

Bewertung des Filteraufwands für HV-Fahrzeuge vom geschirmten 400 V zum ungeschirmten 800 V-HV-System

Dr., Peter, Olbrich, AVL Software and Functions GmbH, Deutschland

Dr., Bastian, Arndt, AVL Software and Functions GmbH, Deutschland

M.Eng., Mario, Kießlich, AVL Software and Functions GmbH, Deutschland

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich das HV-Konzept mit 400 V Systemspannung unter Verwendung von geschirmten HV Leitungen für Elektrofahrzeuge zum Stand der Technik entwickelt. Spürbar stärker werden hierzu die Diskussionen zur Entwicklung des Filteraufwands durch das Reduzieren des HV-Kabelschirms oder das Anheben der Systemspannung auf 800 V. Wichtige Kriterien sind hierbei oft die Kosten des Filteraufwands relativ zur Einsparung und Flexibilität im Bereich der Kabelführung. In dieser Arbeit möchten wir einen Einblick in die simulationsbasierte Filterauslegung auf Basis einer generischen SiC-Technologie basierten Leistungselektronik geben. Verdeutlicht werden soll hierbei der Unterschied im Filteraufwand zwischen einem geschirmten 400 V zu einem ungeschirmten 800 V-HV-System bei gleicher Leistungsklasse ($P_{ave} = 75 \text{ kW}$ und $P_{peak} = 150 \text{ kW}$). Neben der Filtertopologie wird auch der Bauraumbedarf unter Verwendung frei erhältlicher Komponenten dargestellt.

1.1 Simulationsumgebung und Grenzwerte für leitungsgebundene Störung

Die für diese Arbeit durchgeführten Analogsimulationen werden mit der Software LTSpice durchgeführt [1]. Als Grundlage für die Simulation wird auf Modelle einer SiC basierten Leistungselektronik inklusive des Elektromotors, abgebildet als integrierte E-Maschine, zurückgegriffen und mit realistischen Werten bedatet. Die generische Leistungselektronik mit einer Schaltfrequenz $f_s = 10 \text{ kHz}$ basiert auf dem Infineon SiC-Modul [5], welches auf Schaltflanken $T_{rise/fall} = 60 \text{ bis } 80 \text{ ns}$ eingestellt wurde. Der Elektromotor hingegen basiert auf Werten einer AVL Eigenentwicklung und wurde mit seinen technischen Daten und parasitären Eigenschaften in einem Motorersatzmodell beschrieben. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde davon abgesehen die Leistungselektronik inklusive des verbauten Zwischenkreiskondensators ($C_{ZKK} = 500 \mu\text{F}$) und der Y-Kapazitäten ($C_y = 100 \text{ nF}$) speziell für die 400 V und die 800 V-Fahrzeugvariante anzupassen. Die Systeme unterscheiden sich jedoch in den verwendeten HV-Kabeln. Insgesamt werden drei Systeme betrachtet: Ein 400 V-HV-System mit geschirmten 35-mm²-HV-Kabeln und zwei 800 V-HV-Systeme mit geschirmten und ungeschirmten 16 mm²-HV-Kabeln. Die HV-Kabel wurden entsprechend den Herstellerangaben nachmodelliert [7,8].

Die Leistungselektronik wird beim Ladevorgang als inaktiv angenommen und es werden daher die Grenzwerte der ECE-R10 [6] nicht betrachtet. Um die leitungsgebundenen Störungen eindeutig bewerten zu können wird die Simulationsumgebung entsprechend den Messaufbauten in der Norm CISPR-25 erweitert [2]. Als Grenzwert für die an der LISN bewerteten Signale werden hierzu die *Average*-Werte der Klasse 5 für geschirmt (HV) und ungeschirmt (LV) ausgeführte Kabel herangezogen [2]. Die Grenzwerte für die Bereiche SW und CB wurden aus der Betrachtung ausgeschlossen. Die Peak und Quasipeak Grenzwerte werden für die Simulation und der Filterbewertung nicht herangezogen. Im Weiteren wurden die Grenzwerte lückenlos aufgefüllt und lückende Bereiche wurden mit dem Grenzwert des vorangehenden genormten Bereichs aufgefüllt und sind den Simulationsergebnissen hinterlegt (siehe Abb. 1).

