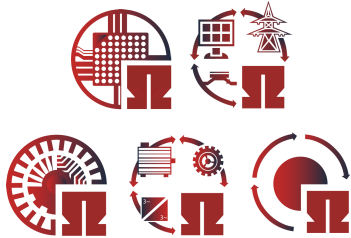


ELSYS Note



Induktives Laden: Platinenlayout

Die Auslegung eines Spannungsteilers zur Messung von Spannungen bis 15 kV und Frequenzen im Bereich von 86 kHz bis 860 kHz bildet die Grundlage des vorliegenden ELSYS-Notes. Im Fokus stehen das Platinenlayout und erste Messergebnisse des entwickelten Spannungsteilers. Ziel ist es, das Verhalten des Aufbaus unter realen Betriebsbedingungen zu bewerten und die Eignung für den Einsatz in induktiven Ladesystemen zu verifizieren.

Einleitung

Die Verwendung induktiver Ladesysteme für Elektrofahrzeuge birgt das Potenzial, die Reichweite der Fahrzeuge zu erhöhen und die Ladezeiten zu reduzieren. Für die Optimierung dieser Systeme ist eine präzise Messung der Systemleistung sowie der Verluste von entscheidender Bedeutung. Im ELSYS-Note „Induktives Laden: Messsystem“ [1] wurde die Auslegung eines Spannungsteilers zur Spannungsmessung vorgestellt. Das vorliegende Note widmet sich den Besonderheiten des Platinenlayouts und präsentiert erste Messergebnisse.

Messsystem

Das Messsystem muss hohe Spannungen und Frequenzen sicher erfassen. Es ist spannungsfest, frequenzstabil und galvanisch getrennt ausgeführt. Diese Anforderungen bestimmen das Layout des Spannungsteilers. Zudem ist eine kompakte Bauform erforderlich, um die Integration in das bestehende Messsystem zu ermöglichen.

Platinendesign

Aufgrund der im Spannungsteiler auftretenden hohen Spannungen

sind ausreichende Luft- und Kriechstrecken zur Vorbeugung elektrischer Überschlüge notwendig. Dies beeinflusst sowohl die Gestaltung der Leiterplatte als auch die Anordnung der Komponenten. Wie im ELSYS-Note No. 21 [1] dargelegt, besteht der Spannungsteiler aus 75 identischen Segmenten, von denen jedes aus einem Widerstand und einer parallelen Kapazität besteht. Die Bauteile werden in einer schlangenförmigen Anordnung platzsparend positioniert (siehe Abb. 1).

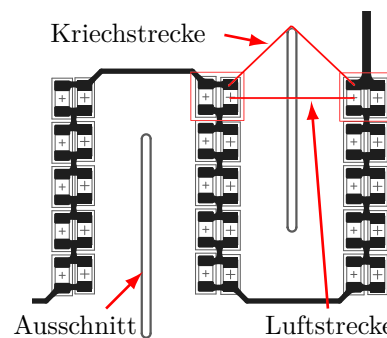


Abb. 1: Oberer Teil des Spannungsteilers

Bei einem Spannungsabfall von 200 V je Segment resultiert eine Spannungsdifferenz von 2.000 V zwischen den beiden gegenüberliegenden Segmenten (vgl. rote Markierung in Abb. 1). Um mögliche Spannungsüberschläge oder Kriechströme zu vermeiden, ist die Einhaltung ausreichender Luft- und

Kriechstrecken erforderlich.

Die VDE 0110-4 definiert die minimalen Abstände für periodische Spannungen zwischen 30 kHz und 10 MHz. Es wird der Verschmutzungsgrad 2 herangezogen, welcher nichtleitende Verschmutzungen umfasst, die jedoch durch Feuchtigkeit leitend werden können [2]. Für eine Spannungsdifferenz von $\Delta u = 2.000 \text{ V}$ ist eine Luftstrecke von 11 mm erforderlich. Der notwendige Abstand der Kriechstrecke wird durch Extrapolation auf 13,9 mm festgelegt. Um die Kriechstrecke zu verlängern, ohne zusätzliche Fläche zu beanspruchen, werden Ausschnitte in die Leiterplatte integriert (vgl. Abb. 1). Das Layout des unteren Teils des Spannungsteilers ist in Abb. 2 dargestellt. Im Anschluss an das 75. Segment erfolgt zunächst die Integration des Widerstands R_1 sowie des Kondensators C_1 , gefolgt vom Tiefpassfilter mit den Elementen R_{TP} und C_{TP} .

