

1 Organisatorisches

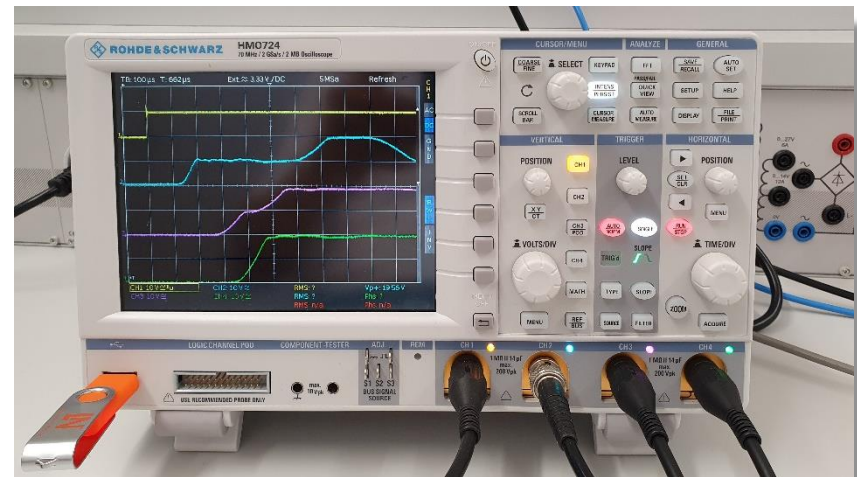
- ✓ Protokollabgabe: spätestens 2 Wochen nach Versuchsdurchführung per Mail bei Prof. Schmidt

2 Versuchstechnik

✓ Oszilloskop

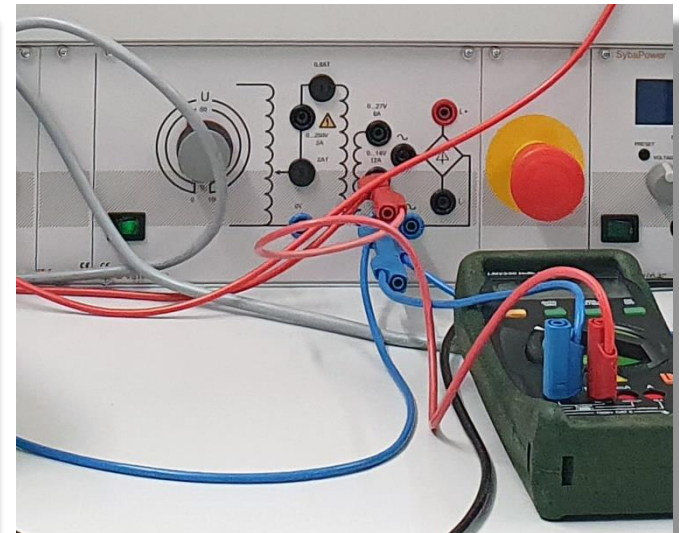
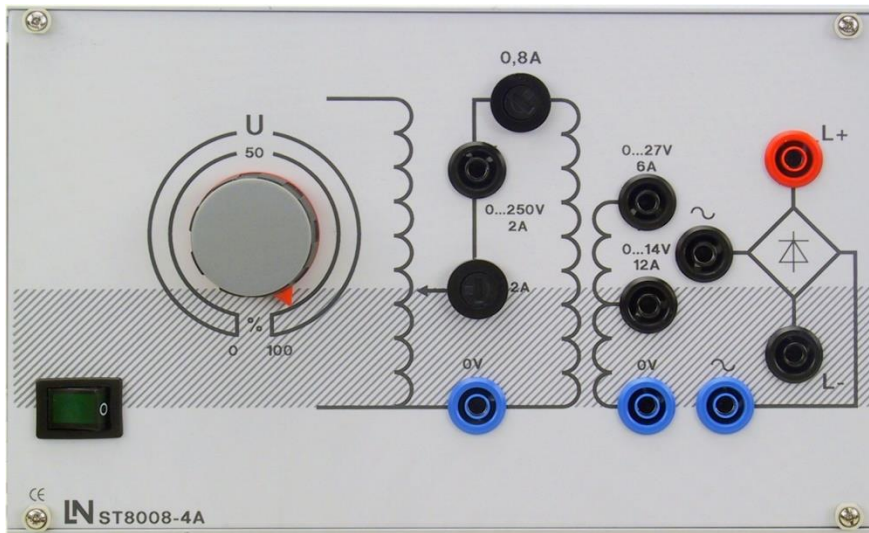
Für die Bedienung sind Fachkenntnisse erforderlich. Die intuitive Bedienung - „irgend eine Taste muss doch das gewünschte Ergebnis liefern“ - ist hier nicht zielführend.

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://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 Ausgangs 0...14V / 12A



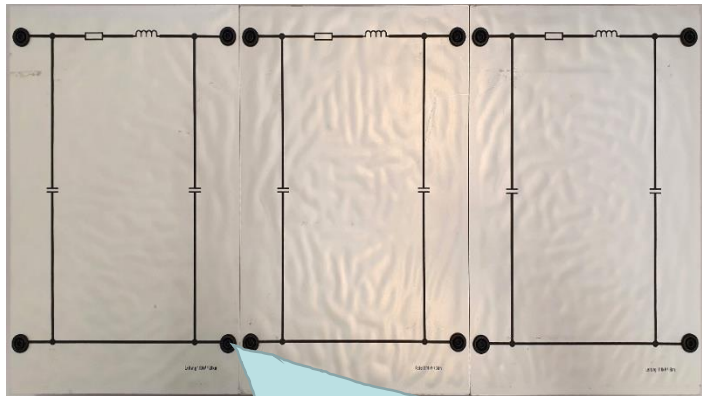
✓ Leistungsschaltermodell

- 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 einpoligen Ersatzschaltbildes der Freileitungen/Kabel werden durch Kettenschaltungen von π -Vierpolen nachgebildet
- Es stehen verschiedene Nachbildungen zur Verfügung, die sich durch die nachgebildete Leitungslänge bzw. die Leitungsart (Freileitung oder Kabel) unterscheiden
- Der Anschluss erfolgt mit 4 mm – Laborleitungen bzw. Brückensteckern
- Der Leitungstyp ist jeweils auf der Frontplatte der Leitungsbausteine angegeben



✓ Leitungsnachbildungen

- Bei geöffneter Experimentierplatte wird die Kettenschaltung 10 von π -Vierpolen sichtbar.
- Die Größe der Bauelemente entspricht der Betriebsgröße des durch den Vierpol nachgebildeten Leitungsabschnittes
- Diese Experimentierplatte bildet eine 110-kV-Freileitung einer Länge von 20 km nach. Demzufolge repräsentiert jeder π -Vierpol eine Leitungslänge von 2 km.
- Die Nachbildung der Freileitung durch eine Kettenschaltung ist notwendig, damit dynamische Vorgänge (z.B. Wanderwellen) untersucht werden können.



