# ELSYS Note

## Induktives Laden: Messsystem

*Diese ELSYS-Notiz behandelt die Entwicklung und Auslegung eines frequenzkompensierten Spannungsteilers zur Messung hoher Spannungen bis 15 kV im Primärkreis eines induktiven Ladesystems (ERS) für Elektrofahrzeuge. Ziel ist die hochfrequenzfähige Spannungsmessung mit großer Bandbreite und minimaler Verzerrung zur präzisen Analyse des Energieübertragungssystems.*

## Einleitung

Induktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge bieten eine vielversprechende Lösung zur Erhöhung der Reichweite und Reduzierung der Ladezeiten. Diese als Electric Road System (ERS) bekannte Technologie überträgt Energie durch elektromagnetische Induktion von einer Primärspule in der Fahrbahn auf eine Sekundärspule im Fahrzeug (Abb. 2). Für die Optimierung und wirtschaftliche Bewertung dieser Systeme, ist eine präzise Messung der Systemleistung und die Ermittlung der Verluste entscheidend.

## Das Ladesystem

Das ERS, das in Abb. 2 dargestellt ist, wird Netzseitig mit elektrischer Energie versorgt. Ein Frequenzumrichter wandelt die netzseitige Eingangsfrequenz ($f_{\text{Netz}} = 50\,\text{Hz}$) auf die Bemessungsgrundfrequenz $f_1 = 86\,\text{kHz}$ um. Der primären Spule ist ein Kondensatorpaket vorgeschaltet, das zusammen mit der Primärspule einen Resonanzkreis bildet. Dieser Resonanzkreis ist auf die Bemessungsfrequenz $f_1$ abgestimmt und ausgelegt. $P_{\text{AC},1}$ in Abb. 2 markiert die Messstelle im Schwingkreis. Bei der Resonanzfrequenz wird die Primärspannung auf etwa $\hat{u} = 10\,\text{kV}$ erhöht. Der Betrieb des Frequenzumrichters erzeugt harmonische Schwingungen höherer Ordnung, die den Schwingkreis zusätzlich anregen und dessen Verhalten beeinflussen. Für eine umfassende Untersuchung des Gesamtsystems muss das Messsystem daher in der Lage sein, Spannungen bis zur 10. harmonischen Oberschwingung ($f_{10} = 860\,\text{kHz}$) zu messen. Hieraus ergibt sich die Anforderung an das Messsystem einer hohen Bandbreite und einer hohen Spannungsfestigkeit. Zur Messung der Hochspannung, wird diese durch einen frequenzkompensierten Spannungsteiler auf ein niedrigeres Potential umgewandelt. Das reduzierte Spannungssignal kann anschließend mit der entsprechenden Messelektronik ausgewertet werden.

## Spannungsteiler

Ein Spannungsteiler ist in der Lage eine hohe Eingangsspannung $u_{\text{in}}(t)$ proportional zu den Widerstandswerten $R_1$ und $R_2$ in eine geringer Ausgangsspannung $u_{\text{out}}(t)$, die über $R_1$ abgegriffen werden kann, zu teilen.

$$u_{\text{out}} = u_{\text{in}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Bei Gleichspannung und niedrigen Frequenzen bliebt der Wert eines ohmschen Widerstandes konstant. Ab einigen hundert kHz, kommen parasitäre Effekte zum tragen und der Widerstandswert verändert sich. Um eine hohe Bandbreite des Spannungsteilers zu gewährleisten, werden die parasitären Effekte durch parallele Kondensatoren im Spannungsteiler kompensiert (Abb. 1).

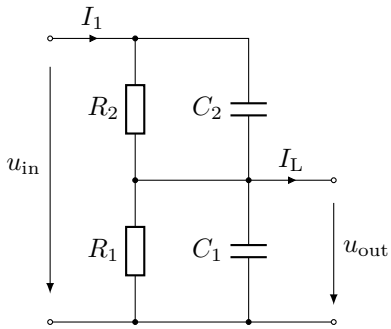


Abb. 1: Spannungsteiler

Folgende parasitäre Effekte, die im Spannungsteiler auftreten, werden berücksichtigt und können kompensiert werden.

- $C_{\text{int}}$: interne Kapazität eines SMD-Widerstandes
- $C_{\text{pad}}$: Kapazität welche durch den Bauteil-Footprint auf der Platine entsteht
- $C_{\text{gnd}}$: die kapazitive Wirkung der Ground Fläche der Platine
- $C_{\text{amp}}$: die Eingangskapazität des nachfolgenden Bauteils (z.B. Operationsverstärker)

