

UNIVERSITÄT REGENSBURG

FORTGESCHRITTENENPRAKTIKUM

Versuch: X-Band

Praktikanten: Erik Fabrizzi, Fabian Tanzer



06. August 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbereitung	2
1.1	Gunn-Effekt	2
1.2	Gunn-Diode	3
1.3	Schwingkreis	3
1.4	Hohlleiter	5
1.4.1	Exkurs: Hohlraumresonator	5
1.4.2	Hohlleiter	5
1.5	Hornantenne	7
1.6	Frequenzabhängigkeit	7
1.7	Frequenzmischung	8
1.8	Bandpass	9
1.9	Spektralanalysator	10
1.10	Radargleichung	10
1.11	Geschwindigkeitsmessung	12
1.12	Entfernungsmessung	13
1.13	Radargerät	14
1.14	Frequenzschwankungen	14
2	Durchführung	16
2.1	Kennlinie der Gunn-Diode	16
2.1.1	Ergebnisse	16
2.2	Spannungsabhängigkeit der Ausgangsfrequenz	16
2.2.1	Ergebnisse	17
2.3	Charakterisierung der Hornantenne	17
2.3.1	Ergebnisse	17
2.4	Frequenzmischung	18
2.5	Messung der Geschwindigkeit eines Autos mit der Radartechnik	18
2.5.1	Ergebnisse	19
2.5.2	Fehlerberechnung	19
2.6	Gemessene Geschwindigkeit	19
3	Fazit	21

1 Vorbereitung

1.1 Gunn-Effekt

Der Gunn-Effekt tritt in Halbleitermaterialien, die im Leitungsband mehrere (relativen) Energieminima besitzen, bei hohen elektrischen Feldstärken auf:

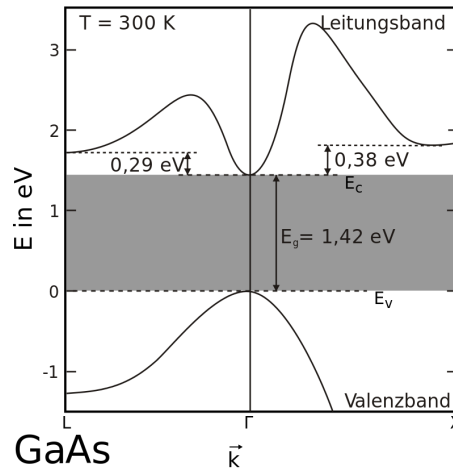


Abb. 1: Bandstruktur von GaAs bei 300 K [6]

Ist keine elektrische Spannung angelegt, so befinden sich die Leitungselektronen im absoluten Minimum des Leitungsbandes. Wird ein elektrisches Feld $\vec{E}$ angelegt, so erhöht sich die Energie der Leitungselektronen. Ihre Driftgeschwindigkeit v_D steigt. Der Stromfluss nimmt zu. Ab einer gewissen Spannung haben die Elektronen genug Energie, um durch die Streuung mit Phononen (durch Änderung des Wellenvektors k) in ein Nebenminimum (z. B. am L-Punkt) zu gehen. Dort haben die Leitungselektronen eine höhere effektive Masse. Ihre Geschwindigkeit nimmt ab ($\mu = \frac{e\tau}{m_e}$). Dadurch nimmt der Stromfluss ab ($\sigma = ne\mu$). Es liegt also ein **NDR** (= negative differential resistance) vor, d. h. $\frac{dI}{dU} < 0$:

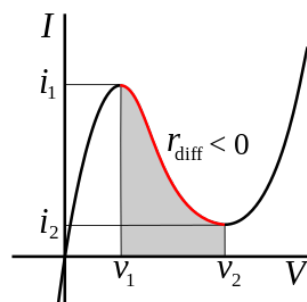


Abb. 2: Negativer differentieller Widerstand (NDR) [5]

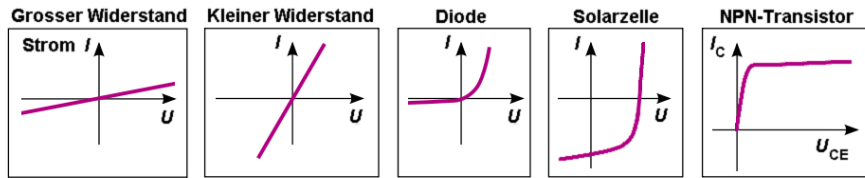


Abb. 3: Zum Vergleich: Fünf Kennlinien anderer elektronischer Bauelemente [8]

Da die Elektronen nun an manchen Stellen im Halbleiter niedrigere Driftgeschwindigkeiten haben, sammeln sie sich dort an (vgl. Verkehrsstau durch unterschiedliche Geschwindigkeiten der Autos). Dieser Effekt wird dann noch durch die abstoßende Coulombkraft verstärkt. Bereiche, in denen sich die Elektronen stauen bzw. sammeln nennt man **(Gunn-)Domänen**. Erreicht eine Domäne die Anode, so treffen dort mehr Elektronen an und der Strom steigt für kurze Zeit an. Das elektrische Feld im Rest des Halbleiters fällt ab. Dadurch entstehen nun regelmäßig periodische Oszillationen, welche die Probe ungefähr mit Driftgeschwindigkeit der Elektronen durchlaufen. Die materialabhängige Frequenz liegt bei ca. 1,5 bis 140 GHz, was im Bereich der Mikrowellenstrahlung ist. Diese können durch die angelegte Spannung am Material gesteuert werden.

1.2 Gunn-Diode

Eine Gunn-Diode besteht meist aus Gallium-Arsenid (GaAs), Galliumnitrid (GaN) oder Indium-Phosphid (InP). Unter Ausnutzung des Gunn-Effekts werden Mikrowellen erzeugt. Es lassen sich Frequenzen von ca. 1,5 GHz bis 200 GHz erzeugen. Sie werden als

- Sender zur Mikrowellen-Datenübertragung,
- kleine Radargeräte
- und als Amateurfunksender

verwendet.

1.3 Schwingkreis

Ein **Gunn-Oszillator** ist ein Hohlleiter mit eingebauter Gunn-Diode:

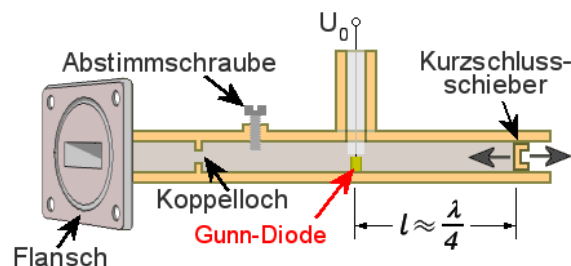


Abb. 4: Aufbau eines Gunn-Oszillators in Hohlraumresonator [10]

Man kann den Gunn-Oszillator als Schwingkreis mit einem Widerstand R , einer Kapazität C und einer Induktivität L betrachten:

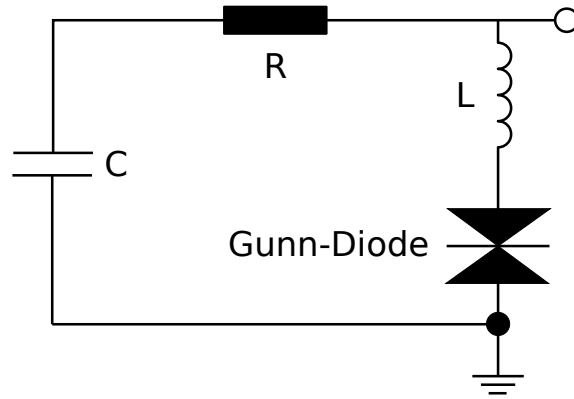


Abb. 5: Ersatzschaltbild der Gunn-Diode (Schwingkreis) (selbst erstellt)

