

Demonstration der Funktionsweise eines Wechselstromzählers

Versuchsziele

- Aufbau eines Wechselstromzähler-Modells
- Untersuchung der Funktionsweise des Modells bei ohmscher Last im Stromkreis.
- Untersuchung der Funktionsweise des Modells bei induktiver Last im Stromkreis.

Grundlagen

Zur genauen Messung der in den einzelnen Haushalten vom Kraftwerk bezogenen elektrischen Arbeit benötigt man zuverlässige Elektrizitätszähler. Eingesetzt werden hierfür im allgemeinen die nach ihrem Erfinder *Galileo Ferraris* benannten Ferraris-Zähler:

In Ferraris-Zählern für Einphasen-Wechselstrom ist eine Metallscheibe drehbar zwischen den Polen zweier Elektromagnete gelagert (siehe Fig. 1). Durch die Spulen eines Elektromagneten fließt der Verbraucherstrom, an der Spule des anderen Elektromagneten liegt die Verbraucherspannung an. In den Stromspulen wird also ein zum Verbraucherstrom I proportionales Magnetfeld B_a , in der Spannungsspule ein zur Verbrau-

Fig. 1 Wechselstromzähler
a Elektromagnet im Verbraucherstromkreis
b Elektromagnet im Spannungskreis
c Permanentmagnet
d drehbare Aluminiumscheibe

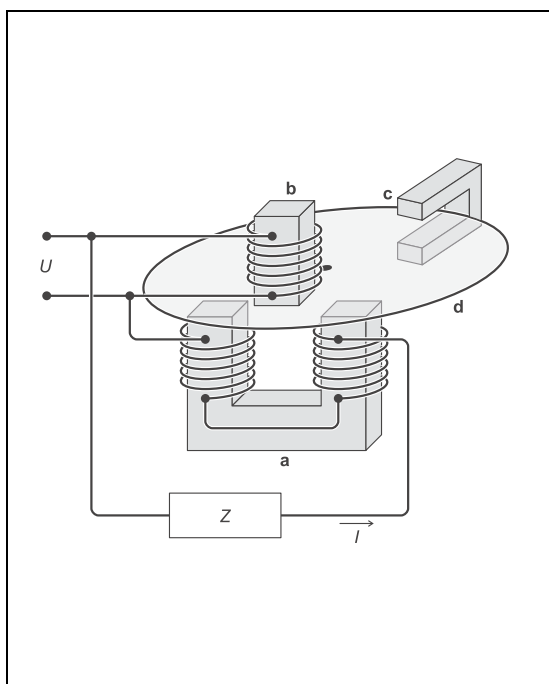
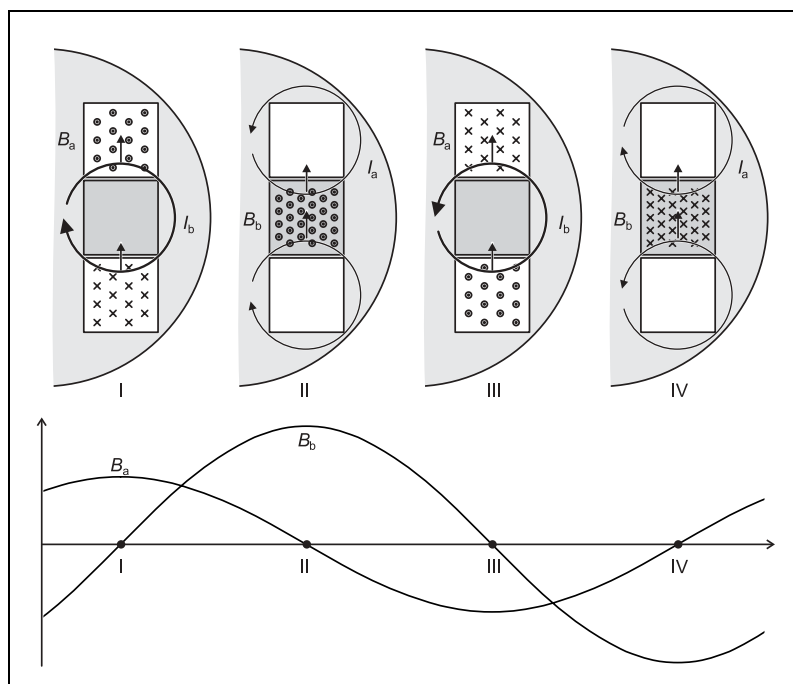


Fig. 2 Vereinfachte Darstellung zur Wechselwirkung zwischen Wirbelströmen und Magnetfeldern während vier aufeinanderfolgender Viertelperioden für den Fall eines rein ohmschen Verbrauchers. Aluminiumscheibe und Elektromagnete werden von oben betrachtet.



