

Ich begrüße Sie zu meinem Vortrag

## Ein analoges Wattmeter

- mit modernen Werkstoffen
- für kleine Leistungen



# Wie kam es dazu, ein Wattmeter zu bauen? Gibt es die nicht zu kaufen?

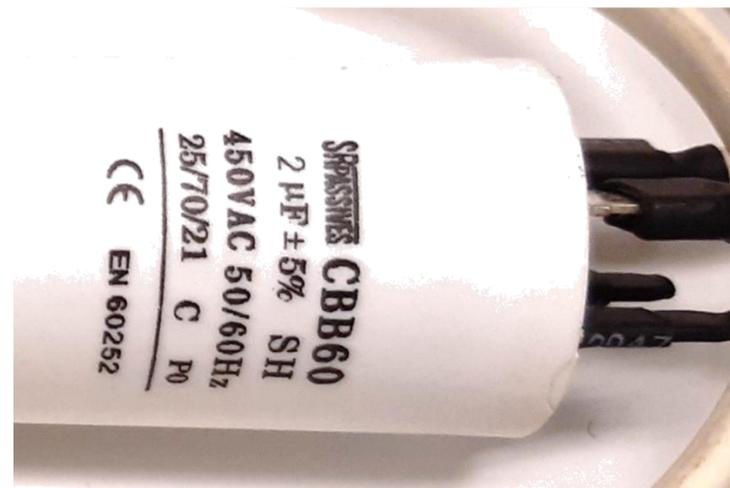
Riesenangebot im Internet.

Aber messen die die **Watt** oder nur die **VoltAmpere?**

Im Bekanntenkreis herumgehört:

Oh je! Eingestiegen! Am Kondensator zeigt es sich: Die messen mehrheitlich VoltAmpere!

Watt sind eben nicht Volt • Ampere, sondern  
**Volt • Ampere • cos φ!**



<https://www.ebay.de>



DC Digital Monitor LCD Volt Amp Watt Meter RC Batterie Power Analyser 100A/200A  
Brandneu | Gewerblich

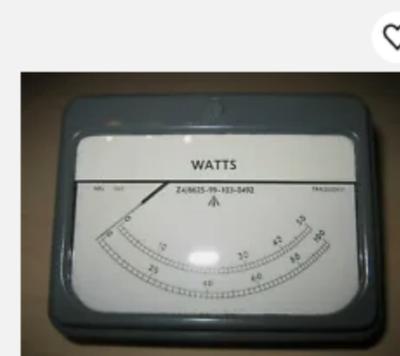
**EUR 20,59 bis EUR 20,75**  
Sofort-Kaufen  
Kostenloser Versand  
Lieferung an Abholstation möglich  
29+ Beobachter



NEW Haute Précision Watt M and Analyseur de Puissance  
Blue Backlight LCD Display

Digital LCD Volt Tester Wattmeter Power Analyzer Leistungsmesser DC RC 60V/100A  
Brandneu | Gewerblich

**EUR 11,89** Bis 5% sparen mit Multi-Rabatt  
oder Preisvorschlag  
Kostenloser Versand



Marconi Messgerät Watt watts panel meter analog Messinstrument vintage  
Gebraucht | Privat

**EUR 29,90**  
Sofort-Kaufen  
+EUR 5,90 Versand

# Wie kam es dazu, ein Wattmeter zu bauen? Gibt es auch noch analoge?

Analoge gibt es auch.

Die messen bestimmt die **Watt** und nicht die VoltAmpere!

Wohl dem, der eines hat.

Ansonsten muss man schon tief in die Tasche greifen.

**Warum gibt es sie noch?**

**Wegen der Ehrlichkeit dieses Instrumentes!**

Aber sie sind für größere Leistungen gebaut. Vollausschlag selten unter 500 W.

➔ Eigenbau!



## HST-2000W Wattmeter < >

SKU: HST-2000W

HST-2000W Portable Analog Wattmeter is highly reliable, and designed for use in laboratories or factories for precision measurement of power at AC and commercial frequencies 45-65Hz.

- Principle: Electrodynamometer type.
- Case Material: Bakelite with glass window.
- Accuracy:  $\pm 0.5\%$  of full scale.
- Scale Length: Approx. 135mm(5-3/8").
- Scale Divisions: 120.
- Frequency Ranges:  
AC 25 to 1000Hz (COS $\phi$ =1.0) (suitable for DC),  
AC 25 to 500Hz (COS $\phi$ =0.2).

Availability: **In stock**

**\$483.00**

# Wie kam es dazu, ein Wattmeter zu bauen?

## Wo liegen die Probleme?

Das Messwerk hat **Feinde**:

Die Induktivität der Spulen → **wenig Windungen**

→ **wenig magnetischer Fluss**

Der ohmsche Widerstand der Spulen → **dicker Draht**

→ **schwere Drehspule, breiter Spalt**

Der magnetische Widerstand der Luft → **Kern ist gut**

→ **Kern hat Remanenz und Wirbelströme**

Die Remanenz eines Eisenkerns → **kein Eisen**

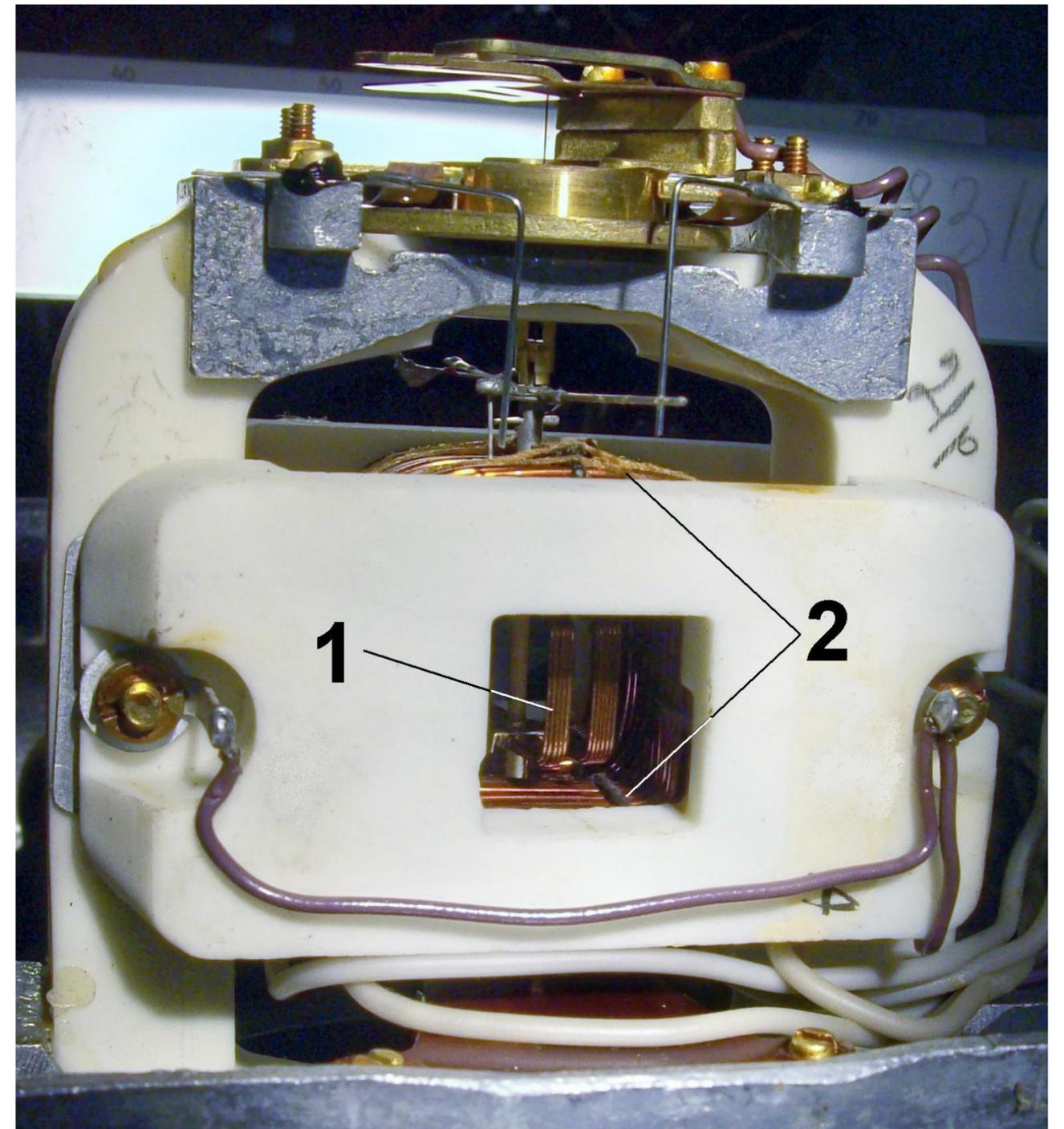
→ **Ferrit geht**

Woher passenden Kern nehmen? → **teuer herstellbar**

→ **anfertigen** → Fertigungskennntnisse sind gut

➡ Messen und berechnen erforderlich!

Mal sehen, ob's geht!



### Einige Zusammenhänge:

Der Antrieb ist  $\theta = I \bullet W$ , die Amperewindungen  
anstatt der Spannung U

Die Bremse ist  $R_m$ , der magnetische Widerstand  
anstatt des Widerstandes R

Der magnetische Fluss ist  $\Phi = I \bullet W / R_m$   
anstatt des Stromes I

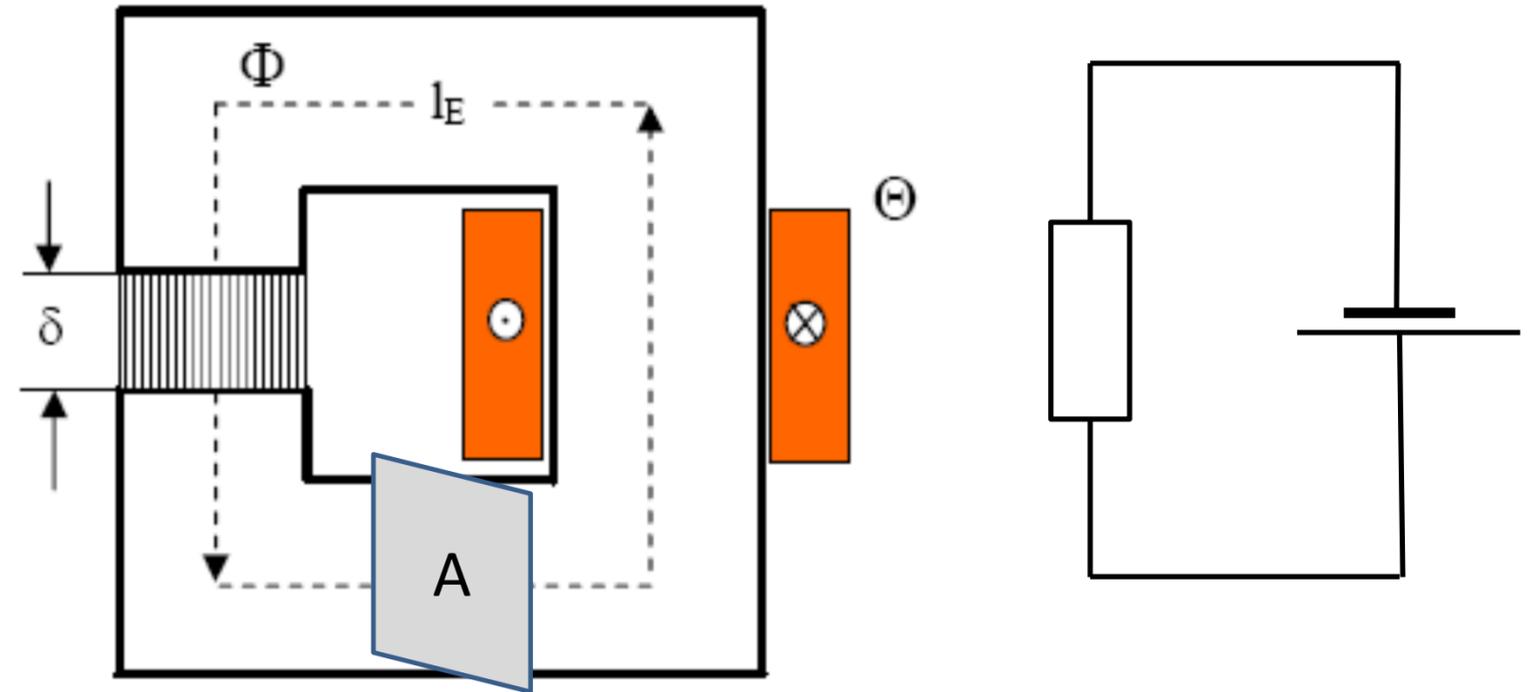
Die Flussdichte ist  $B = \Phi / A$   
anstatt der Stromdichte

und die darf **0,6 Tesla** [= Vs/m<sup>2</sup>] nicht übersteigen!

Die Induktivität ergibt sich zu  $L = W^2 / R_m$

→ Messung von L in einer Probewicklung führt direkt zu  $R_m$

→ und damit kann man eigentlich alles ausrechnen!



### Einige Zusammenhänge:

Der Antrieb ist  $\theta = I \bullet W$ , die Amperewindungen  
anstatt der Spannung U

Die Bremse ist  $R_m$ , der magnetische Widerstand  
anstatt des Widerstandes R

Der magnetische Fluss ist  $\Phi = I \bullet W / R_m$   
anstatt des Stromes I

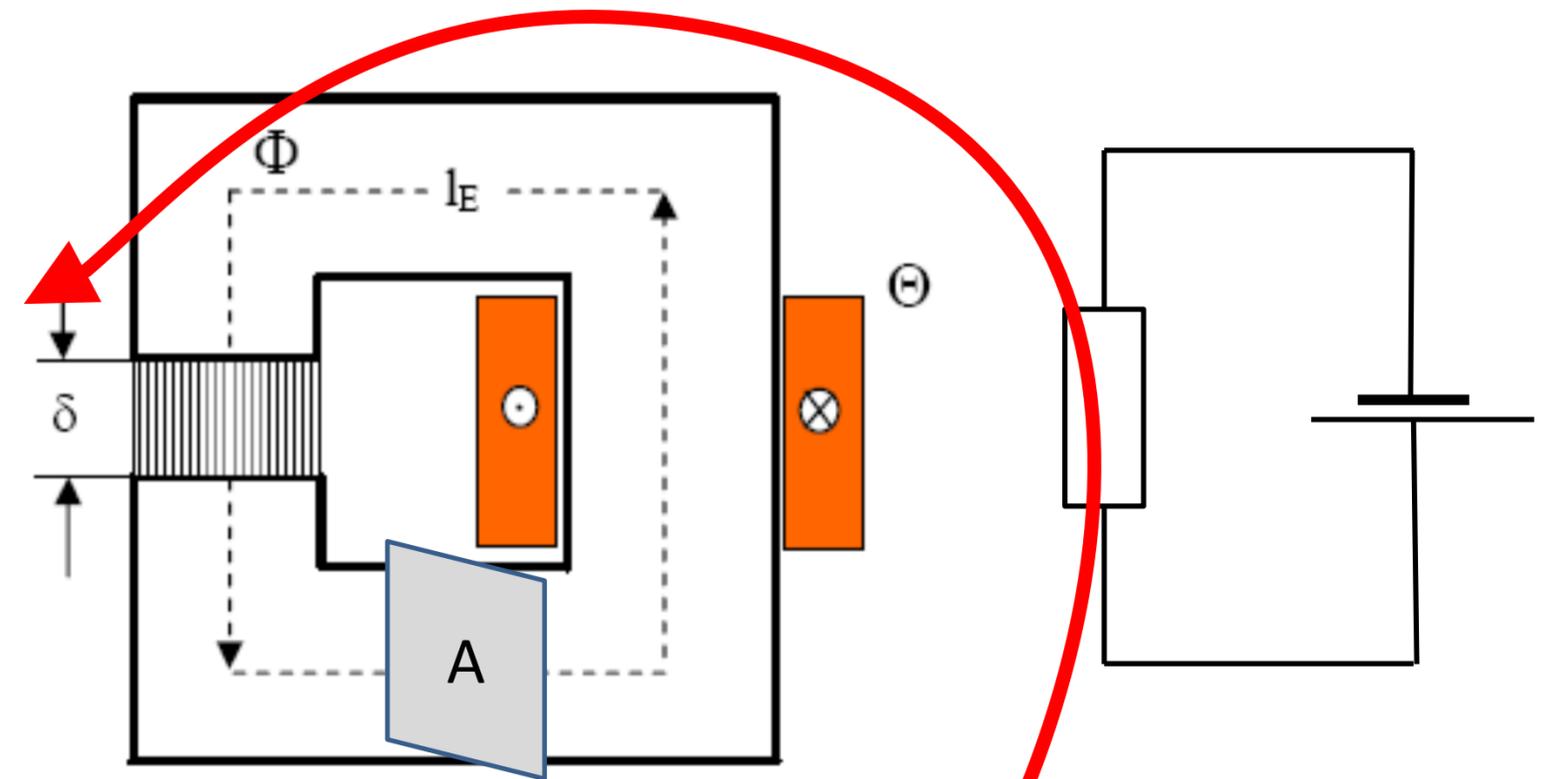
Die Flussdichte ist  $B = \Phi / A$   
anstatt der Stromdichte

und die darf **0,6 Tesla** [= Vs/m<sup>2</sup>] nicht übersteigen!