Die simulationsbasierte Auslegung der Filter erfolgt im Folgenden in der Umgebung der Fahrzeugimpedanz mit der Leistungselektronik als Störquelle, der HV-Verkabelung und Gehäuse als Störpfad, sowie der LISN und Batterie als Störsenke. Im Weiteren werden neben den funktionalen Eigenschaften der Bauteile auch parasitäre Einflüsse modelliert. Zur Bestimmung induktiver und kapazitiver Eigenschaften von Komponenten, z.B. Kabel, als auch zur Auslegung induktiver Komponenten werden Simulationen mittels FEMM [4] durchgeführt.

1.2 Vorgehensweise zur Filter- und Bauteilauslegung

Im Fokus steht hier die Vergleichbarkeit des Filteraufwandes einer HV-Leistungselektronik unter den Gesichtspunkten der HV-Spannung und der Kabelschirmung. Hierzu wird für das 400 V und das 800 V-HV-System die gleiche Leistungsklasse ($P_{ave} = 75 \text{ kW}$ und $P_{peak} = 150 \text{ kW}$) vorausgesetzt. Um die mittleren sowie die maximalen Pegel für Gegen- und Gleichtaktstörungen zu bestimmen, wird für jede der drei Konfigurationen sowohl die durchschnittliche, die maximale Leistung als auch der Nullzeiger angefahren.

Zur Ermittlung der notwendigen Filtertopologie werden Simulationen sowohl im Zeit-, als auch im Frequenzbereich durchgeführt. Das resultierende Störsignal, welches an der LISN abgegriffen wird, wird mathematisch in Gleich- und Gegentaktspannung getrennt und die jeweilig benötigte Gleich- und Gegentaktdämpfung bestimmt [3]. Danach erfolgt die Auswahl einer geeigneten Filtertopologie und die Selektion der einzelnen Filterkomponenten, welche mit Ihrer Anbindung und Wirkung im System bewertet werden. Die resultierende Dämpfung unterscheidet sich hier deutlich von der klassischen Filterauslegung im 50 Ω -System. Neben dem geforderten Frequenzbereich (150 kHz bis 108 MHz) werden die Eigenschaften der Filter bis in den kHz-Bereich betrachtet. Ziel ist es hierbei etwaig entstehende kritische Resonanzen zu erkennen und wenn nötig zu bedämpfen.

In Hinblick auf geltende Anforderungen für den Berührungsschutz ($E < 200 \text{ mJ} = \frac{1}{2} C U^2$) [9] und auf die Reduzierung von Ableitströmen an Ladesäulen stand die Reduzierung der Y-Kapazitäten in der Entwicklung der Filtertopologie in ständiger Abwägung zum Einsatz von CM-Kernen. Die Beschränkung des Energieinhalts hat zur Folge, dass im 800 V-System nur $\frac{1}{4}$ der Y-Kapazität im Vergleich zum 400 V-System verbaut werden darf. Auch für die Spannungsfestigkeit der X-Kondensatoren gelten für beide Systeme unterschiedliche Anforderungen, welche bei 800 V-Komponenten eine größere Bauform bei gleicher Kapazität zur Folge hat. Die Induktivitäten für die Gleich- und Gegentaktunterdrückung werden auf entsprechenden Spitzenströme unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Eigenschaften der Materialien ausgelegt. Die Selektion der Filterbauteile orientiert sich bevorzugt an AECQ-200 qualifizierte, aber auch AECQ-200 qualifizierbare Komponenten. Als Y-Kondensatoren wurden zudem nur Y2 klassifizierte Kondensatoren in der Auswahl berücksichtigt.

1.3 Simulationsergebnisse

Für die drei HV-Systeme (400 V geschirmt, 800 V geschirmt und 800 V ungeschirmt) wurde jeweils eine Simulation ohne und mit HV-Filter erstellt. Die drei Lastfälle (Nullzeiger, Dauerlast und Spitzenlast) wurden zur Filterauslegung herangezogen, um die Filter in Bezug auf Dämpfung der Störspannung auszulegen aber auch um die Belastung der Komponenten in den einzelnen Fällen zu analysieren und entsprechend auszulegen. Die in Abbildung 1 gezeigten Spektren basieren auf Zeitbereichssimulationen. Die Aufteilung in Gegen- und Gleichtaktanteil wurde durch mathematische Berechnung der an den Netznachbildungen abgegriffenen Spannungen durchgeführt. Anschließend wurden diese mittels FFT in den Frequenzbereich gewandelt. Die für die Filterauslegung geltenden Average-Grenzwerte für geschirmte und ungeschirmte HV-Kabel wurden der Abbildung 1 hinterlegt. Die simulierten Spektren der leitungsgebundenen Störung

zeigen für alle drei System ohne HV-Filter im gesamten Frequenzbereich eindeutige Grenzwertverletzungen (siehe linke Seite von Abbildung 1).