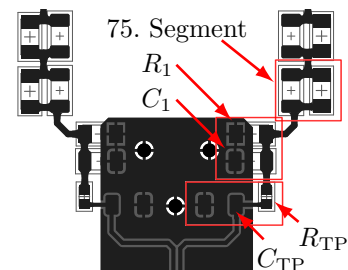


Abb. 2: Unterer Teil des Spannungsteilers

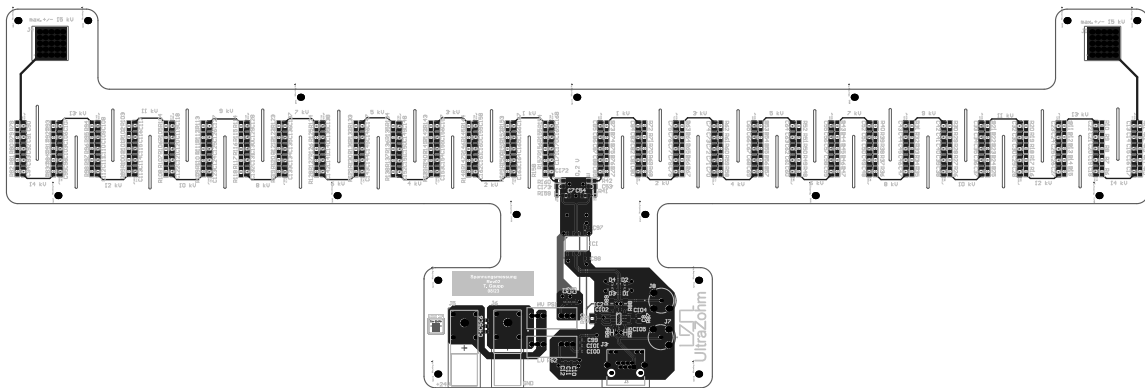


Abb. 3: Platinenlayout zur breitbandigen Spannungsmessung bis 15 kV

Für eine Spannungsmessung ohne Massebezug wird der Spannungsteiler doppelt ausgeführt, sodass die zu messende Spannung als differenzielles Signal erfasst wird. Abbildung 3 zeigt das Layout der gesamten Platine.

Übertragungsverhalten

Aufgrund des hohen Teilungsfaktors des gesamten Spannungsteilers ist eine Untersuchung des Übertragungsverhaltens im Labor nicht möglich. Daher wird zunächst das Übertragungsverhalten eines einzelnen Segmentes analysiert.

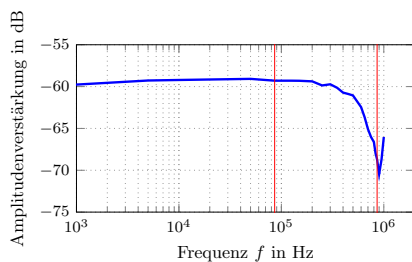


Abb. 4: Amplitudengang

Abbildung 4 zeigt den aufgezeichneten Amplitudenverlauf, während Abb. 5 den Phasenverlauf darstellt. Die beiden vertikalen roten

Linien markieren den angestrebten Messbereich von der Grundfrequenz (86 kHz) bis zur 10. Harmonischen (860 kHz). Der theoretisch berechnete Teilungsfaktor eines Segmentes liegt nach der Auslegung bei $-60,01$ dB. Der aufgezeichnete Amplituden- und Phasengang zeigt, dass der Verstärkungsfaktor bei (86 kHz) etwa $-59,3$ dB beträgt und bis etwa (450 kHz) relativ nahe an der -60 dB Linie verharret. Die Phasenverschiebung bleibt bis etwa (450 kHz) nahe der 0° -Linie. Oberhalb dieser Frequenz nehmen sowohl die Dämpfung als auch die Phasenverschiebung deutlich zu.

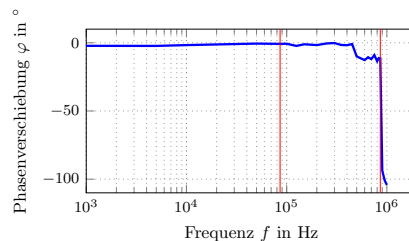


Abb. 5: Phasengang

Testmessungen

Der Spannungsverlauf einer ersten Messung am Prototypen ist in

Abb. 6 dargestellt. Basierend auf dem theoretischen Verstärkungsfaktor der gesamten Schaltung, liegen die gemessenen Spitzenwerte der Spannung bei etwa $\hat{u} = \pm 13$ kV.

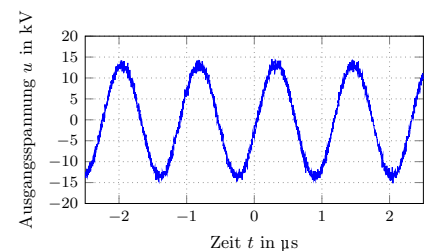


Abb. 6: Spannungsmessung der Primärspule

Ausblick

Aufgrund der noch nicht abgeschlossenen Untersuchung des Übertragungsverhaltens des gesamten Spannungsteilers sind die bisherigen Messergebnisse als vorläufig zu betrachten. Um die Messergenauigkeit zu validieren und mögliche Abweichungen zu identifizieren, sind weitere Untersuchungen erforderlich und geplant.

Verweise

- [1] Tom Gaupp und Michael Schmidt. *Induktives Laden: Messsystem*. ELSYS-Note 21. Nürnberg: Institut für leistungselektronische Systeme ELSYS, Technische Hochschule Nürnberg, Mai 2025.
- [2] *Isolationskoordination für Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen - Teil 4: Berücksichtigung von Hochfrequenzspannungsbeanspruchungen (IEC 60664-4:2005)*. Aufgerufen am 23.05.2024. Juni 2006.