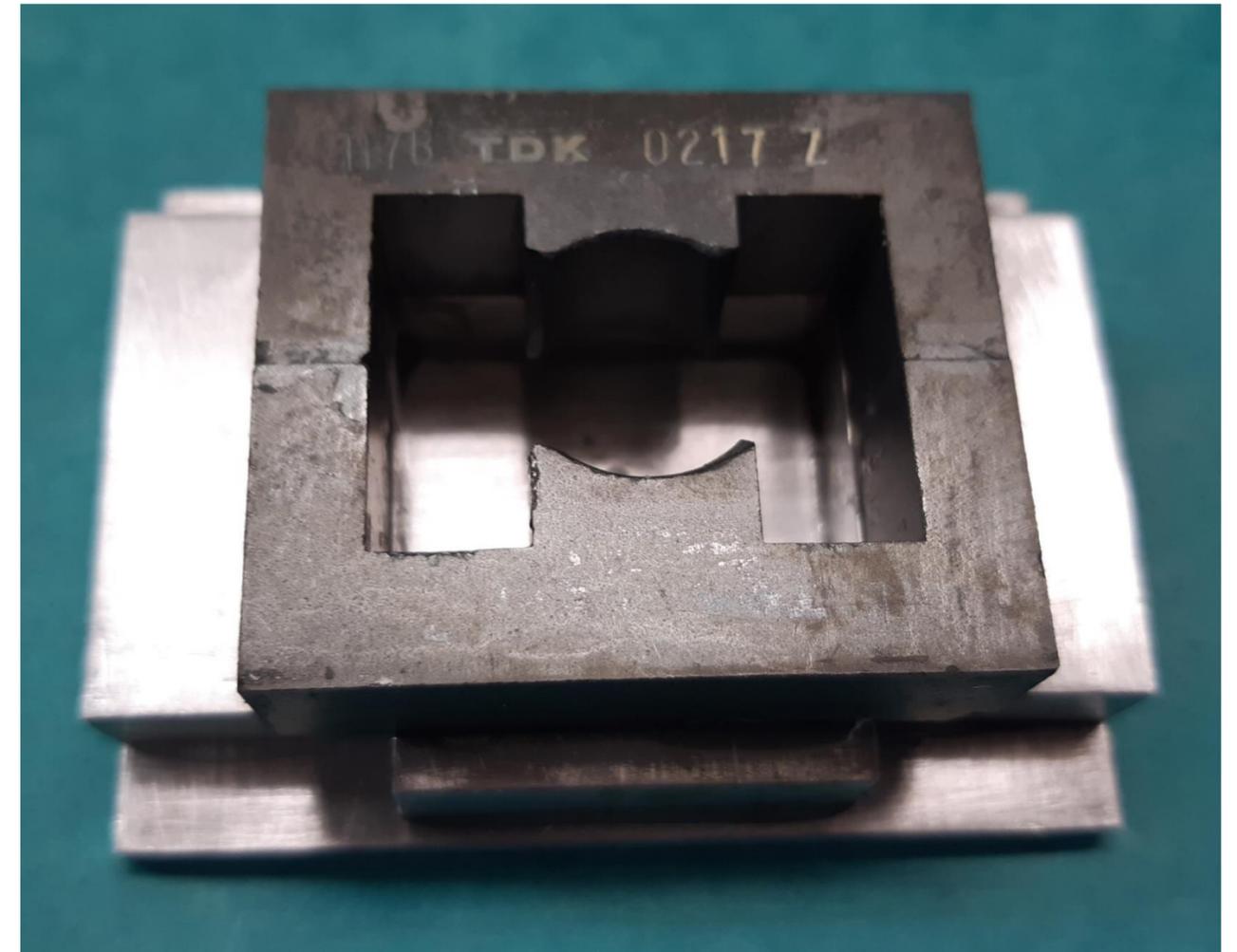
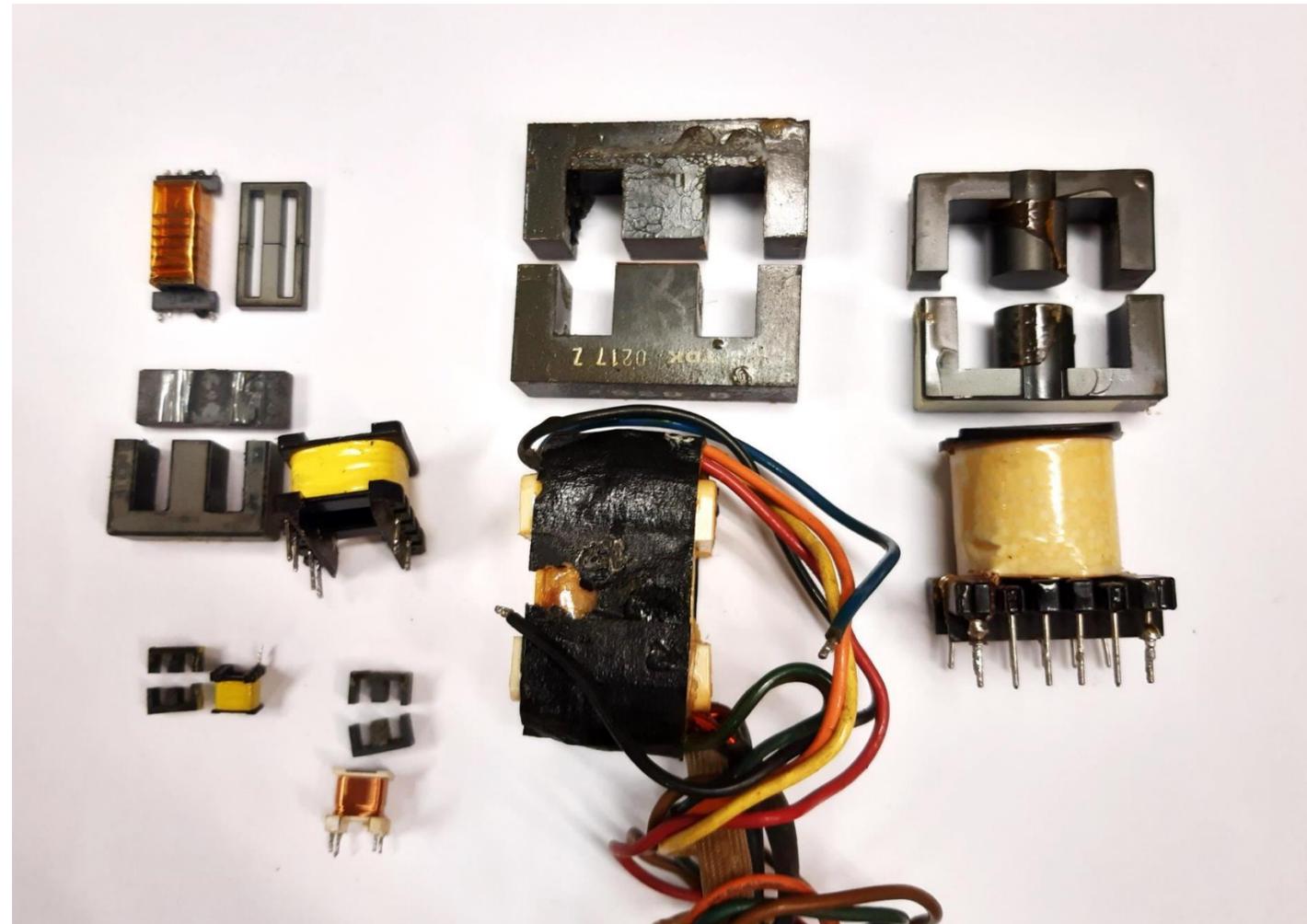
Die Induktivität ergibt sich zu  $L = W^2 / R_m$

→ Messung von L in einer Probewicklung führt direkt zu  $R_m$

→ und damit kann man eigentlich alles ausrechnen!



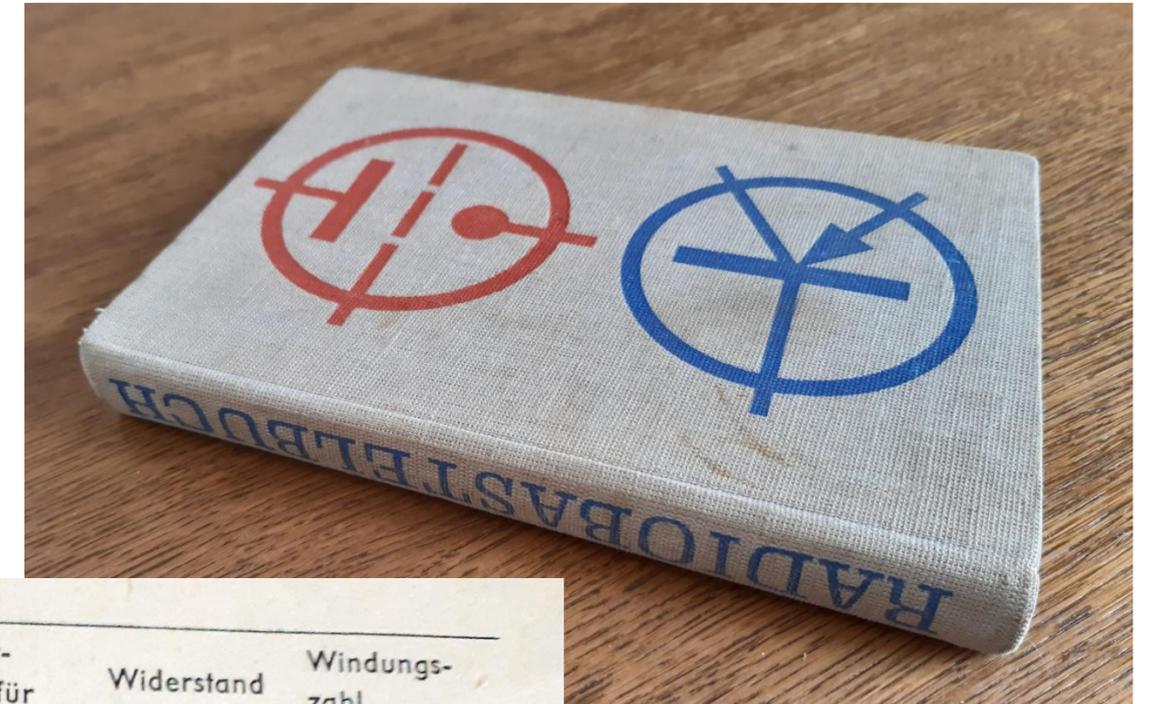
Kerne roh, Ausbauexemplare (sonst „deier“) ...



... und der ausgesuchte auf ein Chassis  
geklebt und ausgeschliffen mit SKG  
(Siliciumcarbid grün)

| Berechnung Wattmeter         |           |           |           |            |                       |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------------------|
| gemessen:                    | Versuch 1 | Versuch 2 | Versuch 3 | Endversuch | Einheit               |
| Kapazität                    | 9,52E-08  | 1,06E-09  | 6,80E-07  | 9,40E-07   | F                     |
| Resonanz                     | 50000     | 4,60E+05  | 16100     | 3420       | Hz                    |
| Induktivität                 | 1,06E-04  | 1,13E-04  | 1,44E-04  | 2,30E-03   | H = Vs/A              |
| Windungszahl (Probe)wicklung |           | 32        |           | 160        |                       |
| Magnetischer Widerstand      |           | 9,07E+06  |           | 1,11E+07   | A/Vs                  |
| Gleichstrom                  |           | 3         |           | 0,5        | A                     |
| Fläche 15x15                 |           | 0,000225  |           | 0,000225   | m <sup>2</sup>        |
| Magnetischer Fluss           |           | 1,06E-05  |           | 7,20E-06   | Vs                    |
| Flussdichte                  |           | 0,04706   |           | 0,03200    | T = Vs/m <sup>2</sup> |

### Da gibt es Richtwerte zur Wicklungsdimensionierung:



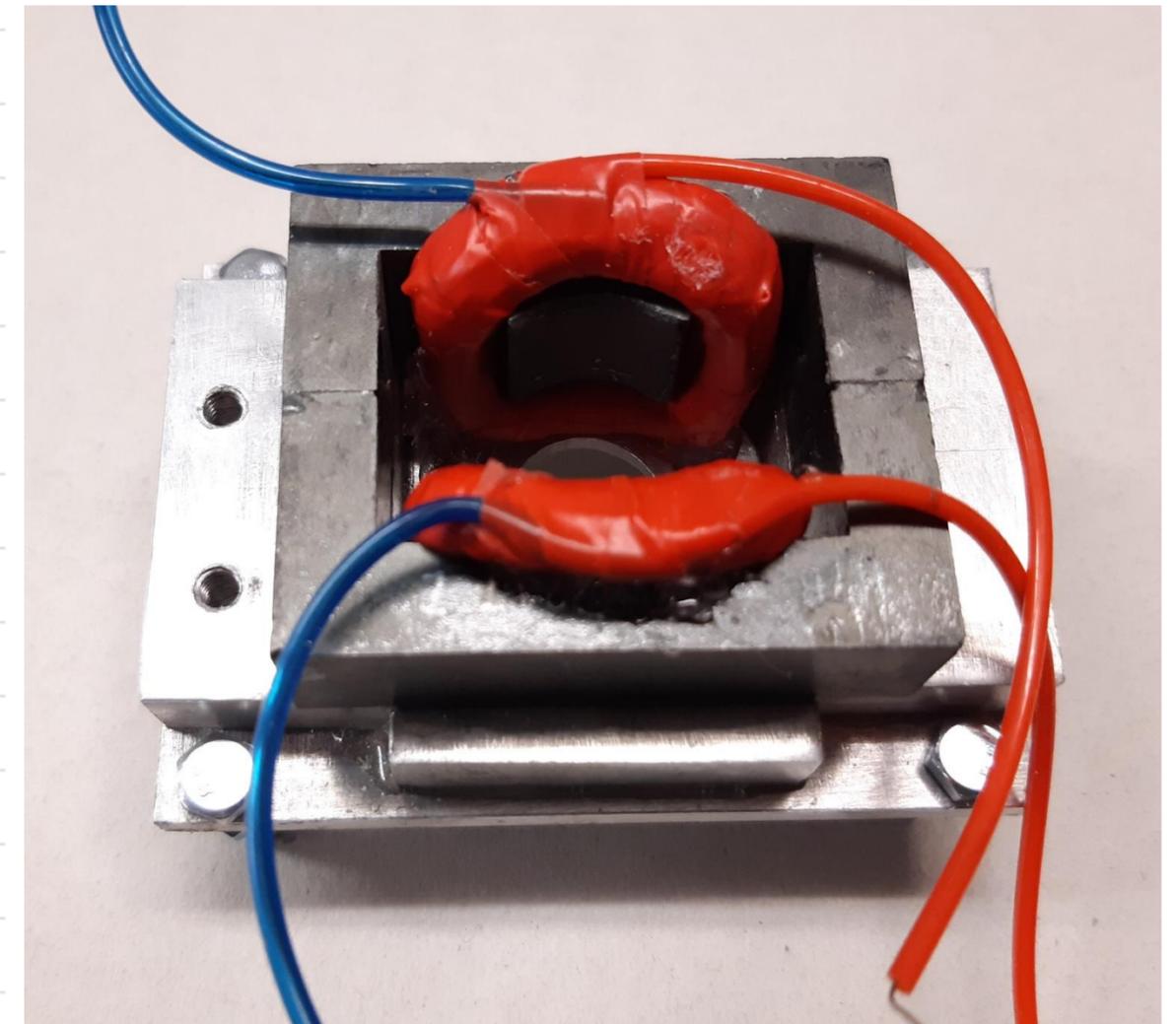
DAS GROSSE  
RADIOBASTELBUCH  
Verlag Sport und Technik 1962

| Fachbuch "Radiobastelbuch"                    |        |                  |
|---|--------|------------------|
| Seite 327, Punkt 9. DATEN FÜR KUPFERLACKDRAHT |        |                  |
| Größe   | Wert   | Einheit          |
| Wicklungsstrom                                | 0,25   | A                |
| Draht Ø erforderlich                          | 0,35   | mm               |
| Windungszahl pro cm <sup>2</sup>              | 580    | cm <sup>-2</sup> |
| Wickelraumbreite                              | 0,5    | cm               |
| Wickelraumhöhe                                | 0,6    | cm               |
| Wickelfläche                                  | 0,3    | cm <sup>2</sup>  |
| Windungszahl                                  | 174    | Wdg.             |
| Drahtwiderstand pro m                         | 0,1824 | Ω/m              |
| Wicklungslänge                                | 8,4    | cm               |
| Drahtlänge                                    | 14,616 | m                |
| Wicklungswiderstand                           | 2,666  | Ω                |
| Spannungsabfall                               | 0,6665 | V                |
| Verlustleistung                               | 0,1666 | W                |