Geräte	
1 Drehbare Aluminiumscheibe	560 32
1 Joch	562 10
1 U-Kern mit Joch	562 11
1 Spule mit 250 Windungen	562 13
1 Spule mit 1000 Windungen	562 15
2 Kleinspannungsspulen	562 18
1 Großer Spulenhalter	562 34
1 Kleinspannungsstelltrafo	521 39
1 Schiebewiderstand 10 Ω	537 32
1 Voltmeter, AC, $U \leq 15$ V z.B.	531 100
1 Amperemeter, AC, $I \leq 3$ A z.B.	531 100
1 Handstoppuhr	313 07
1 Großer Hufeisenmagnet	510 22
1 Großer Stativfuß, V-förmig	300 01
1 Stativstange, 25 cm	300 41
2 Leybold-Muffen	301 01
Experimentierkabel	

Dies wird verständlich, wenn man sich den Fall des rein induktiven Verbrauchers vorstellt, in dem Verbraucherstrom und Verbraucherspannung um 90° gegeneinander verschoben sind. Jetzt sind die beiden Magnetfelder B_a und B_b genau in Phase, Wirbelströme und Magnetfelder aber gerade nicht. Das Drehmoment N_1 ist somit Null und entspricht damit dem verschwindenden Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0$.

Das Drehmoment N_1 beschleunigt die Metallscheibe, bis es mit dem Gegendrehmoment

$$N_2 \sim \omega \tag{III}$$

ω : Winkelgeschwindigkeit der Scheibe

im Gleichgewicht ist, das ein zusätzlicher Permanentmagnet in der sich drehenden Scheibe erzeugt. Im Gleichgewicht

$$N_1 = N_2 \tag{IV}$$

ist die Winkelgeschwindigkeit ω der Scheibe daher proportional zur elektrischen Leistung P .

Lässt man nun die Zahl der Umdrehungen der Scheibe durch ein geeignetes Zählwerk registrieren, so erhält man ein Messgerät für das zeitliche Integral der elektrischen Leistung also für die elektrische Arbeit.

cherspannung U proportionales Magnetfeld B_b erregt. Beide Magnetfelder oszillieren mit der Frequenz des Wechselstromes und induzieren somit in der Metallscheibe Wirbelströme. Auf diese Wirbelströme übt das jeweils andere Magnetfeld Kräfte aus, die die Scheibe in Drehung versetzen.

Fig. 2 verdeutlicht die Situation für den Fall, dass Verbraucherstrom und -spannung in Phase liegen, d.h. für einen rein ohmschen Verbraucher: Hier eilt der Erregerstrom in der Spannungsspule dem Strom in den Stromspulen um 90° nach (der induktive Widerstand der Stromspulen kann vernachlässigt werden). Entsprechendes gilt für die durch die Ströme erregten Magnetfelder B_a und B_b . Die durch das Magnetfeld B_b induzierten Wirbelströme I_b erreichen ihr Maximum somit gleichzeitig (Zeitpunkte I und III) mit dem Magnetfeld der Stromspulen B_a . Ebenso liegen die Wirbelströme I_a an den Stromspulen in Phase mit dem Magnetfeld B_b (siehe Zeitpunkte II und IV).

Die Kräfte der Magnetfelder auf die Wirbelströme weisen alle in dieselbe Richtung. Magnetfelder und Wirbelströme erzeugen also ein Drehmoment

$$N_1 \sim B_a \cdot B_b \sim P \tag{I}$$

proportional zur elektrischen Leistung

$$P = U \cdot I \tag{IIa}$$

Gl. (I) gilt auch für den Fall des nicht rein ohmschen Verbrauchers, in dem die elektrische Leistung gegeben ist durch

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \tag{IIb}$$

Aufbau

Der gesamte Versuchsaufbau ist in Fig. 3 dargestellt. Fig. 4 zeigt – von oben betrachtet – den mechanischen Aufbau des Wechselstromzählers ohne Spannungsspule.

