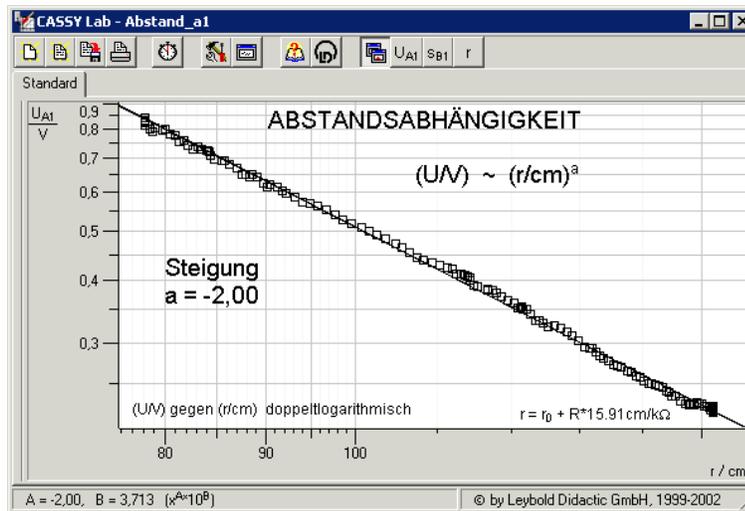


Abbildung 1.4: Signalspannung gegen Abstand  $r$

Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- CASSY-Lab Tip zur Aufzeichnung der Meßwerte:

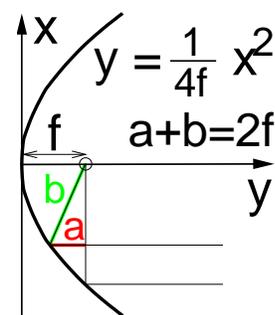
CASSY	/ Kanal A /	Spannung Ua1	+ - Umax V,	gemittelt 200ms
	Kanal B /	Widerstand rB1,	0-10k0hm,	gemittelt 200ms
Meßparameter	/ automatisch	Intervall 200 ms		
Formel	/ neue Größe	$S = 100.0 + 15.9 * (rB1 - 5.0)$	# S0, K, r0	
Darstellung	/ X-Achse	S		
	Y-Achse	Ua1		

- Die Frequenz des Generators ist mit einem Drehpotentiometer in einem kleinen Bereich zwischen 35-40kHz veränderbar. Die Eigenfrequenz der Ultraschallwandler kann von Gerät zu Gerät leicht variieren. Daher sollte die Generatorfrequenz so getrimmt werden, daß ein möglichst großes Signal gemessen werden kann. Danach stets diese Einstellung beibehalten.
- Auf parallaxenfreie Streckenmessung achten (Faden horizontal, entlang der Führungsschiene). Vor der ersten Messung den Absolutwert (Offset  $S_0$ ) der umgerechneten Strecke  $S$  überprüfen.
- Um den Exponenten der Abstandsabhängigkeit zu bestimmen, werden die Messungen in doppelt-logarithmischer Darstellung aufgetragen (siehe Abb. 1.4 als Beispiel). Warum wählt

man diese Darstellung? Aus dem Ergebnis wird der Kalibrationsexponent  $a$  zwischen Intensität und angezeigter Spannung bestimmt.

- Bei geringem Abstand zwischen Sender und Empfänger ist die Welle noch nicht ideal kugelförmig. Außerdem geht der Fehler des Abstandsoffsets  $S_0$  zwischen Sender und Empfänger (die beide in einem Gehäuse eingeschlossen sind) stärker ein als bei größerer Entfernung. In großer Entfernung wird das Signal ggü. dem Rauschen kleiner. Man suche also einen Bereich, in dem die Messungen in der doppelt-logarithmischen Darstellung gut durch eine Gerade beschrieben werden.
- Fehlerabschätzung: Abstandsmessung mit Absolutfehler in  $S_0$  und Kalibrationsfaktor von  $K$ . Regression mit statistischem Fehler (Fehlerfortplanzung für doppelt-log. Auftragung).

Alle folgenden Versuche mit einem Einzelsender benutzen ebene Schallwellen, die mit Hilfe eines Parabolspiegels erzeugt werden. Wie nebenstehend skizziert gibt es bei parabolischer Spiegelform einen Punkt, von dem aus alle Strahlen unabhängig vom Abstand  $x$  zur Achse die gleiche Weglänge – und damit auch die gleiche Phasenlage – haben. Man montiere den Ultraschallwandler im Fokus des Spiegels, und verifiziere die Ebenheit der Wellen, indem man überprüft, ob die Signalstärke des Empfängers bei verändertem Abstand konstant bleibt.



### b) Stehende Welle

Die Wellenlänge wird durch Ausmessen der Schalldruckknoten bzw. -Bäuche einer stehenden Welle bestimmt. Die Abschirm/Reflexionswand wird an der Halterung befestigt und die Öffnung verschlossen. Gemessen wird wieder das Empfängersignal in Abhängigkeit des Ortes. Abb. 1.5 zeigt exemplarisch eine Messung inklusive der abgeschätzten Wellenlänge.

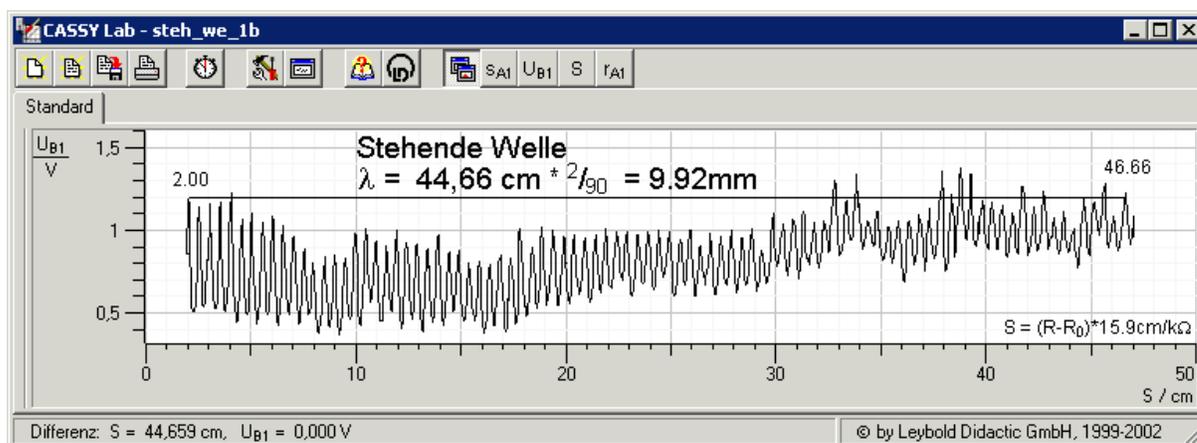


Abbildung 1.5: Stehende Schallwelle

Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- Vor dem Versuch schätze man die Wellenlänge mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit in Luft ab.
- Langsam verschieben, damit die Mittelungszeit des Sensor-CASSY sich nicht schädlich auswirkt.
- Wie groß ist der Fehler? (Peakbestimmung, Streckenkalibration)
- Richtig abzählen – zwischen n Knoten liegen (n-1) halbe Wellenlängen

### c) Beugung

Für die Untersuchung von Beugungsphänomenen stehen verschiedene Platten aus Aluminium zur Verfügung, mit denen Einzelspalte beliebiger Breite sowie Doppel- bis Vierfachspalte mit 25mm breiten Stegen in die Wand eingebaut werden können. Der Empfänger wird am Ende der am Drehteller befestigten Schiene installiert. Die Drehachse soll in der Mitte des Spalts liegen. An die Strombox wird das Potentiometer des Drehtellers angeschlossen. Aufgezeichnet wird das Empfängersignal gegen den Widerstand. Gemessen wird die Beugung an Einzelspalten verschiedener Breite, sowie an Doppel- und Mehrfachspalten. Als Beispiel sind Messwerte eines Doppelspalts in Abb. 1.6 gezeigt.