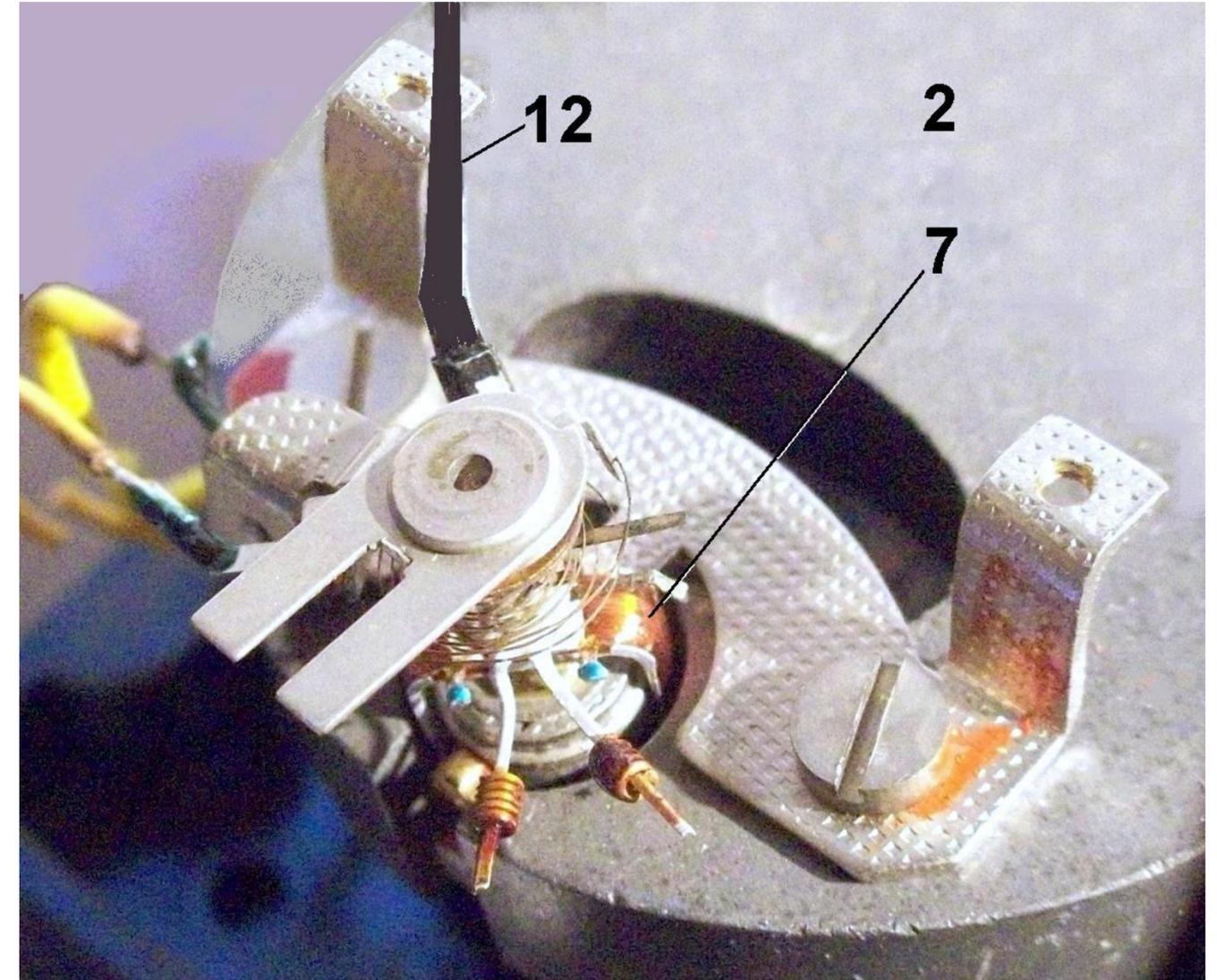
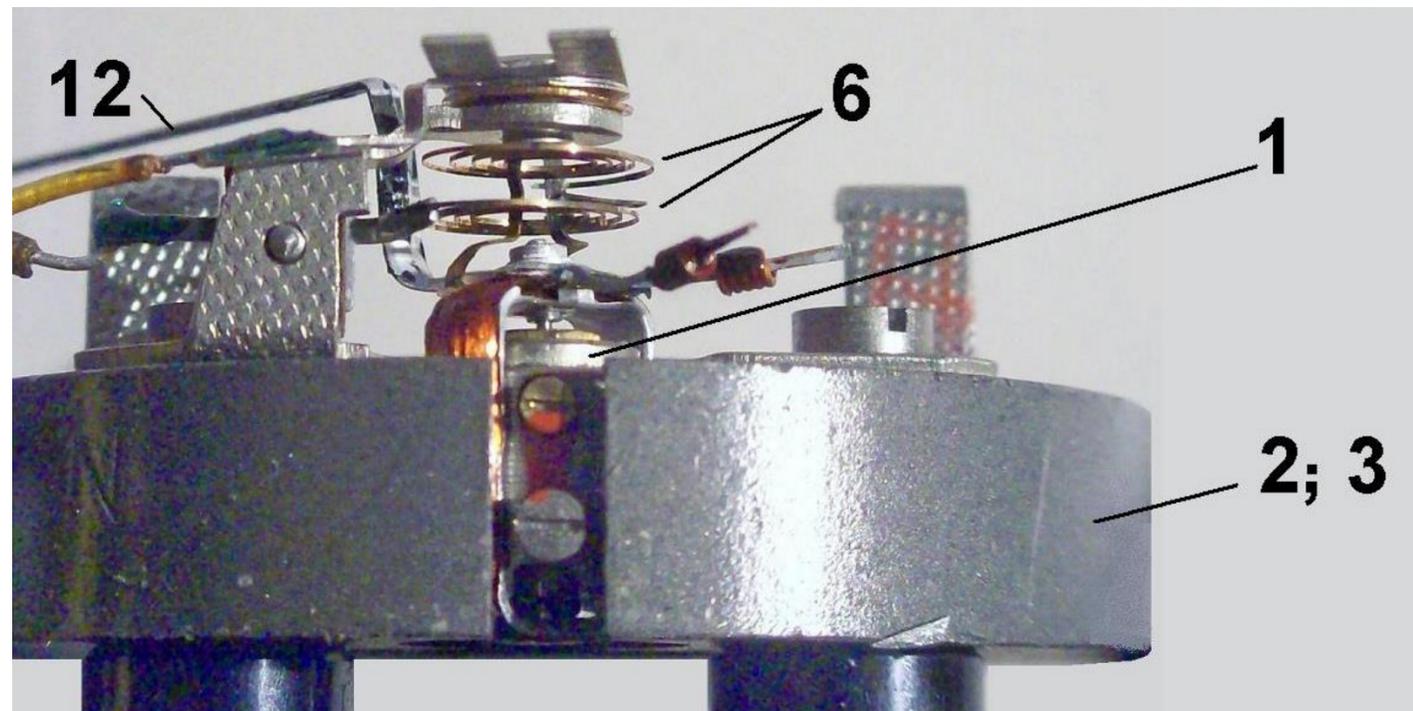
| Nenn-<br>durch-<br>messer<br>mm | Durch-<br>messer<br>für CuL<br>mm | Nenn-<br>querschnitt<br>mm <sup>2</sup> | Höchst-<br>strom für<br>I = 2,55 A<br>A | Widerstand<br>pro Meter<br>Ohm | Windungs-<br>zahl<br>je cm <sup>2</sup><br>Wdg. |
|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|--------------------------------|---|
| 0,03                            | 0,045                             | 0,0007                                  | 0,002                                   | 24,82                          | 45000   |
| 0,04                            | 0,055                             | 0,0013                                  | 0,003                                   | 13,96                          | 25000   |
| 0,05                            | 0,062                             | 0,0020                                  | 0,005                                   | 8,94                           | 20000   |
| 0,06                            | 0,075                             | 0,0028                                  | 0,007                                   | 6,21                           | 15000   |
| 0,07                            | 0,085                             | 0,0039                                  | 0,010                                   | 4,56                           | 11000   |
| 0,31                            | 0,34                              | 0,075                                   | 0,205                                   | 0,218                          | 690   |
| 0,32                            | 0,35                              | 0,080                                   | 0,218                                   | 0,2051                         | 650   |
| 0,33                            | 0,36                              | 0,086                                   | 0,231                                   | 0,1932                         | 600   |
| 0,34                            | 0,37                              | 0,091                                   | 0,245                                   | 0,1824                         | 580   |
| 0,35                            | 0,38                              | 0,096                                   | 0,259                                   | 0,1724                         | 540   |
| 0,36                            | 0,39                              | 0,102                                   | 0,274                                   | 0,1632                         | 520   |
| 0,37                            | 0,40                              | 0,108                                   |   |                                |   |

### Der Stator und seine Wicklungen:

| gemessen:               | Stator Reihe | Stator Parallel | Einheit               |
|-------------------------|--------------|-----------------|-----------------------|
| Kapazität               | 4,76E-07     | 4,76E-07        | F                     |
| Resonanz                | 2270         | 4724            | Hz                    |
| Induktivität            | 0,01033      | 0,00238         | H = Vs/A              |
| Windungszahl            | 346          | 173             |                       |
| Magnetischer Widerstand | 1,16E+07     | 1,26E+07        | A/Vs                  |
| Maximalstrom            | 0,25         | 0,5             | A                     |
| Fläche 15x15            | 0,000225     | 0,000225        | m <sup>2</sup>        |
| Magnetischer Fluss      | 7,46E-06     | 6,89E-06        | Vs                    |
| Flussdichte             | 0,03316      | 0,03063         | T = Vs/m <sup>2</sup> |



## Erste Idee: Man nehme ein Drehspulmesswerk



Die Krux: Der Alu-Rahmen der Spule: Bei Gleichstrom dämpft er das Baumeln, bei Wechselstrom gibt es einen prima Wirbelstrom. Satz mit X: **Das war wohl nix!**

### Der wechselstromtaugliche Rotor auf einem Isolierkörper

Oberes und unteres Querhaupt: AlMg, 2 dick  
Seitenwangen: Pertinax, 0,5 dick

|                         |         |    |
|-------------------------|---------|----|
| Wickelfläche:           | 5 x 1,5 | mm |
| Kerndurchmesser:        | 12      | mm |
| Innendurchmesser Spule: | 13      | mm |
| Außendurchmesser Spule: | 17      | mm |
| Ausschliff des Kernes:  | 18      | mm |
| → Luftspalt:            | 3       | mm |

Noch enger muss der Luftspalt gar nicht sein, sonst wird die Stator-Induktivität zu groß!



### Berechnung des Rotorwickels

Der Widerstand des Rotorwickels ist nicht störend. Die Verlustleistung bei 45 mA ist 0,24 W. Die gibt der Wickel allemal an die Umgebung ab.

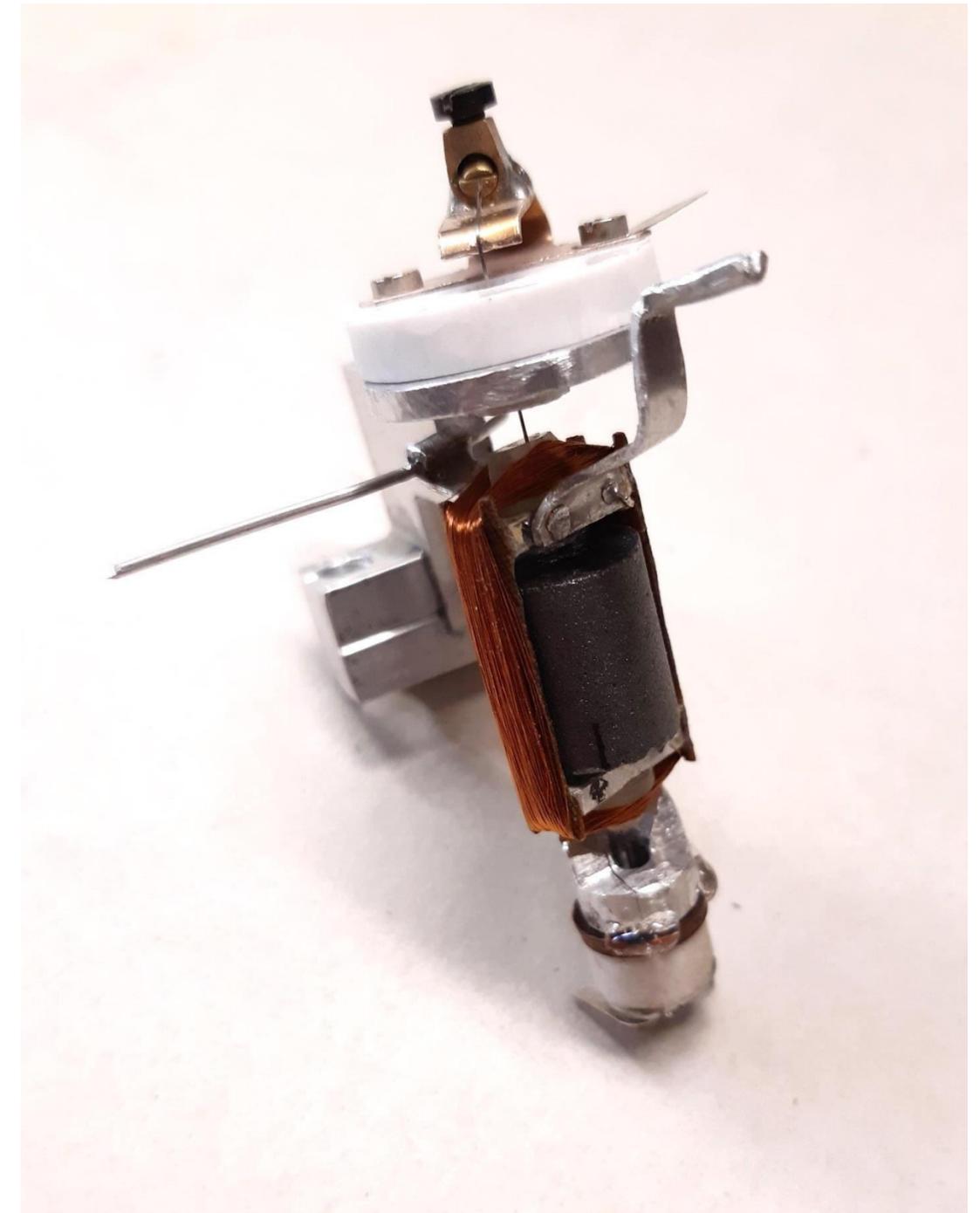
Die Wahl des Drahtdurchmessers war goldrichtig. Auf der Längsseite trägt der Draht bauchig auf.

Noch unklar und schwer zu berechnen ist die Induktivität des Rotors. Wir werden sehen ...

|  |                       |  |
|--|-----------------------|--|
| Wickelraumbreite   | 5 mm                  |  |
| Wickelraumhöhe   | 1,5 mm                |  |
| Wickelfläche   | 7,5 mm <sup>2</sup>   |  |
| Strombelastung der Wickelfläche  | 2,3 A/mm <sup>2</sup> |  |
| Strom durch Wickelfläche   | 17,25 A               |  |
| Projektierter Rotorstrom   | 0,06 A                |  |
| Windungszahl Wickel  | 287,5 Wdg.            |  |
| Drahtdurchmesser theoretisch   | 0,162 mm              |  |
| Drahtdurchmesser praktisch   | 0,07 mm               |  |
| Strombelastbarkeit lt. Buch  | 10 mA                 |  |
| Strombelastbarkeit praktisch   | 45 mA                 |  |
| Wicklungslänge 15 mm x 30 mm   | 0,09 m                |  |
| Drahtlänge   | 25,875 m              |  |
| Drahtwiderstand pro m  | 4,56 Ω/m              |  |
| Wicklungswiderstand  | 117,99 Ω              |  |
| Verlustleistung  | 0,2389 W              |  |
| Mehr Platz für den Spalt, Bewegung weniger kritisch!                       |                       |  |
| Wicklung freiliegend und klein! Gute Wärmeabfuhr! --> 10 A/mm <sup>2</sup> |                       |  |

## Gestaltung der Rotorbaugruppe, einiges ist anders:

- Das Spannband geht nicht durch, der Kern stört.
- Es gibt keine Rückstellfedern. Der Rotorstrom fließt durch die Spannbandhälften.
- Die Fertigungsungenauigkeiten müssen ausjustiert werden.
- Die Nullpunktjustierung befindet sich unten.
- Die Spannbandklemmung oben hat sich so hier nicht bewährt. Das Band ist inzwischen gelötet. Ist besser handhabbar.
- Die Spannbandarretierung an den Querhäuptern ist schwierig.