✓ Leitungsnachbildungen

- Mit der feingliedrigen Unterteilung der Leitungsnachbildung in eine Kettenschaltung von π -Vierpolen können zwar dynamische Vorgänge nachgebildet werden,
- Durch die Nachbildung der Betriebskapazität der Leitung mit diskreten Bauelementen, folgt der Potentialverlauf beim Einlauf der Spannungswelle zeitverzögert, da die Spannung über dem Kondensator nur kontinuierlich ansteigen kann. Dieses versuchstechnische Problem ist bei der Interpretation der Messwerte zu beachten.



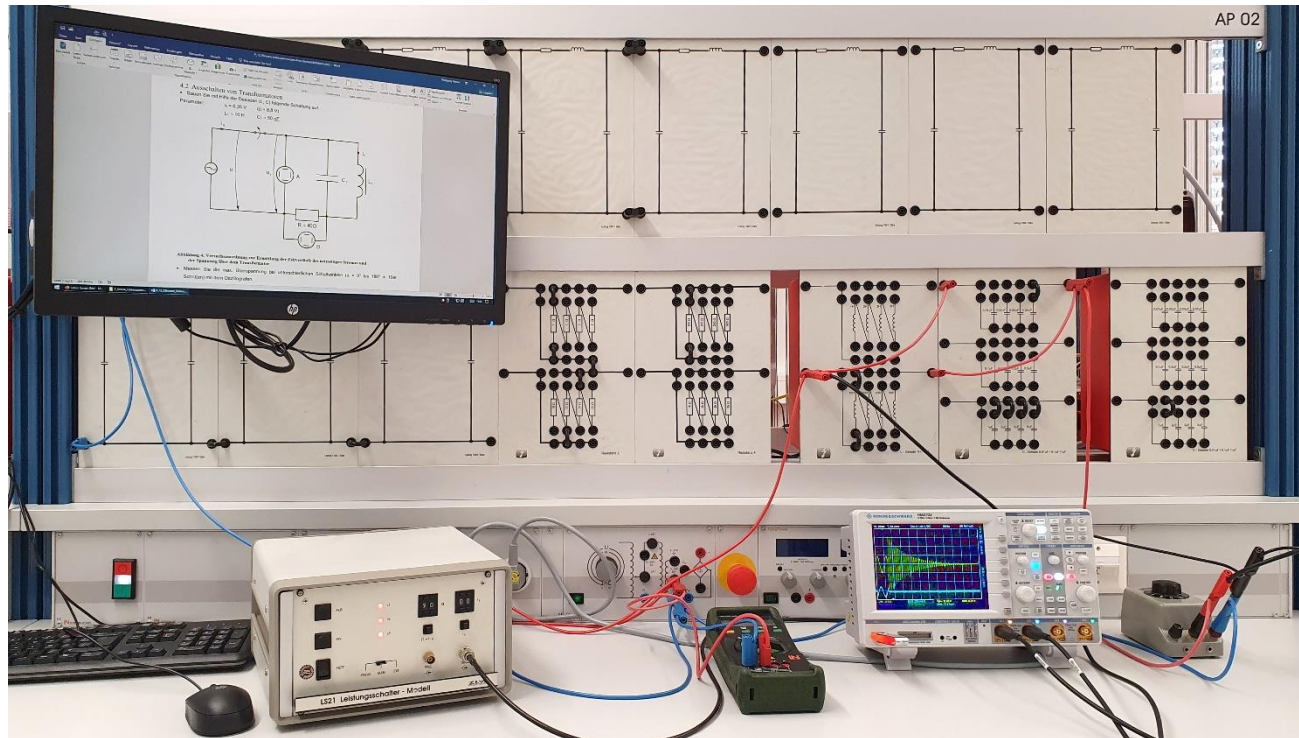
✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz

- Entsprechend den Versuchsaufgaben werden die benötigten Komponenten zusammengestellt:



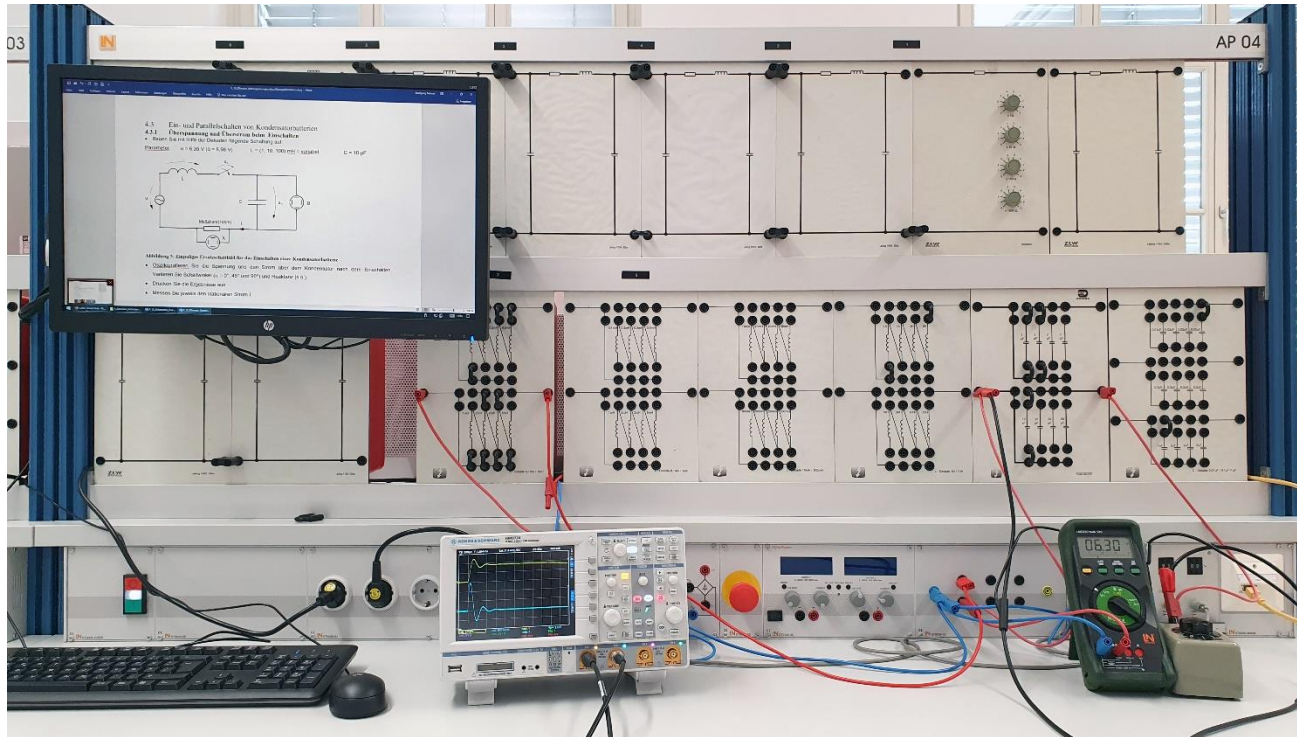
Versuchsplatz zur Untersuchung der Überspannungen beim Einschalten offener Freileitungen (Abschlusswiderstand $R \rightarrow \infty$) gemäß Aufgabe 4.1

✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz



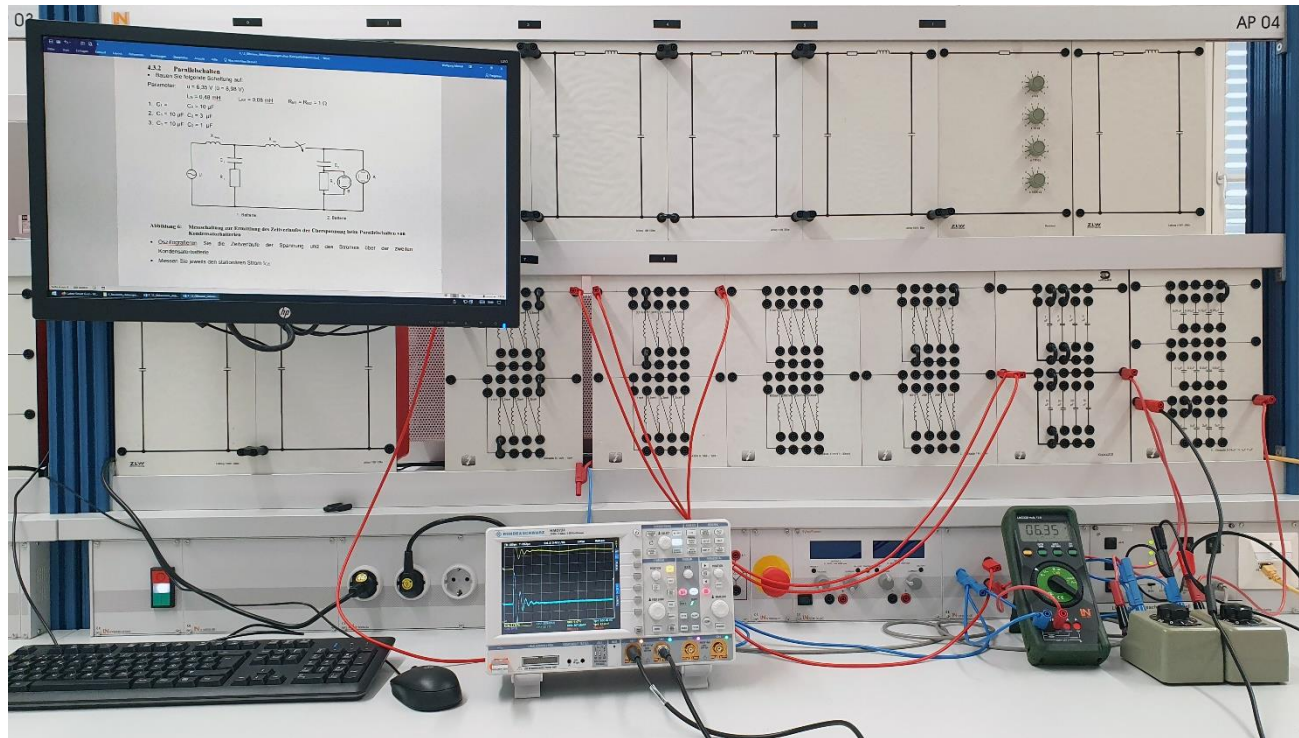
Versuchsplatz zur Untersuchung der Überspannungen beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren, gemäß Aufgabe 4.2

✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz



Versuchsplatz zur Untersuchung der Überspannungen und Überströme beim Einschalten von Kondensatorbatterien, gemäß Aufgabe 4.3.1

✓ Der komplett ausgestattete Versuchsplatz

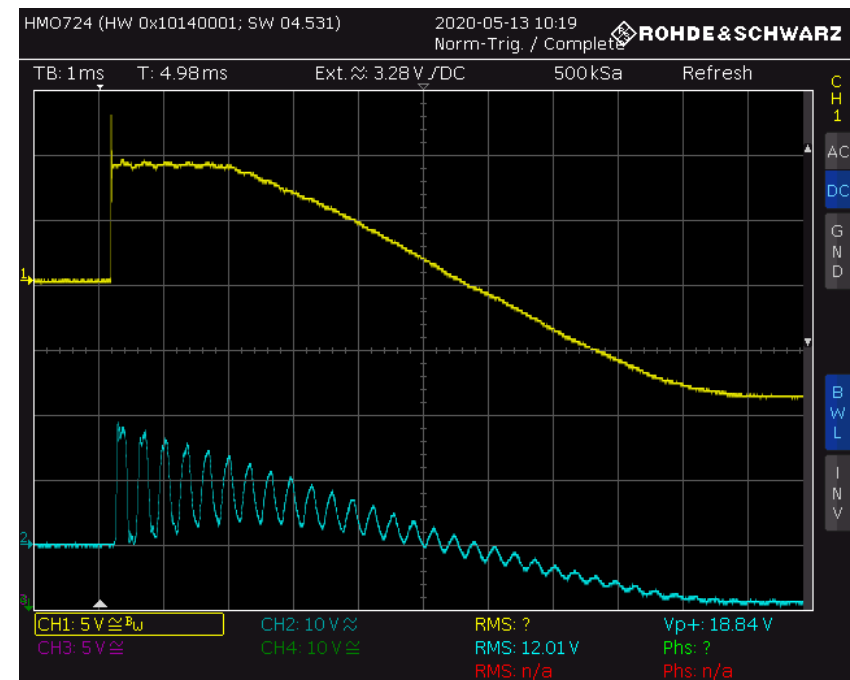
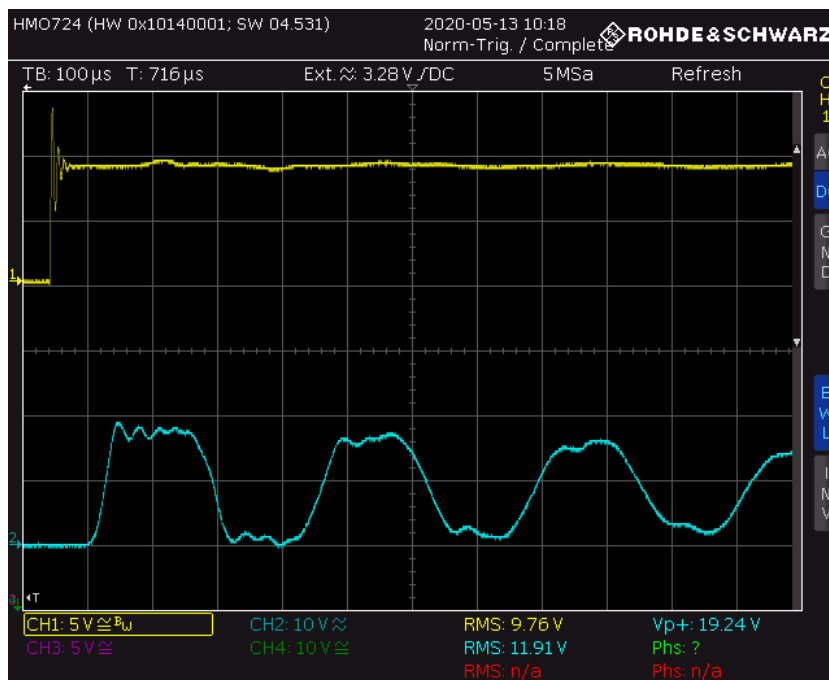
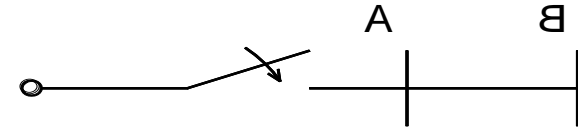