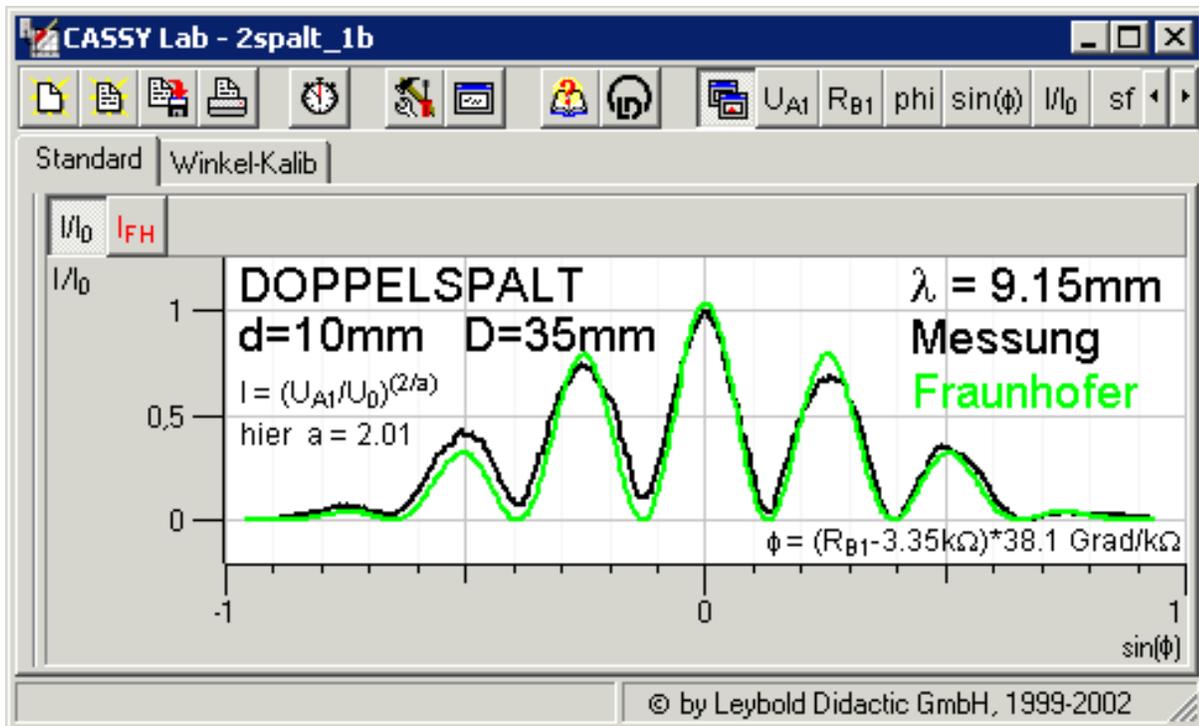


Abbildung 1.6: Intensitätsverteilung hinter einem Doppelspalt

Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- Die Winkelmessung mit dem Drehteller geschieht wie beim Wegaufnehmer über ein Drehpotentiometer. Dieses muß ebenfalls kalibriert werden. Man kann den Teller per Hand auf verschiedene Winkel einstellen und den entsprechenden Wert des Widerstandes im CASSY-Fenster ablesen. Der gesamte Meßbereich sollte kalibriert werden und mittels linearer Regression (mit Fehlerbetrachtung) ausgewertet werden. Bei allen folgenden Messungen muß darauf geachtet werden, daß der Drehteller 'schlupffrei' (insbesondere am Maximalausschlag) fährt.
- Anhand der in Teil **b)** bestimmten Wellenlänge wählt man sinnvolle Breiten der Spalte (nur Hauptmaximum, ein oder zwei Nebenmaxima).
- Die Auswertung erfolgt durch Vergleich mit der Erwartung nach Gleichung 1.10. Dazu muß das Empfängersignal in Schallintensität umgerechnet werden (Teil **a)**). Eventuell muß die Nulllage korrigiert werden, falls die Schallwelle nicht exakt senkrecht auf die Wand fällt. Dazu werden die links und rechts gemessenen Extrema in  $\sin \alpha$  gemittelt. Man berechne die Position der Extrema nach Gl. 1.12 mit der in Teil **b)** ermittelten Wellenlänge und vergleiche mit der Messung.
- Die Beugungsbilder weisen häufig unvorhergesehene Unregelmäßigkeiten auf, die durch Reflexionen an sonstigen umstehenden Wänden, Aufbauten, etc. erzeugt werden. Solche Einflüsse möglichst minimieren. Um zu zeigen, daß es sich um echte physikalische Phänomene handelt (und keine Fehlmessung des Gerätes ist), die Messung wiederholen (z.B. durch Messung auf Hin- und Rückweg). Eine 'Nullmessung' mit geschlossenem Spalt zeigt eventuelle Störungen durch Beugung an sonstigen festen (und beweglichen ...) Gegenständen (und Individuen ...) im Raum an und muß gegebenenfalls von der Messung abgezogen werden.  
Bei großen Beugungsstrukturen ist die Fraunhofer-Näherung nach Abb. 1.1 evtl. nicht mehr zulässig.

#### **d) Aktiver Dipol**

Analog zum Doppelspalt kann auch ein Interferenzmuster erzeugt werden, indem man zwei mit dem gleichen Oszillator (phasenstarr) angeregte Sender nebeneinander aufstellt. Ein gleichphasiges Schwingen der beiden Sender entspricht im Prinzip einem Doppelspalt mit der Senderabstrahlcharakteristik anstelle der Einzelspaltfunktion als Einhüllende. Man kann sie jedoch auch gegenphasig anregen, was zu einem veränderten Interferenzbild führt. Die beiden Sender werden so über dem Drehtisch installiert, daß ihre Position dem eines vorher vermessenen Doppelspaltens entsprechen. Sie werden an denselben Generator angeschlossen; gegenphasiges Schwingen erreicht man durch Umpolung des Steckerpaares eines Senders. Dabei müssen die Piezowandler voneinander elektrisch isoliert eingebaut werden, da ansonsten der Oszillatorausgang über die Piezowandlergehäuse kurzgeschlossen wird. Abb. 1.7 zeigt das aufgezeichnete Empfängersignal gegen den Drehtellerwinkel für gleich- und gegenphasigen Betrieb der zwei Sender.