## Montieren und probieren

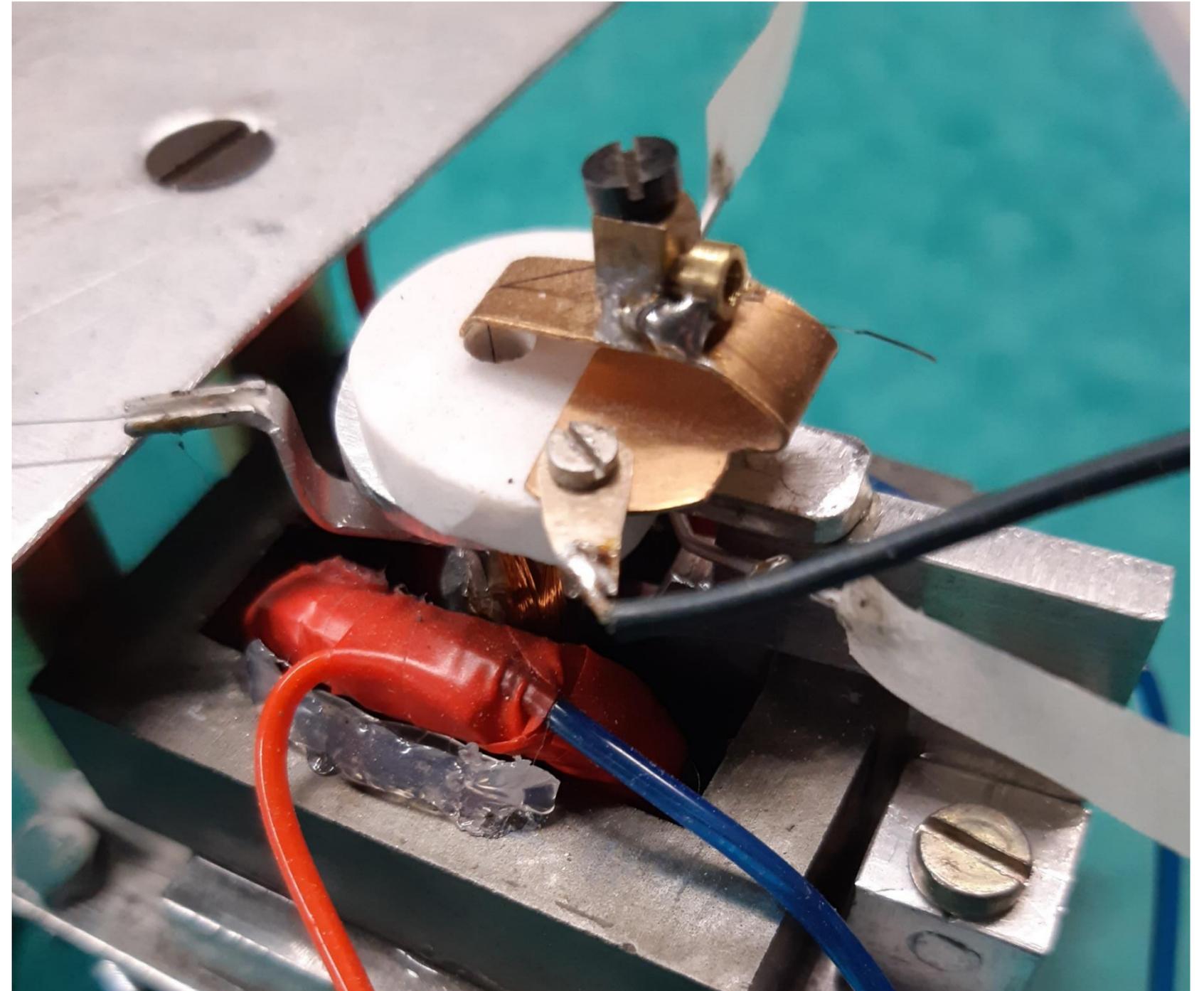
Spannend: Wie ist nun die Empfindlichkeit?

- Rotorstrom = 45 mA, immer vor Stator!
- Rotorspannung ohm'sch = 4,95 V
- Vollausschlag bei Statorstrom = 56 mA

→  $\text{Empf}_{\text{max}} = 0,28 \text{ W}$

Aaaaber:

- Rotor braucht Vorwiderstand, sonst Phasenverschiebung zu groß!
- R-Rotorspannung<sub>min</sub> = 25 V
- Vollausschlag bei 1,4 W (25 V 56 mA)
- Vollausschlag bei 14 W (250 V 56 mA)
- → 1 Teilstrich = 0,1 W bei 220 V



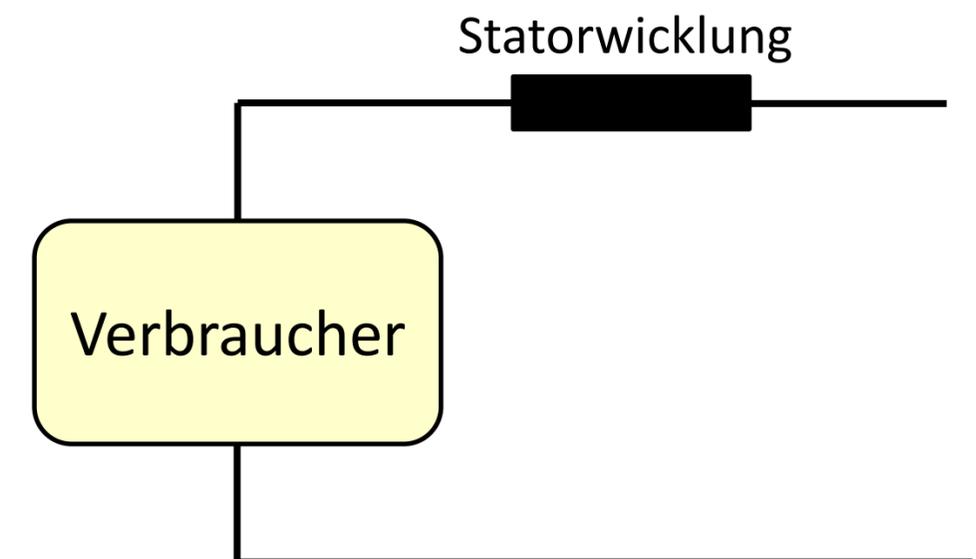
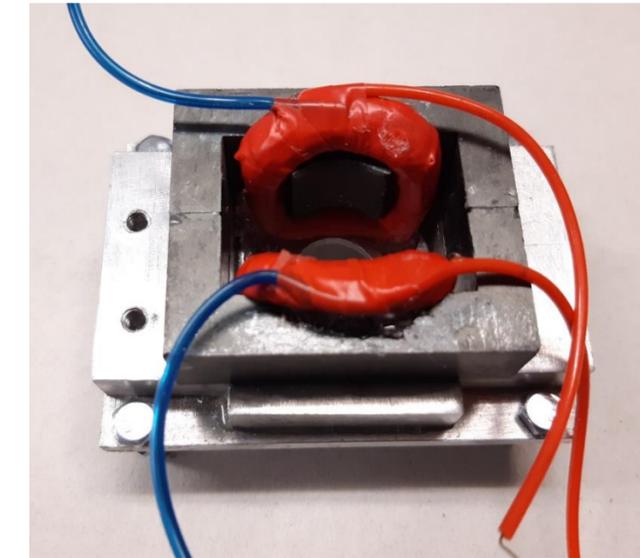
### Dimensionierung der Messbereiche

Die Vorwiderstände und Skalenwerte

| Spannungsbereich [V]: | Vorwiderstand [Ω] | Strom <sub>tats</sub> [A] | Vollausschlag bei I <sub>stator</sub> [A] | Einzelwiderstände [Ω] | Endausschlag Stator Reihe [W] | Endausschlag Stator Paral. [W] | Faktoren für SKW |
|-----------------------|-------------------|---------------------------|---|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------|
| 25,000                | 445,556           | 0,045                     | 0,056                                     | 445,556               | 1,400                         | 2,800                          | 0,010            |
| 50,000                | 1.001,111         | 0,045                     | 0,056                                     | 555,556               | 2,800                         | 5,600                          | 0,020            |
| 100,000               | 2.112,222         | 0,045                     | 0,056                                     | 1.111,111             | 5,600                         | 11,200                         | 0,040            |
| 250,000               | 5.445,556         | 0,045                     | 0,056                                     | 3.333,333             | 14,000                        | 28,000                         | 0,100            |
| 500,000               | 11.001,111        | 0,023                     | 0,056                                     | 5.555,556             | 28,000                        | 56,000                         | 0,200            |
| 1.000,000             | 22.112,222        | 0,011                     | 0,056                                     | 11.111,111            | 56,000                        | 112,000                        | 0,400            |
| 2.500,000             | 55.445,556        | 0,005                     | 0,056                                     | 33.333,333            | 140,000                       | 280,000                        | 1,000            |
| 5.000,000             | 111.001,111       | 0,002                     |   |                       |                               |                                |                  |
|                       |                   |                           |   |                       |                               | Stator Reihe:                  | 1,000            |
|                       |                   |                           |   |                       |                               | Stator Parallel:               | 2,000            |

## Fehler durch Stator

| Induktiver Widerstand bei [Hz]:                                    | Stator Reihe | Stator Parallel | Einheit                   |
|--|--------------|-----------------|---------------------------|
| 50   | 3,24         | 0,75            | $\Omega_{\text{reaktiv}}$ |
| 500  | 32,44        | 7,49            | $\Omega_{\text{reaktiv}}$ |
| 5000   | 324,44       | 74,91           | $\Omega_{\text{reaktiv}}$ |
| Induktiver Spannungsabfall bei $I_{\text{max}}$ und Frequenz [Hz]: |              |                 |                           |
| 50   | 0,811        | 0,375           | $V_{\text{reaktiv}}$      |
| 500  | 8,111        | 3,746           | $V_{\text{reaktiv}}$      |
| 5000   | 81,109       | 37,457          | $V_{\text{reaktiv}}$      |
| Serien-Resonanzen bei C [ $\mu\text{F}$ ] und f [Hz]:              |              |                 |                           |
| 50   | 981,112      | 4249,000        | $\mu\text{F}$             |
| 500  | 9,811        | 42,490          | $\mu\text{F}$             |
| 5000   | 0,098        | 0,425           | $\mu\text{F}$             |
| Ohm'scher Widerstand:  |              |                 |                           |
|  | 5,32         | 1,33            | $\Omega$                  |
| Ohm'scher Spannungsabfall 56 mA                                    |              |                 |                           |
|  | 0,298        | 0,074           | V                         |
| Ohm'scher Spannungsabfall 250 mA                                   |              |                 |                           |
|  | 1,330        | 0,333           | V                         |



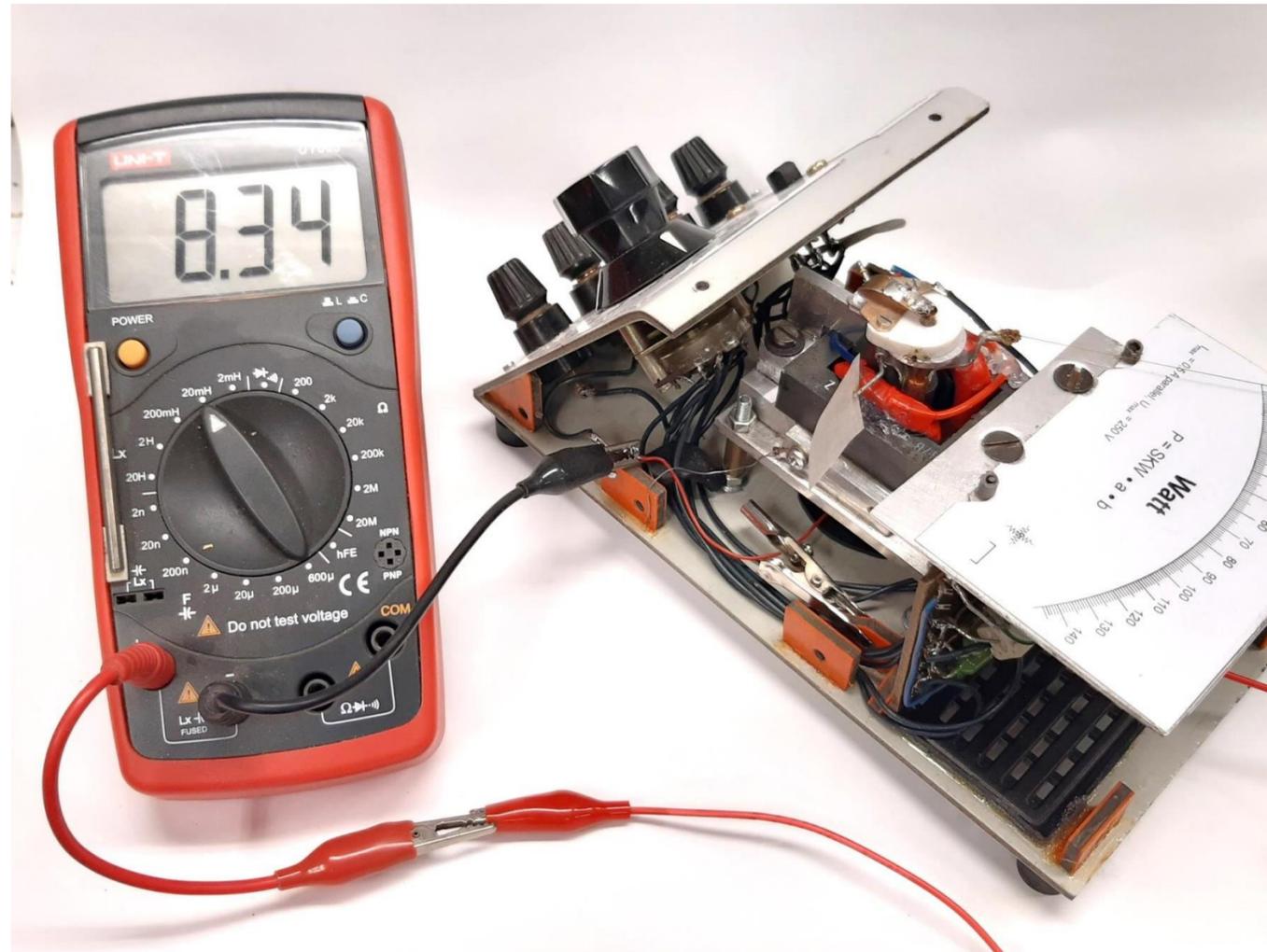
## Fehler durch Rotor

| Induktiver Widerstand bei [Hz]:                                    |  | Rotor    | Einheit                   |
|--|--|----------|---------------------------|
| 50   |  | 2,5371   | $\Omega_{\text{reaktiv}}$ |
| 500  |  | 25,3706  | $\Omega_{\text{reaktiv}}$ |
| 5000   |  | 253,7064 | $\Omega_{\text{reaktiv}}$ |
| Induktiver Spannungsabfall bei $I_{\text{max}}$ und Frequenz [Hz]: |  |          |                           |
| 50   |  | 0,114    | $V_{\text{reaktiv}}$      |
| 500  |  | 1,142    | $V_{\text{reaktiv}}$      |
| 5000   |  | 11,417   | $V_{\text{reaktiv}}$      |

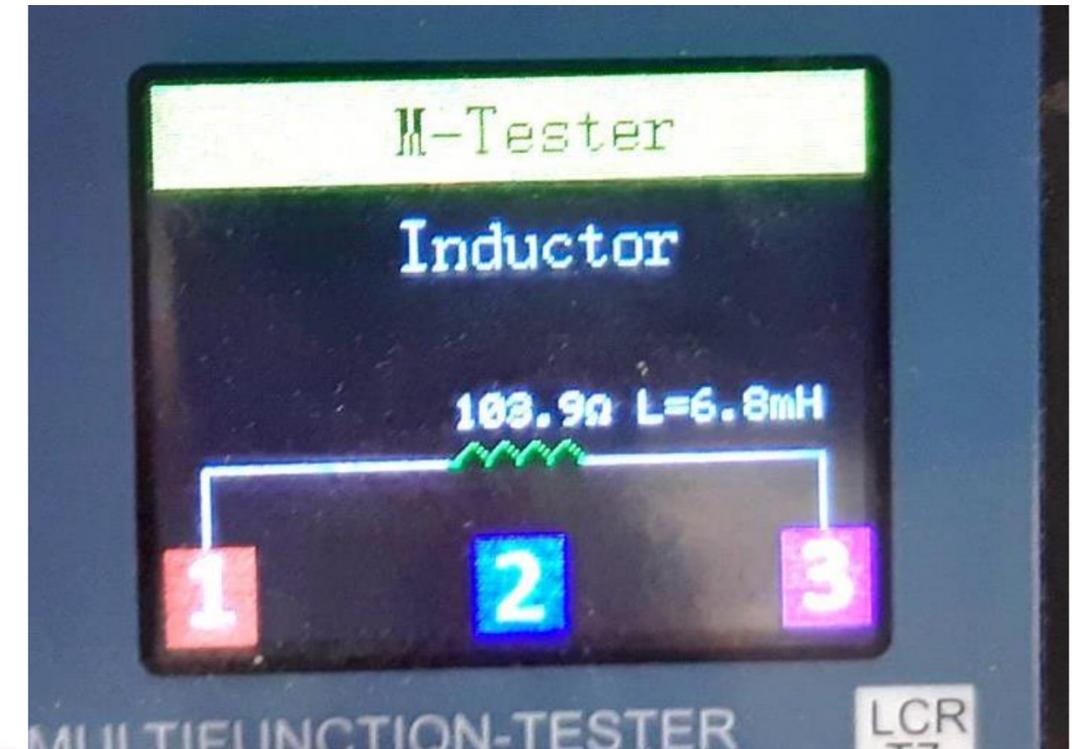
**Höhere Frequenzen sind problematisch. Am besten 50 Hz!**