Mechanischer Aufbau:

- Elektromagnet aus U-Kern und zwei Kleinspannungsspulen mit 50 Windungen aufbauen.
- Drehbare Aluminiumscheibe dicht aber berührungsfrei über dem U-Kern anordnen und mit Hilfe der Stellschrauben des Stativfußes waagrecht ausrichten (dabei zur Schonung des empfindlichen Drehlagers die Aluminiumscheibe nicht anfassen!).
- Spule mit 1000 Windungen und Joch im großen Spulenhalter ebenfalls dicht über der Scheibe anordnen, so dass das Joch zwischen die Pole des U-Kerns weist.
- Großen Hufeisenmagnet auf den großen Stativfuß stellen und zum Zentrum der Aluminiumscheibe ausrichten.

Elektrischer Aufbau:

- Kleinspannungsspulen in Reihe mit Schiebewiderstand und Amperemeter an den Wechselspannungsausgang des Kleinspannungsstelltrafos anschließen.
- Spule mit 10 Windungen und Voltmeter direkt an den Wechselspannungsausgang anschließen.

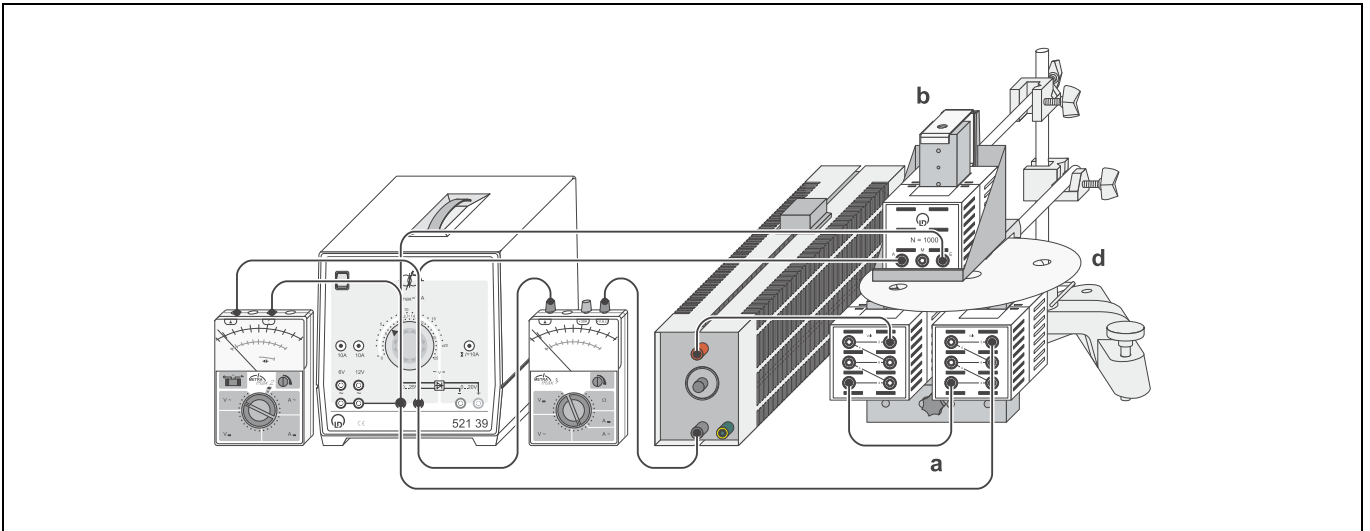
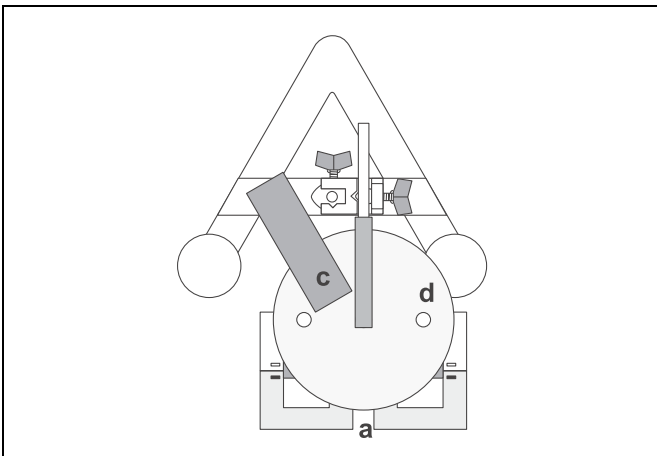


Fig. 3 Versuchsaufbau zur Demonstration der Funktionsweise eines Wechselstromzählers bei ohmscher Last.

