

Bestimmung der Strom- und Spannungsmaxima an einer Lecher-Leitung

Versuchsziele

- Erzeugung stehender Dezimeterwellen auf einer *Lecher*-Leitung mit kurzgeschlossenem Ende, mit offenem Ende und mit angepaßtem Abschluß.
- Bestimmung der Wellenlänge λ aus den Abständen der Strom- und Spannungsmaxima.

Grundlagen

Zur Untersuchung der Ausbreitung elektromagnetischer Schwingungen schlug *E. Lecher* 1890 eine Anordnung aus zwei parallel geführten runden Drähten vor. Bei Einstrahlung eines hochfrequenten elektromagnetischen Feldes in eine solche *Lecher*-Leitung pflanzt sich eine Spannungswelle

$$U = U_0 \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (I)$$

mit $\omega = 2\pi\nu$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

in Drahrichtung x fort, deren Frequenz ν und Wellenlänge λ mit denen des eingestrahlichten elektromagnetischen Feldes übereinstimmen.

Lecher-Leitung mit kurzgeschlossenem Ende:

Sind die beiden Drähte am Ende der *Lecher*-Leitung kurzgeschlossen, so hat dort die Spannung U den Wert Null. Es entsteht eine reflektierte Welle, die gegenüber der einlaufenden Welle um 180° phasenverschoben ist. Zu einer von links nach rechts einlaufenden Spannungswelle

$$U_1 = U_0 \cdot \sin(\omega t - kx)$$

und einer Kurzschlußbrücke an der Stelle $x = 0$ gehört z. B. die reflektierte Welle

$$U_2 = -U_0 \cdot \sin(\omega t + kx).$$

Beide überlagern sich zu einer stehenden Welle

$$U = U_1 + U_2 = -2 \cdot U_0 \cdot \sin kx \cdot \cos \omega t \quad (II).$$

Der Spannung zwischen den Drähten entspricht eine Ladungsverteilung längs der Drähte, deren Verschiebung einen sich wellenförmig ausbreitenden Strom I durch die Drähte liefert. An der Kurzschlußbrücke muß dauernd ein Strom fließen. Die einlaufende Stromwelle

$$I_1 = I_0 \cdot \sin(\omega t - kx)$$

wird also ohne Phasensprung reflektiert, d. h. die reflektierte Stromwelle hat die Form

$$I_2 = I_0 \cdot \sin(\omega t + kx).$$

Beide überlagern sich zu der stehenden Welle

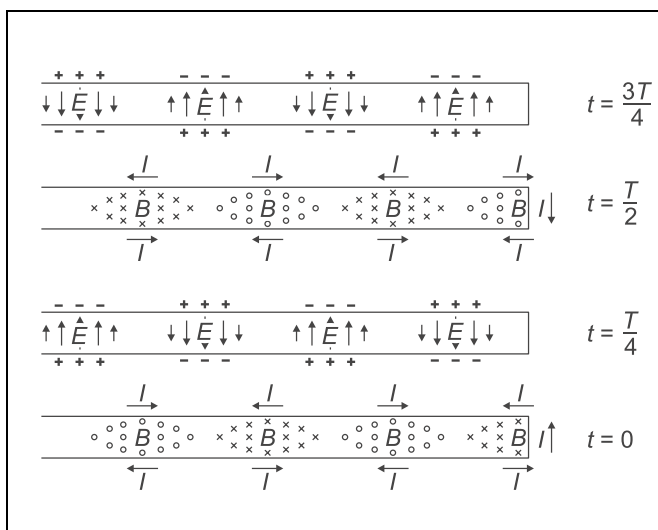
$$I = I_1 + I_2 = 2 \cdot I_0 \cdot \cos kx \cdot \sin \omega t \quad (III).$$

Die Gln. (II) und (III) zeigen, daß die Schwingungsknoten der Spannungswelle gerade den Schwingungsbäuchen der Stromwelle und die Schwingungsbäuche der Spannungswelle gerade den Schwingungsknoten der Stromwelle entsprechen. Dabei liegen die Spannungsknoten an den Stellen

$$x = 0, -\frac{\lambda}{2}, -\lambda, -\frac{3\lambda}{2}, \dots \quad (IV),$$

also um ein Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$ vor dem Drahtende.

Stehende elektromagnetische Wellen auf der *Lecher*-Leitung und zugehörige Ströme I und Ladungen (+,-) auf den Drähten.



Geräte

1 Dezimeterwellensender	587 55
1 Steckernetzgerät 230 V/12 V	562 791
1 Lecher-System mit Zubehör	587 56
1 Rollbandmaß, 2 m	311 77
3 Sockel	300 11

Nachweis stehender Wellen:

Im Versuch wird die Ausbreitung von Dezimeterwellen ($\nu = 433,92$ MHz) auf einer *Lecher*-Leitung untersucht.