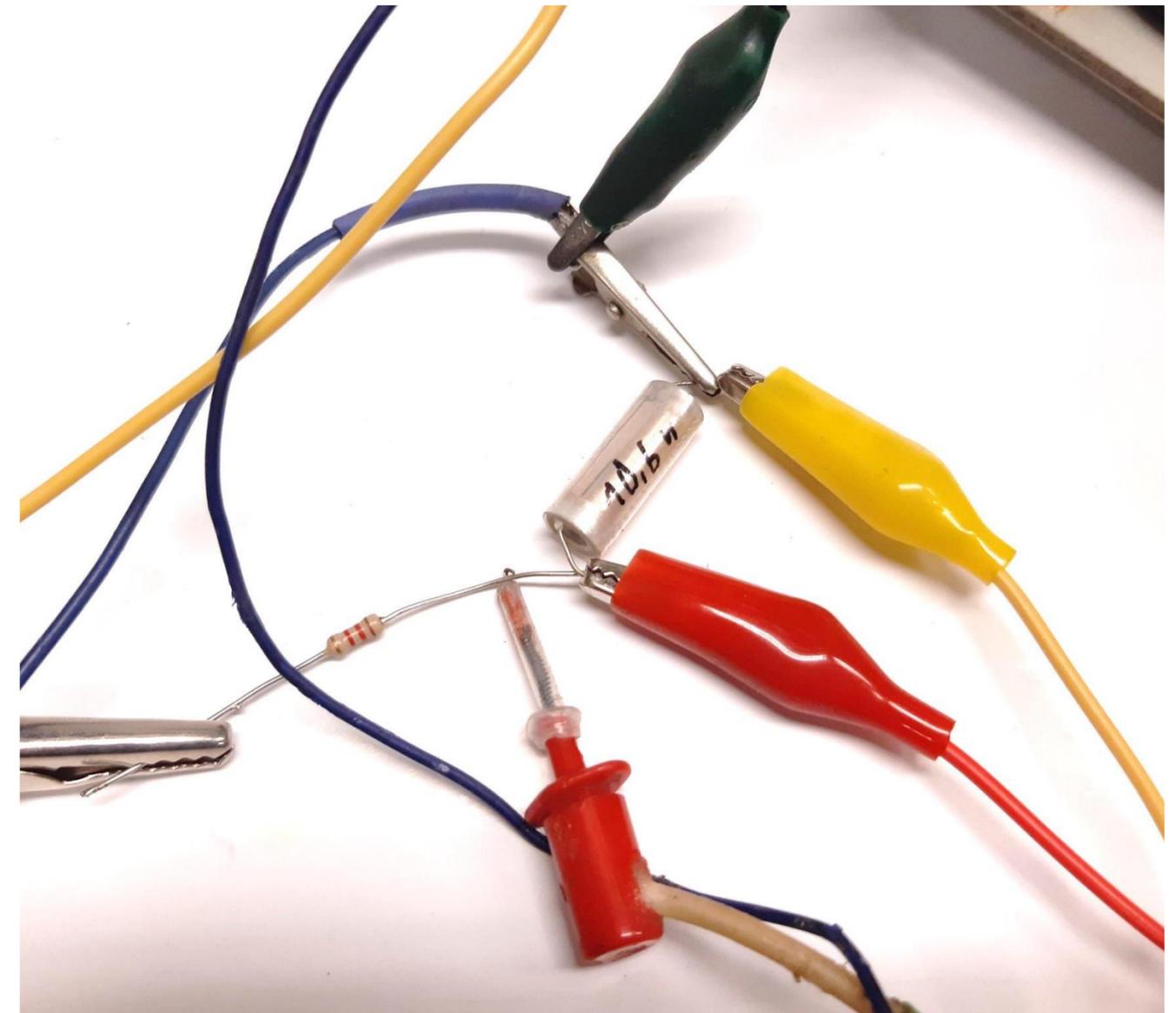
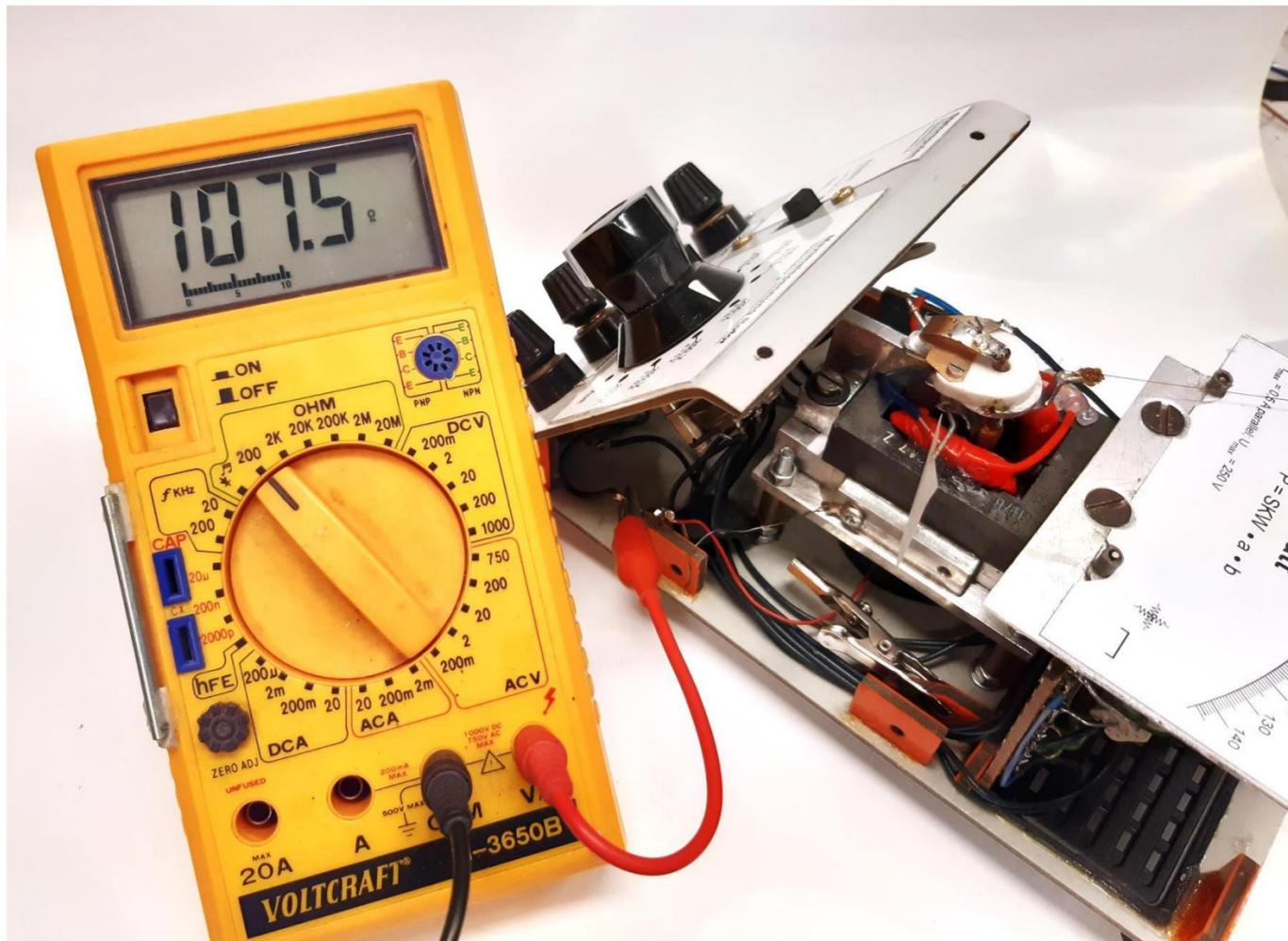
## Induktivitätsmessung und Widerstandsmessung des Rotors mit L-Meter UT603...



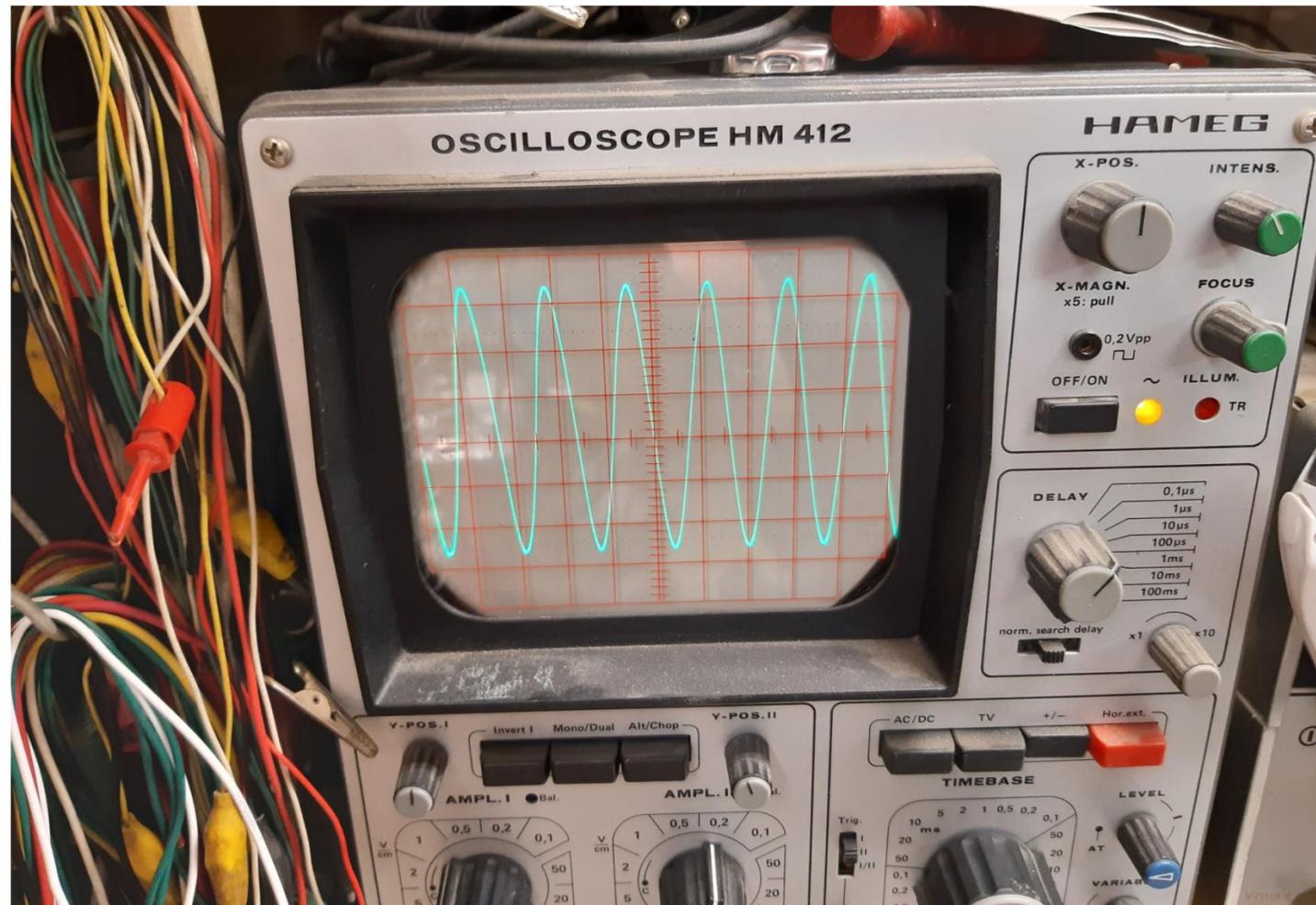
...und mit dem LCR T7 ...



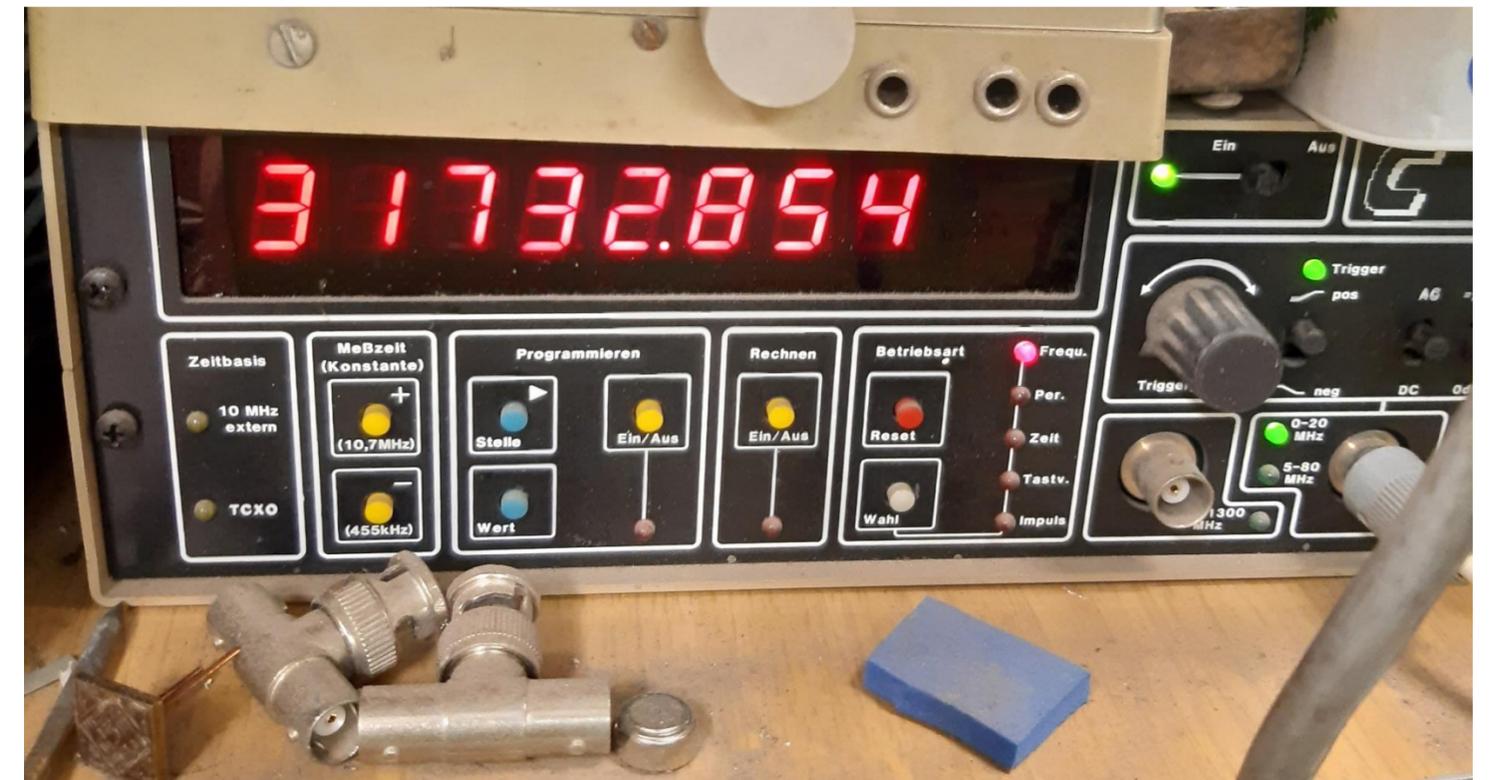
... und mit dem Multimeter Voltcraft M 3650 B



...und über die Resonanz mit einem Kondensator.



Dazu braucht man ein Oszilloskop und einen Frequenzzähler ...



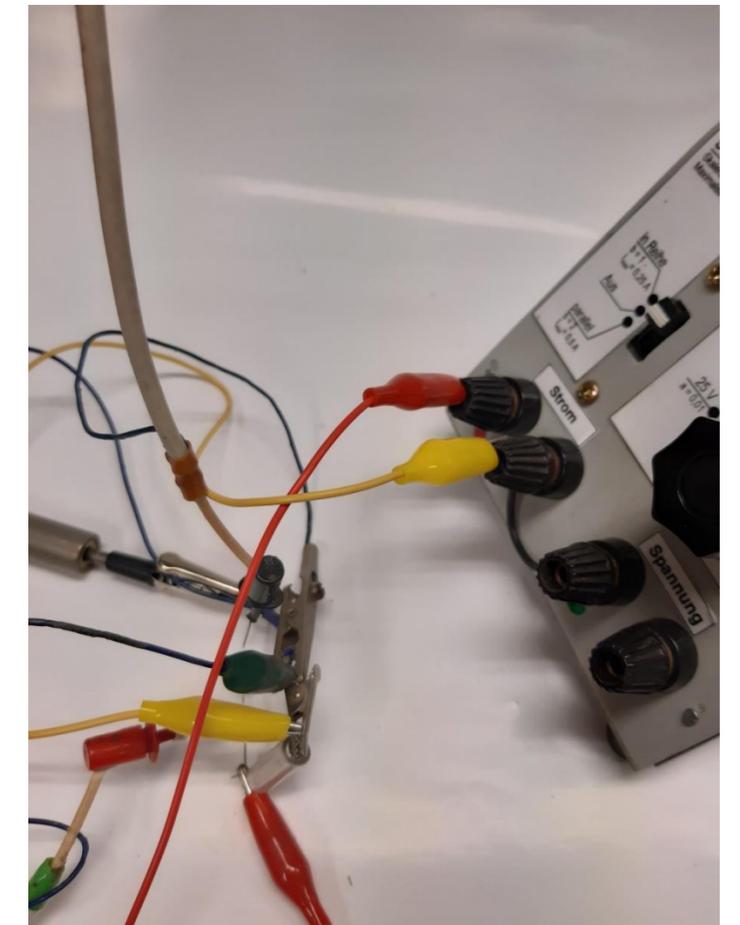
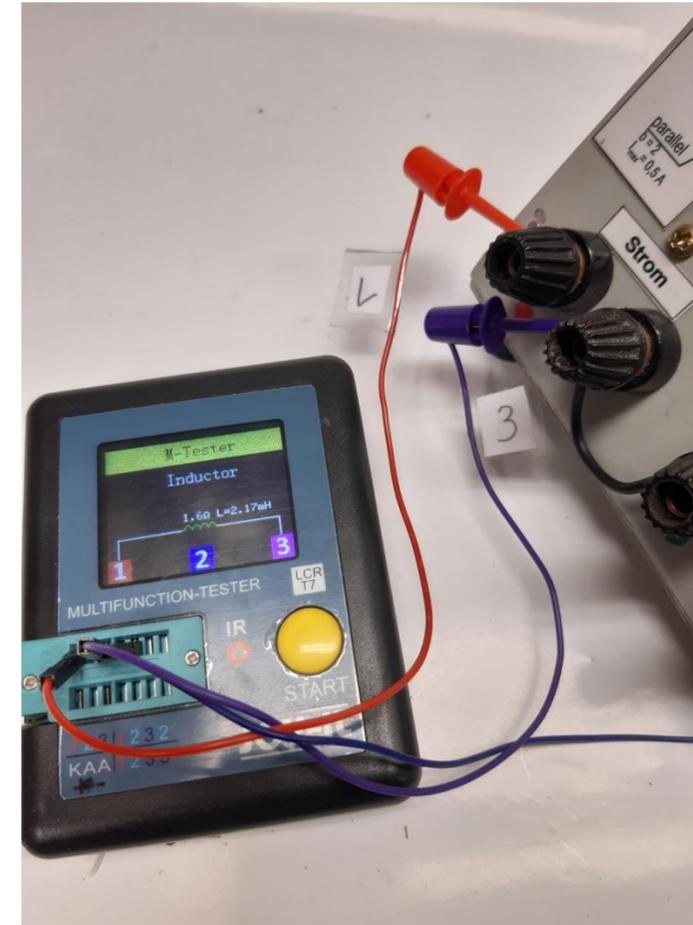
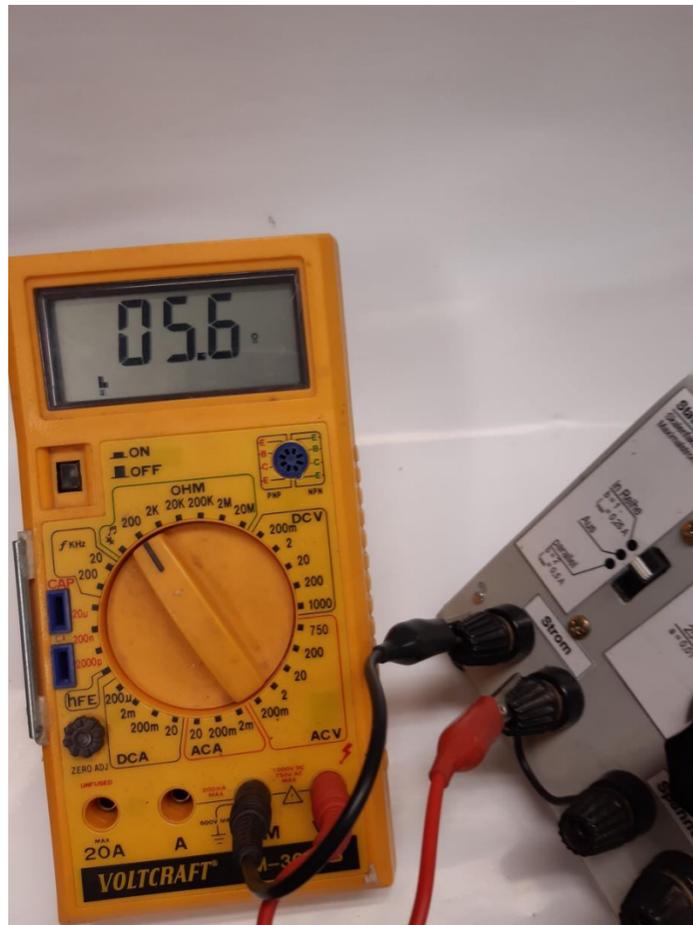
... die Thomsonsche  
Schwingungsgleichung ...