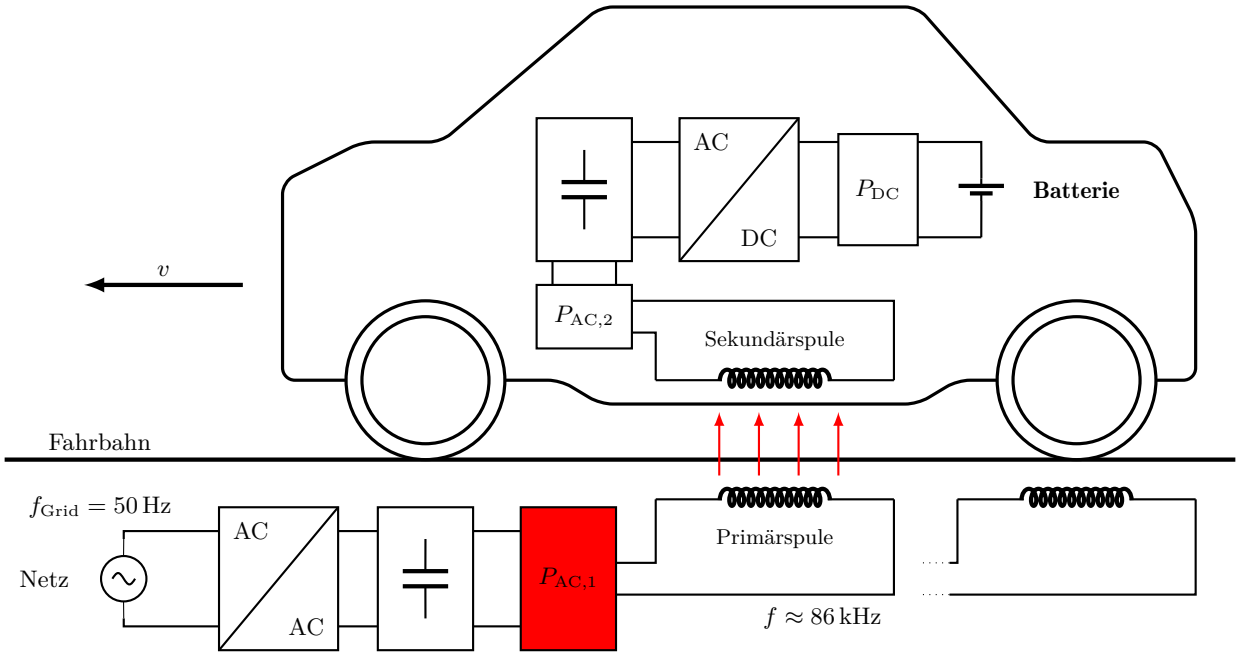


Abb. 2: Induktives Ladesystem

## Teilersegmente

Um die maximale Arbeitsspannung der verwendeten SMD-Bauteile von $U_{op,max,DC} = 200\,V$ nicht zu überschreiten, und trotzdem den gewünschten Spannungsfall zwischen Eingangs- zu Ausgangsspannung zu erreichen, wird der obere Teil des Spannungsteilers auf $N = 75$ identische Segmente aufgeteilt.

## Widerstandsverhältnisse

Der Gesamtwiderstand des oberen Teils des Spannungsteilers wird auf $R_{2,ges} = 6{,}15\,M\Omega$ festgelegt. Dieser Gesamtwiderstand teilt sich auf die 75 Einzelsegmente auf, wodurch sich ein Einzelwiderstand von $R_{2,einzel} = 82\,k\Omega$ pro Segment ergibt.

Der Wert des Widerstands $R_1$ des unteren Teils wird basierend auf dem festgelegten Wert des oberen Teils ($R_{2,ges}$) und dem Verstärkungsfaktor des gesamten Spannungsteilers ($G_{VD} = 1,33 \cdot 10^{-5}$) zu $R_1 = 82\,\Omega$ bestimmt.

## Frequenzkompensation

Die Kapazität $C_{2,einzel}$ des oberen Teils des Spannungsteilers wird auf 1 pF festgelegt. Die Gesamtkapazität des oberen Teils liegt damit bei $C_{2,ges} = 0{,}133\,pF$. Unter Berücksichtigung der parasitären Kapazitäten $C_{int}$, $C_{pad}$ und der Eingangskapazität des nachfolgenden Bauteils $C_{amp}$, wird das Kapazitätsverhältnis $C_2/C_1$ im reziproken Verhältnis zum Widerstandsverhältnis $R_2/R_1$ nach

$$\frac{R_2}{R_1} \approx \frac{C_1 + C_{int,1} + C_{pad,1} + C_{amp}}{C_2 + C_{int,2} + C_{pad,2}}$$

ausgelegt. Dabei ergibt sich für $C_1$ eine Kapazität von 1 µF.

## Abgleich

Nach [1] gilt ein Spannungsteiler als korrekt kompensiert, wenn die Bedingung aus

$$\frac{R_1}{N \cdot R_2 + R_1} \stackrel{!}{=} \frac{C_2/N}{C_2/N + C_{1,neu} + C_{LP}}$$

erfüllt ist. Zur Filterung von unerwünscht hohen Frequenzen, wird ein Tiefpassfilter dem Spannungsteiler nachgeschaltet. Die Kapazität des Tiefpassfilters $C_{LP} = 2\,nF$ wird hierbei ebenfalls berücksichtigt.

## Literatur

[1] Michael Grubmuller, Bernhard Schweighofer und Hannes Wegleiter. „Development of a Differential Voltage Probe for Measurements in Automotive Electric Drives“. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64.3 (2017), S. 2335–2343. DOI: 10.1109/TIE.2016.2626374.