Zum Nachweis der stehenden Spannungswelle dient ein Tastkopf bestehend aus zwei Leiterstücken, zwischen denen eine Glühlampe angeschlossen ist und die in festem Abstand über die *Lecher*-Leitung geführt werden. In den Spannungsbäuchen wird die Spannung zwischen den beiden Leiterstücken maximal und die Glühlampe leuchtet hell auf.

Die stehende Stromwelle wird mittels einer Induktionsschleife mit angeschlossener Glühlampe nachgewiesen. In den Strombäuchen leuchtet die Glühlampe hell auf, weil das zwischen den Drähten der *Lecher*-Leitung erzeugte Magnetfeld mit maximaler Amplitude hin und her schwingt.

Lecher-Leitung mit offenem Ende:

Die Verhältnisse ändern sich, wenn das Ende der *Lecher*-Leitung offen bleibt. Jetzt liegt am Ende dauernd eine Spannung an, die einlaufende Spannungswelle wird also ohne Phasensprung reflektiert, während der Strom am offenen Ende immer Null ist, die einlaufende Welle also mit Phasensprung reflektiert wird. Für die sich ausbildenden stehenden Wellen erhält man die beiden Gleichungen

$$U = U_1 + U_2 = 2 \cdot U_0 \cdot \cos kx \cdot \sin \omega t \quad (V)$$

und

$$I = I_1 + I_2 = -2 \cdot I_0 \cdot \sin kx \cdot \cos \omega t \quad (VI),$$

die aus den für das geschlossene Ende geltenden Gln. (II) und (III) durch Vertauschen von U und I hervorgehen.

Lecher-Leitung mit angepaßtem Abschluß:

Stehende Wellen bilden sich nicht aus, wenn die Enden der *Lecher*-Leitung durch einen ohmschen Widerstand verbunden sind, der dem Wellenwiderstand der *Lecher*-Leitung entspricht. In diesem Fall werden die einlaufenden Strom- und Spannungswellen am Leitungsende nicht reflektiert.

Sicherheitshinweise

Der Dezimeterwellensender hält nicht mit Sicherheit die Grenzwerte der Klasse A, Gruppe 2 der Norm EN 55011 ein. Geräte innerhalb des Fachraums einer Schule oder anderen Ausbildungsstätte können gestört werden. Außerdem können Funkstörungen bis zu einem Abstand von mehreren 100 m auftreten. Durch den Betreiber sind daher alle erforderlichen Maßnahmen zu treffen, damit sichergestellt wird, daß außerhalb des Fachraums installierte Geräte ordnungsgemäß arbeiten können.

- Hinweise in der Gebrauchsanweisung zum Dezimeterwellensender beachten.
- Sendebetrieb nicht länger als für die Versuchsdurchführung nötig vornehmen und sofort nach Abschluß der Versuchsdurchführung durch Ausschalten des Steckernetzgerätes beenden.

Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 1 dargestellt.

- Dezimeterwellensender im Sockel festklemmen und Betriebsart CW wählen.
- Je zwei Teilstücke der offenen Lecher-Leitung zusammenstecken, Halterung mit Stiel von Ende her aufschieben und in Sockel festklemmen.
- 4-mm-Stecker der Lecher-Leitung in den Antennenausgang des Dezimeterwellensenders stecken.
- Dezimeterwellensender und Lecher-Leitung in der Höhe so ausrichten, daß die Lecher-Leitung waagrecht verläuft.
- Halterung mit Stiel von einem Ende her aufschieben auf die Koppelschleife und in Sockel festklemmen.
- Zur Herstellung einer Induktionsschleife Schraubfassung E10 inkl. Glühlampe (2) auf die Koppelschleife (1) aufstecken.
- Induktionsschleife in der Höhe ausrichten und mit dem gebogenen Ende knapp über der Lecher-Leitung anordnen.

Durchführung**a) Lecher-Leitung mit kurzgeschlossenem Ende:**

- Dezimeterwellensender durch Anschluß des Steckernetzgerätes einschalten.
- Verbindungsstecker auf das offene Ende der Lecher-Leitung stecken.
- Induktionsschleife längs der Lecher-Leitung verschieben und eine Stelle suchen, an der die Glühlampe möglichst hell aufleuchtet.
- Zur Optimierung der Helligkeit die Induktionsschleife senkrecht zur Lecher-Leitung verschieben und ggf. vorsichtig den Abstand zur Lecher-Leitung reduzieren, ohne daß die Lecher-Leitung berührt wird.
- Induktionsschleife zunächst „von links nach rechts“, anschließend „von rechts nach links“ über die Lecher-Leitung führen und jeweils die Stellen (Stromknoten) auf der Lecher-Leitung markieren, an den die Glühlampe gerade verlicht.