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

... und EXCEL.

| f     | C        | L        |
|-------|----------|----------|
| 19760 | 1,06E-08 | 6,12E-03 |
| 15507 | 1,06E-08 | 9,94E-03 |
| 31733 | 1,06E-08 | 2,37E-03 |

### Das gleiche mit dem Stator.

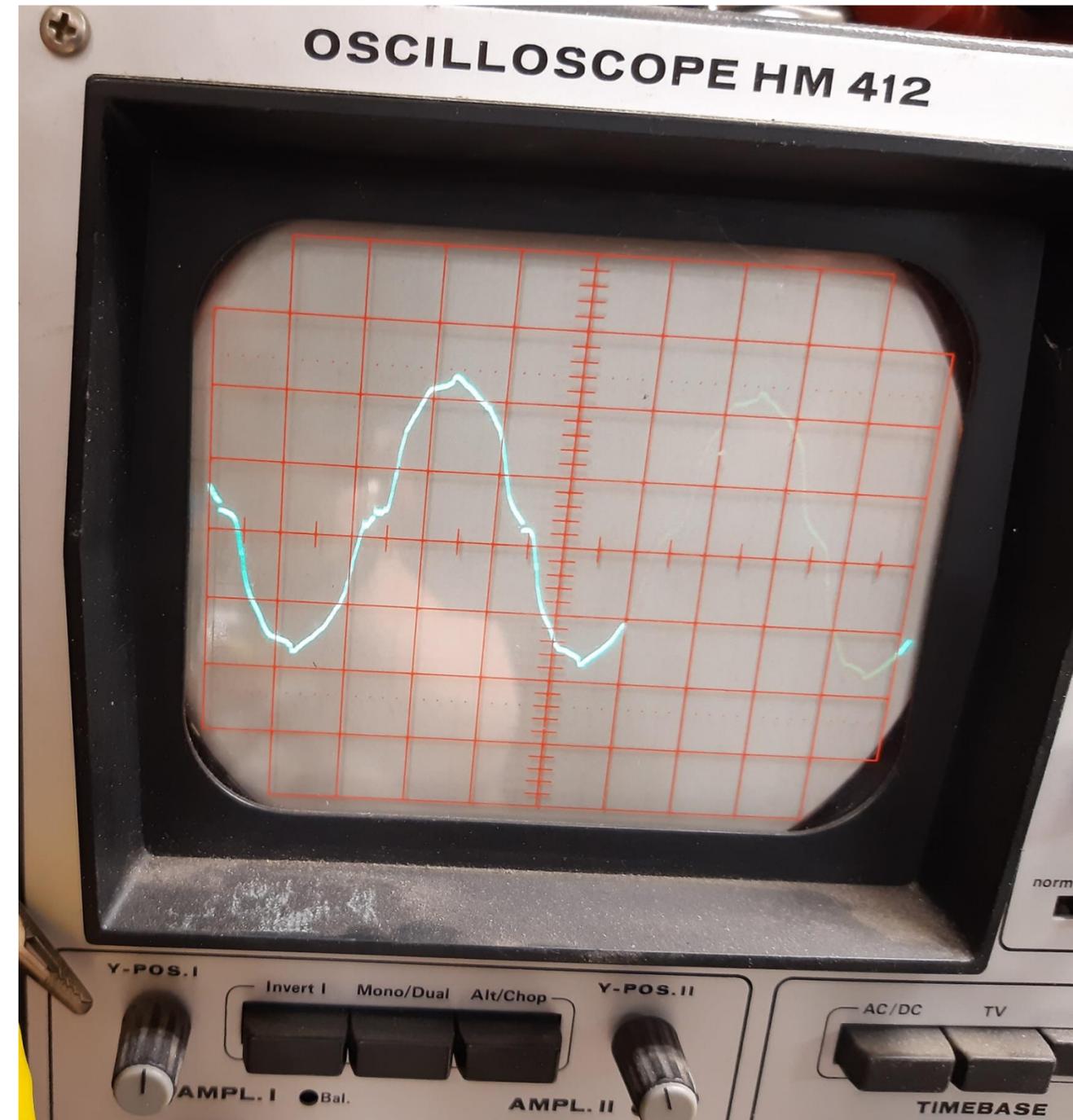
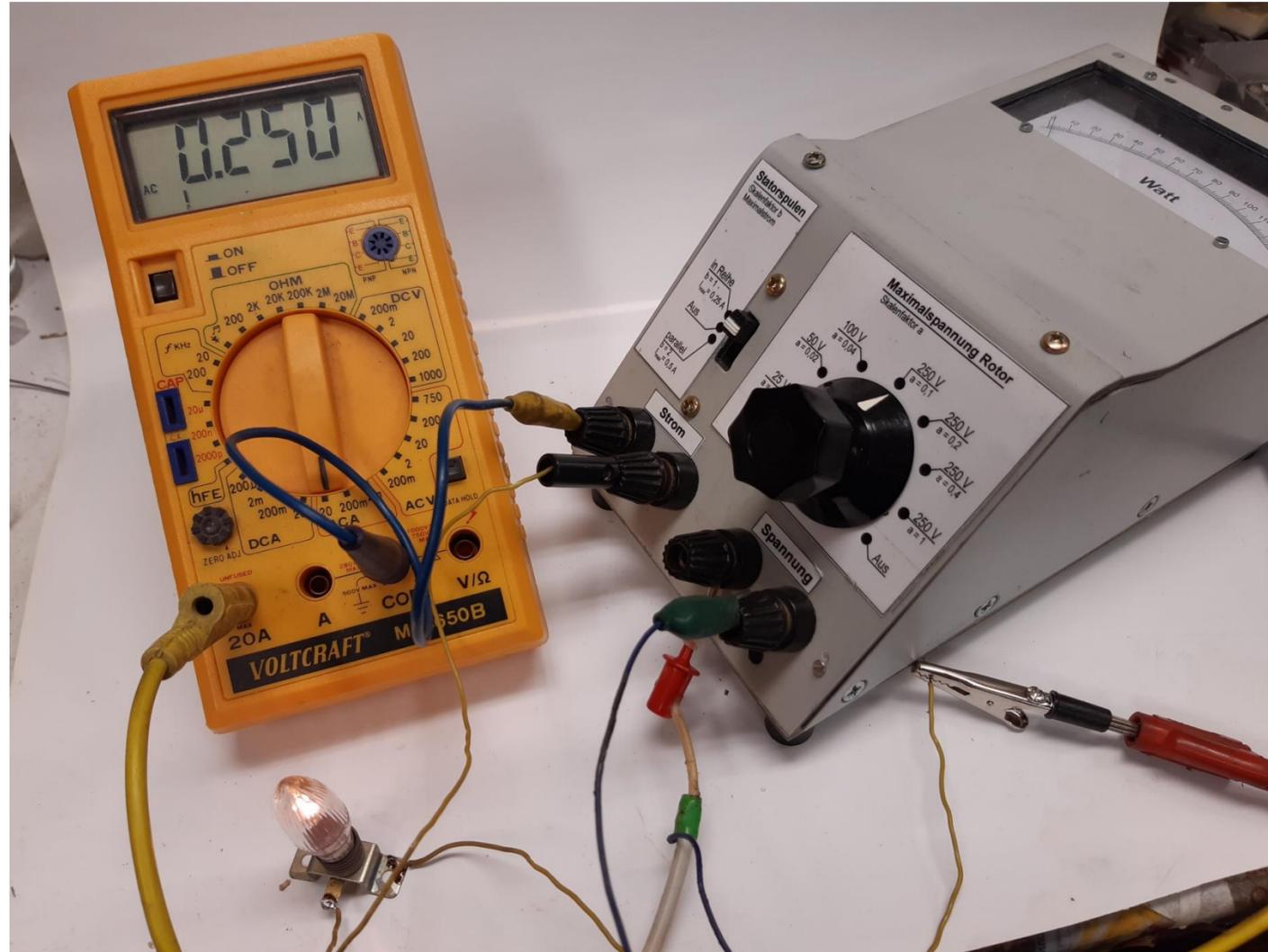


| <b>Messwerte 1. Juli 2023</b> |         |        |       |          |                  |
|-------------------------------|---------|--------|-------|----------|------------------|
| <b>Spannungsspule:</b>        |         |        |       |          |                  |
| Via:                          | L-Meter | Tester | MM    | Resonanz | Berechnung vorab |
| L [mH]                        | 8,34    | 6,8    |       | 6,12     | 8,08             |
| R [Ω]                         | 107,2   | 103,9  | 107,6 |          |                  |
| <b>Stromspule</b>             |         |        |       |          |                  |
| Reihe                         | L-Meter | Tester | MM    | Resonanz |                  |
| L [mH]                        | 10,46   | 9,1    |       | 9,94     | 10,32            |
| R [Ω]                         | 5,7     | 5,6    | 5,4   |          | 5,33             |
| Parallel                      | L-Meter | Tester | MM    | Resonanz |                  |
| L [mH]                        | 2,51    | 2,17   |       | 2,37     | 2,38             |
| R [Ω]                         | 1,6     | 1,6    | 1,4   |          | 1,33             |

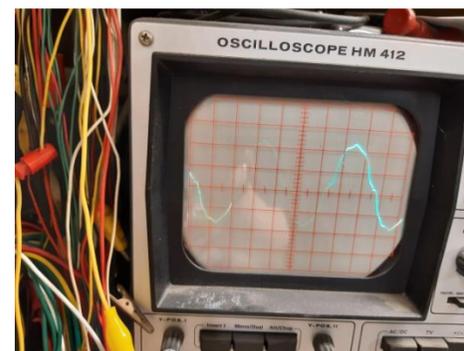
Die Induktivitätsmessung ist immer etwas problematisch. L wird immer durch relativ viel R überlagert. Beides zu trennen fällt auch den Geräten schwer.

**Auf alle Fälle stimmt es ganz gut mit der Berechnung überein.**

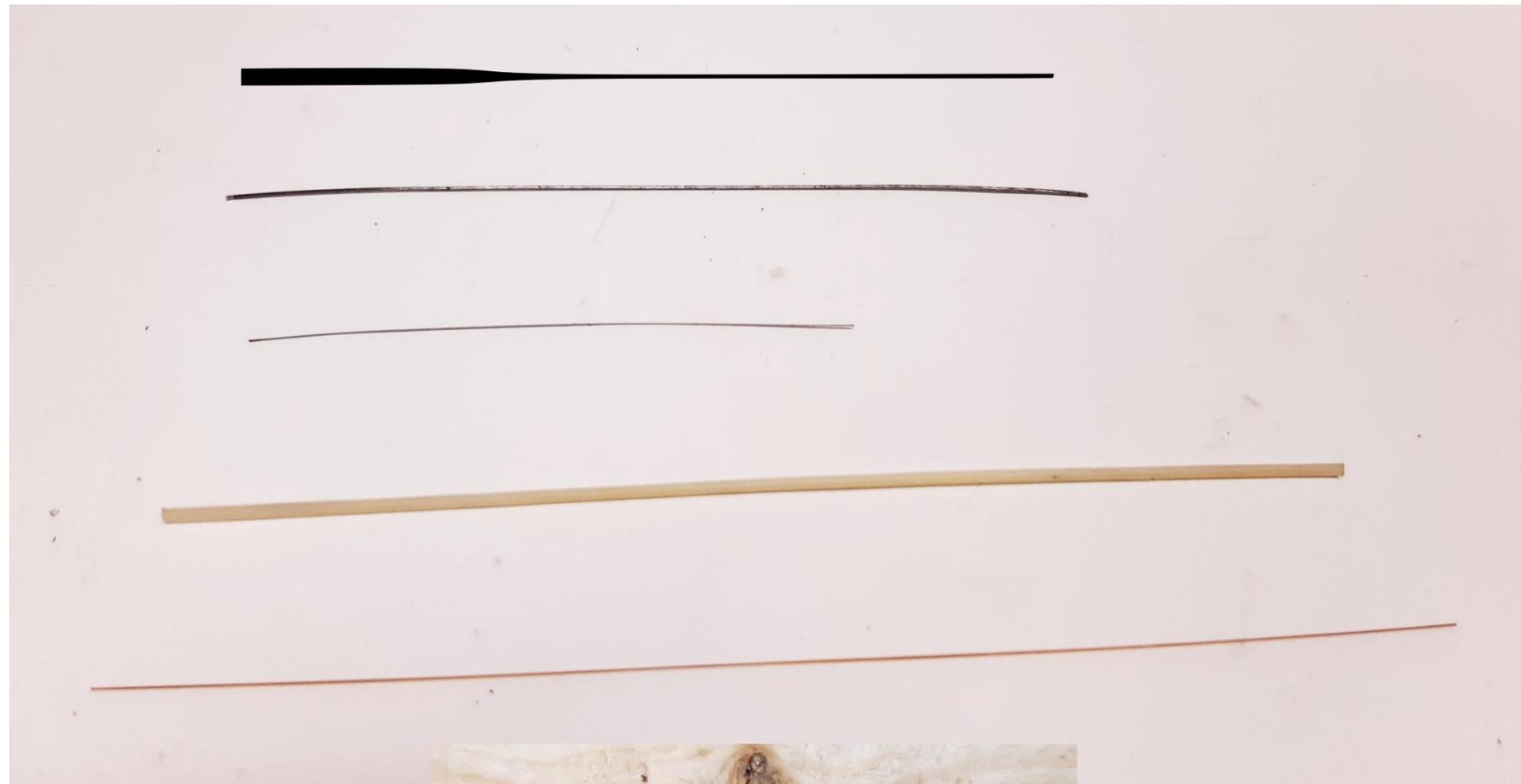
Die Dimensionierung war also richtig.



Die Kopplung beträgt  
zum Glück nur 0,2 V  
bei Maximalstrom.