Versuchsplatz zur Untersuchung der Überspannungen und Überströme beim Parallelschalten von Kondensatorbatterien, gemäß Aufgabe 4.3.2

4. Versuchsaufgaben

41. Einschalten von Freileitungen

Kurze Leitung

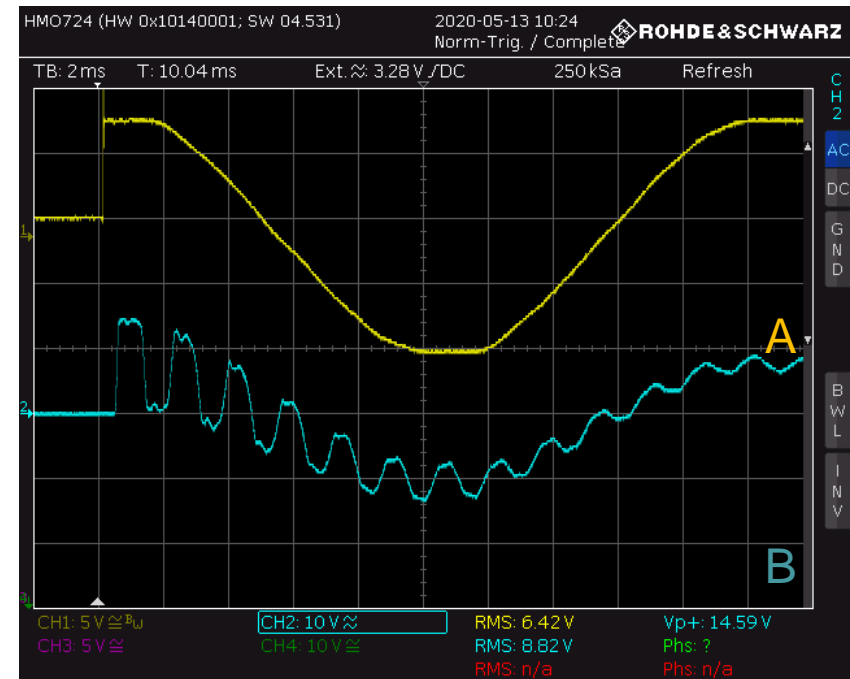
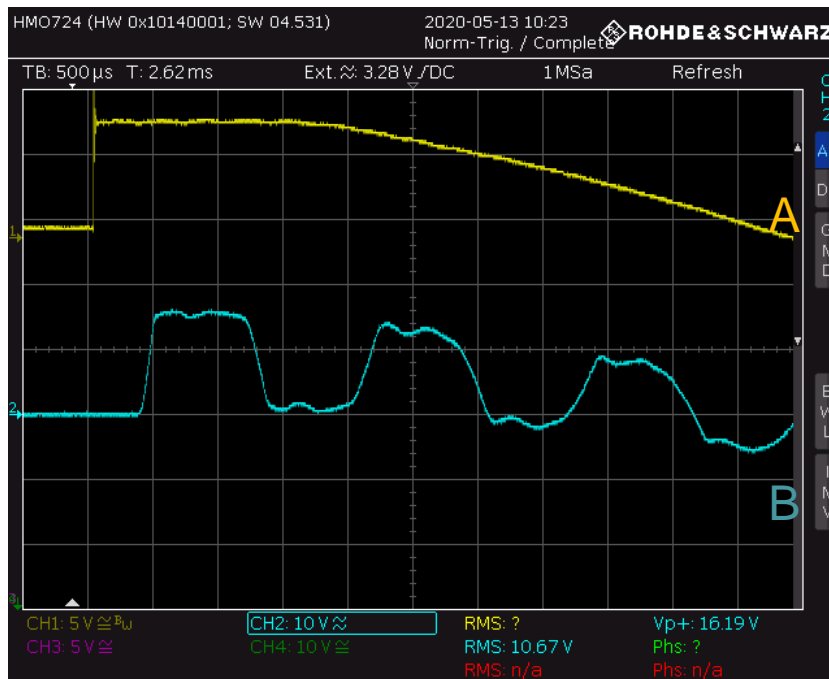
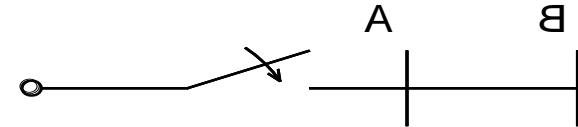


Die Laufzeit der beim Einschalten ausgelösten Spannungswelle ist so kurz, dass sich der Momentanwert der Netzspannung erst nach mehreren Totalreflexionen am offenen Leitungsende signifikant ändert

4. Versuchsaufgaben

41. Einschalten von Freileitungen

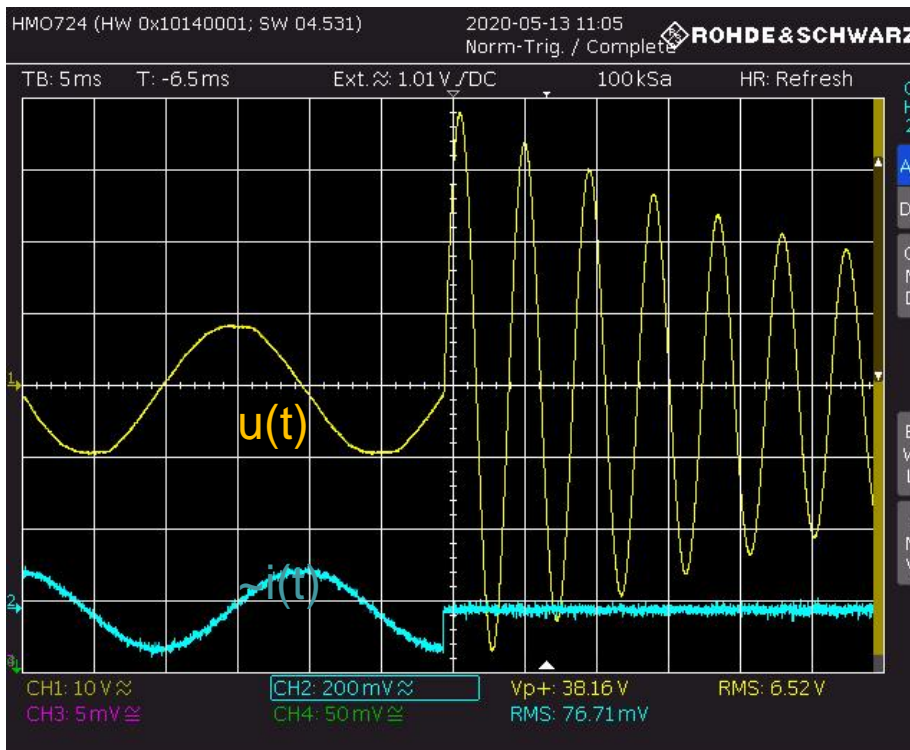
Lange Leitung



Die Laufzeit der beim Einschalten ausgelösten Spannungswelle ist so lang, dass sich der Momentanwert der Netzspannung schon nach der ersten Totalreflexionen am offenen Leitungsende messbar geändert hat. Der Wanderwellenvorgang überlagert sich mit der zeitlich veränderlichen Netzspannung.