Betrachtet man den Schwingkreis nun erst mal ohne der Gunn-Diode, so muss nach den Kirchhoff'schen Regeln gelten:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=0}^N U_i(t) = 0 \\
 \Leftrightarrow & U_R(t) + U_C(t) + U_L(t) = 0 \\
 \Leftrightarrow & R \cdot I + \frac{1}{C} \cdot Q(t) + L \cdot \frac{dI(t)}{dt} = 0 \quad \bigg| \cdot \frac{d}{dt} \\
 \Leftrightarrow & \boxed{R \cdot \frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot I(t) + L \cdot \frac{d^2 I(t)}{dt^2} = 0} \quad \text{DGL} \quad (1) \\
 & (2)
 \end{aligned}$$

Ansatz:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{(\alpha + i\omega)t} \quad (3)$$

Ableiten:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}(t) &= (\alpha + i\omega) \cdot I_0 \cdot e^{(\alpha + i\omega)t} \\
 \ddot{I}(t) &= (\alpha + i\omega)^2 \cdot I_0 \cdot e^{(\alpha + i\omega)t}
 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen in die DGL (1) erhält man:

$$\begin{aligned}
 & R \cdot (\alpha + i\omega) \cdot I_0 \cdot e^{(\alpha + i\omega)t} + \frac{1}{C} \cdot I_0 \cdot e^{(\alpha + i\omega)t} + L \cdot (\alpha + i\omega)^2 \cdot I_0 \cdot e^{(\alpha + i\omega)t} = 0 \quad \bigg| \cdot \frac{1}{I_0 \cdot e^{(\alpha + i\omega)t}} \\
 \Leftrightarrow & R \cdot (\alpha + i\omega) + \frac{1}{C} + L \cdot (\alpha + i\omega)^2 = 0
 \end{aligned}$$

Substitution: $s = a + i\omega$

$$\begin{aligned}
 \Leftrightarrow Ls^2 + Rs + \frac{1}{C} &= 0 \\
 s &= \frac{-R \pm \sqrt{R^2 - 4L\frac{1}{C}}}{2L} \\
 &= -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \\
 &= -\frac{R}{2L} \mp i^2 \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \\
 &= \underbrace{-\frac{R}{2L}}_{\alpha} + i \left(\underbrace{\mp \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}_{\omega} \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

(5)

Da nur ein positives ω Sinn macht, ist nun also

$$I(t) = I_0 \exp \left(\frac{R}{2L} + i \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \right) t \tag{6}$$

Damit das System anschwingen kann, darf die Dämpfung nicht zu groß sein. Also darf die Frequenz ω nicht imaginär sein:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} &\geq 0 \\
 \Leftrightarrow R^2 &\leq 4\frac{L}{C} \\
 \Leftrightarrow R &\leq 2\sqrt{\frac{L}{C}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Die Gunn-Diode ist hierbei das relevante Bauteil, um den Schwingkreis zum Schwingen anzuregen.

1.4 Hohlleiter

1.4.1 Exkurs: Hohlraumresonator

Leitet man eine elektromagnetische Welle senkrecht auf eine Fläche, so wird sie reflektiert. Stellt man nun in geeignetem Abstand parallel eine zweite Fläche auf, so entsteht eine stehende Welle. Werden noch seitliche Wände hinzugefügt, so spricht man vom Hohlraumresonator (**Ortsfestes** elektrisches und magnetisches Wechselfeld).

1.4.2 Hohlleiter

Hohlleiter sind Metallrohre mit meist rechteckigem Querschnitt. Sie dienen als Wellenleiter elektromagnetischer Wellen:

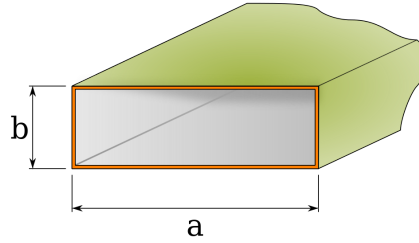


Abb. 6: Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt [11]

Meist werden mit ihnen Mikrowellen übertragen. Ein Vorteil gegenüber elektrischen Kabeln ist, dass die Übertragung mit Hohlleitern verlustärmer ist. Trifft die ebene Welle senkrecht auf die schmale Seite des rechteckigen Querschnitts, so wird sie zwischen beiden Wänden hin und her reflektiert. Beträgt der Abstand zwischen den beiden Wänden die Hälfte der Wellenlänge, also

$$a = \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

so entsteht eine stehende Welle. Verkleinert man nun den Abstand ein wenig, so breitet sich die Welle in einem speziellen Winkel aus (**Wanderwelle**).

Entspricht die Mindestbreite eines Rechteckhohlleiters etwa der Hälfte der halben Wellenlänge der ebenen Welle, so passt nur ein Schwingungsbau in Querrichtung hinein. So lässt sich aus der Breite des Hohlleiters auf die verwendete niedrigste Frequenz schließen. Die höchst mögliche übertragene Wellenlänge (bzw. niedrigst mögliche übertragene Frequenz) bezeichnet man als **kritische Wellenlänge** λ_c und berechnet sich mit

$$\lambda_c = 2a \quad (9)$$

Die Größe der Ausgangsblende bestimmt die Amplitude und Frequenz der ausgekoppelten Strahlung.

Passt also ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge zwischen die schmale Seiten

$$k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

so bezeichnet man die verschiedenen Zustände als sogenannte (**Schwingungs**)moden¹ H_{k0}

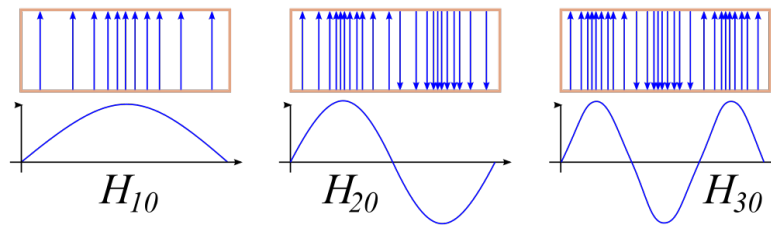


Abb. 7: Moden in einem Rechteckhohlleiter [11]

¹Elektrische und magnetische Feldlinien stehen immer senkrecht aufeinander: $\vec{E} \perp \vec{B}$

Steht das elektrische Feld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung $\vec{E} \perp \vec{v}$, spricht man von H-Moden (TE-Moden)

Steht das magnetische Feld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung $\vec{B} \perp \vec{v}$, spricht man von E-Moden (TM-Moden)

1.5 Hornantenne

Um Mikrowellen aus einem Hohlleiter möglichst reflexionsarm in den freien Raum abzustrahlen verwendet man eine Hornantenne:

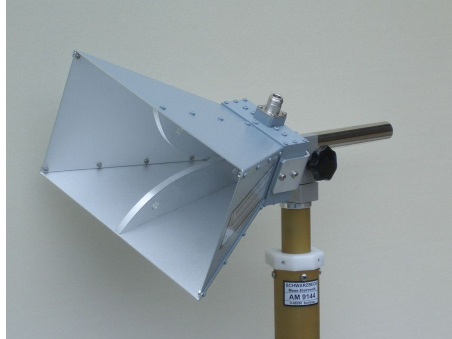


Abb. 8: Steghornstrahler [9]

Die Abstrahlcharakteristik ergibt folgendes Strahlungsdiagramm

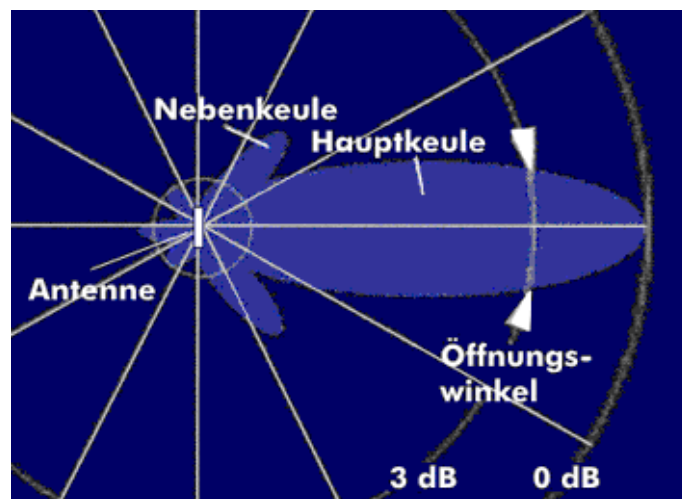


Abb. 9: Strahlungsdiagramm [2]

Die **Hauptkeule**, **Nebenkeule** sowie die **Rückkeule** sind durch die Bauart der Antenne bestimmt. Die Nebenkeulen sind unerwünscht, da sie den Hauptkeulen die Energie entziehen. Durch eine bestimmte Bauart der Antenne kann man sie jedoch auf ein Minimum reduzieren. Zudem kann man einen Parabolspiegel verwenden. Durch diesen wird die Strahlung besser fokussiert und die Strahlung der Nebenkeulen werden in die Richtung der Hauptkeule gerichtet.

1.6 Frequenzabhängigkeit

In diesem Versuch wird die Frequenz des Oszillators durch folgende drei Bauteile beeinflusst:

- Gunn-Diode: Die Länge der Gunn-Diode beeinflusst die Driftgeschwindigkeit der erzeugten Domänen und diese wiederum die Frequenz der so erzeugten Mikrowellenstrahlung.

- Hohlleiter: Wie in Kapitel 1.4 beschrieben, beeinflussen die Eigenschaften des Hohlleiters (z. B. Größe und Form des Querschnitts) die Ausbildung von Moden und damit die Ausbreitung von Mikrowellen
- Varactor-Diode²: Mit dieser wird die Kapazität des Schwingkreises und somit die Frequenz des Oszillators variiert. Dies geschieht über das Variieren der an der Varactor-Diode angelegten Spannung

1.7 Frequenzmischung

Die **Schottky-Diode** ist ein nichtlineares Halbleiterbauelement, das bei diesem Versuch zur Frequenzmischung dient. Die Kennlinie der Schottky-Diode hat eine exponentielle Gestalt:

$$I(U) = e^{\alpha U} \quad (11)$$

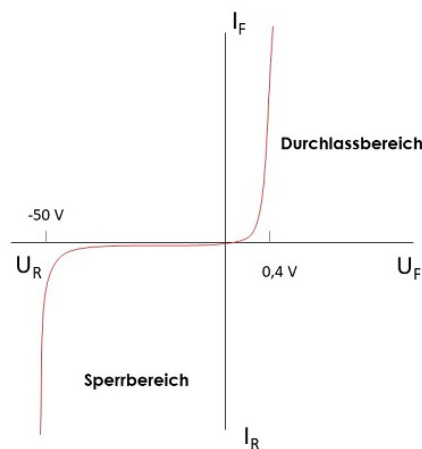


Abb. 10: Kennlinie einer Schottky-Diode [4]

Werden an diese Diode nun zwei zu mischende Wechselspannungen

$$U_1(t) = \tilde{U} \sin(\omega_1 t)$$

$$U_2(t) = \tilde{U} \sin(\omega_2 t)$$

angelegt, so werden diese addiert

$$\begin{aligned} U(t) &= U_1(t) + U_2(t) \\ &= \tilde{U} \sin(\omega_1 t) + \tilde{U} \sin(\omega_2 t) \end{aligned}$$

und man erhält man die zeitabhängige Stromstärke

$$\begin{aligned} I(t) &= e^{\alpha U} \\ &\stackrel{\text{TE}}{\approx} 1 + \alpha \cdot U(t) + \frac{1}{2} \cdot \alpha^2 \cdot U(t)^2 + \dots \\ &= \dots \\ &= \tilde{I} \left[1 + \alpha \cdot \tilde{U} \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right) + \dots \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Daraus kann man dann $\omega_1 + \omega_2$ und $\omega_1 - \omega_2$ leicht ablesen.

²vgl. Kondensator mit veränderlicher Kapazität

1.8 Bandpass

Ein Bandpass vereint Hoch- und Tiefpass, wie man in folgender Abbildung insbesondere unten rechts leicht erkennen kann:

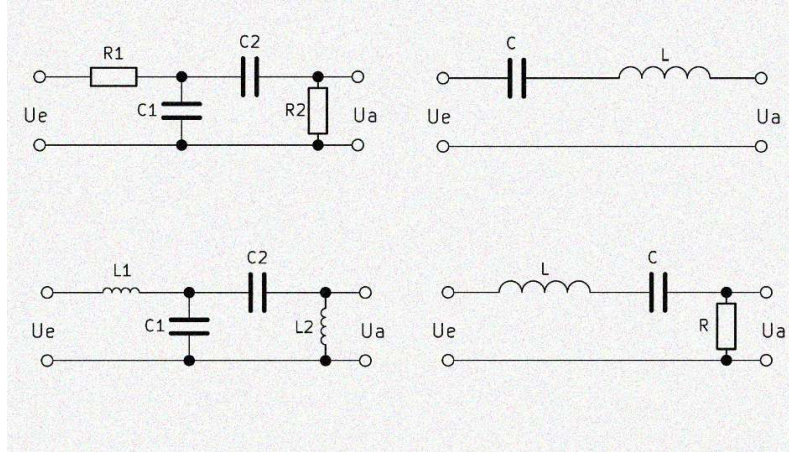


Abb. 11: oben links: Passiver Bandpass 1. Ordnung, Oben rechts: LC Bandpass 1. Ordnung, Unten links: Passiver Bandpass 2. Ordnung, Unten rechts: RLC Bandpass (typisch) [1]

Er lässt also nur ein bestimmtes Band eines Frequenzspektrums passieren und schwächte die anderen Bereiche ab:

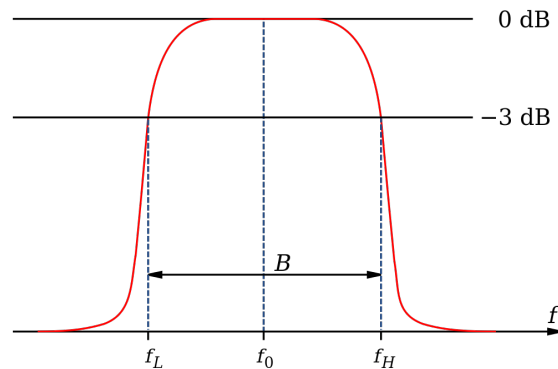


Abb. 12: Bandweite und Mittenfrequenz eines Bandpasses [7]

Somit hat ein Bandpass eine Mittenfrequenz, die als geometrisches Mittel von f_H und f_L definiert ist: Die **Mittenfrequenz** f_0 bezeichnet den geometrischen Mittelwert aus beiden:

$$f_0 = \sqrt{f_H f_L} \quad (13)$$

Für die Bandbreite B gilt:

$$B = f_H - f_L \quad (14)$$

Die **Grenzfrequenz** f_G bezeichnet die Frequenzen, bei denen das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsspannung

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 70,7\% \quad (15)$$

bzw.

$$20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \text{ dB} \approx -3,01 \text{ dB} \quad (16)$$

beträgt.