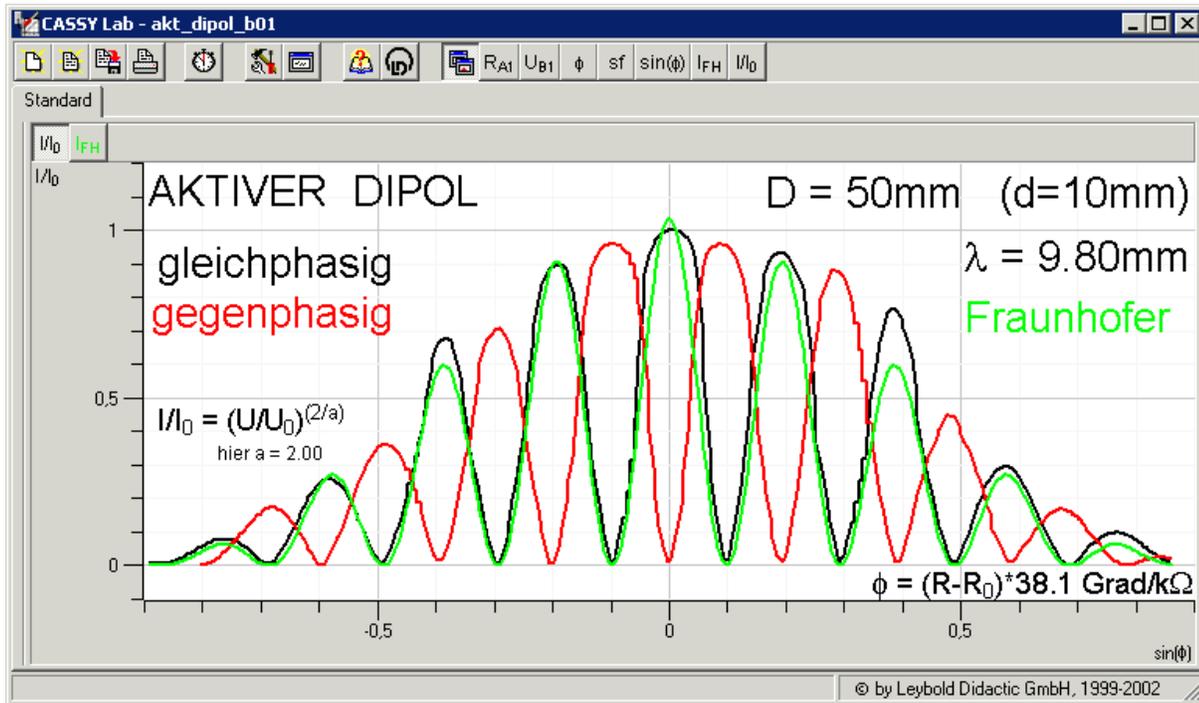


Abbildung 1.7: Intensitätsverteilung eines aktiven Dipols

Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- Man vergleiche das Interferenzmuster der gleichphasigen mit der gegenphasigen Schwingung.
- Man vergleiche das Interferenzmuster mit dem Doppelspalt aus Teil c)

### e) Reflexion / reflexionsfreie Wand

Analog zur optischen Linsenvergütung kann auch für Schallwellen eine reflexfreie Wand konstruiert werden. Die nebenstehende Abbildung verdeutlicht das Prinzip. Der Raum zwischen den Wänden kann als Resonator mit zwei festen Wänden aufgefaßt werden. Für bestimmte  $D$  ist er in Resonanz und absorbiert die einfallende Welle maximal, d.h. die reflektierte Welle verschwindet. Die Abstände  $\Delta$  zwischen solchen Positionen werden erwartet für  $\Delta = \lambda/2 \cos \phi$ .

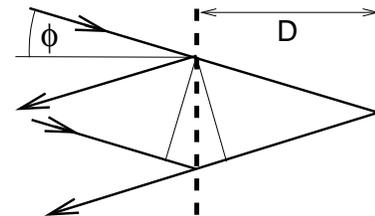


Abbildung 1.8: Reflexfreie Wand

Für diesen Versuch steht ein Verschiebetisch zur Verfügung, der anstelle der Holzwand auf einer Traverse über dem Drehteller unter 30 Grad zur Einfallsrichtung montiert werden kann.

Eine verschiebbare Lochplatte dient als teildurchlässige vordere und eine fest installierte als undurchlässige hintere Reflexionswand. Der Empfänger-Arm wird auf der Sender-Seite auf einen Winkel von etwa 60 Grad eingestellt, um das reflektierte Signal zu messen. Der Wegaufnehmer wird auf der Grundplatte montiert, um den Abstand  $D$  zwischen den zwei Wänden zu messen. Abb. 1.9 zeigt eine aufgezeichnete Messung des Empfängersignals in Abhängigkeit des Abstandes  $D$ , sowie die Bestimmung von  $\Delta$ .

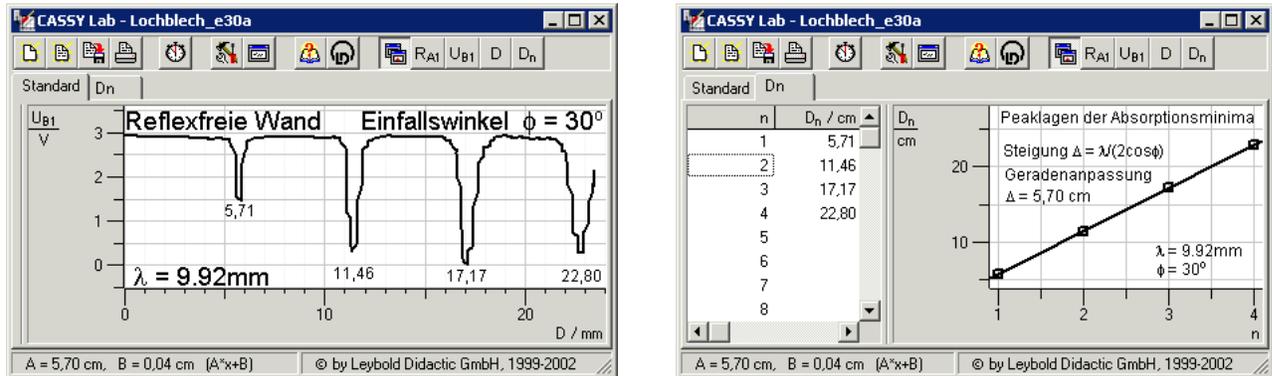


Abbildung 1.9: Reflexion an einer doppelten Wand

Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- Da hier nur kleine Wegstrecken gemessen werden, sollte der Widerstandsmeßbereich angepaßt werden ( 0 - 300 $\Omega$  )
- Auf parallaxenfreie Streckenmessung achten. Dann kann der Streckenkalibrationsfaktor  $K$  aus Teil **a**) übernommen werden. Eine Kalibration des Meßintervalls mit der Mikrometerschraube ist aber besser.
- Warum bildet sich das gemessene Muster? Wo sollte sich das erste Minimum befinden, wo die weiteren? Man vergleiche die Messung mit der Erwartung für die aus Teil **b**) erhaltenen Wellenlänge. (mittels linearer Regression, wie in Abb. 1.9 rechts gezeigt)

## 1.4 Versuche mit elektromagnetischen Mikrowellen

### 1.4.1 Versuchsaufbau

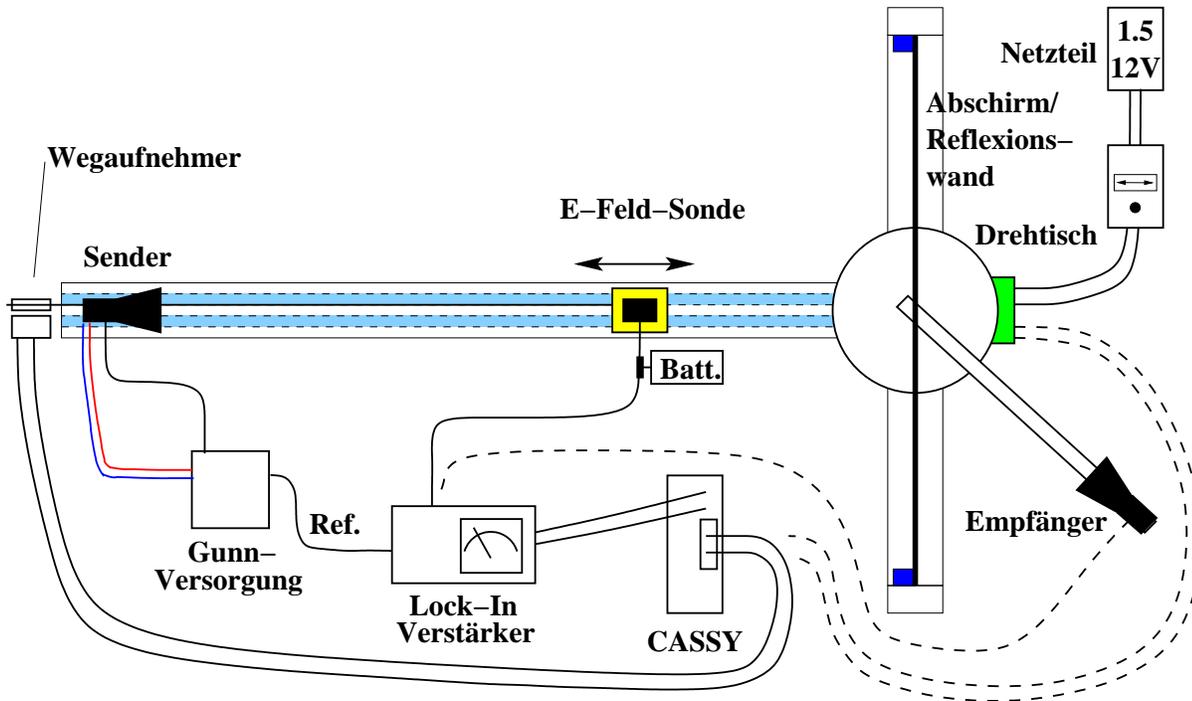
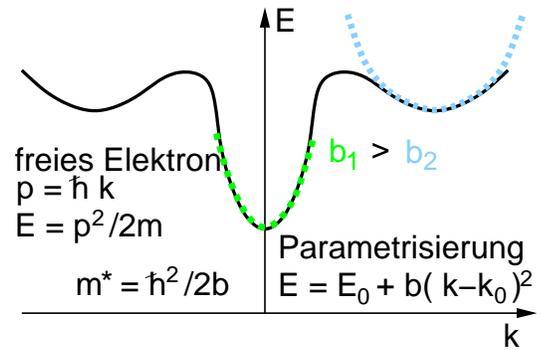