4. Versuchsaufgaben

4.2 Ausschalten leerlaufender Transformatoren



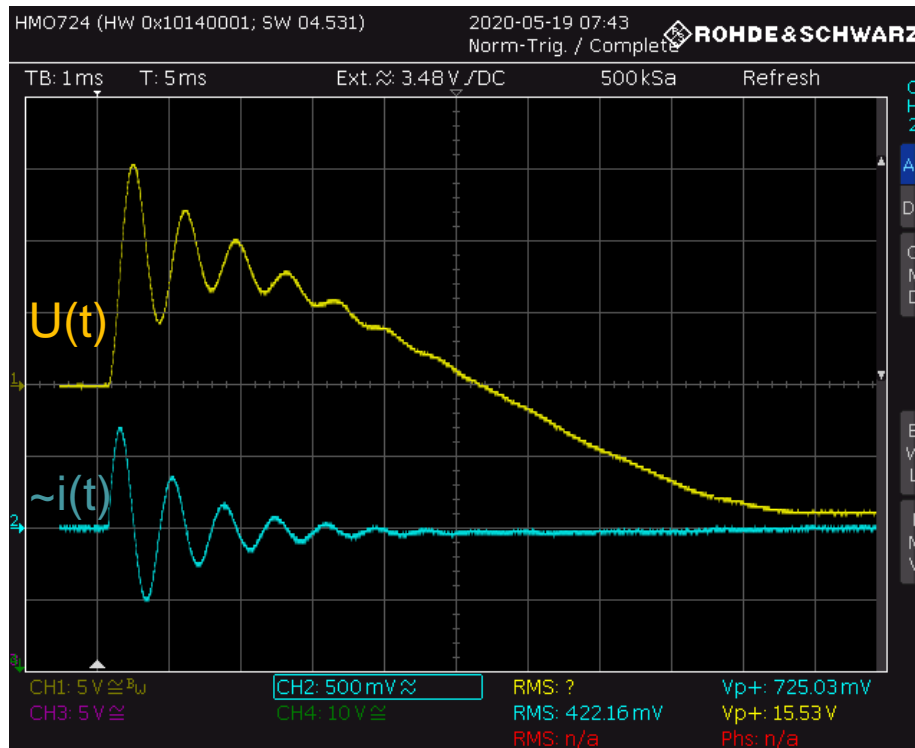
Der für Kurzschlussströme bemessene Leistungsschalter kann den Stromfluss des Leerlaufstromes zu jedem Zeitpunkt – auch außerhalb des natürlichen Stromnulldurchganges - unterbrechen. Die bei Stromabriss im Magnetfeld der Reaktanz gespeicherte Energie wird im Schwingkreis mit der Kapazität der Anordnung (Wicklungen gegen geerdeten Kern und Kessel, Sammelschiene gegen Erde) umgesetzt.

Die abrupte Stromänderung (hohes di/dt) sorgt für erheblich Überspannungen, die für die innere Isolierung des Transformators gefährlich sind)

4. Versuchsaufgaben

4.3 Ein- und Parallelschalten von Kondensatorbatterien

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Einschalten



$$\alpha = 90^\circ$$

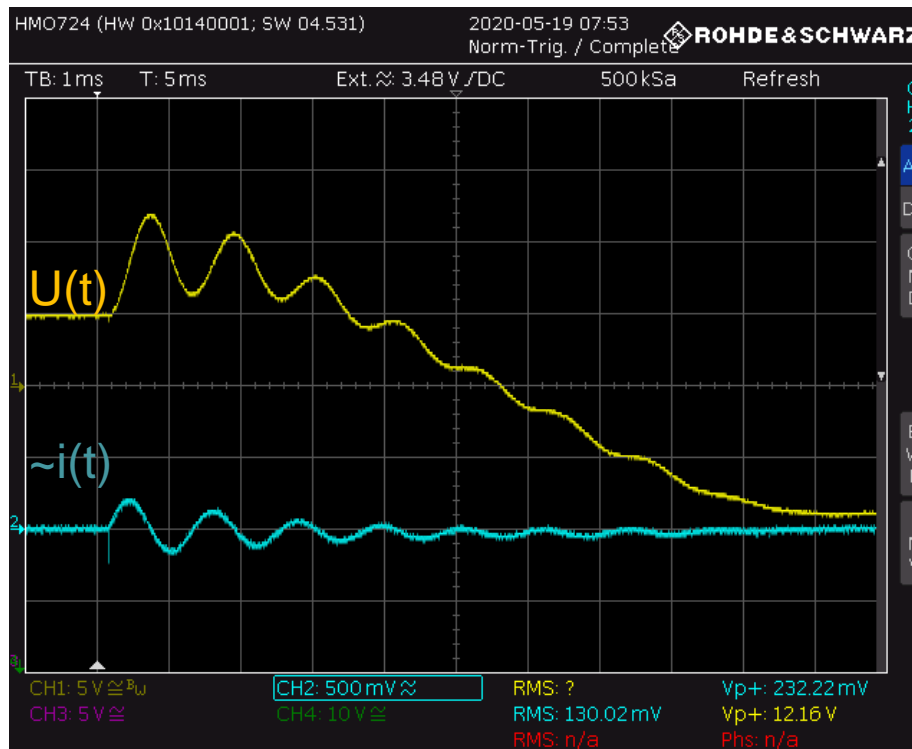
$$L = 1\text{mH}$$

$$\left. \begin{array}{l} \hat{i}_{\max} = 725\text{mA} \\ \hat{i}_{\text{Stat}} = 29,8\text{mA} \end{array} \right\} k_i = 24,3$$