1.9 Spektralanalysator

Ein Spektralanalysator (auch Spektrumanalysator) ist ein Messgerät zur Darstellung eines Signals im Frequenzbereich, im Gegensatz zum Oszilloskop³.

Der Sägezahn-generator erzeugt ein Sägezahnsignal. Dieses steuert den LO (Lokaloszillator) an. Der Lokaloszillator liefert dann die Frequenz, welche dann durch den Mischer mit der Eingangsfrequenz vermischt wird. Man spricht dann vom sogenannten Zwischenfrequenzsignal (ZF-Signal). Dieses wird durch den ZF-Verstärker verstärkt. Der ZF-Filter filtert die oberen und unteren Frequenzen raus, damit auch wirklich nur die mittleren Frequenzen vorliegen. Um die Dynamik zu vergrößern und eine Übersteuerung zu vermeiden, kommt das verstärkte Zwischenfrequenzsignal nun zu einem Logarithmierer. Der Hüllkurvendetektor bzw. -demodulator bildet dann das Amplitudensignal. Der Videofilter ist ein Tiefpassfilter. Er mittelt das Amplitudenspektrum und reduziert dadurch das Rauschen. Das Signal wird dann durch die Anzeige angezeigt.

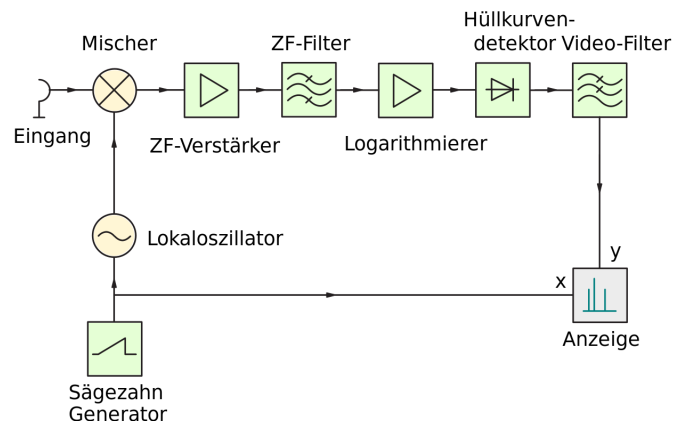


Abb. 13: Vereinfachtes Blockschaftbild eines Spektrumanalysators [12]

Die spektrale Breite des LO-Signals beeinflusst die spektrale Breite des ZF-Signals und damit die Auflösungsgrenze **RBW** (engl. „Resolution Band Width“). Letztendlich wird das Spektrum durch einen Abgleich mit dem LO-Signal, dessen Parameter aufgrund des Sägezahn-Generators bekannt sind, berechnet.

1.10 Radargleichung

Die **Radar(grund)gleichung** stellt die vom Empfänger registrierte Leistung in Abhängigkeit von der Sendeleistung, der Entfernung und den Eigenschaften des reflektierenden Objektes dar.

3

Spektralanalysator: Abszisse: Frequenzachse, Ordinate: Amplitude
Oszilloskop: Abszisse: Zeitachse, Ordinate: Amplitude

Bei der Herleitung werden folgende Größen verwendet:

P_S : Sendeleistung

P_r : Reflektierte (Strahlungs)leistung

S_u : Ungerichtete Leistungsdichte⁴

S_g : Gerichtete Leistungsdichte

S_E : Empfangene Leistungsdichte

G_S : Antennengewinn der Sendeantenne

G_E : Antennengewinn der Empfängerantenne

D : Richtwirkung

η : Wirkungsgrad (bzw. antennenspezifischer Faktor K_a)

σ : Effektive Reflexionsfläche (engl. „radar cross section“= RCS)

A_w : Wirksame Antennenfläche

R_S : Entfernung Sendeantenne - reflektierendes Objekt

R_E : Entfernung reflektierendes Objekt - Empfangsantenne

λ : Verwendete Wellenlänge

Herleitung: Als Quelle wird hierfür [3] verwendet

Durch die Strahlungsdivergenz wird die Leistungsdichte S an der Fläche A mit steigendem Abstand r geringer. Zuerst wird von einem isotropen Kugelstrahler ausgegangen. D. h. von einem Körper, der in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlt. Also haben Kugelschalen um den Mittelpunkt gleiche Leistungsdichte. Es gilt also:

$$S_u = \frac{P_S}{4\pi \cdot R_S^2} \quad (17)$$

Die Leistungsdichte nimmt also quadratisch mit dem Abstand vom Sender ab.

Durch die Richtwirkung der Antenne⁵ wird die Abstrahlung auf eine Kugelteilfläche begrenzt. Es ergibt sich also in Abstrahlrichtung eine Erhöhung der Leistungsdichte (**Antennengewinn**):

$$S_g = G \cdot S_u \quad (18)$$

In Betracht der effektiven Reflexionsfläche gilt:

$$P_r = S_g \cdot \sigma \quad (19)$$

Im Folgenden wird das reflektierende Objekt (z. B. Auto, Flugzeug) auch als Sender betrachtet. Es gilt also analog zum Hinweg:

$$S_E = \frac{P_r}{4\pi \cdot R_E^2} \quad (20)$$

Da nicht die gesamte Fläche der Antenne als Empfangsfläche zur Verfügung steht, funktioniert eine reale Antenne nicht verlustfrei:

$$\eta = \frac{A_w}{A} \quad (21)$$

An der Empfangsantenne gilt:

$$P_E = S_E \cdot A_w \quad (22)$$

⁵eine reale Antenne sendet ja - im Gegensatz zum isotropen Kugelstrahler - nicht in alle Richtung gleichmäßig ab

Durch schrittweises Einsetzen der jeweiligen Formeln ergibt sich:

$$P_E = S_E \cdot A_w \quad (23)$$

$$\stackrel{20}{=} \frac{P_r}{4\pi \cdot R_E^2} \cdot A_w$$

$$\stackrel{21}{=} \frac{P_r}{4\pi \cdot R_E^2} \cdot A \cdot \eta$$

$$\stackrel{19}{=} \frac{S_G \cdot \sigma}{4\pi \cdot R_E^2} \cdot A \cdot \eta$$

$$\stackrel{18}{=} \frac{G_S \cdot S_u \cdot \sigma}{4\pi \cdot R_E^2} \cdot A \cdot \eta$$

$$\stackrel{17}{=} \frac{G_S \cdot \frac{P_S}{4\pi \cdot R_S^2} \cdot \sigma}{4\pi \cdot R_E^2} \cdot A \cdot \eta \quad (24)$$

