

## 1 Organisatorisches

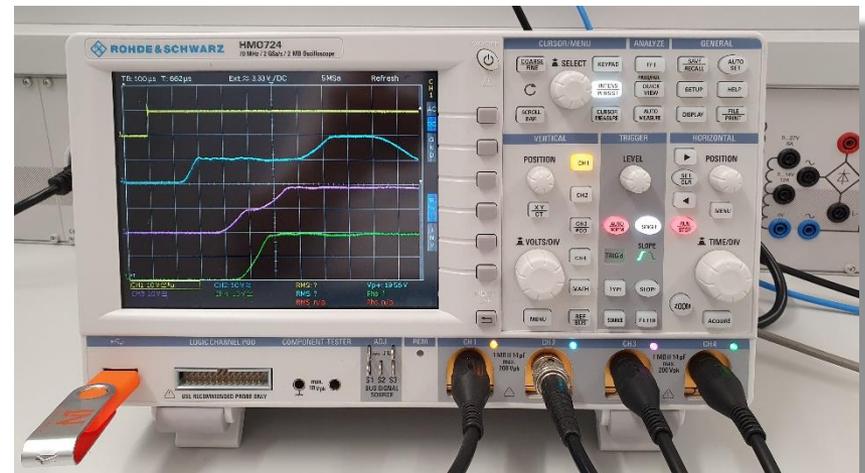
- ✓ Protokollabgabe: spätestens 2 Wochen nach Versuchsdurchführung per Mail bei Prof. Schmidt

## 2 Versuchstechnik

### ✓ Oszilloskop

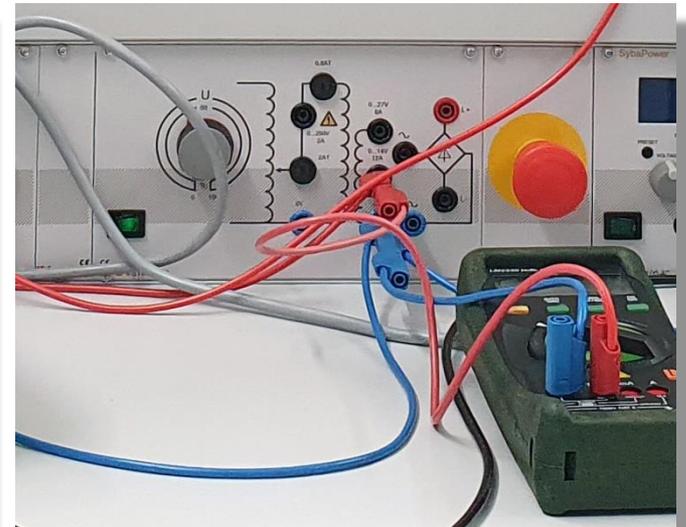
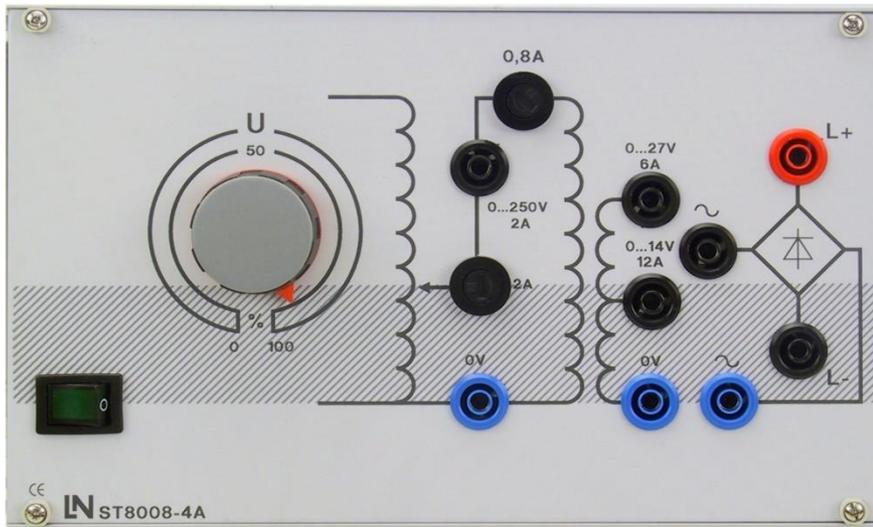
Für die Bedienung sind Fachkenntnisse erforderlich. Die intuitive Bedienung - „irgend eine Taste muss doch das gewünschte Ergebnis liefern“ - ist hier nicht zielführend.