4. Versuchsaufgaben

4.3 Ein- und Parallelschalten von Kondensatorbatterien

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Einschalten



$$\alpha = 90^\circ$$

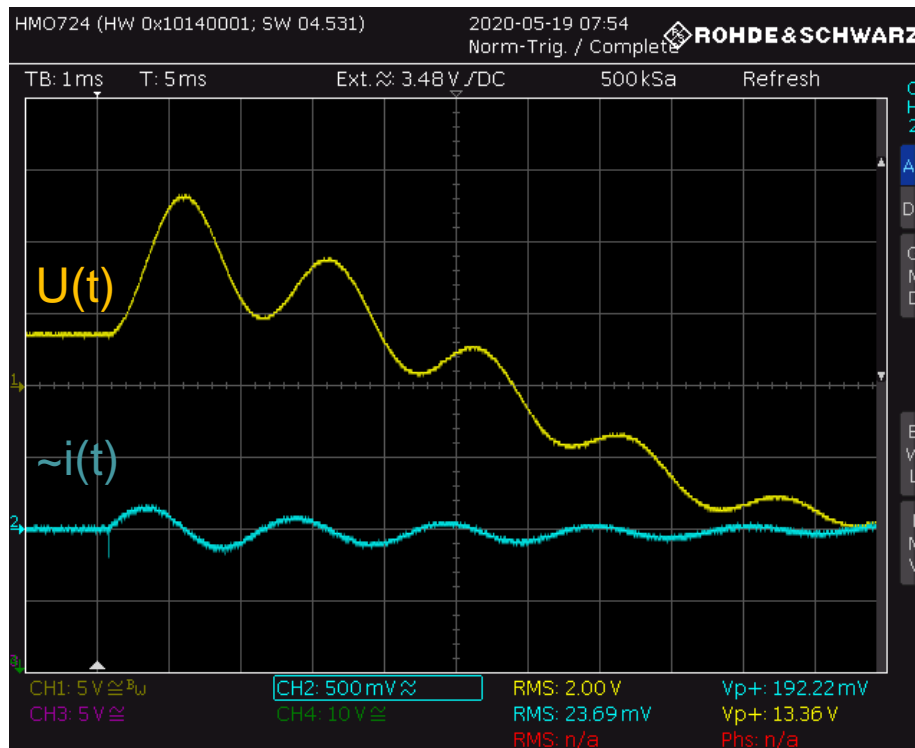
$$L = 3\text{mH}$$

$$\left. \begin{array}{l} \hat{i}_{\max} = 232,2\text{mA} \\ \hat{i}_{\text{Stat}} = 29,0\text{mA} \end{array} \right\} k_i = 8,0$$

4. Versuchsaufgaben

4.3 Ein- und Parallelschalten von Kondensatorbatterien

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Einschalten



$$\alpha = 90^\circ$$

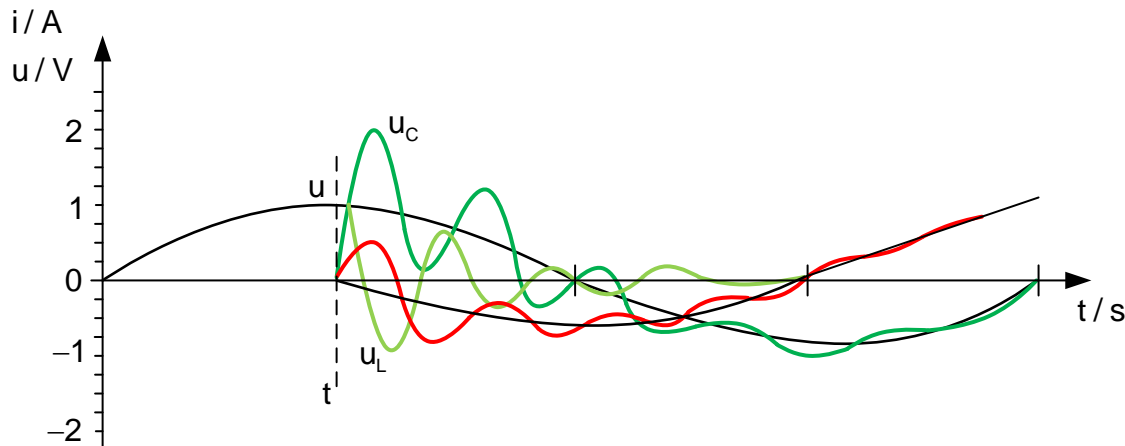
$$L = 10\text{mH}$$

$$\left. \begin{array}{l} \hat{i}_{\max} = 192,2\text{mA} \\ \hat{i}_{\text{Stat}} = 28,3\text{mA} \end{array} \right\} k_i = 6,8$$

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Einschalten

✓ Interpretation der Messergebnisse

Qualitative Diskussion,
kritischer Fall: Einschalten im Spannungsmaximum ($\alpha = 90^\circ$)



- u_C Spannung über der Kondensatorbatterie
- u_L Spannungsfall über der Netzreaktanz
- u Netzspannung
- i Einschaltstrom

Zeitverläufe der Spannungen und des Stromes beim Einschalten einer Kondensatorbatterie (qualitative Darstellung)

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Einschalten

✓ Interpretation der Messergebnisse

1. Qualitative Diskussion

kritischer Fall: Einschalten im Spannungsmaximum ($\alpha = 90^\circ$)

- u kann über L springen, aber C wirkt wie Kurzschluss
→ $u_N = \hat{u}_N$ fällt über L ab
- $i = 0$, da L springen von i verhindert, erst im eingeschwungenen Zustand wird i durch C bestimmt, d.h. 90° voreilend
- Maschensatz $u_C = u_N - u_L \rightarrow u_C$ wird aus der Differenz bestimmt
- Maximalwert $u_C = 2\hat{u}_N$ (größtmögliche Überspannung)
- Dämpfung des Vorgangs durch R , d.h. $u_C = 2 \cdot \hat{u}_N$
wird nur bei hinreichend kleiner Dämpfung erreicht

4. Versuchsaufgaben

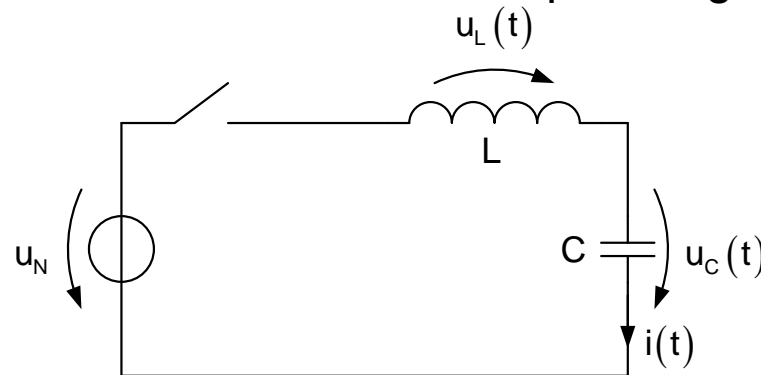
4.3 Ein- und Parallelschalten von Kondensatorbatterien

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Einschalten

✓ Interpretation der Messergebnisse

2. Quantitative Diskussion

kritischer Fall: Einschalten im Spannungsmaximum ($\alpha = 90^\circ$)



$$M: u_N = u_L + u_C$$

$$u_N = LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C$$

\Downarrow

$$u_C = \hat{u}_N (1 - \cos \omega_e t)$$

$$u_C = \hat{u}_N \left(1 - \cos \frac{t}{\sqrt{LC}} \right)$$

$$\text{mit } u_L = L \frac{di}{dt} \quad ; \quad i = C \frac{du_C}{dt}$$

Differenzialgleichung 2. Ordnung

(Anfangsbedingungen: $t = 0$, $u_C = 0$, $i = 0$)

$$\text{mit } \omega_e = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Ersatzschaltbild und Lösung der Differenzialgleichung 2. Ordnung