Nebenrechnung: Es wird versucht das Produkt $A \cdot \eta$ durch die Wellenlänge auszudrücken:

Die Richtwirkung D gibt das Verhältnis der Leistungsdichte einer realen Antenne in ihre Hauptrichtung zur Leistungsdichte des isotropen Kugelstrahler an:

$$\begin{aligned} D &= \frac{S}{S_i} \\ &= \frac{A_{\text{Kugel}}}{A_w} \\ &= \dots \\ &= \frac{4\pi \cdot A_w}{\lambda^2} \end{aligned}$$

Der Antennengewinn ist um den Faktor des Wirkungsgrades kleiner als die Richtwirkung (aufgrund des ohmschen Widerstandes, ...):

$$G = \eta \cdot D \quad (25)$$

Einsetzen dieser Formeln liefert:

$$\begin{aligned} G &= \eta \cdot D \\ &\stackrel{25}{=} \eta \cdot \frac{4\pi \cdot A_w}{\lambda^2} \\ \Leftrightarrow A \cdot \eta &= \frac{G_E \cdot \lambda^2}{4\pi} \end{aligned} \quad (26)$$

Setzt man diese Formel in (24) ein, so ergibt sich:

$$P_E = P_S \cdot \frac{G_S \cdot G_E \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R_S^2 \cdot R_E^2} \quad (27)$$

1.11 Geschwindigkeitsmessung

Die Geschwindigkeitsmessung bei einem Doppler-Radar basiert auf dem **Doppler-Effekt**. Dieser besagt, dass Signale bei Veränderung des Abstands zwischen Sender und Empfänger gestaucht oder gedehnt werden. Die empfangene Frequenz ist also dann unterschiedlich zur gesendeten Frequenz:

$$f_E = f_S \cdot \left(1 \pm \frac{v_r}{c}\right) \quad (28)$$

Da beim Radar zwei mal der Doppler Effekt auftritt, erhält man nun für die Doppler-Frequenz⁶:

$$\begin{aligned}
 f_D &= 2 \cdot (f_E - f_S) \\
 &= 2 \cdot f_S \cdot \frac{v_r}{c} \\
 &= 2 \cdot f_S \cdot \frac{v_t \cdot \cos \alpha}{c}
 \end{aligned} \tag{29}$$

wobei:

f_E : Empfangene Frequenz

f_S : Gesendete Frequenz

v_r : Radialgeschwindigkeit

v_t : Tatsächliche Geschwindigkeit

α : Winkel zwischen Fahrzeugachse (senkrecht zur Fahrtrichtung) und Strahlungsrichtung des Senders (s. Abb. 14)

c : Lichtgeschwindigkeit

$+$: Falls sich Objekt auf Sender zu bewegt

$-$: Falls sich Objekt vom Sender weg bewegt

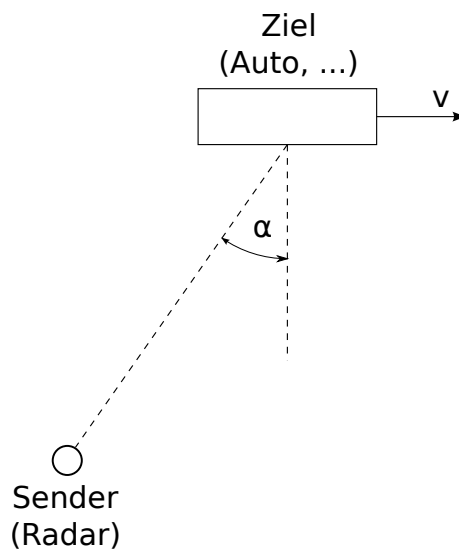


Abb. 14: Skizze zur Bedeutung des Winkels α . (selbst erstellt)

An der Schottky-Diode wird das Signal dann gemischt und man erhält die Doppler-Frequenz f_D . Daraus lässt sich dann die Geschwindigkeit bei bekannten Winkel α berechnen:

$$v_t = \frac{c \cdot f_D}{2 \cdot f_S \cdot \cos(\alpha)} \tag{30}$$

1.12 Entfernungsmessung

Bei der Entfernungsmessung wird die Zeit gemessen, die die Strahlung benötigt, um vom Sender zum Zielobjekt (Auto, Flugzeug, ...) zu gelangen und dann durch Reflexion wieder am Empfänger anzukommen. Das Dauerstrichsignal des Gunn-Oszillators wird kurzzeitig durch die Varactor-Diode verändert. Dazu wird für kurze Zeit eine höhere Frequenz ausgestrahlt. Das Zielobjekt (Auto, Flugzeug, ...) reflektiert die höherfrequente Strahlung. Aus der Zeit, die das Wellenpaket benötigt um wieder zum Empfänger zurückzukehren, kann nun berechnet werden, wie weit das Zielobjekt

⁶also die Frequenzdifferenz

entfernt ist. Es gilt also:

$$\begin{aligned} v &= \frac{2 \cdot d_{\min}}{t_P} \\ \Leftrightarrow d_{\min} &= \frac{1}{2} \cdot t_P \cdot c \end{aligned} \quad (31)$$

wobei:

t_P : Pulsdauer

$d_{\min}$: Minimal messbare Reichweite

Der Faktor 2 muss berücksichtigt werden, da der Puls zuerst vom Sender zum Zielobjekt läuft und dann von Zielobjekt zum Empfänger. Das in diesem Versuch verwendete Radar hat eine Pulsdauer von $t_P = 0,5 \text{ } \mu\text{s}$. Dadurch folgt ein Mindestabstand von

$$\begin{aligned} d_{\min} &= \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ &\approx 75 \text{ m} \end{aligned}$$

1.13 Radargerät

Das Radargerät besteht im Wesentlichen aus den zwei Komponenten Sendeeinheit und Empfangseinheit. Die Sendeeinheit besteht aus der Gunn-Diode und der Varactor-Diode und dient schließlich für Erzeugung des Signals. Die Empfangseinheit empfängt die nach der Reflexion wiederkehrende Signal und wird nach der Schottky-Diode über den Hohlleiter weitergeleitet. Anschließend werden die Daten verarbeitet. Es wird die Geschwindigkeit bzw. Entfernung berechnet (je nach Einstellung). Diese werden letztendlich am Display angezeigt.

- Sendeteil
 - Mikrokontrollereinheit
 - Gunn-Diode
 - Varactor-Diode
- Empfangsteil
 - Hohlleiter
 - Schottky-Diode
 - Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung
 - Mikrokontroller
 - Display

1.14 Frequenzschwankungen

Der Gunn-Oszillator ist nicht frequenzstabilisiert. Die Frequenz schwankt also um einige 10 kHz. Unter der Annahme, dass

- sich die Zielobjekte mit der Geschwindigkeit $50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bewegen und
- der Gunn-Oszillator bei einer Frequenz von 10,6 GHz abstrahlt,

folgt für die Doppler-Frequenz nach (29):

$$\begin{aligned} f_D &= 2 \cdot 10,6 \cdot 10^9 \frac{1}{s} \cdot \frac{50 \frac{m}{s} \cdot \cos(0^\circ)}{2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}} \\ &\approx 3,5 \text{ kHz} \end{aligned}$$

Da für die Abweichung der Doppler-Frequenz

$$\begin{aligned} \Delta f_D &= 2 \cdot \frac{v \cdot \cos(\alpha)}{c} \cdot \Delta f_S \\ &= 2 \cdot \frac{50 \frac{m}{s} \cdot \cos(0^\circ)}{2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}} \cdot 20 \cdot 10^3 \frac{1}{s} \\ &\approx 6,6 \text{ mHz} \end{aligned}$$

gilt, folgt, dass sich die Schwankung des Gunn-Oszillator um einige 10 kHz erst im Millihertzbereich bemerkbar macht. Somit ist dieser Effekt vernachlässigbar.