Abbildung 1.10: Versuchsaufbau Mikrowelle

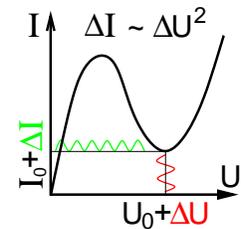
Benötigte Geräte:

- Mechanischer Aufbau mit motorgetriebenem Drehtisch und Reflexionswand
- Gunn-Versorgung mit Modulator
- Lock-In Meßverstärker
- Gunn-Oszillator mit Hornstrahler
- Empfänger mit Hornantenne
- Sensor-CASSY mit Stromquellenbox LEYBOLD 542 031
- Wegaufnehmer LEYBOLD 529 031 mit Faden und Befestigungsmuffe
- diverse Netzgeräte und Kabel
- verschiedene Aufsätze für mechanischen Aufbau: Polarisationsfilter, PE-Halbzylinder
- Verschiedene Abstandsbleche für PE-Halbzylinder

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Gunn-Oszillator als Sender und einer Hornantenne als Empfänger. Zur Erzeugung der Mikrowellen wird eine Gunn-Diode eingesetzt. Der Gunn-Effekt ist eine hochfrequente Strommodulation, die durch unterschiedliche effektive Massen  $m^*$  der Elektronen im nebenstehend skizzierten Feld des Kristallgitters zustandekommt. Abhängig von der Schichtdicke des Halbleiters ergeben sich Frequenzen im GHz Bereich.



In der Empfänger-Antenne wird eine Tunnel-Diode im nebenstehend skizzierten nicht-linearen (quadratischen) Bereich ihrer Kennlinie betrieben, um das empfangene Hochfrequenz-Signal in einen Effektivwert zu wandeln, der proportional zur Intensität ist.



Um den störungsfreien Betrieb mehrerer Anlagen im gleichen Raum zu ermöglichen, wird der Strom durch die Gunn-Diode mit einer anlagenspezifischen Frequenz  $f_i$  im kHz Bereich moduliert. Der Meßverstärker multipliziert nach dem Lock-In Prinzip das Antennensignal mit dem jew. Modulationssignal als Referenz. Signale anderer Anlagen mit Modulationsfrequenz  $f_j$  verschwinden bei Mittelung über Zeiten  $t \gg 1/|f_i - f_j|$ .

Sender oder Empfänger können je nach Messung auf der Schiene oder an einem Dreh-Arm bewegt werden. Zur Führung wird ein T-förmiges Schienenkreuz mit aufgesetztem motorgetriebenem Drehtisch verwendet. Abb. 1.10 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau. Man baue die Grundschaltung (Gunn-Versorgung, Sender, Empfänger, Lock-In-Verstärker, Strombox für Bewegungsmessung) einschließlich Sensor-CASSY auf. Jeder Versuchsteil ist durch seine eigene Variante des Versuchsaufbaus charakterisiert, welche im nächsten Kapitel beschrieben werden. Es ist darauf zu achten, daß die Intensität der Welle am Messort stark vom Aufbau abhängt. Z.B. ist die maximale Intensität hinter einem Doppelspalt größer als hinter einem Einfachspalt der gleichen Breite. Wegen stehender Wellen im Raum kann das gemessene Signal auch von der Position oder der Orientierung des Aufbaus im Raum abhängen. Somit muß bei jeder Messung der Messbereich und die Verstärkung angepasst werden, um eine optimale Ausnutzung des CASSY-Messbereichs ('Binningeffekte' der Digitalisierung) zu erzielen.

Der Drehtischmotor ist für Spannungen bis 6V ausgelegt. Ein Vorwiderstand ermöglicht das Betreiben mit dem stufenweise regelbaren 12V-Netzgerät. Die Drehgeschwindigkeit kann durch Umschalten der Ausgangsspannung am Netzgerät verändert werden. Die Messungen sollten bei möglichst kleiner Drehgeschwindigkeit erfolgen, damit die Mittelungszeit des Sensor-CASSY die Messung minimal beeinträchtigt. (Warum?) Mit dem Umschalter kann die Drehrichtung gewählt werden. Läuft der Drehteller nicht von alleine an, so kann mit dem Taster der Vorwiderstand kurzzeitig überbrückt werden.

## 1.4.2 Versuchsdurchführung

### a) Abstandsmessung

Das von der Empfänger-Diode demodulierte Signal wird in eine Spannung  $U \sim E^a$  verstärkt. Erwartet wird  $a = 2$  und damit eine Proportionalität zwischen Spannung und Intensität. Eine Abweichung kann sich aber ergeben wegen eines nicht optimal eingestellten Arbeitspunktes der Tunnel-Diode oder eines nicht-linearen Lock-In Verstärkers. Mit der Messung der Signalspannung  $U$  in Abhängigkeit des Abstands  $r$  zwischen Sender und Empfänger kann der Exponent  $a$  bestimmt werden. Für die Auswertung der folgenden Versuchsteile berechnet sich die Intensität dann zu  $I \sim U^{2/a}$ . Ausgenutzt wird die bekannte Abnahme der Feldstärke einer Kugelwelle. Nach Gl. 1.6 gilt  $E(r) \sim 1/r$  und damit  $U \sim r^{-a}$ .

Um bei großen Entfernungen messen zu können, wird der Empfänger am Ende des Dreh-Arms in Verlängerung der Längs-Schiene montiert. Der Sender wird auf dem Schlitten am Schienenanfang montiert und – ohne Abschirm/Reflexionswand dazwischen – auf den Empfänger gerichtet. Der Wegaufnehmer zur Bestimmung der Senderposition ist ein Mehrgang-Drehpotentiometer und wird an die Strombox angeschlossen.

Nach der Kalibration des Wegaufnehmers (vgl. Abb. 1.2 ) kann die Abstandsabhängigkeit des des E-Feldes aufgezeichnet werden. Abb. 1.11 zeigt eine solche Messung:

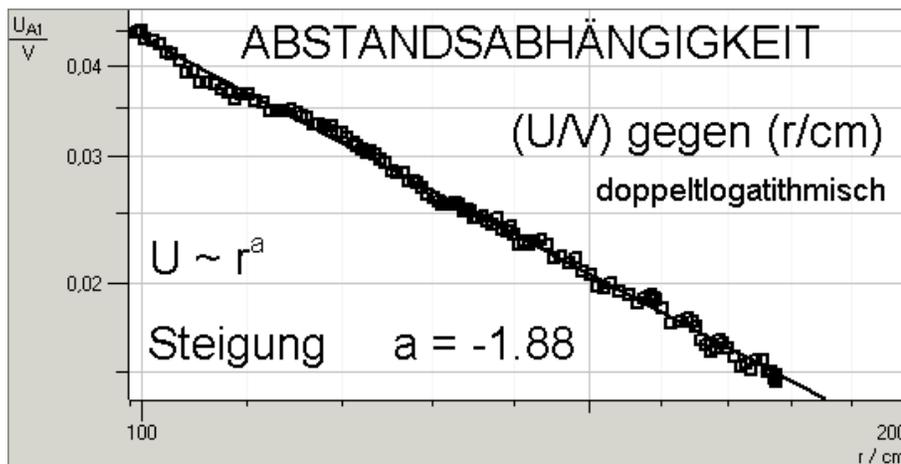


Abbildung 1.11: Signalspannung gegen Abstand  $r$

Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- CASSY-Lab Tip zur Aufzeichnung der Meßwerte:

CASSY	/ Kanal A /	Spannung Ua1	+ - Umax V	gemittelt 200ms
	Kanal B /	Widerstand rB1,	0-10kOhm,	gemittelt 200ms
Meßparameter	/ automatisch	Intervall	200 ms	
Formel	/ neue Größe	S = 50.0 + 15.9*(rB1-5.0)		# S0, K, R0
Darstellung	/ X-Achse	S		
	Y-Achse	Ua1		

- Auf parallaxenfreie Streckenmessung achten (Faden horizontal, entlang der Führungsschiene).
- Um den Exponenten der Abstandsabhängigkeit zu bestimmen, werden die Messungen in doppelt-logarithmischer Darstellung aufgetragen. Warum wählt man diese Darstellung? Aus dem Ergebnis wird der Exponent  $a$  zwischen Feldstärke und angezeigter Spannung bestimmt.
- Bei geringem Abstand zwischen Sender und Empfänger ist die Welle noch nicht kugelförmig und der Absolutfehler des Abstandes hat einen größeren Einfluß. Bei großen Abständen hingegen wird das Signal klein gegenüber dem Rauschen. Man suche daher einen Bereich, in dem die Messungen in der doppelt-logarithmischen Darstellung gut durch eine Gerade beschrieben werden.
- Wie groß ist der Fehler der Abstandsmessung? Wie groß ist der Fehler des Kalibrationsfaktors?

### b) Stehende Welle

Die Wellenlänge wird durch Ausmessen der Intensitätsknoten des elektrischen Feldes einer stehenden Welle bestimmt. Die Abschirm/Reflexionswand wird mit der Aluminiumseite zum Sender hin an der Halterung befestigt und die Öffnung mit einer Aluminiumplatte (warum metallisch?) verschlossen.

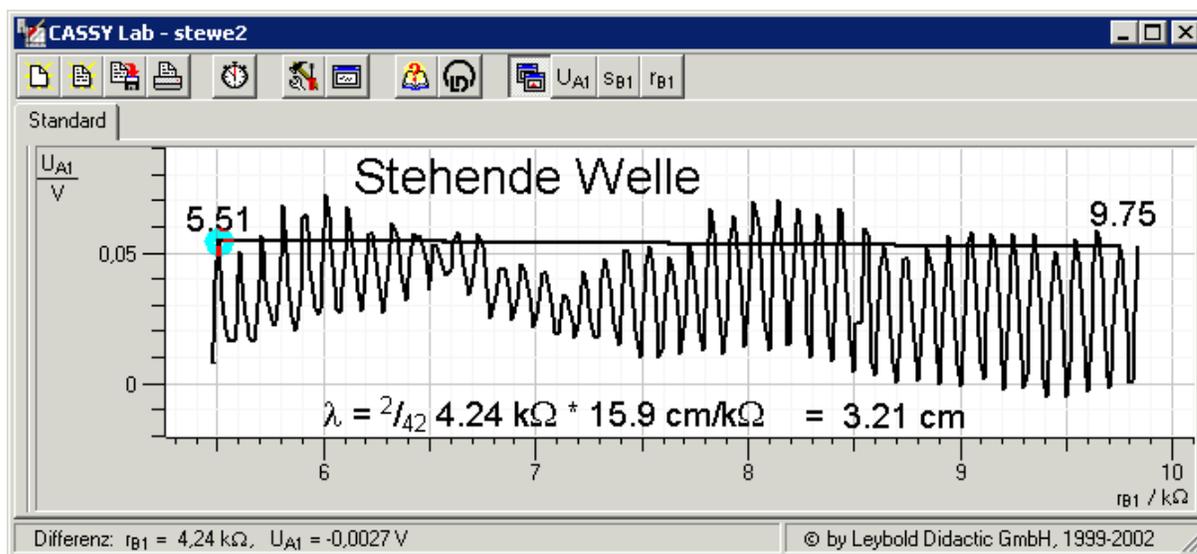


Abbildung 1.12: Mikrowellen: Stehende Welle vor einer leitenden Wand

Gemessen wird das Empfängersignal in Abhängigkeit des Abstands Empfänger-Wand. Abb. 1.12 zeigt exemplarisch eine Messung inklusive der durch abzählen der Knoten abgeschätzten Wellenlänge. Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- Vor dem Versuch schätze man die Wellenlänge mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit in Luft ab.
- Langsam verschieben, damit die Mittelungszeit des Sensor-CASSY sich nicht schädlich auswirkt.
- Wie groß ist der Fehler? (Peakbestimmung / Strecken-Kalibration)

### c) Beugung

Für die Untersuchung von Beugungsphänomenen stehen verschiedene Platten aus Aluminium zur Verfügung, mit denen Einzelspalte beliebiger Breite sowie Doppel- und Mehrfachspalte mit 25mm breiten Stegen in die Wand eingebaut werden können. Der Empfänger wird am Ende der am Drehteller befestigten Schiene installiert. Die Drehachse soll in der Mitte des Spalts liegen. An die Strombox wird das Potentiometer des Drehtellers angeschlossen. Aufgezeichnet wird das Empfängersignal gegen den Widerstand. Gemessen wird die Beugung an Einzelspalten verschiedener Breite, sowie am Doppel- und Mehrfachspalt. Als Beispiel sind Meßwerte eines Dreifachspalts in Abb. 1.13 gezeigt:

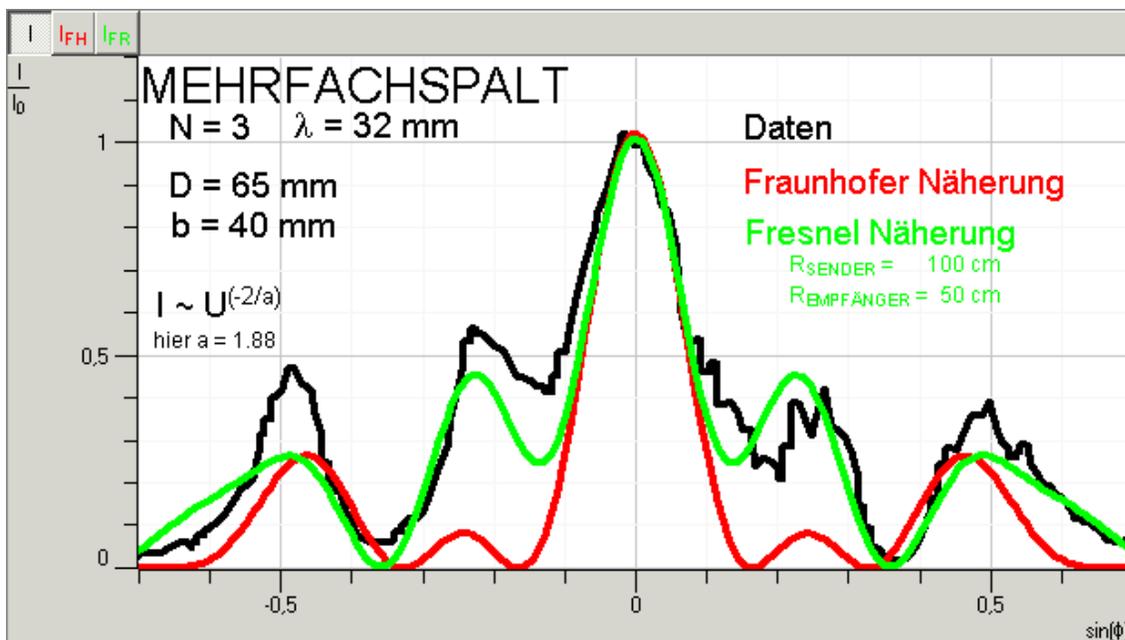


Abbildung 1.13: Messung eines Dreifachspalts. Deutlich zu erkennen ist, daß die Fraunhofer-Näherung (rot) die Messung schlechter beschreibt, als die Fresnel Rechnung (grün)

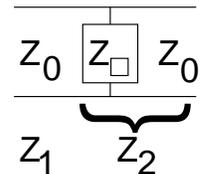
Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- Die Winkelmessung mit dem Drehteller geschieht wie beim Wegaufnehmer über ein Drehpotentiometer. Dieses muß analog zum Wegaufnehmer kalibriert werden. Man kann den Teller per Hand auf verschiedene Winkel einstellen und den entsprechenden Wert des Widerstandes im CASSY-Fenster ablesen. Der gesamte Meßbereich sollte kalibriert werden.