Mit Hilfe von Videosequenzen können Sie sich an die notwendigen Bedienschritte für relevante Messaufgaben heranführen lassen. Auf den Seiten des Labors Grundlagen der Elektrotechnik finden Sie Links zu den Videos und auch die Bedienungsanleitung: <https://f-ei.hszg.de/fakultaet/labore/bereich-elektrotechnik/labor-grundlagen-der-elektrotechnik.html>



✓ **Regelbare Spannungsversorgung AC/DC 0-250 V/2A; 0-14 V/12 A; 0-27V/6 A**

- Die stufenlos einstellbare Wechselspannung wird über einen Dreh-Stelltransformator mit nachgeschaltetem Sicherheitstransformator (Erzeugung DC: über frei zuschaltbarem Brückengleichrichter)
- Nutzung des Ausganges 0...14V / 12A



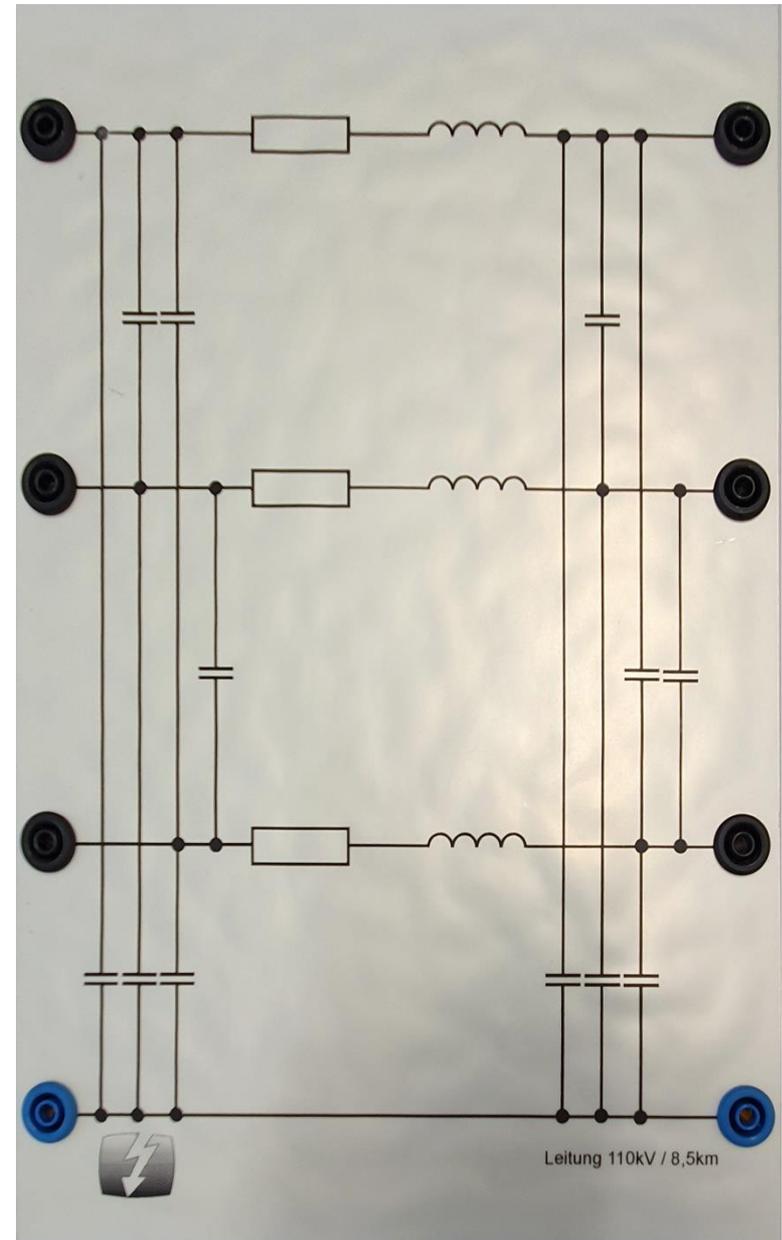
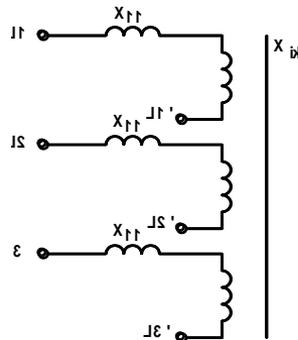
## ✓ Leistungsschaltermodell

- Das Leistungsschalter-Modell wird zum Ein- bzw. Ausschalten des untersuchten Stromkreises verwendet
- Der Triggerausgang wird genutzt, um beim Auslösen des Schalters zugleich die Aufzeichnung des Oszilloskops zu starten (externe Triggerung des Oszilloskops)