2 Durchführung

Das Hauptziel der folgenden Experimente ist es, ein ausreichendes Verständnis dafür zu erlangen, wie man eine Gunn-Diode antreibt, um hochfrequente elektromagnetische Strahlung zu erzeugen und mehr über die möglichen Anwendungen zu erfahren, indem wir viele Komponenten eines Radars charakterisieren, das am Ende unserer Tests verwendet wird, um die Geschwindigkeit einiger Autos zu bestimmen, was das perfekte Beispiel für eine reale Anwendung ist.

2.1 Kennlinie der Gunn-Diode

In der ersten Messreihe haben wir gemessen, wie die Spannungs-Strom-Leitung der Gunn-Diode verläuft. Um eine gewisse Hysterese nicht zu übersehen, haben wir sowohl von 0 bis 11 Volt als auch von 11 bis 0 Volt gemessen.

2.1.1 Ergebnisse

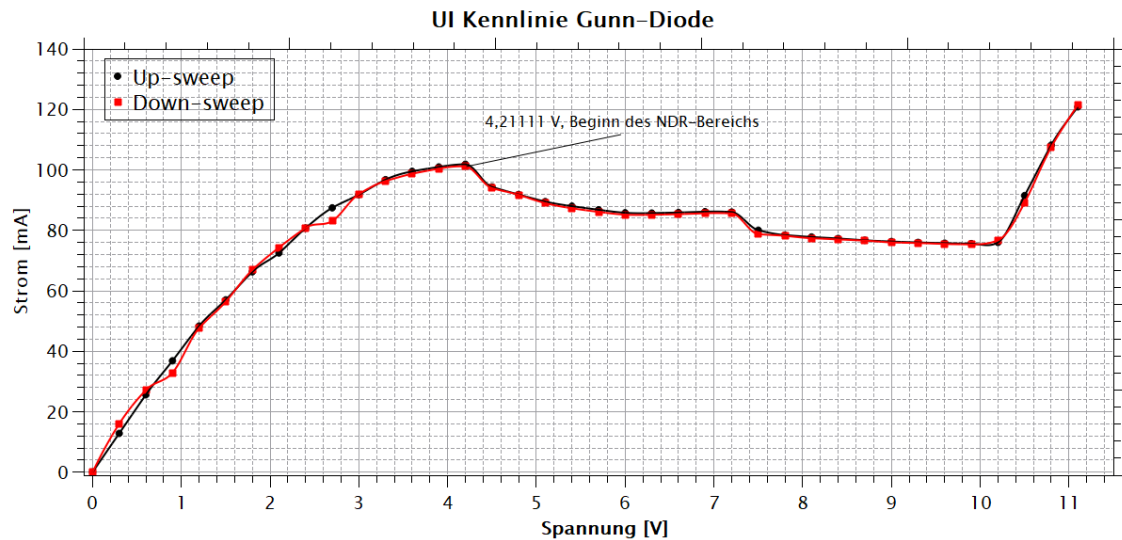


Abb. 15: UI Kennlinie der Gunn-Diode. Die x-Achse zeigt die Spannung in Volt. Die y-Achse zeigt den Strom in mA.

Die Messungen zeigen deutlich, dass der NDR-Bereich der in diesem Experiment verwendeten Diode von etwa 4,2 V bis 10 V reicht.

Wie man in der Grafik sehen kann, sind die Up-Sweep- und Down-Sweep-Kurven fast perfekt aufeinander abgestimmt, so dass bei der uns zur Verfügung stehenden Diode keine Hysterese beobachtet wurde.

2.2 Spannungsabhängigkeit der Ausgangsfrequenz

Nach der Bestimmung des NDR-Bereichs der verwendeten Gunn-Diode haben wir weitere Informationen über die tatsächliche Abstrahlung der Diode gesammelt: Das Ausgangssignal der Diode wurde über eine Antenne in ein Spektrometer eingespeist, das dann das detektierte Spektrum anzeigte, um die Werte von Frequenz, Intensität und Schärfe des Signals zu speichern. Die Spannung wurde dann variiert (zwischen Werten innerhalb des NDR-Bereichs), um zu beobachten, wie die Spannungsänderungen das Spektrum der Diode beeinflussen. Es ist zu beachten, dass die folgenden Messungen am Ausgang einer in einem Resonator eingeschlossenen Diode durchgeführt wurden. Die Werte für die einfache Diode können abweichen.

2.2.1 Ergebnisse

Obwohl wir keine signifikante Änderung der Intensität oder der Schärfe des vom Spektrometer angezeigten Peaks beobachten konnten, gab es einige leichte Schwingungen in der Frequenz der Strahlung. Die Werte sind in der folgenden Grafik dargestellt.

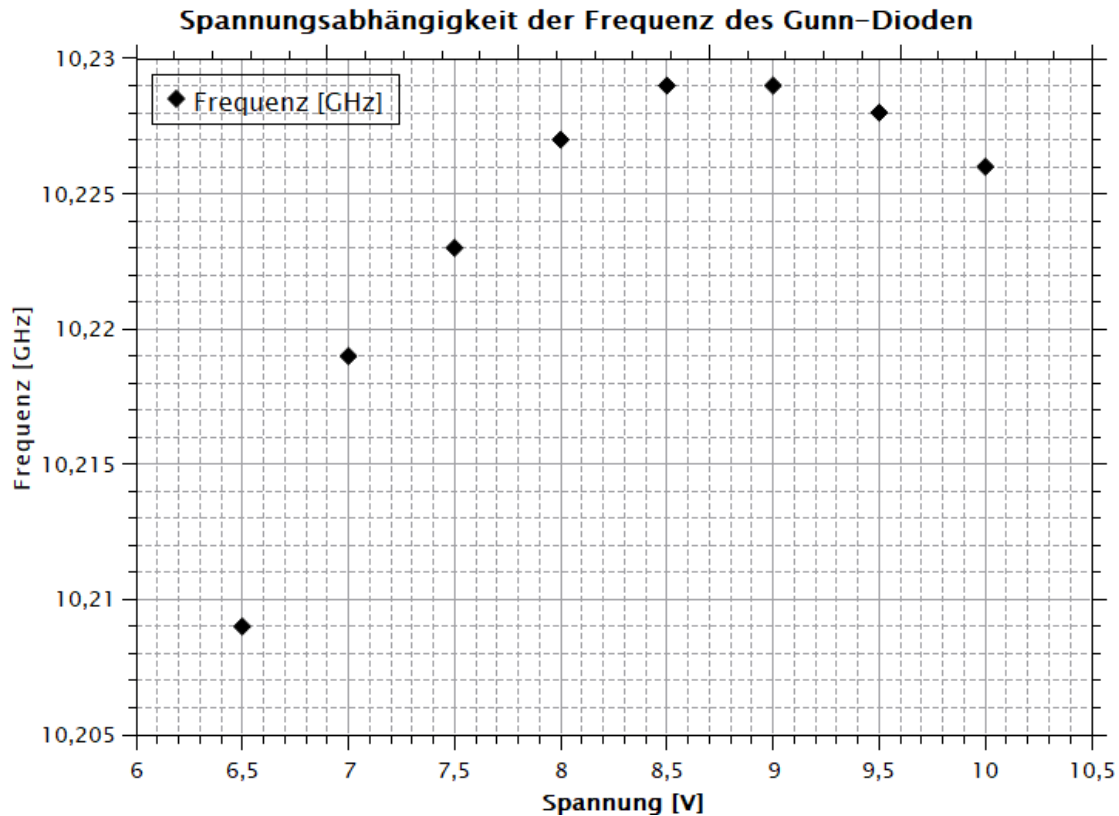


Abb. 16: Frequenz in Abhängigkeit von der Spannung bei der Gunn-Diode. Die x-Achse zeigt die Spannung in Volt. Die y-Achse zeigt die Frequenz in GHz.