Die Stromknoten liegen jeweils in der Mitte der „linken“ und „rechten“ Markierungen.

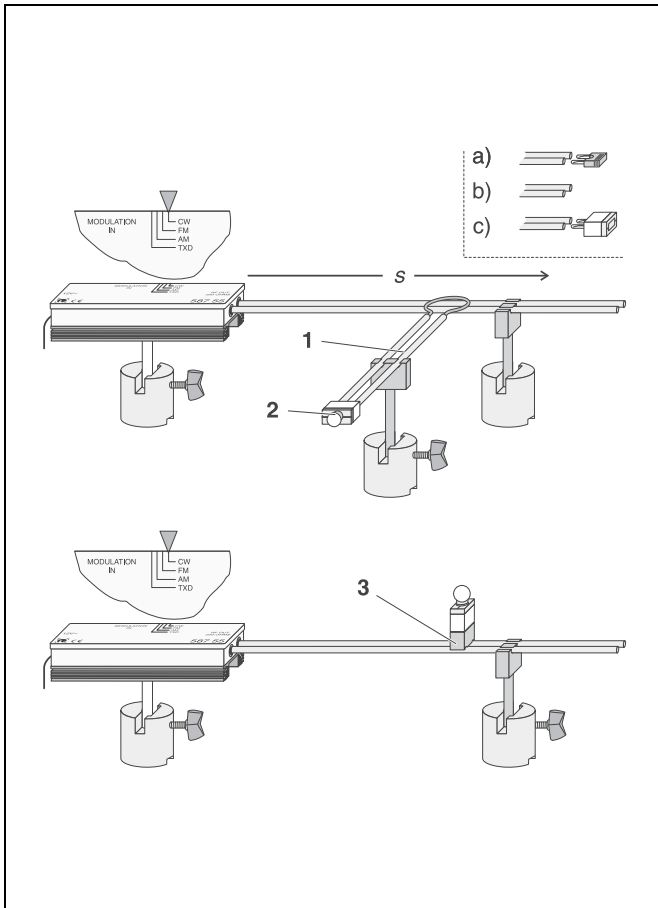


Fig. 1 Versuchsaufbau zum Nachweis der Strommaxima und -minima (oben) und zum Nachweis der Spannungsmaxima und -minima (unten)

- Zur Herstellung eines Tastkopfes Schraubfassung E10 inkl. Glühlampe (2) auf Kunststoff-Adapter (3) stecken und Tastkopf auf die Lecher-Leitung setzen.
- Tastkopf „von links nach rechts“ und „von rechts nach links“ über die Lecher-Leitung führen und jeweils die Stellen (Spannungsknoten) auf der Lecher-Leitung markieren, an den die Glühlampe gerade verlischt.
Die Spannungsknoten liegen jeweils in der Mitte der „linken“ und „rechten“ Markierungen.
- Positionen s der Strom- und Spannungsknoten auf der Lecher-Leitung vom Ausgang des Dezimeterwellensenders ausgehend mit dem Rollbandmaß ausmessen und notieren.
- Mit dem Tastkopf Spannungsbäuche an den Positionen der Stromknoten nachweisen.
- Mit der Induktionsschleife Strombäuche an den Positionen der Spannungsknoten nachweisen.

b) Lecher-Leitung mit offenem Ende:

- Mit dem Tastkopf die Spannungsknoten auf der Lecher-Leitung suchen und markieren.
- Mit der Induktionsschleife die Stromknoten auf der Lecher-Leitung suchen und markieren.
- Positionen s der Strom- und Spannungsknoten auf der Lecher-Leitung vom Ausgang des Dezimeterwellensenders ausgehend mit dem Rollbandmaß ausmessen und notieren.
- Mit dem Tastkopf Spannungsbäuche an den Positionen der Stromknoten nachweisen.
- Mit der Induktionsschleife Strombäuche an den Positionen der Spannungsknoten nachweisen.

c) Lecher-Leitung mit angepaßtem Abschluß:

Achtung: Die Dauerbelastbarkeit des Abschlußwiderstandes 200Ω beträgt nur $2 W$:

Abschlußwiderstand 200Ω bei eingeschaltetem Dezimeterwellensender nicht länger als 5 min anschließen.

- Abschlußwiderstand 200Ω auf das offene Ende stecken.
- Mit Induktionsschleife und Tastkopf nach Helligkeitsmaxima und -minima der Glühlampe suchen.