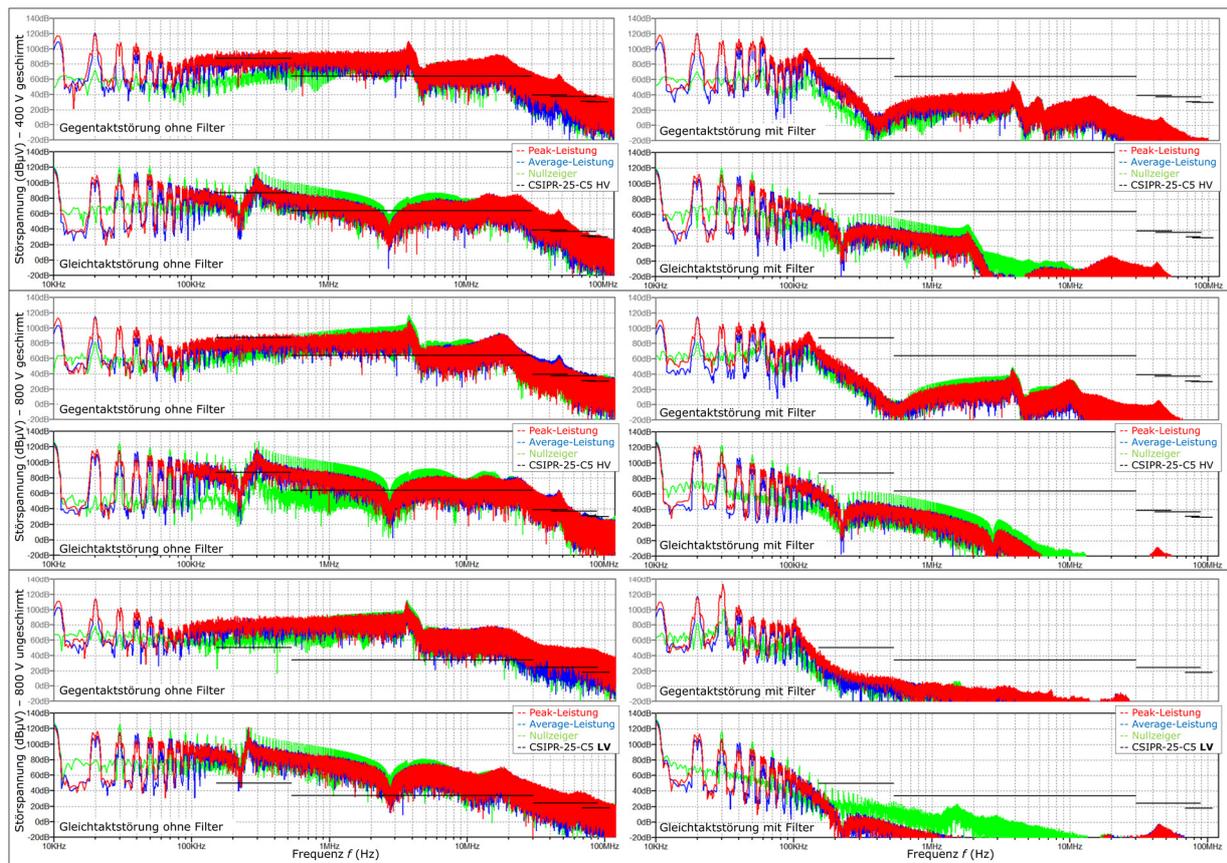


Abbildung 1: Leitungsgebundene Störung ohne (links) und mit (rechts) HV-Filter für die drei simulierten HV-Systeme – das geschirmte 400 V-HV-System (oben), das geschirmte 800 V-HV-System (mitte) und das ungeschirmte 800 V-HV-System (unten). Die Störsignale wurden auf Gegentakt- und Gleichtaktstörung aufgeteilt, jeweils für Spitzenleistung (rot), Nennleistung (blau) und Nullzeiger (grün). Die durchgezogenen schwarzen Linien entsprechen den, an der CISPR-25-Klasse 5 HV/LV angelegten, Average-Grenzwerten.