- a Elektromagnet im Verbraucherstromkreis
- b Elektromagnet im Spannungskreis
- c Permanentmagnet (nicht sichtbar)
- d drehbare Aluminiumscheibe

Fig. 4 Teilaufbau des Wechselstromzählers von oben betrachtet

- a Elektromagnet im Verbraucherstromkreis
- b Elektromagnet im Spannungskreis (noch nicht montiert!)
- c Permanentmagnet
- d drehbare Aluminiumscheibe



Durchführung

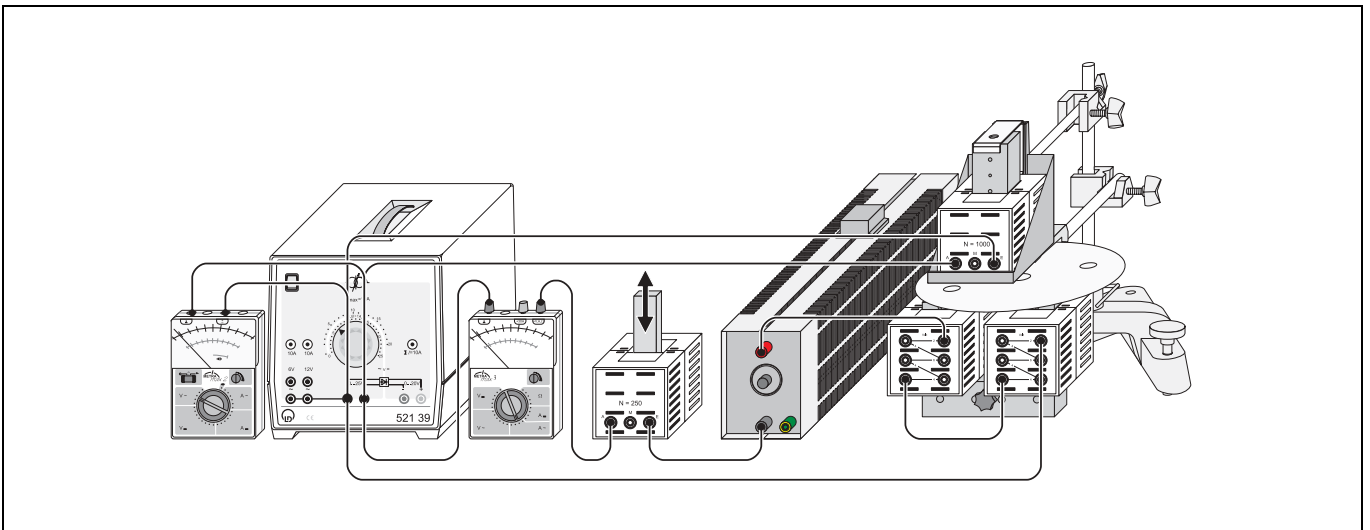
a) Beobachtung bei ohmscher Last:

- Ausgangsspannung $U = 2,5\text{ V}$ am Stelltrafo einstellen.
- Widerstand im Strompfad langsam vermindern (Schieber zum Betrachter ziehen) und Stromstärke $I = 1\text{ A}$ einstellen. Spannung U ggf. nachstellen.
- Zeit T für 10 Umdrehungen der Scheibe messen.
- Stromstärke auf 2 A erhöhen und ebenfalls Zeit für 10 Umdrehungen messen.
- Messungen für $U = 5,0\text{ V}$, $7,5\text{ V}$, $10,0\text{ V}$ und $12,5\text{ V}$ wiederholen.

b) Beobachtung bei induktiver Last:

- Spule mit 250 Windungen in Reihe zum Schiebewiderstand schalten (siehe Fig. 5).
- Z. B. Spannung $U = 5\text{ V}$ und Strom $I = 2\text{ A}$ einstellen.
- Joch langsam in die Spule mit 250 Windungen einschieben und drehbare Aluminiumscheibe beobachten.