Die Eichung geschieht mittels linearer Regression (Fehler?). Bei allen folgenden Messungen muss darauf geachtet werden, daß der Drehteller 'schlupffrei' (insbesondere am Maximalausschlag) fährt.

- Anhand der in Teil **b)** bestimmten Wellenlänge wählt man sinnvolle Spaltbreiten, um das Hauptmaximum und evtl. ein oder zwei Nebenmaxima aufzeichnen zu können.
- Die Auswertung erfolgt durch Vergleich mit der Erwartung nach Gleichung 1.10. Dazu muß das Empfängersignal in die Intensität der Welle umgerechnet werden (Teil **a)**). Eventuell muss die Nullage korrigiert werden, falls die Mikrowelle nicht exakt senkrecht auf die Wand fällt. Dazu werden die links und rechts gemessenen Extrema in  $\sin \alpha$  gemittelt. Man berechne die Position der Extrema anhand der in Teil **b)** ermittelten Wellenlänge und vergleiche mit der Messung.
- Die Beugungsbilder weisen häufig unvorhergesehene Unregelmäßigkeiten auf, die durch Reflexionen an sonstigen umstehenden Wänden, Aufbauten, etc. erzeugt werden. Solche Einflüsse möglichst minimieren (evtl. den Aufbau ein wenig verschieben). Um sich zu vergewissern, daß es sich um aufgezeichnete Mikrowellensignale handelt (und keine Artefakte des Meßgerätes), empfiehlt es sich, die Messung auf dem Hin- und Rückweg zu vergleichen. Eine 'Nullmessung' mit geschlossenem Spalt zeigt eventuelle Störungen durch Beugung an sonstigen festen und beweglichen ... Gegenständen (und Individuen ...) im Raum an und muß gegebenenfalls von der Messung abgezogen werden.

Zur Vermeidung von stehenden Wellen ist die Abschirmwand auf der Empfängerseite mit teildurchlässiger graphitierter Pappe verkleidet. Diese wirkt mit der vollständig reflektierenden Aluminiumfolie als sogenannter  $\lambda/4$  Absorber (vgl. Abb. 1.8 – reflexfreie Wand). Ein Reflexionskoeffizient  $R$  für vollständige Auslöschung von direkt reflektierter mit der im Zwischenraum mehrfach reflektierten Welle wird dadurch erreicht, daß der Flächenwiderstand der Graphitschicht  $Z_{\square}$  (angegeben in  $\Omega/\square$ ) durch Auftragen in geeigneter Dicke auf den Wellenwiderstand des Vakuums  $Z_0 = E/H = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = \pi \cdot 120\Omega$  eingestellt wird. Dann ist  $R = (Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2) = 1/3$  – wie nebenstehend skizziert, da vor der Graphitfläche  $Z_1 = Z_0$  ist und die Reflexion an der Graphitfläche mitsamt dem dahinterliegendem Halbraum stattfindet – also an der 'Parallelschaltung' von  $Z_{\square}$  und wiederum  $Z_0$ , d.h.  $1/Z_2 = 1/Z_{\square} + 1/Z_0$ .



#### d) Polarisation

Zur Demonstration von Polarisierungseffekten wird ein Gitter aus elektrisch leitenden Stäben senkrecht zur Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger aufgestellt. Um sich von der Wirkungsweise eines solchen Polarisationsfilters zu überzeugen, wird die Abhängigkeit der Signalstärke vom Gitterwinkel sowohl in Vorwärtsrichtung, als auch seitlich (bei geschwenktem Empfänger-Arm) beobachtet und qualitativ beschrieben. Dabei wird der Aufbau (durch Verschieben von Sender/Gitter/Empfänger/Schiene) so eingestellt, daß in Vorwärtsrichtung bei Gitterstäben parallel zum Sende-Dipol kein Signal mehr gemessen wird. Dann wird die Intensität in Vorwärtsrichtung hinter dem Gitter in Abhängigkeit vom Drehwinkel des Gitters wie in Abb. 1.14 aufgezeichnet.

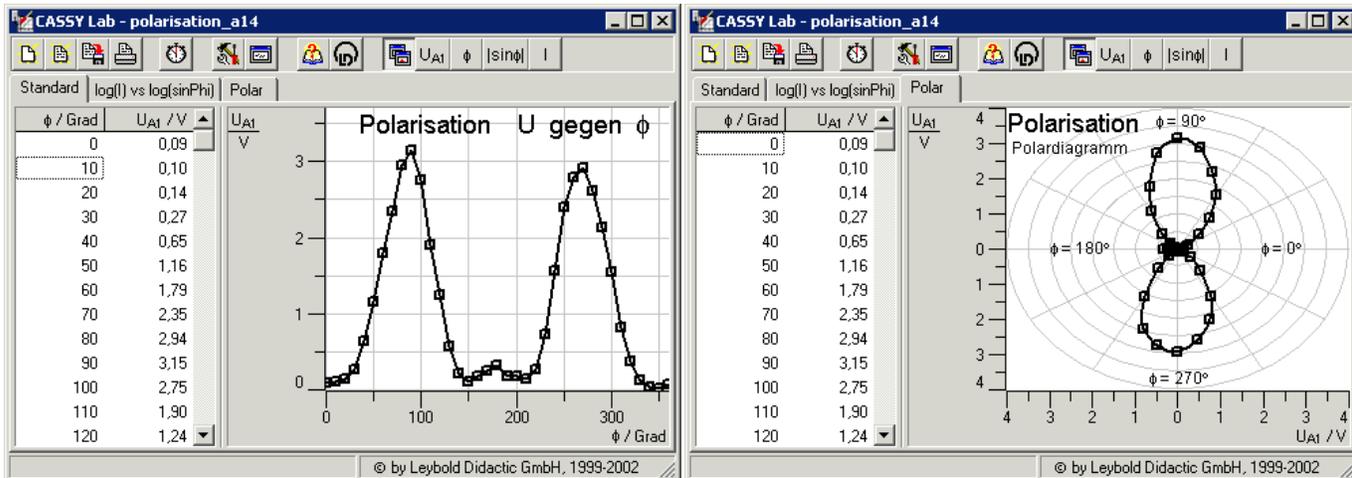


Abbildung 1.14: Gemessenes Signal gegen Drehwinkel des Polarisationsgitters. Links in kartesischer Darstellung und rechts im Polardiagramm

Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- Der Winkel des Polarisationsfilters kann z.Zt. nicht direkt mit dem Sensor-CASSY ausgelesen werden. Somit muß ein wenig 'getrickst' werden, um die Werte zügig mit CASSY aufzuzeichnen. Für Messungen von 0 bis 360 Grad in 10 Grad Schritten hat sich folgende Einstellung bewährt:

```

CASSY          / Kanal A /   Spannung Ua1   +- Umax V, gemittelt 1000ms
Meßparameter  / manuell
Formel        / neue Größe   Phi: 10*(n-1)
Darstellung   / X-Achse Phi
               / Y-Achse Ua1
  
```

- Bevor man die Darstellung in doppelt-logarithmischer Form ausführt, muss gezeigt werden, wo die Polarisationssebene liegt. Dies kann in kartesischer Auftragung durch Ermittlung der Maxima, oder im Polardiagramm über die (visuelle) Bestimmung einer Symmetrieachse geschehen.
- Das Gesetz von Malus (Gl. 1.14) wird in einer doppelt-logarithmischen Darstellung überprüft. Welcher Exponent wird erwartet? Da die Polarisation nicht vollständig ist und evtl. im Raum stehende Wellen am Ort des Empfängers ein Untergrund-Signal liefern, muß zunächst ein in der kartesischen Darstellung erkennbarer Signaloffset  $U_0$  abgezogen werden. Außerdem muß das gemessene Signal mit dem Kalibrierexponenten  $a$  aus der Abstandsmessung in die Intensität umgerechnet werden.