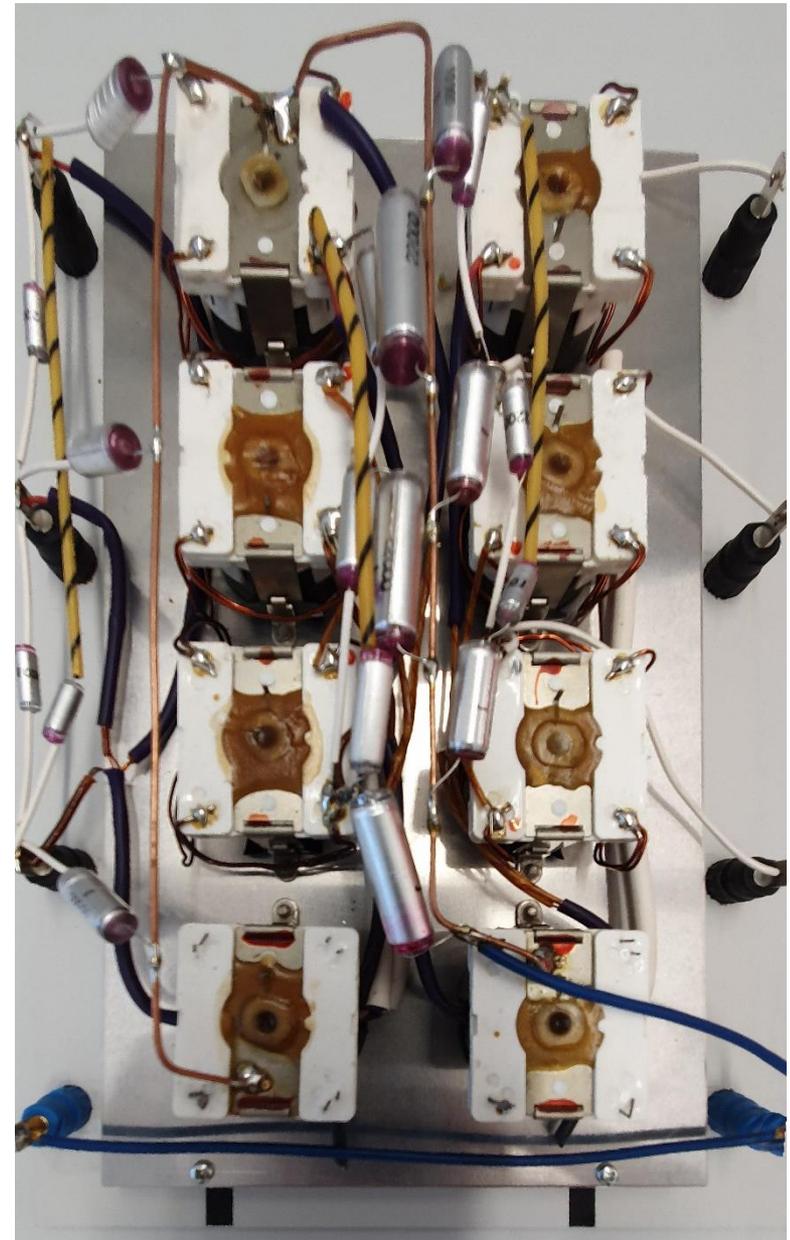
## ✓ Leitungsnachbildungen

- Die die Betriebsgrößen des dreipoligen Ersatzschaltbildes der 110-kV-Freileitung werden durch Kettenschaltungen von  $\pi$ -Vierpolen nachgebildet
- Der Anschluss erfolgt mit 4 mm – Laborleitungen bzw. Brückensteckern
- Das Modell orientiert sich an einer 110-kV-Freileitung 210/36 Al/St, Mastbild Tonne.
- Für den diesen Leitungstyp ergibt aus den Werten für  $X'_{ii}$  und  $X'_{ik}$  der magnetische Kopplungsfaktor  $k = 0,4$  zwischen den Leitern.
- Diese magnetische Kopplung wird durch Übertrager realisiert.