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Einschalten

✓ Interpretation der Messergebnisse

2. Quantitative Diskussion

kritischer Fall: Einschalten im Spannungsmaximum ($\alpha = 90^\circ$)

⇒ max Spannung über Kondensator

$$u_{C\max} = 2\hat{u}_N = k_u \cdot \hat{u}_N$$

Überstromfaktor

$$k_i = \frac{\hat{i}_{\max}}{\hat{i}_{\text{Stat}}} = \frac{\omega_e}{\omega_{\text{SO}}} \quad \left(\text{folgt aus: } i_C = C \frac{du_C}{dt} \right)$$
$$\hat{i}_{\text{Stat}} = u_N \cdot \omega_{\text{SO}} \cdot C$$

Überstromfaktor wird größer, je kleiner Kapazität ist, die zugeschaltet wird

Interpretation:

$k_u = 2$ - Gefahr von Durchschlägen des Kondensatorwickels (selbstheilend, keine Störung)

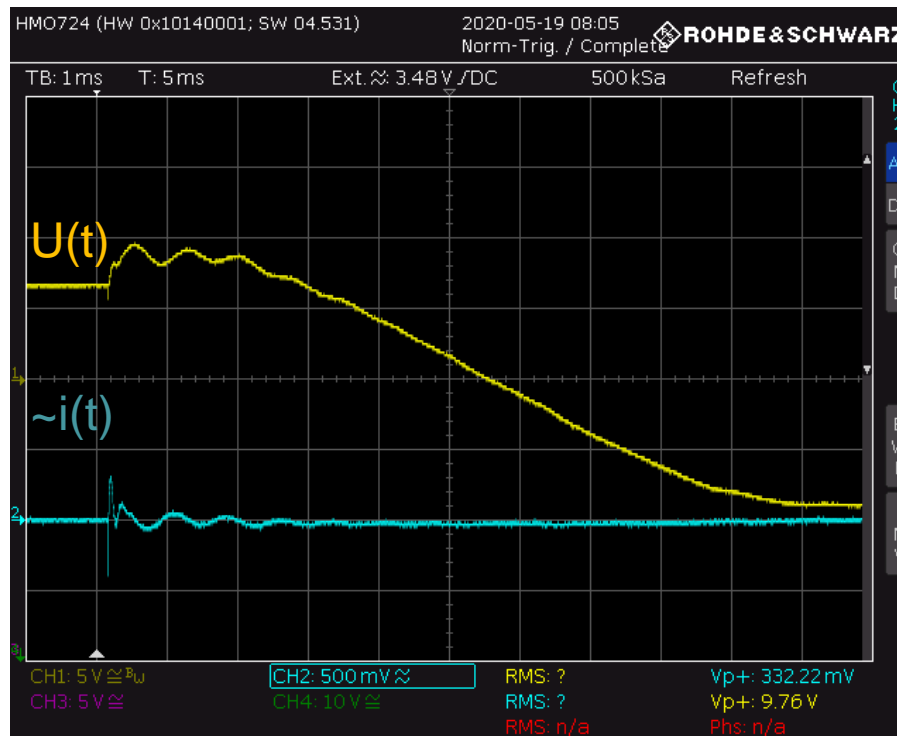
$k_i \gg 2$ - Gefahr der mechanischen Entfestigung des Kondensatorwickels

(Lösung: Einsatz von strombegrenzenden Reihendrosseln)

4. Versuchsaufgaben

4.3 Ein- und Parallelschalten von Kondensatorbatterien

4.3.2 Überspannung und Überstrom beim Parallelschalten



$$\alpha = 90^\circ$$

$$C_1 = 10\mu\text{F}$$

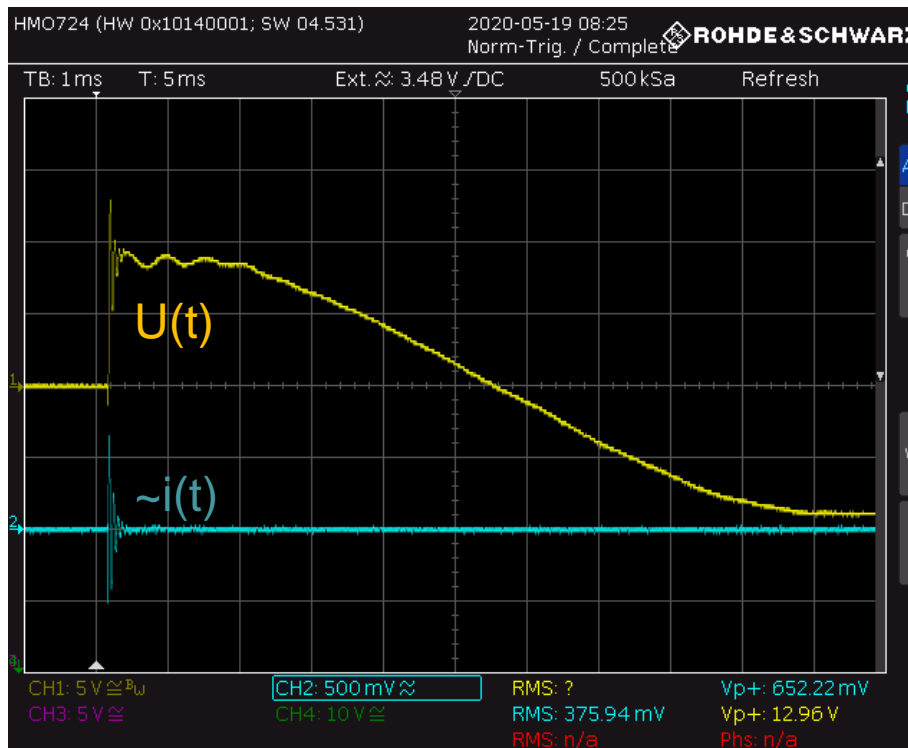
$$C_2 = 10\mu\text{F}$$

$$\left. \begin{array}{l} \hat{i}_{\max} = 332,2\text{mA} \\ \hat{i}_{\text{Stat}} = 29,8\text{mA} \end{array} \right\} k_i = 24,3$$