1.3 Filtertopologien und -bewertung

Um die Gleich- und Gegentaktspannungen unter das geforderte Niveau zu dämpfen, wurden HV-Filter mit realitätsnah modellierten Komponenten entworfen. Der Gegentaktfilter wurde ausgelegt, um unter Spitzen- und Durchschnittslast den Gegentaktpegel unter dem Grenzwert zu halten, wohingegen der Gleichtaktfilter seine maximale Dämpfung im Falle des Nullzeigers erbringen muss. Mit den entsprechend ausgelegten HV-Filtern zeigen die Spektren der leitungsgebundenen Störung keine Grenzwertverletzungen mehr (siehe rechte Seite von Abbildung 1).

Die für die Betrachtung herangezogenen Filtertopologien zur Erfüllung der strengen Grenzwerte werden in Abbildung 2 dargestellt. Für die Modellierung der Filter wurden auch parasitäre Eigenschaften der Anschlüsse, Busbar sowie der verwendeten Bauteile berücksichtigt. Die Kombination der kapazitiven Elemente entspricht einer späteren Bestückung des Filters mittels PCB und dient der späteren Abschätzung des Filtervolumens. Im Vordergrund stand hierbei auch der Aufbau in sich wiederholenden Filterstufen mit verfügbaren Bauteilen, sondern auch der Optimierung der Gesamtimpedanz. Für die beiden geschirmten Systeme sind zur Dämpfung der Gleich- und Gegentaktstörung je ein zweistufiger LC-Filter ausreichend (siehe Abbildung 2 oben und mittig). Für die Filter der beiden geschirmten HV-Systeme ergab die geometrische

Abschätzung ein benötigtes Filtervolumens von $V_F < 0.87$ L. Für das ungeschirmte 800 V-HV-System mussten, im Vergleich zum geschirmten System, nicht nur Werte einzelner Bauteile, sondern auch ihre Anzahl erhöht werden. Zudem musste der Gleich- und Gegentaktfilter um je eine LC-Stufe erweitert werden. Ausschlaggebend war hier vor allem der um 37 dB niedrigere Grenzwert zwischen 150 kHz und 500 kHz. Im Vergleich zu den beiden geschirmten Systemen benötigte der Filter mit $V_F < 1.72$ L ungefähr das doppelte Volumen.