## Schon mal verwendete Zeiger



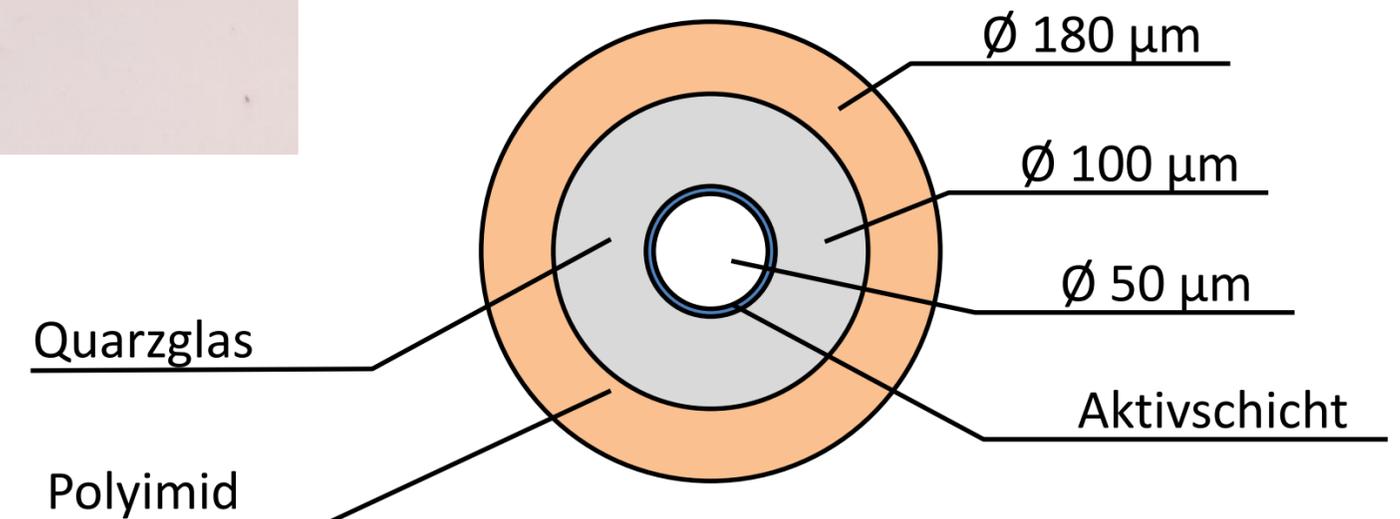
Ausgezogener Glaszeiger

Stahldrahtzeiger

PVC-Zeiger dünn (Besenhaar)

PVC-Zeiger dick (PVC-Draht)

Kapillare der Elektrophorese



### Zunächst ein Problem.

Ein alter, defekter Aufzieh-Wecker spendete seine Unruhfeder. „Verbrauchte“ sich nach und nach beim Aufbau. Angebot von  für 21,95 €:

#### Produktbeschreibung

Bronze-Federdrähte  
für Drehpendeluhren

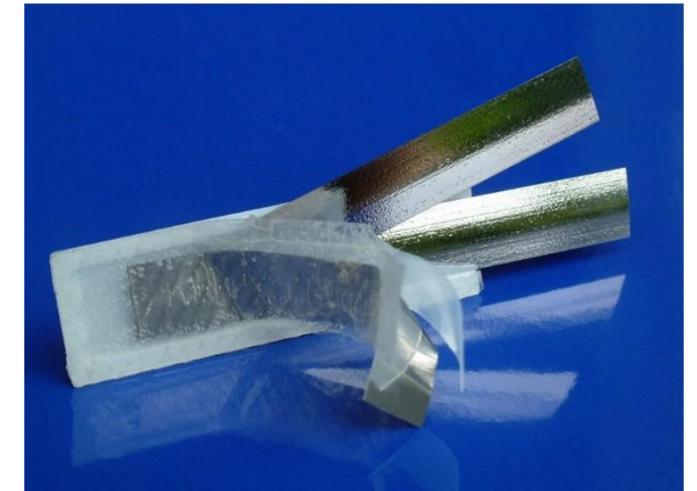
Sortiment mit  
je 1 Bronzefeder 0,05 - 0,06 - 0,07 - 0,08 und 0,09 mm dick. Länge 150 mm.

|                  |                 |
|------------------|-----------------|
| Material         | Bronze          |
| Anwendung        | Drehpendeluhren |
| Inhalt           | 5.00            |
| Außenmaß Länge   | 150.00          |
| Maßeinheit Länge | mm              |
| Stärke mm        | 0.050           |

Viele Angebote sind eine „Katze im Sack“

### Dann die Lösung.

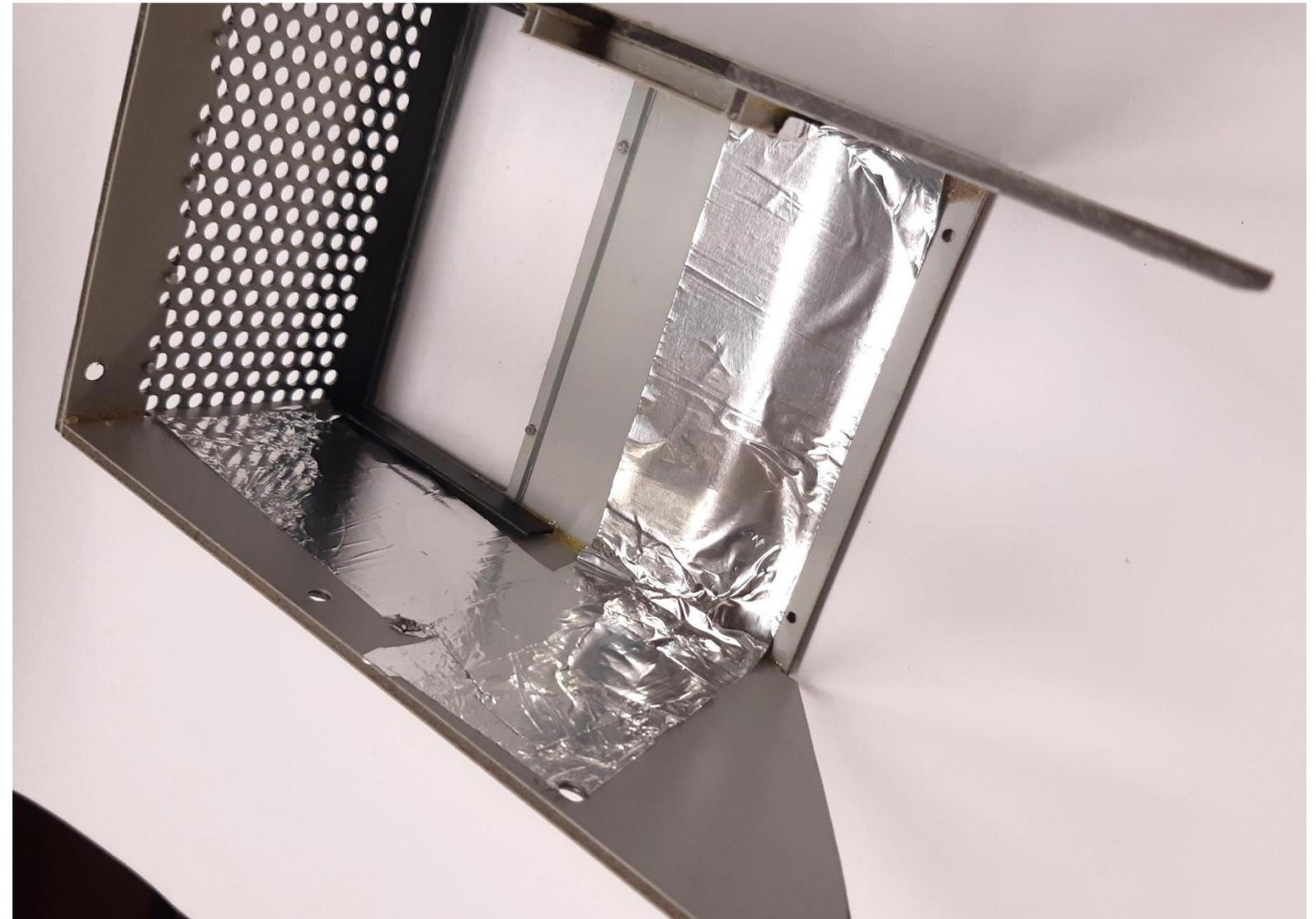
Stahlplättchen 0,022 dick!



Stahlplättchen  
0,022 mm dick!

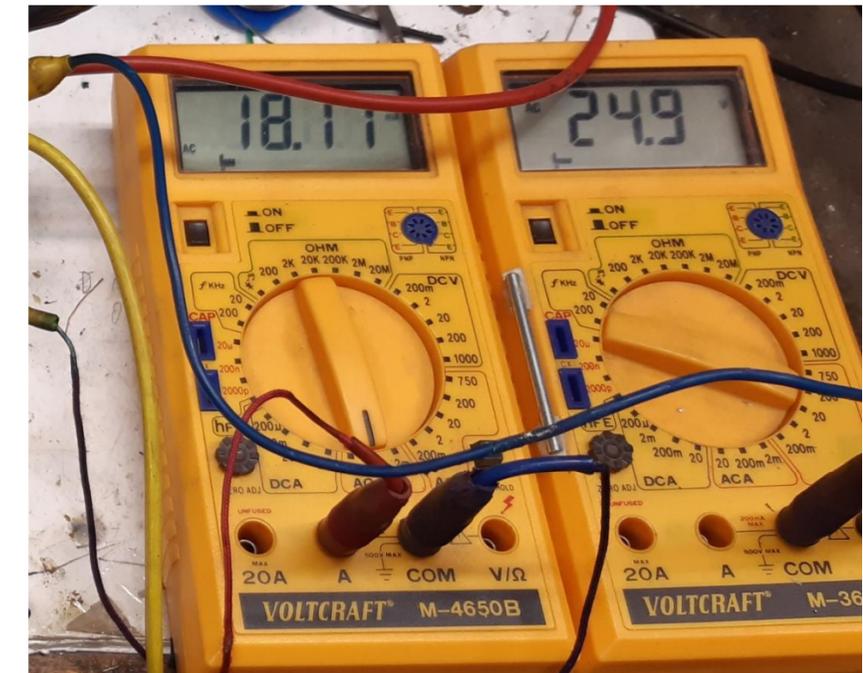
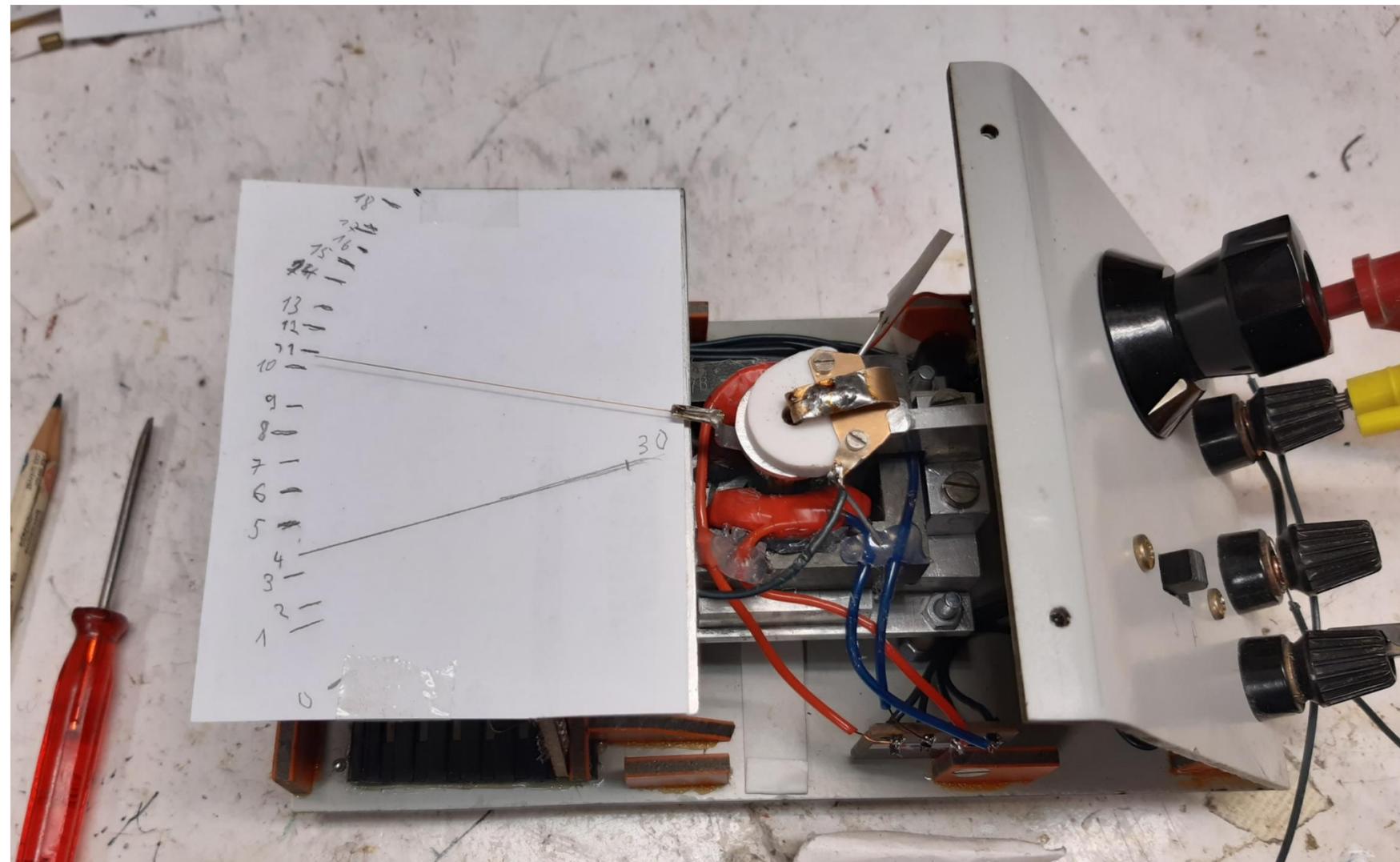
Befestigung durch  
Weichlöten, aber  
einen Knoten im  
Zinn „begraben“.

**Das Gehäuse bedarf im Inneren einer Abschirmung. Sonst macht der Zeiger irgendwas.**  
Selbstklebende Aluminiumfolie tut es.



## Behelfsskala anfertigen.

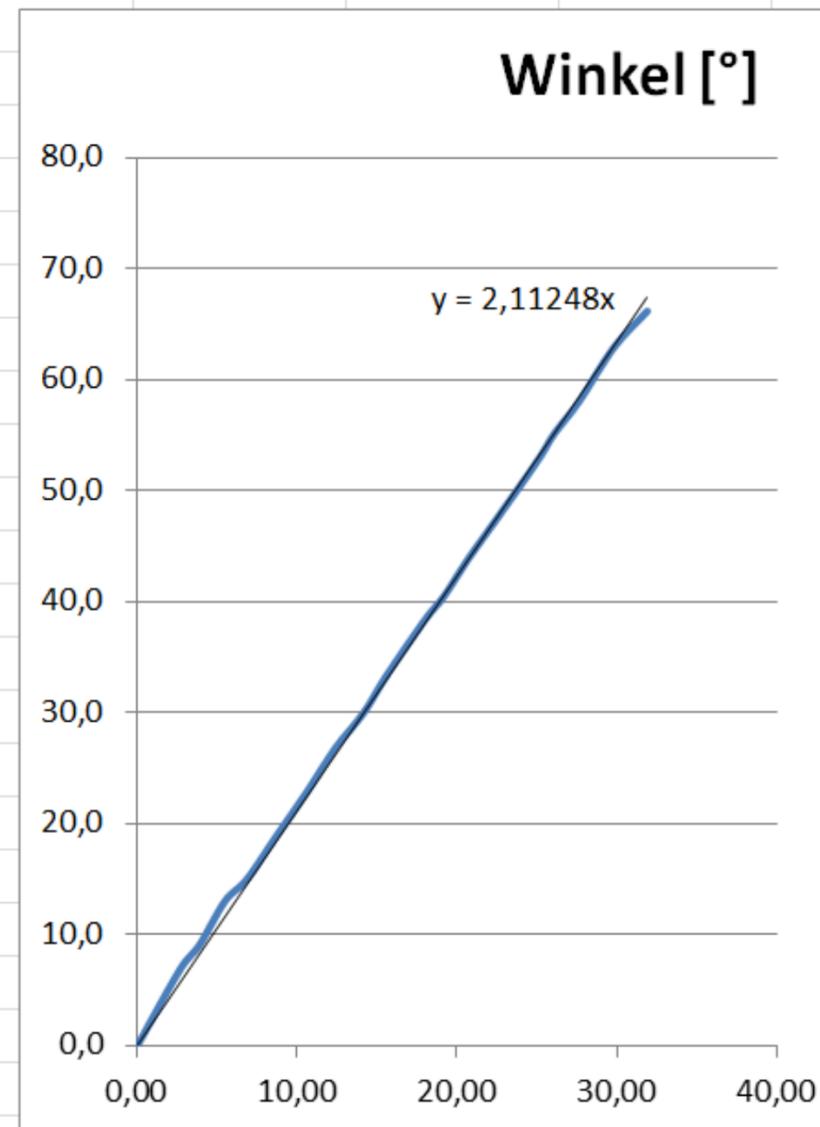
Beliebige Messgrößen aufgeben, ca. 15 ... 20 Werte. Striche nummerieren, Protokoll machen. Mittelpunkt reproduzierbar machen.