4. Versuchsaufgaben

4.3 Ein- und Parallelschalten von Kondensatorbatterien

4.3.2 Überspannung und Überstrom beim Parallelschalten



$$\alpha = 90^\circ$$

$$C_1 = 10\mu\text{F}$$

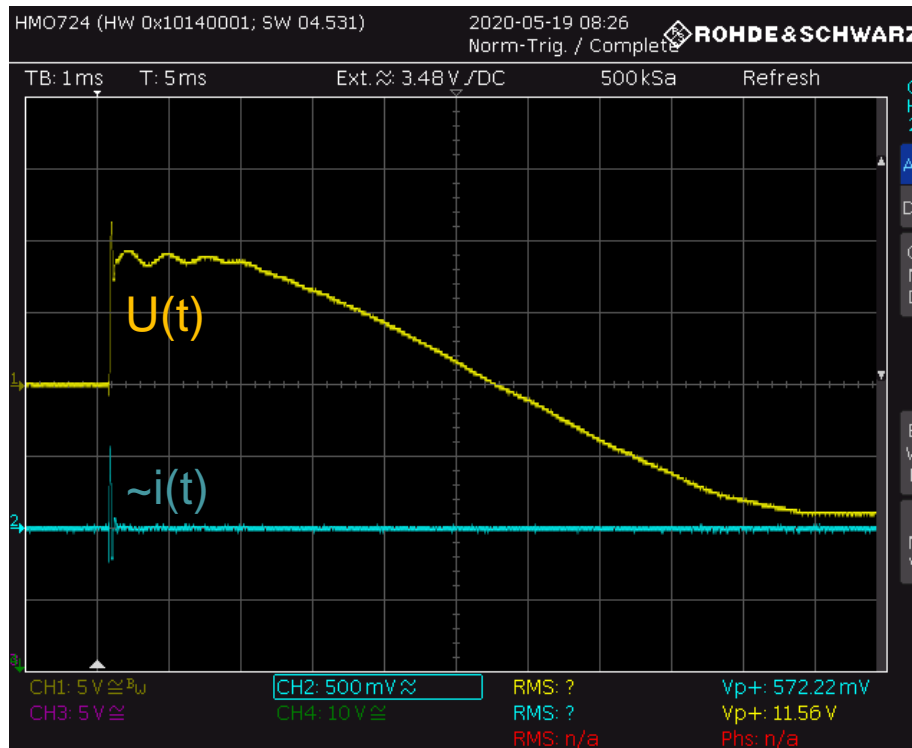
$$C_2 = 3\mu\text{F}$$

$$\left. \begin{array}{l} \hat{i}_{\max} = 652,2\text{mA} \\ \hat{i}_{\text{Stat}} = 8,1\text{mA} \end{array} \right\} k_i = 80,2$$

4. Versuchsaufgaben

4.3 Ein- und Parallelschalten von Kondensatorbatterien

4.3.2 Überspannung und Überstrom beim Parallelschalten



$$\alpha = 90^\circ$$

$$C_1 = 10 \mu\text{F}$$

$$C_2 = 1 \mu\text{F}$$

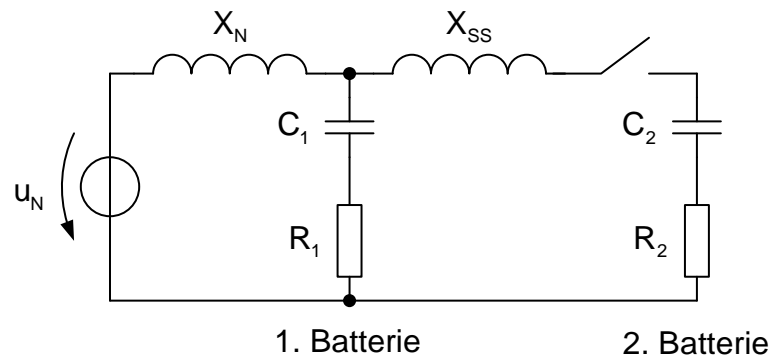
$$\left. \begin{array}{l} \hat{i}_{\max} = 672,2 \text{ mA} \\ \hat{i}_{\text{Stat}} = 2,7 \text{ mA} \end{array} \right\} k_i = 245,0$$

4. Versuchsaufgaben

4.3 Ein- und Parallelschalten von Kondensatorbatterien

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Parallelschalten

✓ Interpretation der Messergebnisse



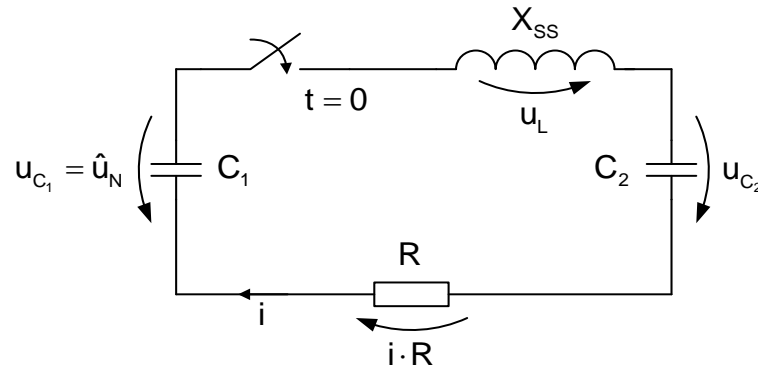
Annahme: Zuschalten im Spannungsmaximum (kritischer Fall, $\alpha = 90^\circ$)

Wegen $X_N \gg X_{SS}$ startet zunächst ein hochfrequenter Umladevorgang, aus dem Netz kann kaum Strom nachfließen, da $X_N = \omega L$ zu groß ist

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Parallelschalten

✓ Interpretation der Messergebnisse

Vereinfachtes Ersatzschaltbild für den HF-Vorgang



Der Überstromfaktor ist groß, weil die Eigenfrequenz ω_e sehr groß ist.

Der Überspannungsfaktor bleibt auf 2 begrenzt.

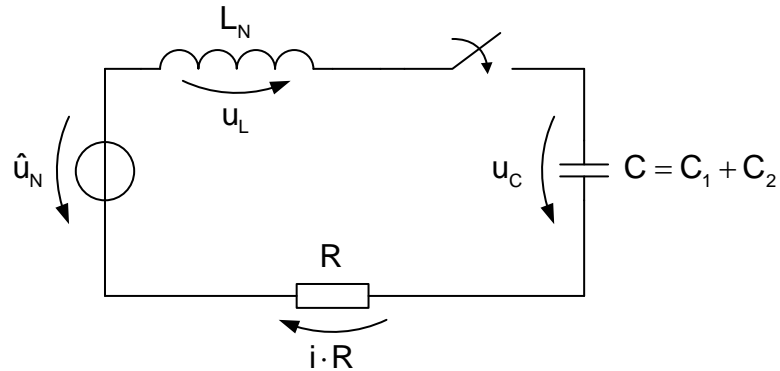
Im Ergebnis des Umladevorganges wird aus dem Netz nachgeladen, da die Spannung über der Parallelschaltung der Kondensatorbatterien auf

$$u_{C1} = u_{C2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \hat{u}_N$$

abgesunken ist

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Parallelschalten

✓ Interpretation der Messergebnisse



wegen $L_N \ll L_{SS}$ kann L_{SS} vernachlässigt werden

4.3.1 Überspannung und Überstrom beim Parallelschalten

✓ Interpretation der Messergebnisse

- Der MF-Vorgang führt nicht zu einer weiteren Erhöhung des Überstromfaktors, weil die Eigenfrequenz kleiner ist (Parallelschaltung von C_1 und C_2 statt Reihenschaltung)

Bewertung:

- Besonders groß wird der Überstromfaktor, wenn eine kleine Kapazität C_2 einer vergleichsweise großen Kapazität C_1 parallel geschaltet wird (Praxisbeispiel: ein kurzer Kabelabschnitt wird einem ausgedehnten Kabelnetz parallelgeschaltet)
- Es sind Einschalt-drosseln zur Strombegrenzung und Verringerung der Anstiegssteilheit erforderlich