Fig. 5 Versuchsaufbau zur Demonstration der Funktionsweise eines Wechselstromzählers bei induktiverer Last.



Messbeispiel

a) Beobachtung bei ohmscher Last:

Tab. 1: Zeit T für 10 Umdrehungen der Aluminiumscheibe in Abhängigkeit von der Spannung U und dem Strom I

$\frac{U}{V}$	$\frac{10 \cdot T}{s}$	$\frac{10 \cdot T}{s}$
	$I = 2 \text{ A}$	$I = 1 \text{ A}$
2,5	57,9	85,5
5,0	20,4	41,1
7,5	11,7	25,9
10,0	9,4	18,5
12,5	7,4	14,4

b) Beobachtung bei induktiver Last:

Je weiter das Joch in die Spule eingeschoben wird, desto langsamer dreht sich die Aluminiumscheibe.

Bei vollständig eingeschobenem Joch steht die Scheibe still.

Auswertung

a) Beobachtung bei ohmscher Last:

Tab. 2: Drehfrequenz f der Aluminiumscheibe in Abhängigkeit von der Leistung $P = U \cdot I$

$\frac{P}{W}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{A}$	$\frac{f}{Hz}$
2,5	2,5	1,0	0,117
5,0	5,0	1,0	0,243
7,5	7,5	1,0	0,386
10,0	10,0	1,0	0,541
12,5	12,5	1,0	0,694
5,0	2,5	2,0	0,173
10,0	5,0	2,0	0,490
15,0	7,5	2,0	0,855
20,0	10,0	2,0	1,064
25,0	12,5	2,0	1,351

In Tab. 2 ist die Auswertung der Messwerte zusammengefasst. Aufgeführt ist zum einen die aus Strom I und Spannung U berechnete Leistung P und zum anderen die aus der Zeit T berechnete Drehfrequenz f der Scheibe.

Fig. 6 zeigt die lineare Abhängigkeit der Drehfrequenz von der Leistung in grafischer Darstellung. Man erkennt, dass die Scheibe sich erst bei Leistungen oberhalb einer Eigenleistung von etwa 1 W zu drehen beginnt.

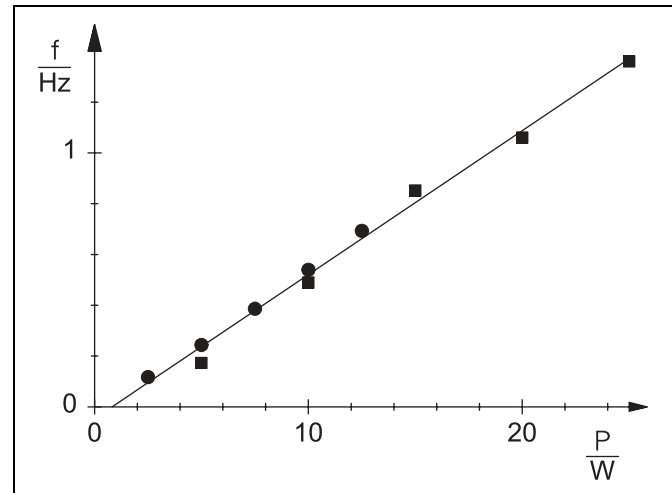


Fig. 6 Drehfrequenz f der Metallscheibe in Abhängigkeit von der Leistung P an einer ohmschen Last (● $I = 1 \text{ A}$, ■ $I = 2 \text{ A}$)

b) Beobachtung bei induktiver Last:

Durch Einschieben des Jochs in die Spule wird die Induktivität der Spule erhöht.

Bei vollständig eingeschobenem Joch ist die Induktivität so groß, dass die ohmsche Last im Stromkreis vernachlässigt werden kann. Die Wirkleistung $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ ist Null.

Die Scheibe bleibt stehen, weil die von Strom und Spannungskreis erzeugten Magnetfelder in Phase schwingen.

Ergebnis

Mit einem Ferraris-Zähler kann die elektrische Arbeit als zeitliches Integral der Wirkleistung gemessen werden.

Zusatzinformation

Im Gegensatz zum Wechselstrom- oder Einphasenstromzähler hat der Drehstrom- oder Dreiphasenstromzähler zwei drehbare Scheiben auf einer gemeinsamen Achse und drei Spannungs- sowie drei Stromspulen.