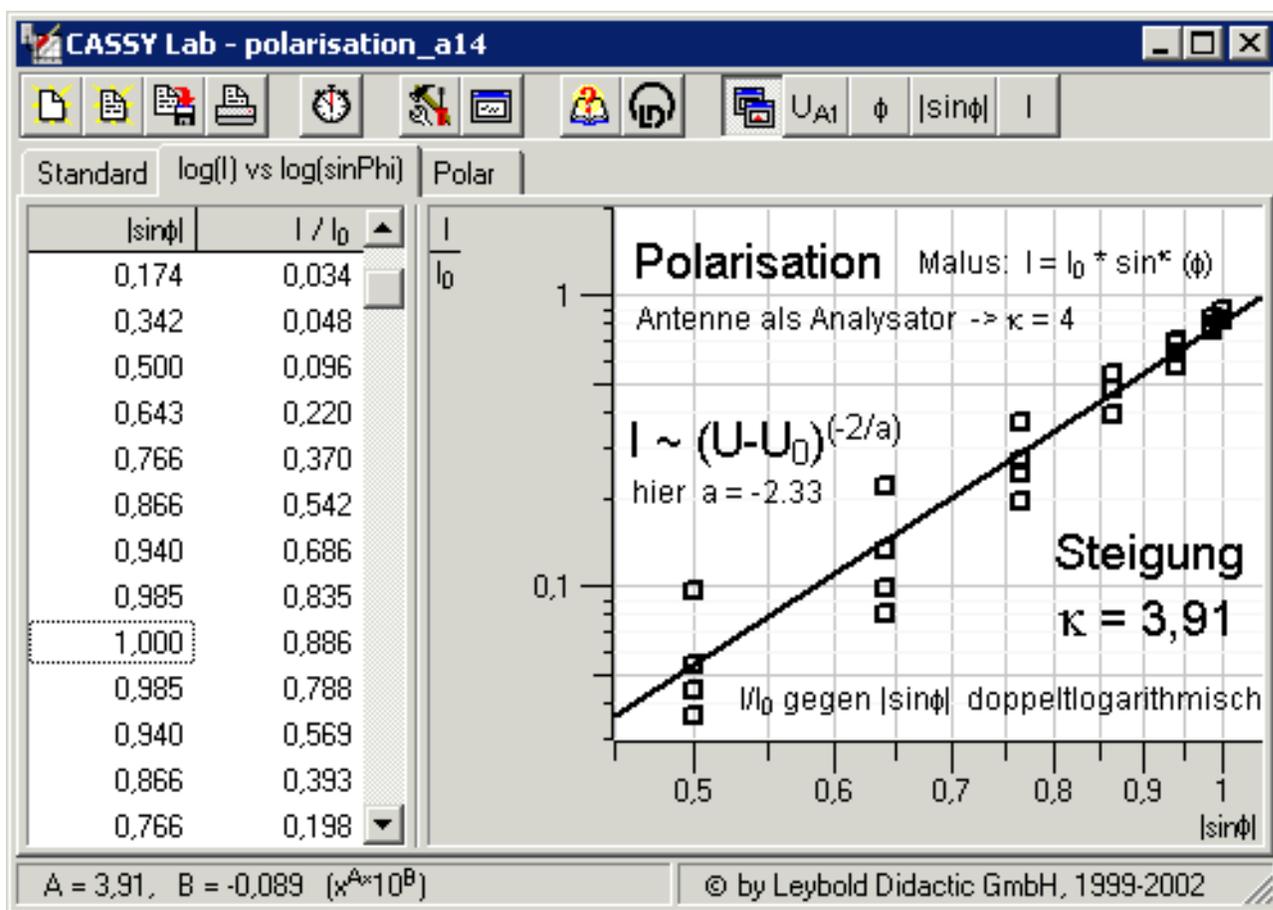
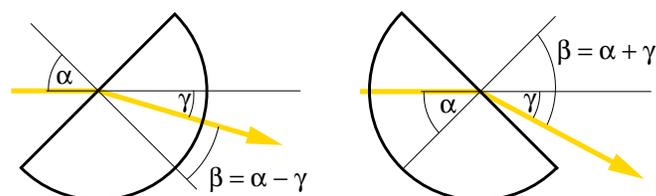


Abbildung 1.15: Polarisationsmessung in doppelt-logarithmischer Darstellung

### e) Brechung in PE

Zur Überprüfung des Brechungsgesetzes wird ein PE-Halbzylinder anstelle der Holzwand auf ein waagrechtes U-Profil konzentrisch über den Drehteller gestellt. Der Empfänger wird so auf dem Schwenk-Arm befestigt, daß die Öffnung der Horn-Antenne auf einem Radius von 30cm liegt. Der Sender wird auf ca. 1m Abstand gestellt. Aufgezeichnet wird die Signalstärke in Abhängigkeit des Empfängerwinkels  $\gamma$  für verschiedene (jeweils positive und negative!) Einfallswinkel  $\alpha$ .

Wie nebenstehend skizziert wird sowohl der Übergang von Luft nach PE, als auch von PE nach Luft gemessen, d.h. mit der flachen und auch der runden Seite des Halbzyinders zum Sender. Bis zu welchen Einfallswinkeln sind diese Messungen sinnvoll (Totalreflexion)?



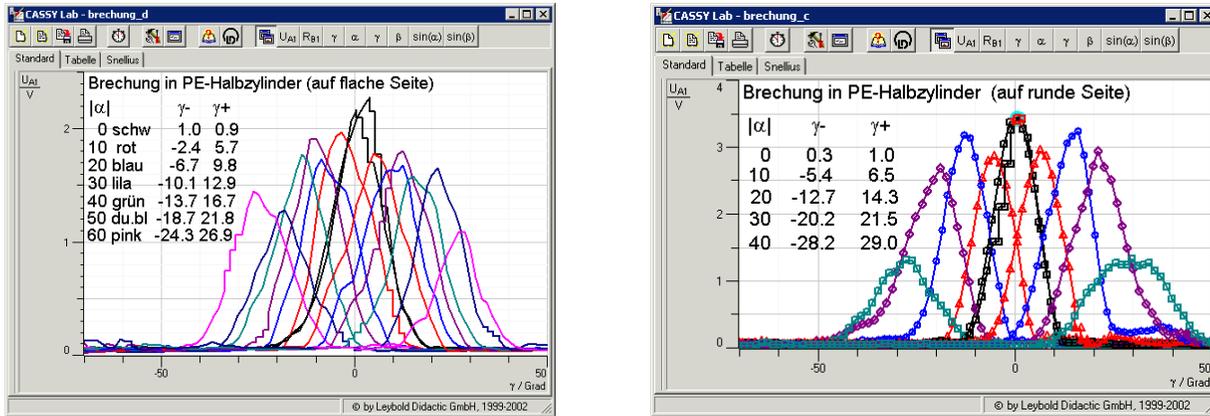


Abbildung 1.16: Aufgezeichnete Signalstärken hinter dem PE-Halbzyylinder. Links der Übergang Luft-PE. Rechts der Übergang PE-Luft