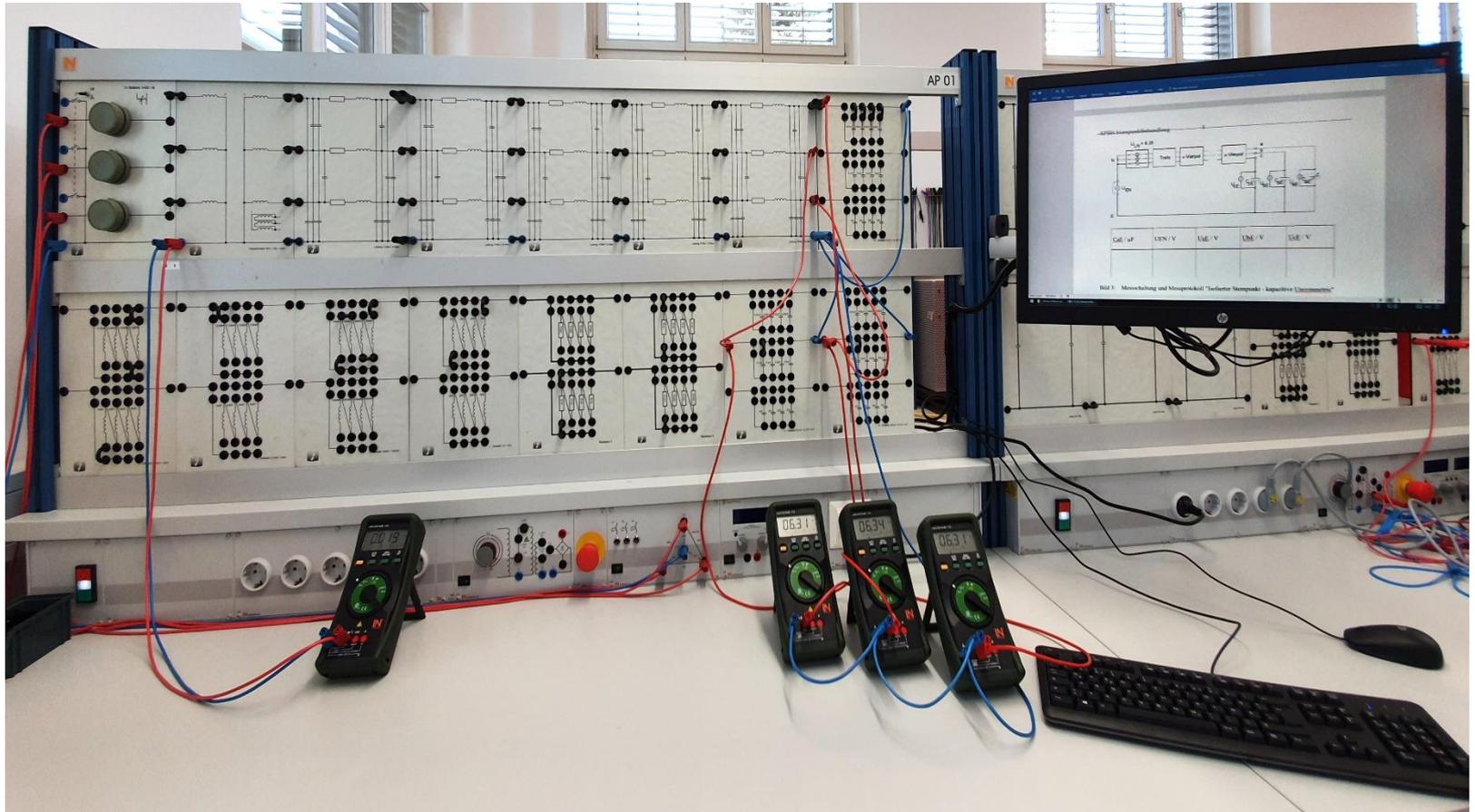


## ✓ Leitungsnachbildungen

- Bei geöffneter Experimentierplatte wird die Kettenschaltung von  $\pi$ -Vierpolen sichtbar. Die magnetische Kopplung zwischen den Außenleitern und Erde erfordert 4 Übertrager je Vierpol. Die Leiter-Leiter und Leiter Erde-Kapazitäten sind durch Folienkondensatoren nachgebildet. Der Drahtwiderstand der Übertrager genügt, um die Resistanz der Leitung nachzubilden.
- Diese Experimentierplatte bildet eine 110-kV-Freileitung einer Länge von 8,5 km nach. Demzufolge repräsentiert jeder  $\pi$ -Vierpol eine Leitungslänge von 4,25 km.



✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz



Versuchsplatz zur Untersuchung des isolierten Sternpunktes gemäß  
4.1  
4.1.1 Sternpunktverlagerungsspannung bei kapazitiver Unsymmetrie

✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz



Versuchsplatz zur Untersuchung eines Erdschlusses am Leitungsende, Aufgabe 4.1.2

✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz



Versuchsplatz zur Untersuchung der Resonanzsternpunktterdung, Aufnahme der Resonanzkurve gemäß Aufgabe 4.2.1

✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz



Versuchsplatz zur Untersuchung der Resonanzsternpunktterdung, gemäß Aufgabe 4.2.2

✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz



Versuchsplatz zur Untersuchung der Resonanzsternpunktterdung, Aufnahme der v-Kurve gemäß Aufgabe 4.2.2

✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz



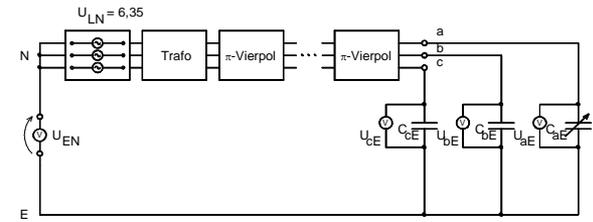
Versuchsplatz zur Untersuchung der niederohmigen Sternpunktterdung, gemäß Aufgabe 4.3, 4.3.1 Erdung über eine Reaktanz

## 4. Versuchsaufgaben

### 4.1 Isolierter Sternpunkt

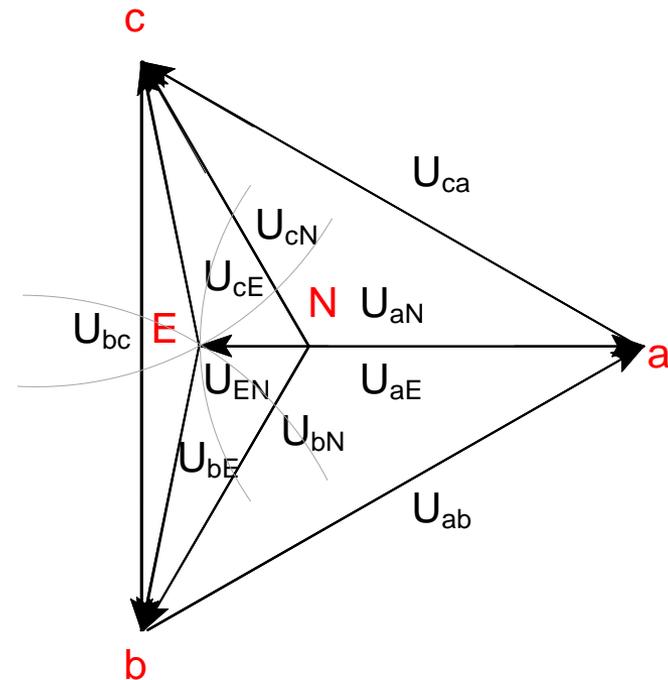
#### 4.1.1 Sternpunktverlagerungsspannung

bei fehlerfreiem Betrieb mit kapazitiver Unsymmetrie



Messwerte:

$C_{aE} / \mu\text{F}$	$U_{EN} / \text{V}$	$U_{aE} / \text{V}$	$U_{bE} / \text{V}$	$U_{cE} / \text{V}$
0	0,8	7,1	5,9	5,9
0,01	0,7	7,0	6,0	6,1
0,02	0,6	7,0	6,0	6,1
0,03	0,6	6,9	6,0	6,1
0,04	0,5	6,8	6,1	6,2
0,05	0,4	6,7	6,1	6,2
0,06	0,3	6,6	6,1	6,2
0,07	0,2	6,5	6,1	6,2
0,08	0,2	6,5	6,1	6,3
0,09	0,1	6,4	6,2	6,3
0,10	0,1	6,3	6,2	6,3



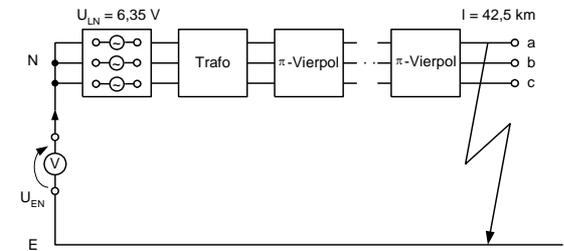
### Zeigerbild der Sternpunktverlagerungsspannung

Konstruktion zur Ermittlung des Punktes E: um die Spitzen der Außenleiter-Neutralleiter-Spannungen werden Kreisbögen geschlagen (Radius: Außenleiter-Erde-Spannungen umgerechnet mit dem Spannungsmaßstab)e

## 4. Versuchsaufgaben

### 4.1 Isolierter Sternpunkt

#### 4.1.2 Erdschluss im Leiter a



Messwerte:

$U_{EN}/V$	$I_a/mA$	$I_b/mA$	$I_c/mA$	$U_{aE}/V$	$U_{bE}/V$	$U_{cE}/V$
6,35	1,37	0	0	0	11,05	11,10

Ermittlung des Erdfehlerfaktors:

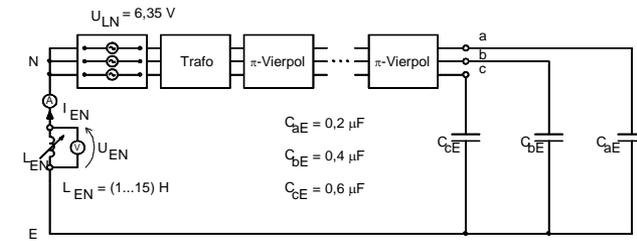
$$\delta = \frac{\text{höchste Leiter - Erde - Spannung eines fehlerfreien Leiters}}{\text{Leiter - Erde - Spannung vor dem Fehler am gleichen Ort}}$$

$$\delta = \sqrt{3}$$

# 4. Versuchsaufgaben

## 4.2 Resonanzsternpunktterdung

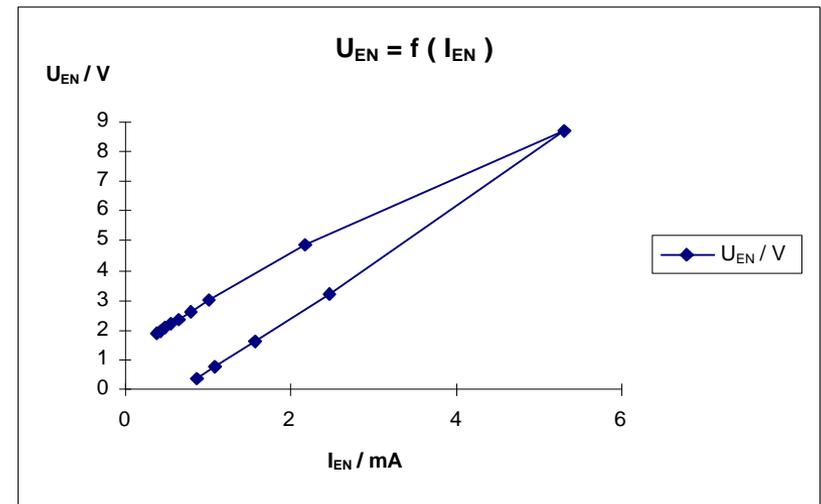
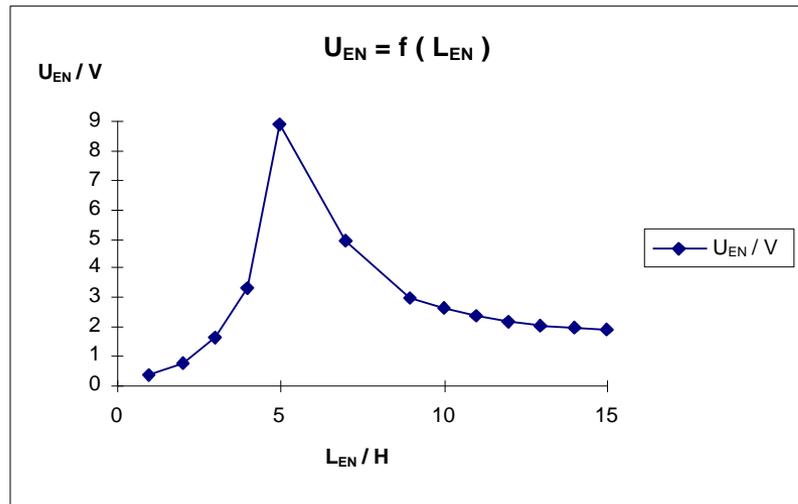
### 4.1.2 Aufnahme der Resonanzkurve



Messwerte:

$L_{EN} / H$	1	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13	14	15
$I_{EN} / mA$	0,87	1,10	1,57	2,47	5,33	2,19	1,03	0,80	0,66	0,56	0,49	0,43	0,40
$U_{EN} / V$	0,31	0,73	1,58	3,20	8,64	4,86	2,96	2,57	2,31	2,16	2,03	1,94	1,87