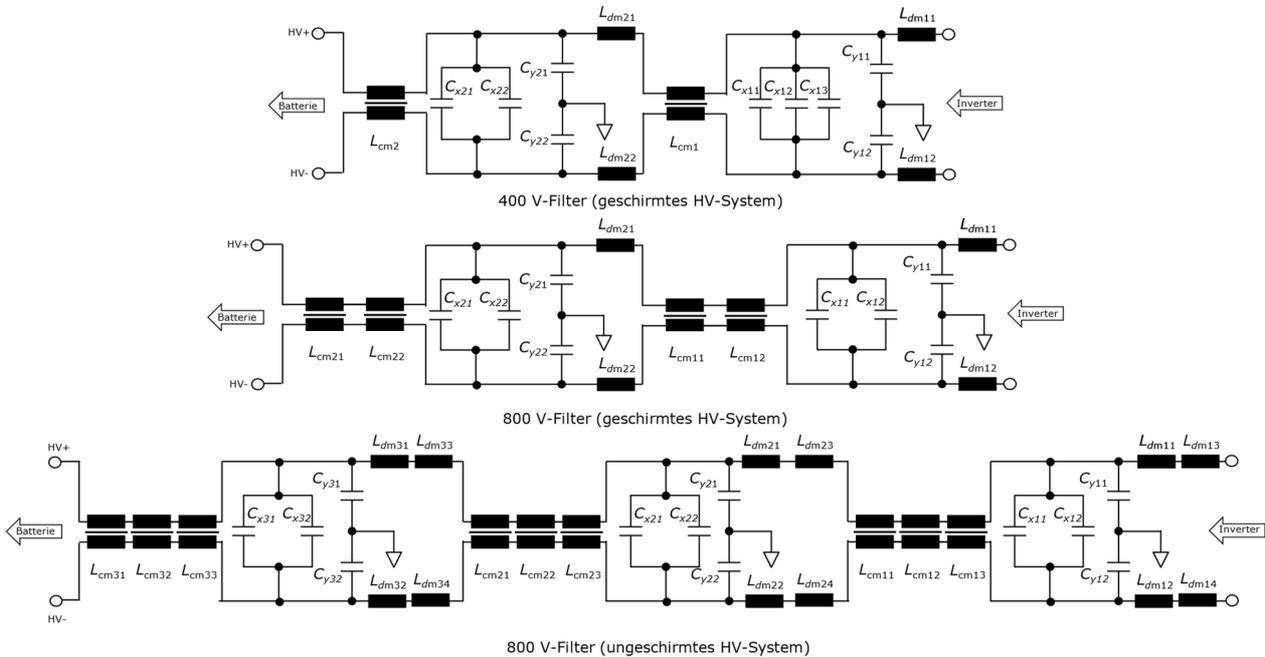


Abbildung 2: Filtertopologien für die drei simulierten HV-Systeme: 400 V (oben) und 800 V mit geschirmten HV-Kabeln (mittig), sowie 800 V mit ungeschirmten HV-Kabeln (unten)

Nachfolgend werden die einzelnen induktiven und kapazitiven Elemente aufgelistet, die für die HV-Filter der drei simulierten HV-Systeme nach Herstellerangaben modelliert wurden. Hierbei handelt es sich um AECQ 200 qualifizierte oder qualifizierbare Bauteile [10-13]. Eine Betrachtung der Gesamtkosten wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt und müsste auch gegen die Einsparung an anderer Stelle, z.B. bei den Kosten und Verarbeitung der HV-Kabel, sowie dem Gesamtgewicht gerechnet werden.

Filterkomponenten des geschirmten 400 V-HV-Systems:

- L_{cm} - VAC V316 ($A_L = 90 \mu\text{H} / 20 \mu\text{H}$, $I_{sat} = 0.4 \text{ A} / 0.8 \text{ A} @ 10 \text{ kHz} / 100 \text{ kHz}$)
- L_{dm} - CSC CH400125 Highflux ($A_L = 170 \text{ nH} / 140 \text{ nH} @ I_{DC} = 0 \text{ A} / 400 \text{ A}$)
- C_x - KEMET 3.9 μF (R75PW4390AA30J) 630 V, RM 37.5 mm
- C_y - KEMET Y2 47 nF (R413I2470GYT0M) 1500 V, RM 15 mm

Filterkomponenten des geschirmten 800 V-HV-Systems:

- L_{cm} - VAC V318 ($A_L = 104 \mu\text{H} / 24 \mu\text{H}$, $I_{sat} = 0.5 \text{ A} / 1 \text{ A} @ 10 \text{ kHz} / 100 \text{ kHz}$)
- L_{dm} - CSC CH270125 Highflux ($A_L = 160 \text{ nH} / 140 \text{ nH} @ I_{DC} = 0 \text{ A} / 190 \text{ A}$)
- C_x - KEMET 3.9 μF (R75QW4390AA00K) 1000 V, RM 37.5 mm
- C_y - KEMET Y2 15 nF (R413I2150AAT0M) 1500 V, RM 15 mm

Filterkomponenten des ungeschirmten 800 V-HV-Systems:

- L_{cm} - VAC V318 ($A_L = 104 \mu\text{H} / 24 \mu\text{H}$, $I_{sat} = 0.5 \text{ A} / 1 \text{ A} @ 10 \text{ kHz} / 100 \text{ kHz}$)
- L_{dm} - CSC CH270125 Highflux ($A_L = 160 \text{ nH} / 140 \text{ nH} @ I_{DC} = 0 \text{ A} / 190 \text{ A}$)
- C_x - KEMET 3.9 μF (R75QW4390AA00K) 1000 V, RM 37.5 mm
- C_y - KEMET Y2 33 nF (R413I2330DQT0M) 1500 V, RM 15 mm