Meßbeispiel

Länge s_0 der Lecher-Leitung: 88 cm

a) Lecher-Leitung mit kurzgeschlossenem Ende:

Tab. 1: Position s der Strom- bzw. Spannungsknoten auf der kurzgeschlossenen Lecher-Leitung

N	$\frac{s}{\text{cm}}$	Art
1	5,0	Stromknoten
2	22,25	Spannungsknoten
3	38,5	Stromknoten
4	56,0	Spannungsknoten
5	72,75	Stromknoten
6	88,0	Spannungsknoten

b) Lecher-Leitung mit offenem Ende:

Tab. 2: Position s der Strom- bzw. Spannungsknoten auf der offenen Lecher-Leitung

N	$\frac{s}{\text{cm}}$	Art
1	4,25	Spannungsknoten
2	21,25	Stromknoten
3	38,25	Spannungsknoten
4	55,25	Stromknoten
5	71,5	Spannungsknoten
6	88,0	Stromknoten

c) Lecher-Leitung mit angepaßtem Abschluß:

Es sind weder ausgeprägte Strom- noch Spannungsbäuche oder -knoten zu finden.

Auswertung

Fig. 2 zeigt eine zusammenfassende graphische Darstellung der Meßwerte aus Tab. 1 und 2.

Die eingezeichnete Gerade stimmt im Rahmen der Meßgenauigkeit mit den Meßwerten überein, d. h. die Abstände zwischen den Strom- und Spannungsknoten sind jeweils konstant. Die

Geradensteigung a beträgt 16,875 cm, daraus berechnet man für die Wellenlänge der Dezimeterwellen

$$\lambda = 4 \cdot a = 67,5 \text{ cm}$$

Daraus berechnet man für die Phasengeschwindigkeit

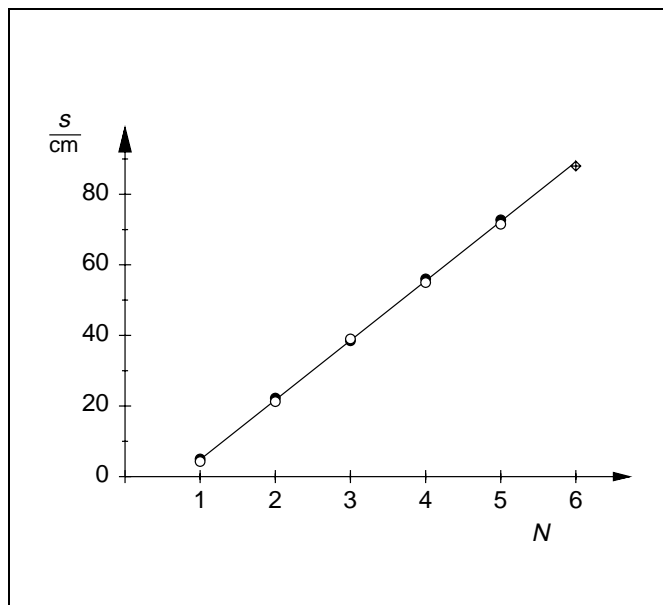
$$v = \lambda \cdot \nu = 2,93 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}.$$

Ergebnis

Dezimeterwellen breiten sich auf einer Lecher-Leitung aus. Je nach Abschluß der Lecher-Leitung können sich stehende Wellen ausbilden.

Ist das Leitungsende kurzgeschlossen, so bildet sich dort ein Spannungsknoten. Am offenen Leitungsende wird ein Stromknoten erzeugt. Ist das Leitungsende mit einem ohmschen Widerstand abgeschlossen, der dem Wellenwiderstand Z entspricht, so bilden sich keine stehenden Wellen aus, da die eingestrahlte Energie vom ohmschen Widerstand aufgenommen wird.

Fig. 2 Position s der Spannungs- und Stromknoten in Abhängigkeit von der Ordnungszahl N
geschlossene Kreise: Stromknoten und Spannungsknoten bei kurzgeschlossenem Ende
offene Kreise: Stromknoten und Spannungsknoten bei offenem Ende



Zusatzinformation

Der ermittelte Wert für die Phasengeschwindigkeit liegt etwas unterhalb der Vakuumlichtgeschwindigkeit, d. h. die Wellenlänge ist gegenüber der Vakuumwellenlänge des Dezimeterwellensenders etwas verkürzt. Der Grund für die Verkürzung ist in der endlichen Dicke der *Lecher*-Leitung zu suchen und in der Tatsache, daß die Ströme bei hohen Frequenzen an der Oberfläche und nicht homogen durch den Drahtquerschnitt verteilt fließen (Skinneffekt).

Die in Fig. 2 eingezeichnete Gerade belegt, daß der letzte (sechste) Knoten rechnerisch etwa 1,2 cm hinter dem Leitungsende ($s_0 = 88$ cm) liegt. Auch dieser Effekt ist auf die endliche Drahtstärke zurückzuführen.

Außerdem zeigt eine genauere Betrachtung, daß die Positionen für die Knoten der kurzgeschlossenen Leitung um etwa 0,7 cm gegenüber den Knoten der offenen Leitung verschoben sind.