2.3 Charakterisierung der Hornantenne

Nachdem wir unsere Diode hinreichend charakterisiert hatten, gingen wir dazu über, Informationen über eine der wichtigsten Komponenten unseres Radaraufbaus zu sammeln, unsere Hornantenne, die später als Signalkollektor bzw. Signalsender dienen wird. Um ihre Fähigkeiten zu bestimmen, maßen wir die Intensitätsschwankungen des gestrahltes Signals in Bezug auf den Winkel zwischen der Hauptachse der Hornantenne und dem Empfänger.

2.3.1 Ergebnisse

Das folgende Polardiagramm zeigt die Ergebnisse unserer Messungen: In dieser Darstellung steht der 90°-Winkel für die Konfiguration, bei der der Empfänger direkt auf der Hauptachse der Hornantenne liegt.

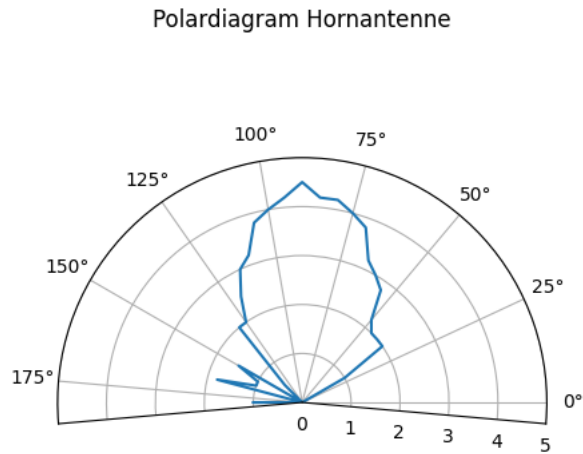


Abb. 17: Polarplot der Signalintensität, Hornantenne

Wie man im Diagramm sehen kann, trägt die Hornantenne dazu bei, dass das Signal bei einem Winkel von $\pm 15^\circ$ um die Hauptachse und bei einem weiten Winkel (fast $\pm 30^\circ$ um die Hauptachse) relativ wenig verloren geht. Das Diagramm gibt auch einige Hinweise auf Winkel, in denen theoretisch kein Signal von der Hornantenne empfangen werden sollte: Wir haben festgestellt, dass diese Ausschläge durch Wellenreflexionen an der Wand des Labors verursacht werden.

2.4 Frequenzmischung

Das endgültige Radarsetup verwendet eine Schottky-Diode, um das ausgestrahlte Signal mit dem empfangenen Signal zu mischen (das von einem sich bewegenden Objekt reflektiert wird und daher dopplerverschoben ist), um eine Ausgangsfrequenz von $|f_{\text{in}} - f_{\text{out}}|$ zu erhalten, die Informationen über die Geschwindigkeit des reflektierten Objekts enthält. Die Geschwindigkeit kann dann mit Hilfe der Radargleichung, wie in Abschnitt 1.11 beschrieben, bestimmt werden. Um die Fähigkeiten der im Aufbau verwendeten Mischschaltung zu testen, wurde das Signal von zwei verschiedenen Gunn-Dioden in die Schaltung eingespeist und die Ausgabe mit Hilfe eines Spektrometers gemessen. Die von den beiden Dioden emittierten Frequenzen sind $f_1 = 10,234 \text{ GHz}$ und $f_2 = 9,395 \text{ GHz}$, was eine theoretische Frequenz f_{mix} von 839 MHz ergibt. Es wurde eine Frequenz f_{mix} von 832 MHz gemessen, was gut mit dem theoretischen Wert übereinstimmt.

2.5 Messung der Geschwindigkeit eines Autos mit der Radartechnik

Zum Abschluss der Versuchsreihe zur Radartechnik wurde eine Gunn-Diode mit einer Hornantenne als Wellenleiter vor einem Parabolspiegel auf einem Stativ montiert und an der nächsten Straße Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt.

Die Parabolantenne und die Hornantenne werden verwendet, um die EM-Welle zu leiten und um die Welle aufzufangen, wenn sie von einem sich bewegenden Objekt reflektiert wird.

Das Referenzsignal und das eingefangene Signal werden dann in den Mischkreis geleitet, dessen Ausgang von einem Ad-hoc-Messgerät ausgewertet wird, das die gemessene Radialgeschwindigkeit des bewegten Objekts ausgibt.

Ausführlichere Informationen finden Sie in den Abschnitten 1.10 bis 1.14.

2.5.1 Ergebnisse

2.5.2 Fehlerberechnung

Es ist sinnvoll, vor der Auswertung der Messungen zu ermitteln, mit welchem Messfehler bei der linearen Geschwindigkeit gerechnet werden kann. Da wir wissen, dass $v_{\text{lin}} = \frac{v_{\text{rad}}}{\cos(\alpha)}$, wird unser Fehler vom Messfehler des Winkels und dem Messfehler der Radialgeschwindigkeit abhängen. Die Messungen werden an demselben fahrenden Auto für verschiedene Winkel durchgeführt. Da jede Messung sehr schnell sein wird, werden wir einen signifikanten Fehler bei der Bestimmung des Winkels zwischen der Signalquelle und dem fahrenden Auto haben. Für die Versuche wird ein Fehler für α von $\Delta\alpha = \pm 2^\circ$ angenommen. Für die Radialgeschwindigkeit wird ein Messfehler von mindestens $\pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ angenommen. Mit Hilfe einiger grundlegender Differenzierungsregeln kann man das zeigen:

$$\begin{aligned}\Delta v_{\text{lin}}(v_{\text{rad}}, \alpha) &= \left| \frac{\partial v_{\text{lin}}}{\partial v_{\text{rad}}} \right| \cdot \Delta v_{\text{rad}} + \left| \frac{\partial v_{\text{lin}}}{\partial \alpha} \right| \cdot \Delta \alpha \\ &= \frac{\Delta v_{\text{rad}}}{\cos(\alpha)} + \frac{\sin(\alpha)}{\cos^2(\alpha)} \cdot \Delta \alpha\end{aligned}\quad (32)$$

2.6 Gemessene Geschwindigkeit

Obwohl in der Grafik deutlich zu sehen ist, dass wir nicht besonders erfolgreich waren, um saubere Daten zu sammeln, haben wir einen angenäherten Wert für die gemessene Geschwindigkeit von $24 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ erhalten.

