



ÜBERSpannungSSCHUTZ

Mario Möller
Field Application Engineer

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

Agenda

- Grundlagen
- Bauteilübersicht
- Grundlagen Varistor
- Bauteilauswahl
- Dimensionierungsbeispiel
- Grundlagen TVSP Dioden
- Design Tipps



GRUNDLAGEN

Entstehung von Überspannung

- Natürliche Phänomene
 - z.B.: indirekter Blitzschlag



- Industrielle Entladungen
 - z.B.: Schalten induktiver Lasten



- Elektrostatische Entladung
 - z.B.: zwischen Mensch und Material



- EN 61000-4-5
 - Surge mit hoher Energie

- EN 61000-4-4
 - EFT

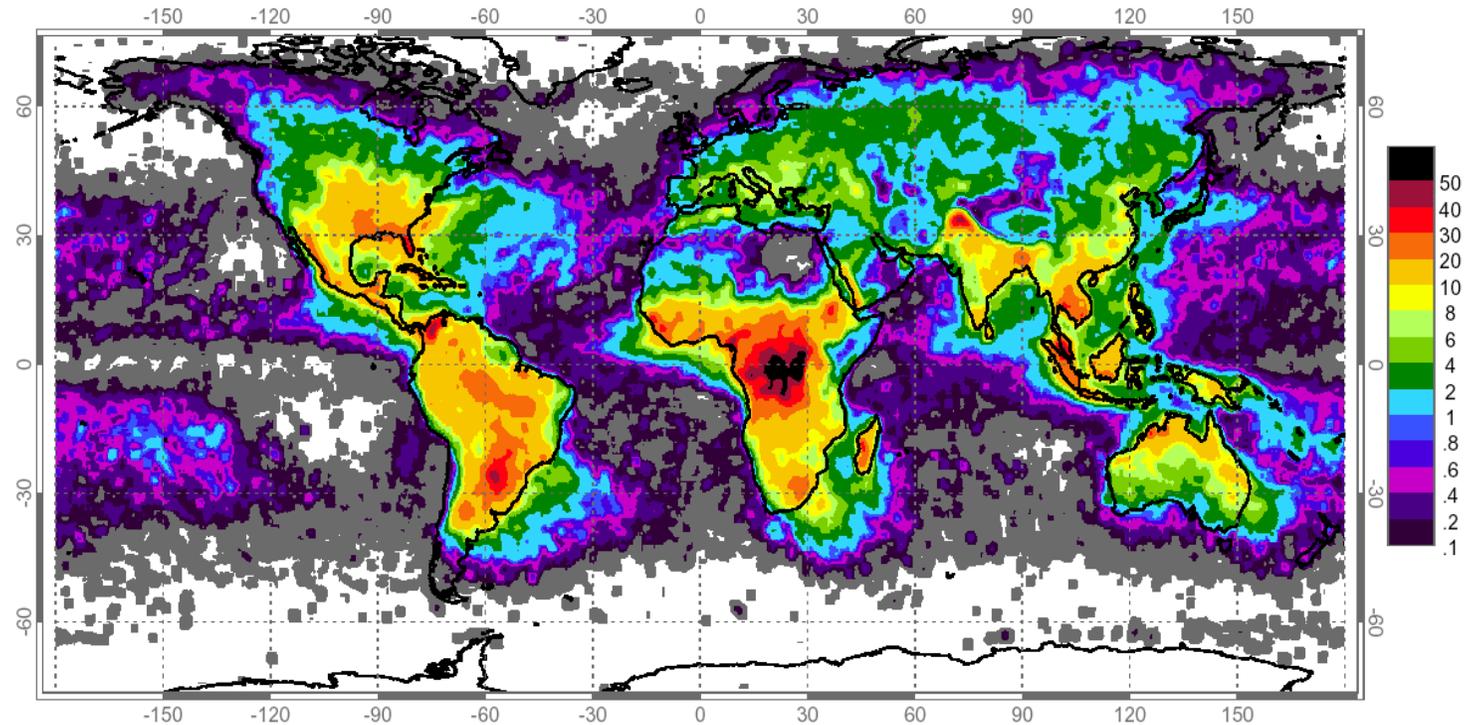
- EN 61000-4-2
 - ESD

SURGE



Atmosphärische Entladungen: Blitz

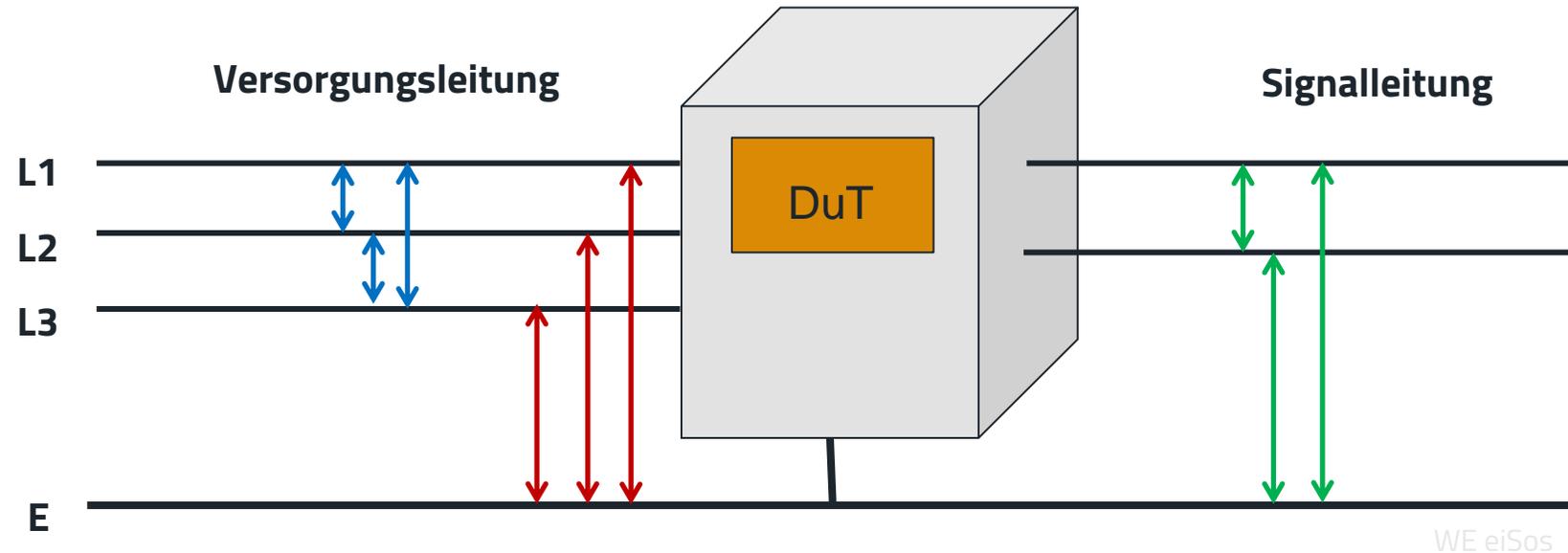
- Direkte Einwirkung Blitzeinschläge
- Indirekte Einwirkung durch Leitungseinkopplung in z.B Hochspannungsleitungen
- Unsicherheit über Größe der eingekoppelten Energie



NASA_LightingMap0 - Picture from NASA NTSCC Lighting team

IEC 61000-4-5 Surge

Prüfaufbau



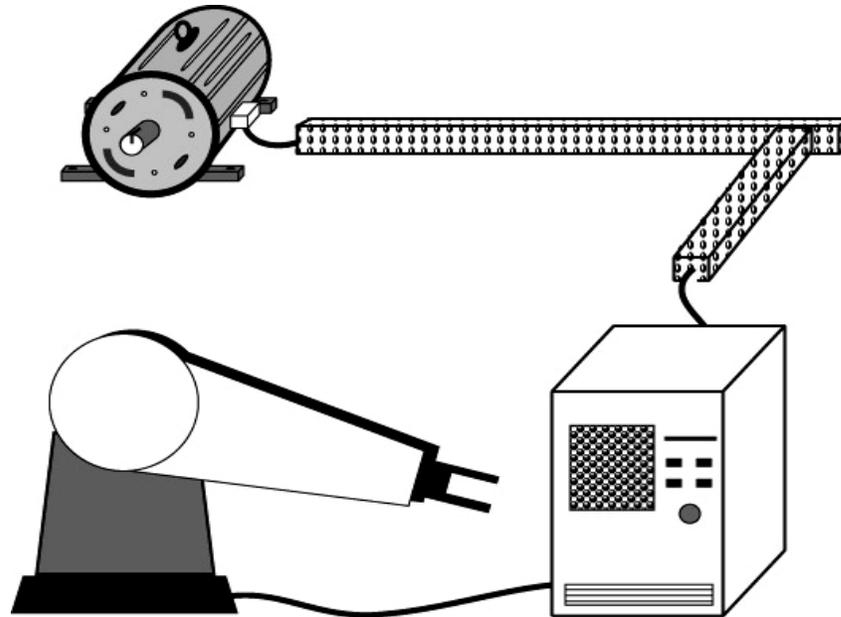
- **Leitung gegen Erde** $Z = 12\Omega$
- **Leitung gegen Leitung** $Z = 2\Omega$
- **Signal-Leitung** $Z = 42\Omega$