Zur Bestimmung des Brechungsindex wird aus den aufgezeichneten Signalverläufen der Ausfallwinkel  $\beta$  ermittelt und dann wie in Abb. 1.17  $\sin \alpha$  gegen  $\sin \beta$  aufgetragen. Nach Gl. 1.13 liegen die Werte auf einer Ursprungsgeraden mit dem Brechungsindex als Steigungsfaktor:

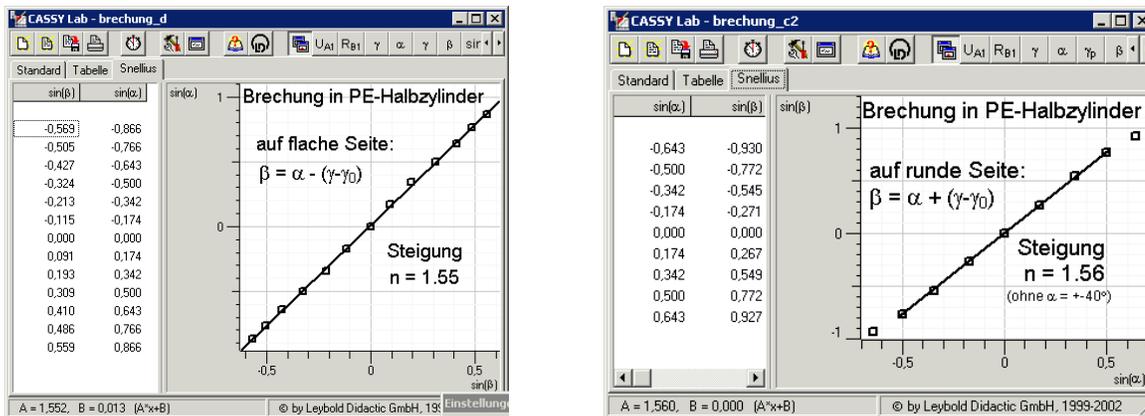
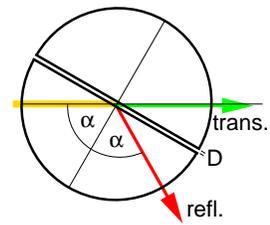


Abbildung 1.17: Bestimmung des Brechungsindex von PE. Links der Übergang Luft-PE. Rechts der Übergang PE-Luft

Hinweise zur Durchführung und Auswertung:

- Sollte sich während der Messungen der Winkel-Nullpunkt  $\gamma_0$  verschieben, so wird er notiert und von der jeweiligen Messung abgezogen.
- Eine schief einfallende Welle (Justage des Senders) führt zu verschobenen Peaklagen, die durch Mittelung der jeweils zu  $+\alpha$  und  $-\alpha$  korrespondierenden Ausfallwinkel korrigiert werden kann.
- $\sin \beta$  wird aus den korrigierten Winkeln berechnet
- Wie genau ist die Messung? Dazu die Fehler von Einfallswinkel- bzw. Ausfallswinkel abschätzen (Skalenablesenauigkeit, Peakbestimmung, Winkelkalibration, Fehlerfortpflanzung).

**Optischer Tunneleffekt** Der Aufbau zur Messung des Übergangs PE-Luft kann durch einen zweiten Halbzylinder, wie nebenstehend skizziert, ergänzt werden, um einen interessanten Effekt zu demonstrieren: Wegen der Wellennatur der elektromagnetischen Strahlung ist auch für Einfallswinkel oberhalb der Totalreflexion ein transmittierter Strahl zu beobachten, wenn die Lückenbreite  $D$  kleiner ist als die Wellenlänge  $\lambda$ .



Dieser Effekt wird auch *frustrierte totale interne Reflexion* – FTIR – genannt und findet in Strahlteilern mit variabler Intensitätsaufteilung Anwendung.

Analog zum quantenmechanischen Tunneleffekt ergibt sich für die transmittierte Intensität  $I_T \sim e^{-2\pi D/\lambda}$ . Eine Aufteilung im Verhältnis 1:1 ergibt sich somit für  $D = \lambda \frac{\ln 2}{2\pi} \approx \lambda/10$ .

Bei einem Einfallswinkel von  $\alpha = 60$  Grad kann sowohl der reflektierte als auch der transmittierte Strahl für verschiedene Lückenbreiten  $D$  gemessen werden. Nebenstehend ist eine Messung gezeigt (Abstandsbleche verwenden). Wird nun die Signalhöhe in Intensität umgerechnet, und der transmittierte Anteil logarithmisch über  $D$  aufgetragen, liegen die Werte auf einer Geraden mit Steigung  $-2\pi/\lambda$ . Eine solche Auswertung zeigt Abb. 1.18.

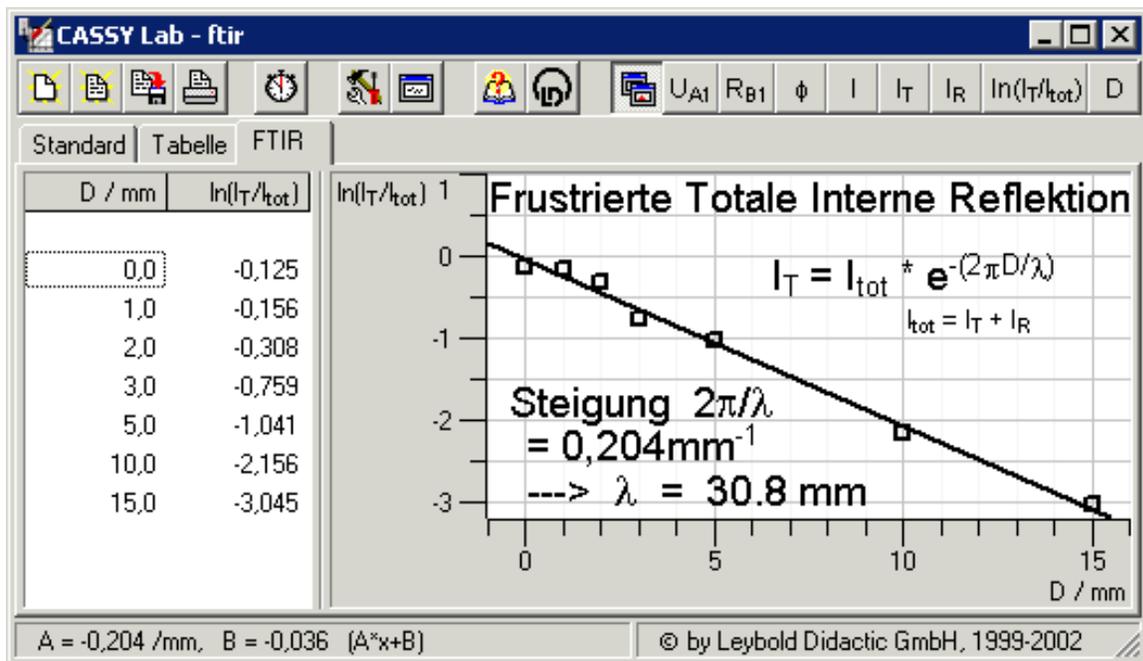
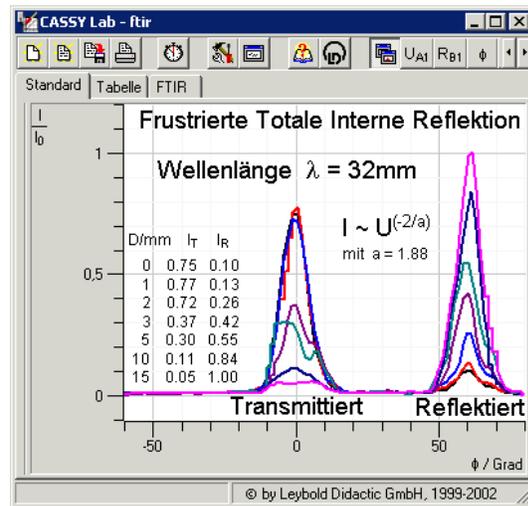


Abbildung 1.18: Frustrierte totale interne Reflexion