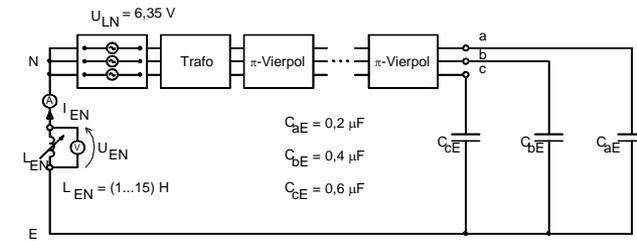
## Resonanzkurve



# 4. Versuchsaufgaben

## 4.2 Resonanzsternpunktterdung

### 4.2.1 Aufnahme der Resonanzkurve

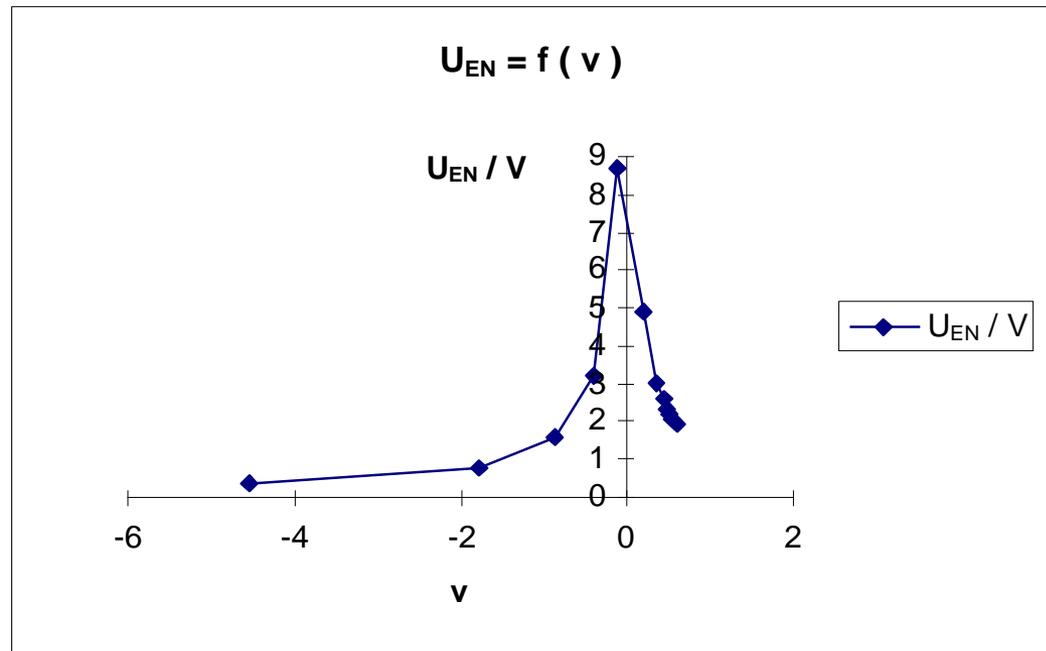


Berechnung des Verstimmungsgrades:

$$v = 1 - \frac{1}{L_{EN} \cdot 3\omega^2 C_{00}} \quad C_{00} = \frac{1}{3} (C_{aE} + C_{bE} + C_{cE}) = \frac{1}{3} (0,2 + 0,4 + 0,6 + 3 \cdot 0,21) \mu\text{F} = 0,61 \mu\text{F}$$

$L_{EN} / \text{H}$	1	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13	14	15
$v$	-4,54	-1,77	-0,85	-0,38	-0,11	0,21	0,38	0,45	0,50	0,54	0,57	0,60	0,63
$U_{EN} / \text{V}$	0,31	0,73	1,58	3,20	8,64	4,86	2,96	2,57	2,31	2,16	2,03	1,94	1,87

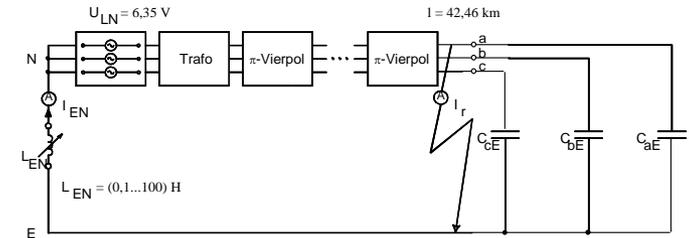
Resonanzkurve



# 4. Versuchsaufgaben

## 4.2 Resonanzsternpunktterdung

### 4.2.2 Aufnahme der v-Kurve



Messung  $I_r = f(I_{EN})$  für satten Erdschluss im Leiter a am Leitungsende:

$L_{EN} / H$	0	0,1	0,2	0,5	1	2	5	7	9	10	11	12
$I_{EN} / mA$	158,7	85,5	64,9	31,5	15,9	8,9	3,9	2,8	2,2	2,0	1,8	1,7
$I_r / mA$	158,4	84,7	63,9	30,6	14,8	7,8	2,7	1,7	1,1	0,9	0,7	0,6
$L_{EN} / H$	13	14	15	17	19	20	25	30	40	50	70	100
$I_{EN} / mA$	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2
$I_r / mA$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,9	1,0	1,0	1,2