BURST



Industrielle Überspannung

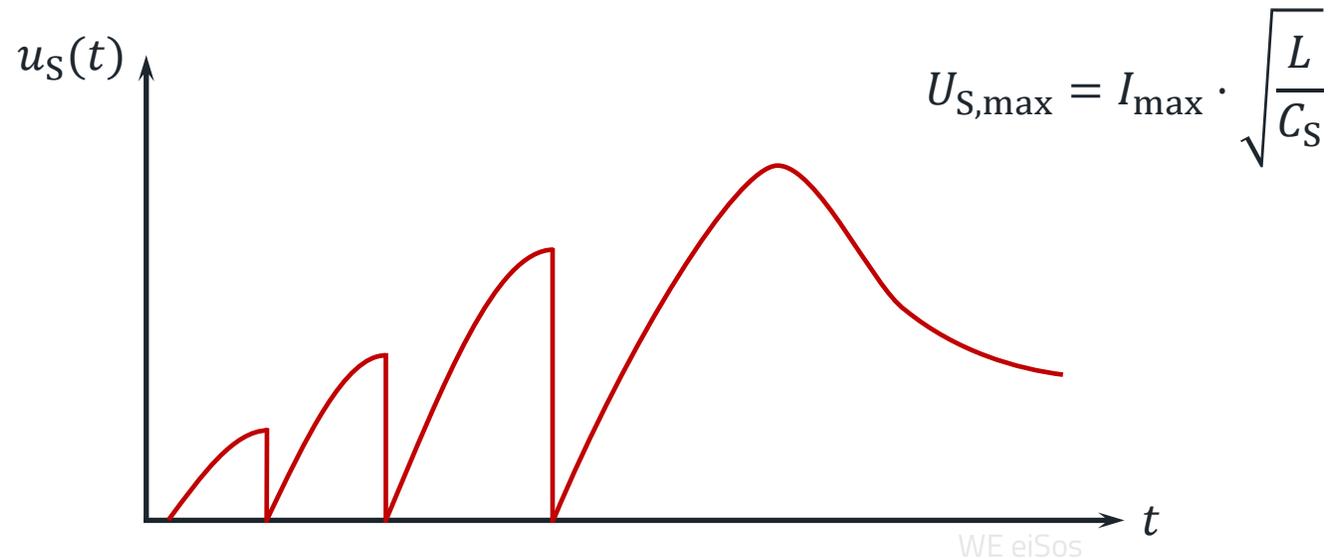
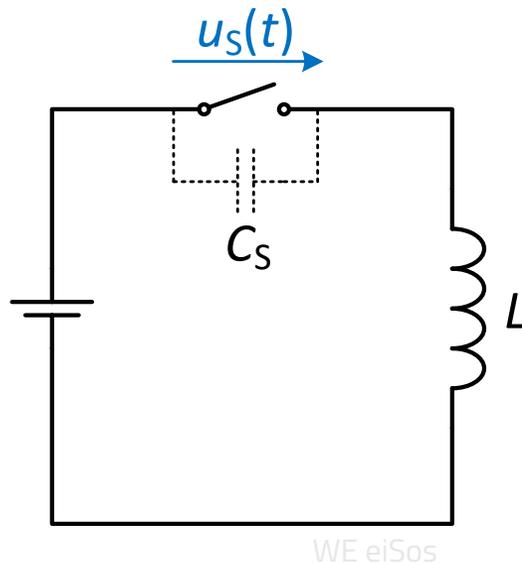
- Verursacht transiente Leitungsstörungen
- Schaltvorgänge von Transformatoren, Motoren, Relais, Bürstenfeuer...
- Tritt kontinuierlich auf
- Wirkt selten zerstörerisch