1.4 Zusammenfassung

Die erarbeitenden Filtertopologien beleuchten den Filteraufwand in Bezug auf die Spannungsklasse und Flexibilität bei der Kabelverlegung durch Einsparung des Kabelschirms. Die Simulationen basieren auf einer Leistungselektronik die realitätsnah modelliert, aber, um einen Vergleich zu ermöglichen, nicht für eine spezielle Systemspannung optimiert wurde. Als Designziel für den HV-Filter galten die durchaus strengen Grenzwerte der CISPR-25-Klasse 5 HV (für geschirmte Systeme) und Klasse 5 LV (für geschirmte Systeme). Das Anheben der HV-Spannung von 400 V auf 800 V bei gleichbleibender Leistungsklasse, resultiert in einem konstant bleibendem Filtervolumen von ca. $V_F < 0.87 \text{ L}$. Ein Vergleich auf Bauteil- und Fertigungskosten wurde hierzu nicht durchgeführt. Eine Ausführung des 800 V-Systems ohne geschirmter HV-Leitungen führt unter den simulierten Bedingungen zu einer Verdoppelung des Filtervolumens auf $V_F < 1.72 \text{ L}$. Dies ist den um bis zu 37 dB niedrigeren Grenzwerten geschuldet, erlaubt jedoch eine flexiblere Kabelverlegung und eine Reduzierung der damit verbundenen Kosten in Herstellung und Verarbeitung.

Literaturangaben

- [1] Analog Devices Inc.: LTspice Simulator Homepage, online 2022, URL: www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html (Stand 25.05.2022)
- [2] VDE-Verlag: CISPR-25, online 2021, URL: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/250584/cispr-25-2021.html> (Stand 25.05.2022)
- [3] Adolf, Schwab: Elektromagnetische Verträglichkeit, ISBN 9783540420040, Springer 2007
- [4] David, Meeker: Finite Element Method Magnetics Homepage, online 2019, URL: www.femm.info/wiki/HomePage (Stand 25.05.2022)
- [5] Infineon Technologies AG: HybridPACK Drive module FS03MR12A6MA1B, online 2021, URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS03MR12A6MA1B-DataSheet-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4627862c3e501787e48f6ef330c (Stand 25.05.2022)
- [6] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): IECE-R10, online 2019, URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2019/E-ECE-324-Add.9-Rev.6.pdf> (Stand 25.05.2022)
- [7] Coroplast Fritz Müller GmbH & Co. KG: Geschirmte Kupfer Hochvoltleitungen für Hybrid- und Batterie-Fahrzeuge, URL: <https://www.coroflex-cable.com/de/hochvoltleitungen/coroflex-180hv-ssc-fh1r2gcb2g> (Stand 25.05.2022)
- [8] Coroplast Fritz Müller GmbH & Co. KG: Ungeschirmte Kupfer Hochvoltleitungen für Hybrid- und Batterie-Fahrzeuge, URL: <https://www.coroflex-cable.com/de/hochvoltleitungen/coroflex-180hv-usc-fh12g> (Stand 25.05.2022)
- [9] Volkswagen AG: Konzernnorm VW 80303 - Elektrische Eigenschaften und elektrische Sicherheit von Hochvolt-Komponenten in Kraftfahrzeugen, 2014
- [10] VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG: Amorphe und Nanokristalline Kerne, online 2022, URL: <https://vacuumschmelze.de/Produkte/Induktive-Bauelemente/Amorphe-und-Nanokristalline-Kerne> (Stand 25.05.2022)

[11] Chang Sung Cooperation: Soft Magnetic Powder Cores, online 2021, URL: <http://www.changsung.com/cores?lang=en> (Stand 25.05.2022)

[12] Kemet: Single Metallized Polypropylene Film Capacitors for DC and Pulse Applications (Automotive Grade), online 2022, URL: <https://connect.kemet.com:7667/gateway/IntelliData-ComponentDocumentation/1.0/download/datasheet/R75PW4390AA30J.pdf> (Stand 25.05.2022)

[13] Kemet: X1/Y2 Class Metallized Polypropylene Film EMI Suppression Capacitors (Automotive Grade), online 2021, URL: <https://connect.kemet.com:7667/gateway/IntelliData-ComponentDocumentation/1.0/download/datasheet/R413I2150JHM1M.pdf> (Stand 25.05.2022)