## Funktion ermitteln.

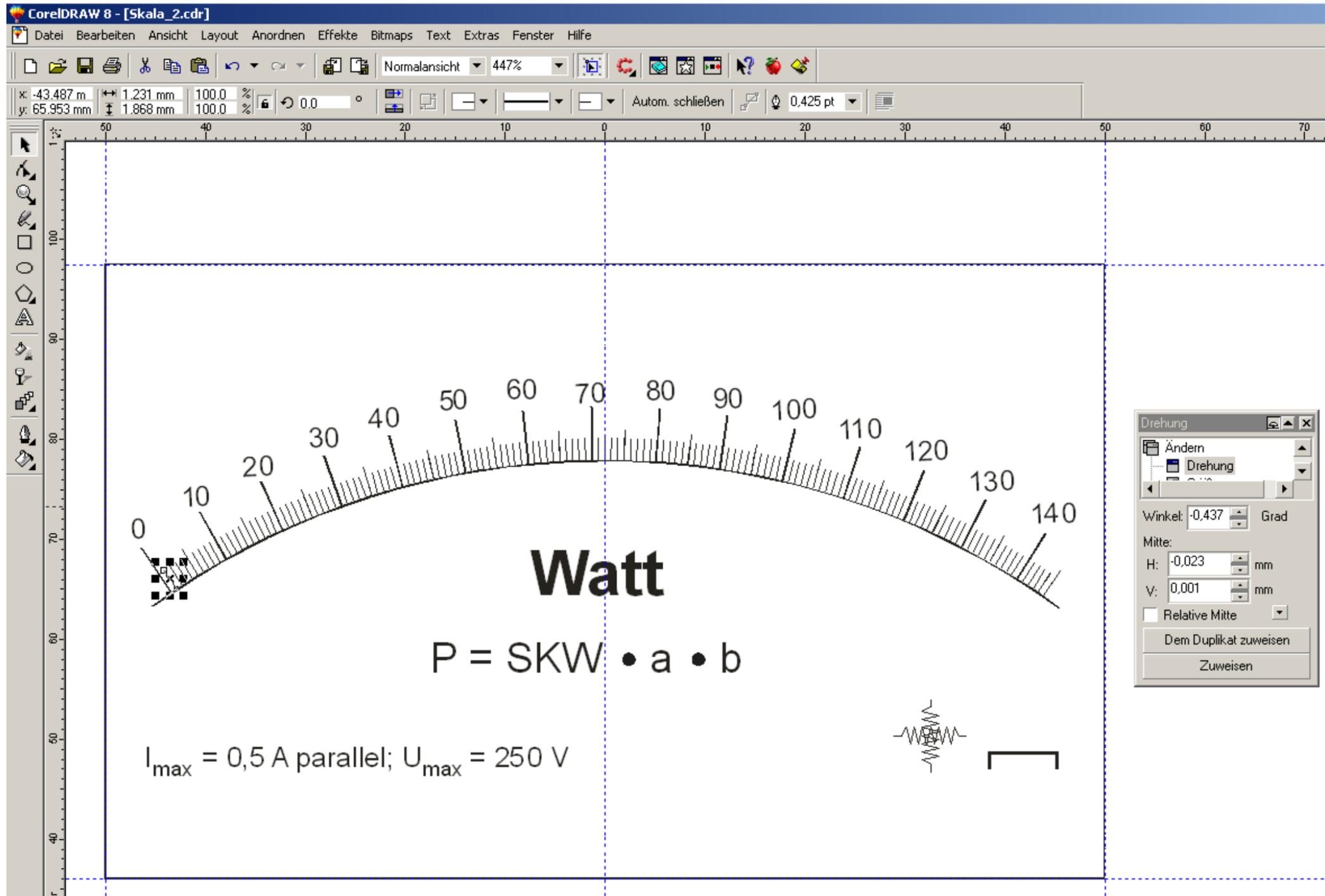
Hilfsskala mit Winkelmesser ausmessen, Werte ins EXCEL, Funktion machen, visuell beurteilen, nachrechnen.

| MP-Nr. | Strom [mA] | Winkel [°] | Winkel lt. Formel [°] | $\Delta_{abs}$ [°] |
|--------|------------|------------|-----------------------|--------------------|
| 0      | 0,00       | 0,0        | 0                     | 0,000              |
| 1      | 2,73       | 7,0        | 5,7670704             | 1,233              |
| 2      | 3,86       | 9,0        | 8,1541728             | 0,846              |
| 3      | 5,47       | 13,0       | 11,5552656            | 1,445              |
| 4      | 6,85       | 15,0       | 14,470488             | 0,530              |
| 5      | 8,75       | 19,0       | 18,4842               | 0,516              |
| 6      | 10,67      | 23,0       | 22,5401616            | 0,460              |
| 7      | 12,37      | 26,8       | 26,1313776            | 0,669              |
| 8      | 14,16      | 30,0       | 29,9127168            | 0,087              |
| 9      | 15,52      | 33,2       | 32,7856896            | 0,414              |
| 10     | 18,01      | 38,4       | 38,0457648            | 0,354              |
| 11     | 19,18      | 40,5       | 40,5173664            | -0,017             |
| 12     | 20,67      | 43,8       | 43,6649616            | 0,135              |
| 13     | 22,00      | 46,5       | 46,47456              | 0,025              |
| 14     | 23,82      | 50,2       | 50,3192736            | -0,119             |
| 15     | 25,21      | 53,1       | 53,2556208            | -0,156             |
| 16     | 26,10      | 55,2       | 55,135728             | 0,064              |
| 17     | 27,60      | 58,0       | 58,304448             | -0,304             |
| 18     | 29,80      | 62,9       | 62,951904             | -0,052             |
| 19     | 31,90      | 66,2       | 67,388112             | -1,188             |



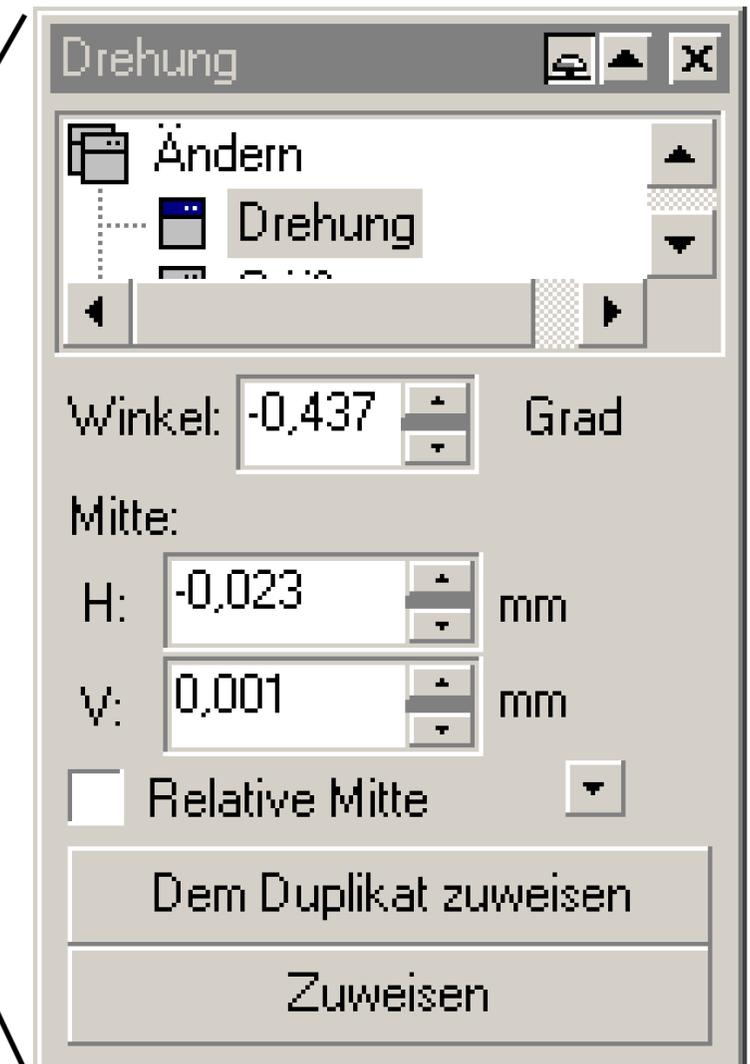
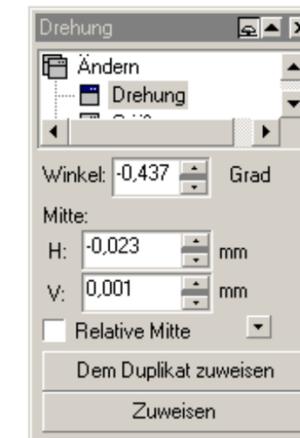
| Voll bei 30 mA: | Winkel [°] |
|-----------------|------------|
| 30              | 63,3744    |
| Teilstriche:    | 0,43706    |
| 2er Teilung:    | 0,87413    |
| 10er:           | 4,37065    |

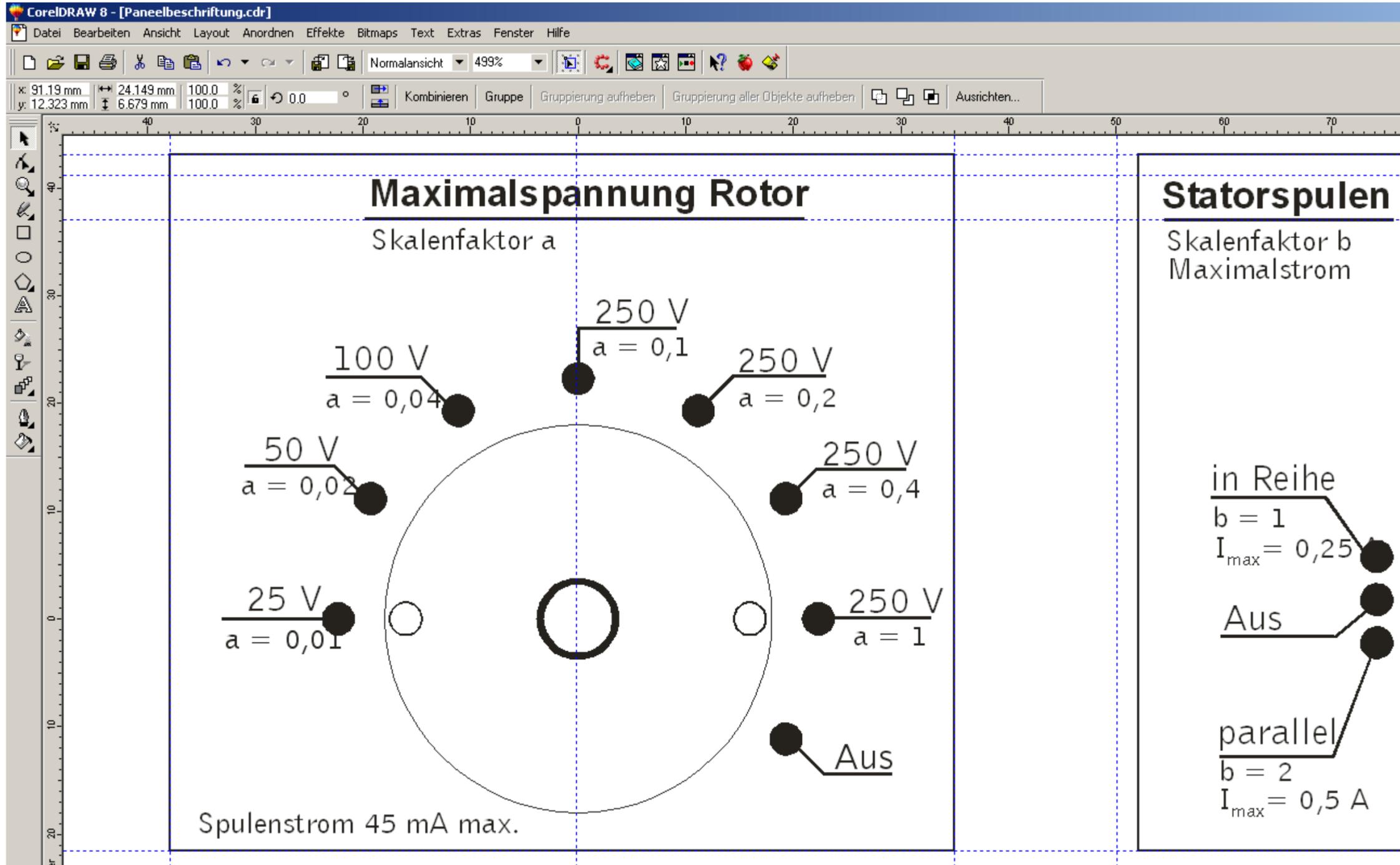
— Winkel [°]  
— Linear (Winkel [°])



## Corel

arbeitet vektoriell und mit guter Auflösung.



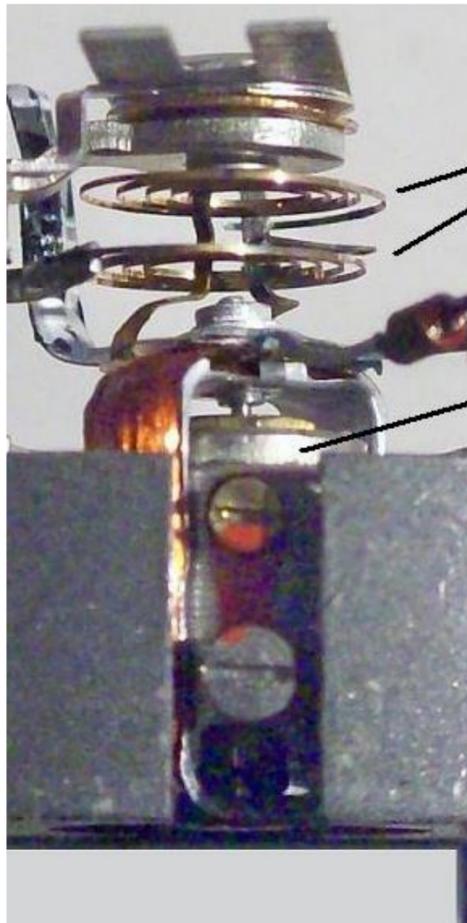


**Corel**

arbeitet vektoriell und mit guter Auflösung.

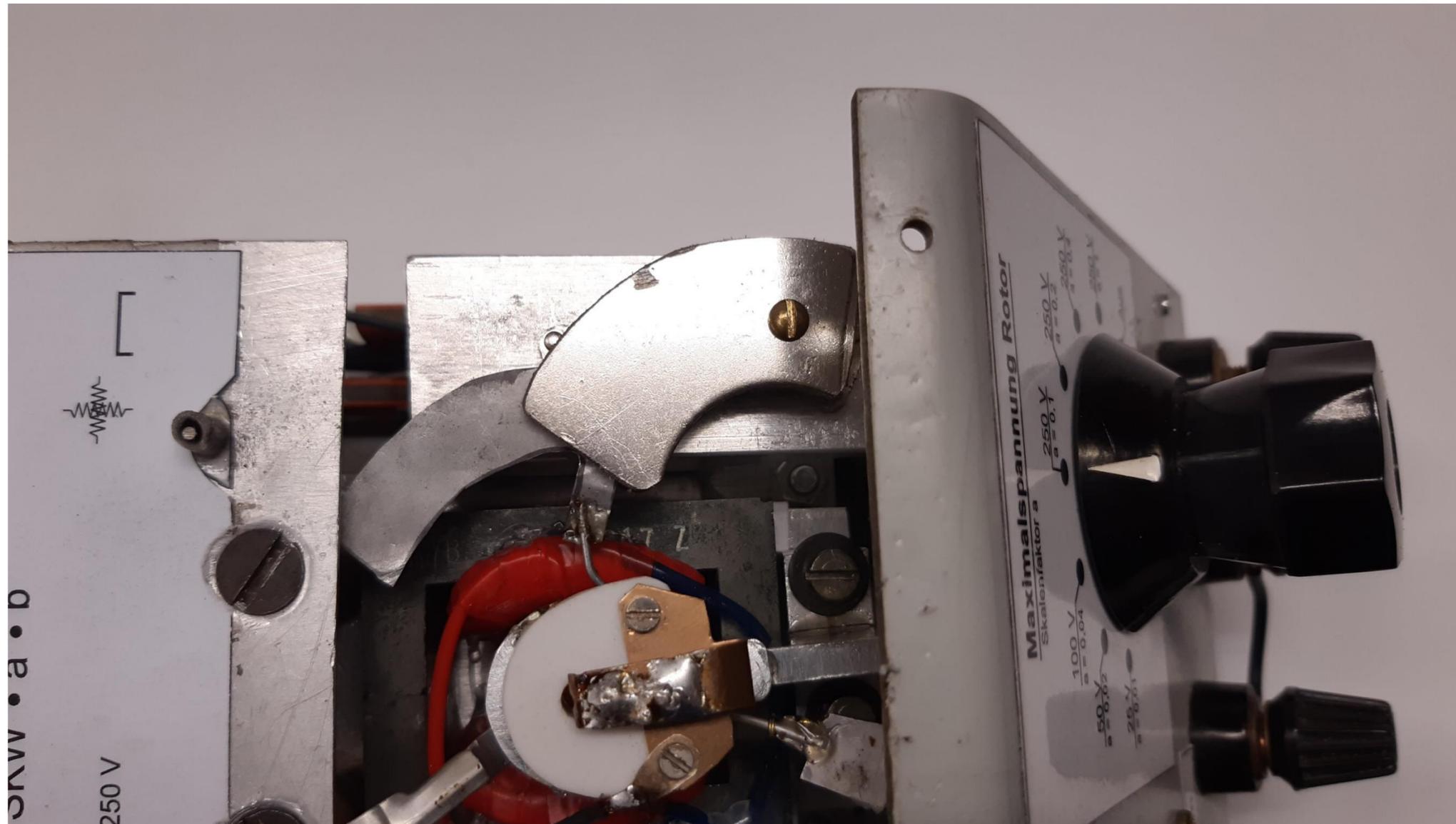
## Dämpfung mit Luft oder Wirbelstrom?

Mit einem Luftwedel war es zu schwach und eine Luftkammer zu kompliziert.



## Probieren geht über studieren

Erster Versuch mit Aluminiumblech 0,5 : Dämpfung viel zu groß. Anzeige erst nach 10 Sekunden!



Zweiter Versuch mit  
Aluminiumblech 0,15 :  
Dämpfung richtig, der  
aperiodische Grenzfall wird  
nahezu erreicht.



**Fertsch!**

Ich bedanke mich für die  
Aufmerksamkeit!