Industrielle Überspannung

Schalten von induktiven Lasten

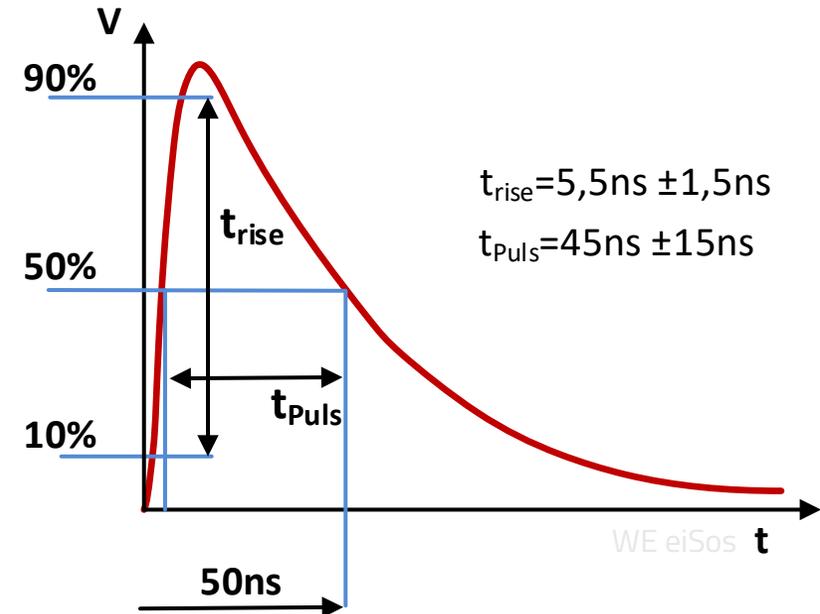
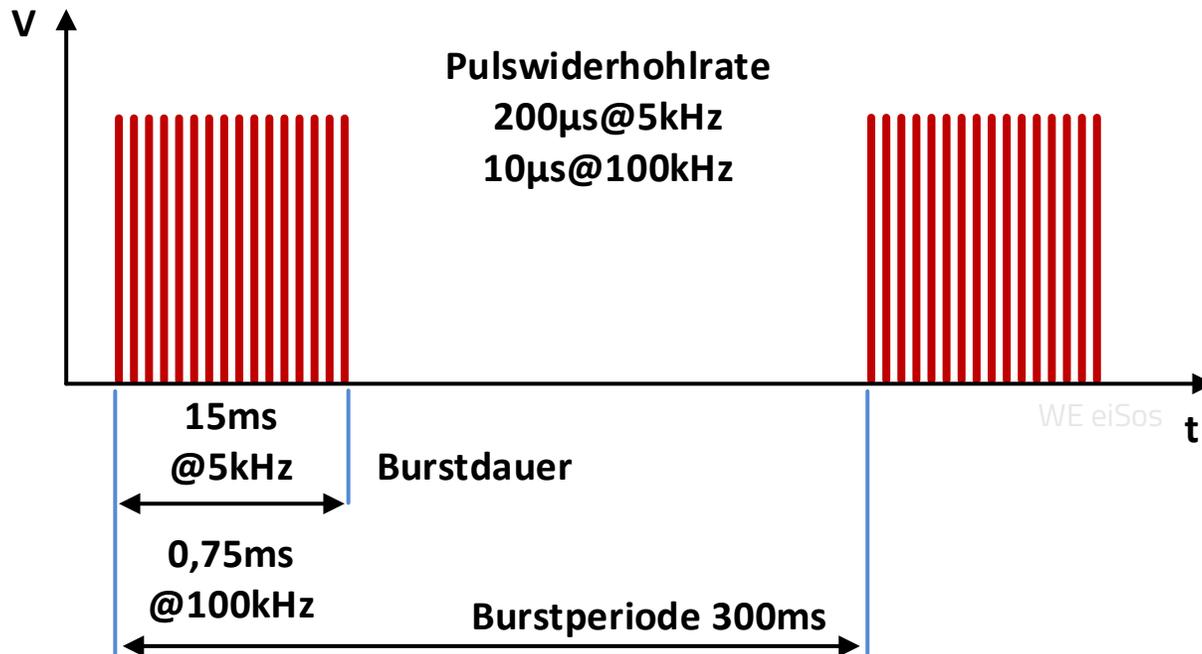
- Beim Öffnen eines Schalters oder Relais in einem Stromkreis mit induktiver Last wird über den **Kontakten** eine Spannung induziert.
- Die Spannung kann mehrere Kilovolt betragen und ein **Lichtbogen** kann zünden.
- Brennzeit des Lichtbogens: einige Nanosekunden
- Impulsfrequenz (Burst): 10 kHz...10 MHz