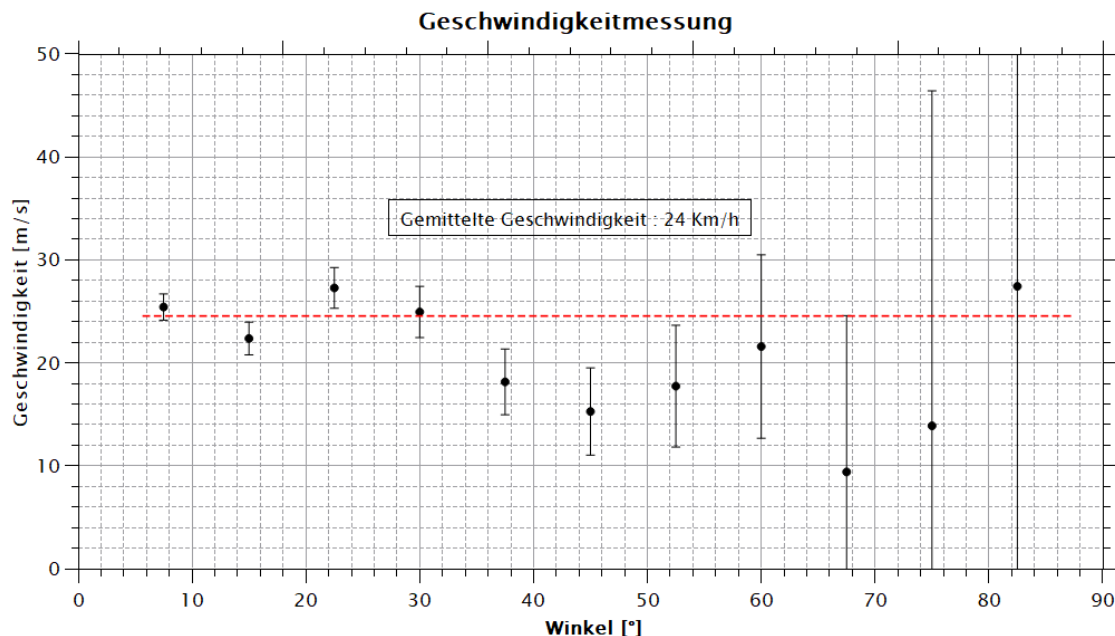


Abb. 18: Geschwindigkeit eines Autos in Abhängigkeit vom Winkel. Die x-Achse zeigt den Winkel in Grad. Die y-Achse zeigt die Geschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Da die Messungen auf einer Straße mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ durchgeführt wurden, gehen wir davon aus, dass die gemessene Geschwindigkeit realistisch ist und die Messung daher erfolgreich ist. Als Grund für die schlechten Messwerte vermuteten wir, dass die gemessenen Fahrzeuge keine konstante Geschwindigkeit einhielten, da fast alle langsamer wurden, als sie

die Parabolantenne sahen, vielleicht aus Neugier oder weil sie vermuteten, dass es sich um eine gesetzlich vorgeschriebene Geschwindigkeitsmessung handelte.

3 Fazit

Die Versuchsreihen, die wir in dieser Laborsitzung besprochen und durchgeführt haben, waren sowohl spannend als auch erfolgreich. Obwohl der quantenmechanische Hintergrund der Funktionsweise einer Gunn-Diode für die Durchführung dieser Experimente nicht unbedingt erforderlich war, ist er sicherlich faszinierend und eine tiefere Erforschung wert. Eine weitere interessante Erkenntnis, die durch diese Erfahrung gewonnen werden kann, ist die Tatsache, dass heutzutage wirklich präzise Messgeräte dank Halbleiter-Technik relativ preiswert erworben werden können.

Abbildungsverzeichnis

1	Bandstruktur von GaAs bei 300 K [6]	2
2	Negativer differentieller Widerstand (NDR) [5]	2
3	Zum Vergleich: Fünf Kennlinien anderer elektronischer Bauelemente [8]	3
4	Aufbau eines Gunn-Oszillators in Hohlraumresonator [10]	3
5	Ersatzschaltbild der Gunn-Diode (Schwingkreis) (selbst erstellt)	4
6	Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt [11]	6
7	Moden in einem Rechteckhohlleiter [11]	6
8	Steghornstrahler [9]	7
9	Strahlungsdiagramm [2]	7
10	Kennlinie einer Schottky-Diode [4]	8
11	oben links: Passiver Bandpass 1. Ordnung, Oben rechts: LC Bandpass 1. Ordnung, Unten links: Passiver Bandpass 2. Ordnung, Unten rechts: RLC Bandpass (typisch) [1]	9
12	Bandweite und Mittenfrequenz eines Bandpasses [7]	9
13	Vereinfachtes Blockschaltbild eines Spektrumanalysators [12]	10
14	Skizze zur Bedeutung des Winkels α . (selbst erstellt)	13
15	UI Kennlinie der Gunn-Diode. Die x-Achse zeigt die Spannung in Volt. Die y-Achse zeigt den Strom in mA.	16
16	Frequenz in Abhängigkeit von der Spannung bei der Gunn-Diode. Die x-Achse zeigt die Spannung in Volt. Die y-Achse zeigt die Frequenz in GHz.	17
17	Polarplot der Signalintensität, Hornantenne	18
18	Geschwindigkeit eines Autos in Abhängigkeit vom Winkel. Die x-Achse zeigt den Winkel in Grad. Die y-Achse zeigt die Geschwindigkeit in $\frac{m}{s}$	19

Literaturverzeichnis

- [1] Electronicbase. Bandpass berechnen – funktionsweise, formel, bandpass rechner. <https://electronicbase.net/de/bandpass-berechnen/>, 2021. (Aufgerufen 05.08.2021).
- [2] ITWissen.info. Richtantenne. <https://www.itwissen.info/Richtantenne-directional-antenna.html>, 2021. (Aufgerufen 04.08.2021).
- [3] Radartutorial. Die Radargrundgleichung. <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Die%20Radargleichung.de.html>, 2021. (Aufgerufen 04.08.2021).
- [4] RS Online. Schnell und effizient: Schottky dioden. <https://de.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideen-und-tipps/schottky-dioden-leitfaden>, 2021. (Aufgerufen 05.08.2021).
- [5] Wikibooks, Open books for an open world. Circuit idea/negative differential resistance. https://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Negative_Differential_Resistance, 2021. (Aufgerufen 04.08.2021).
- [6] Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Gunn-Effekt. <https://de.wikipedia.org/wiki/Gunn-Effekt>, 2017. (Aufgerufen 04.08.2021).
- [7] Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Bandpass. <https://de.wikipedia.org/wiki/Bandpass>, 2019. (Aufgerufen 03.08.2021).
- [8] Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Differentieller Widerstand. https://de.wikipedia.org/wiki/Differentieller_Widerstand, 2019. (Aufgerufen 03.08.2021).
- [9] Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Hornstrahler. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hornstrahler>, 2019. (Aufgerufen 03.08.2021).
- [10] Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Gunndiode. <https://de.wikipedia.org/wiki/Gunndiode>, 2021. (Aufgerufen 04.08.2021).
- [11] Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Hohlleiter. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hohlleiter>, 2021. (Aufgerufen 03.08.2021).
- [12] Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Spektrumanalysator. <https://de.wikipedia.org/wiki/Spektrumanalysator>, 2021. (Aufgerufen 04.08.2021).