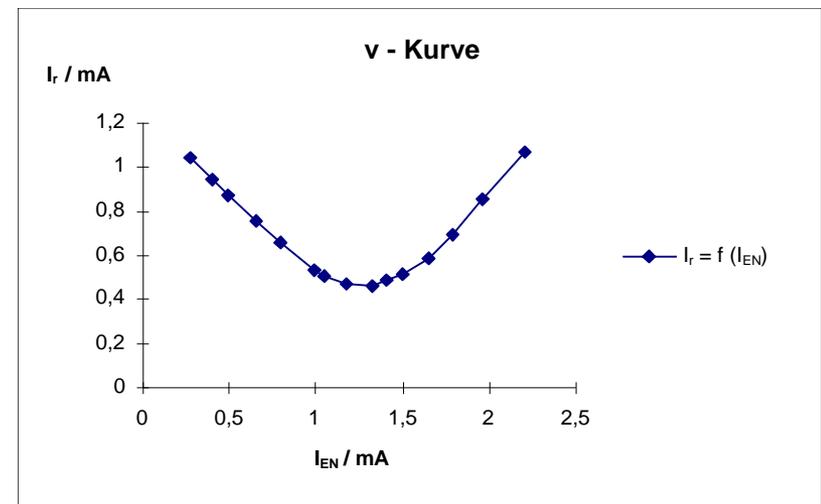
Bei vollständiger Kompensation des kapazitiven

Erdschlussstromes ist  $|I_{EN}| = |I_F|$ .

Daraus ergibt sich für den Wirkreststrom :  $I_{rw} = I_r$  ( $I_r \rightarrow$  minimal).

$$I_{rw} = \underline{0,46 \text{ mA}}$$

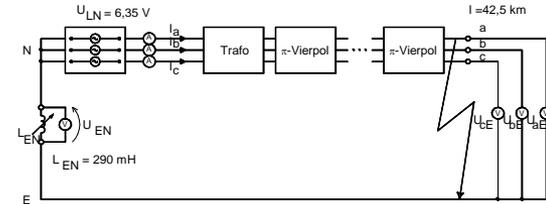
Messung bei  $L_{EN} = 0$  :  $I_{CE} = I_r = \underline{1,33 \text{ mA}}$



## 4. Versuchsaufgaben

### 4.3 Niederohmige Sternpunktterdung

#### 4.3.1 Erdung über eine Reaktanz



Messung der Leiterströme und –spannungen, der Sternpunktverlagerungsspannung sowie des Erdkurzschlussstrom an der Fehlerstelle am Leitungsende

$L_{EN} / \text{mH}$	$U_{EN} / \text{V}$	$I_a / \text{mA}$	$I_b / \text{mA}$	$I_c / \text{mA}$	$U_{aE} / \text{V}$	$U_{bE} / \text{V}$	$U_{cE} / \text{V}$
300	4,59	48,0	0,96	0,96	0	9,95	10,4

#### Wirksame Sternpunktterdung

liegt vor, wenn der Erdfehlerfaktor an keiner Stelle des Netzes den Wert 1,4 überschreitet ( $\delta \leq 1,4$ ).

$$\delta = \frac{\text{höchste Leiter - Erde - Spannung eines fehlerfreien Leiters}}{\text{Leiter - Erde - Spannung vor dem Fehler am gleichen Ort}}$$

#### Nichtwirksame Sternpunktterdung

liegt vor, wenn der Erdfehlerfaktor an irgendeiner Stelle des Netzes den Wert 1,4 überschreitet ( $\delta > 1,4$ ).

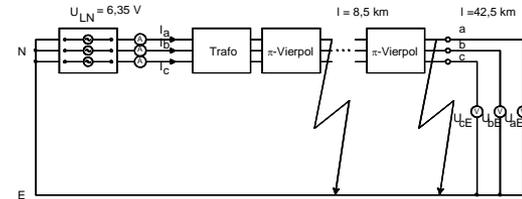
$L_{EN} / \text{mH}$	$U_{LE \text{ max}}$ eines fehlerfreien Leiters	$U_{LE}$ vor dem Fehler	Erdfehlerfaktor $\delta$
300	10,4	6,35	1,64

⇒ keine wirksame Sternpunktterdung (für diesen Fehlerort !)

## 4. Versuchsaufgaben

### 4.3 Niedrohmmige Sternpunktterdung

#### 4.3.2 Unmittelbare Sternpunktterdung



Messung der Leiterströme und –spannungen, der Sternpunktverlagerungsspannung sowie des Erdkurzschlussstrom an der Fehlerstelle (Leiter a bei  $l = 8,5$  km bzw.  $42,5$  km).

$l / \text{km}$	$I_a / \text{mA}$	$I_b / \text{mA}$	$I_c / \text{mA}$	$U_{aE} / \text{V}$	$U_{bE} / \text{V}$	$U_{cE} / \text{V}$
8,5	400	0,7	0,7	0	6,7	6,8
42,5	170	0,7	0,7	0	7,3	7,2

$l / \text{km}$	$U_{LE \text{ max}}$ eines fehlerfreien Leiters	$U_{LE}$ vor dem Fehler	Erdfehlerfaktor $\delta$
8,5	7,51	6,35	1,18
42,5	7,96	6,35	1,25

⇒ **wirksame Sternpunktterdung**