IEC 61000-4-4 Burst

Impulsform

- Anzuwenden auf alle AC/DC Versorgungsleitungen und Signalleitungen ab 3m Länge



ESD



Elektrostatische Entladung

- Wird durch Ionisierung von Materialien (z.B. Reibung) erzeugt
- Entladung zwischen Materialien
- Kontaktentladung durch Menschen
- Kann zu schwerwiegenden Störungen führen, Totalausfällen möglich



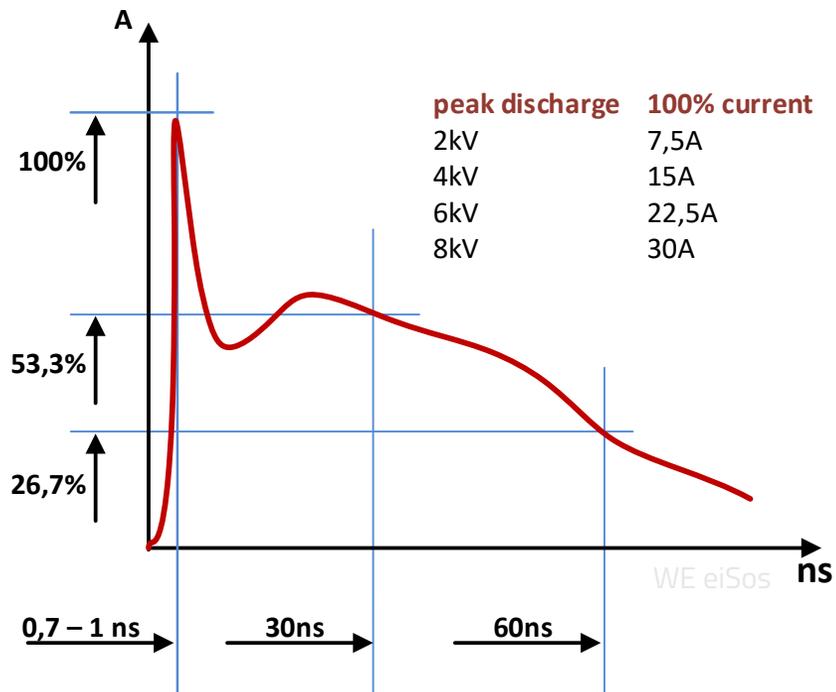
Typische Spannungswerte - Wintereffekt

Quelle	Erzeugte Aufladung bei...	
	...Luftfeuchtigkeit 10-20%	...Luftfeuchtigkeit 65-90%
Laufen über Teppich	35.000V	1.500V
Laufen über Linoleum	12.000V	250V
Arbeiten an der Werkbank	6.000V	100V
Papiere in Kunststoffhülle	7.000V	600V
Kunststoffbeutel	20.000V	1.200V
Gepolsterter Stuhl	18.000V	1.500V

IEC 61000-4-2 ESD

- Die Prüfung eines Gerätes auf elektrostatische Entladung ist in der Norm DIN EN 61000-4-2 festgelegt.
- Die Entladung erfolgt über einen leitfähigen Kontakt mit dem Gerät oder über eine Luftstrecke.
- Der Entladestrompuls des Generators in eine 50Ω-Kalibrierlast ist festgelegt.

EN 61000-4-2 current waveshape

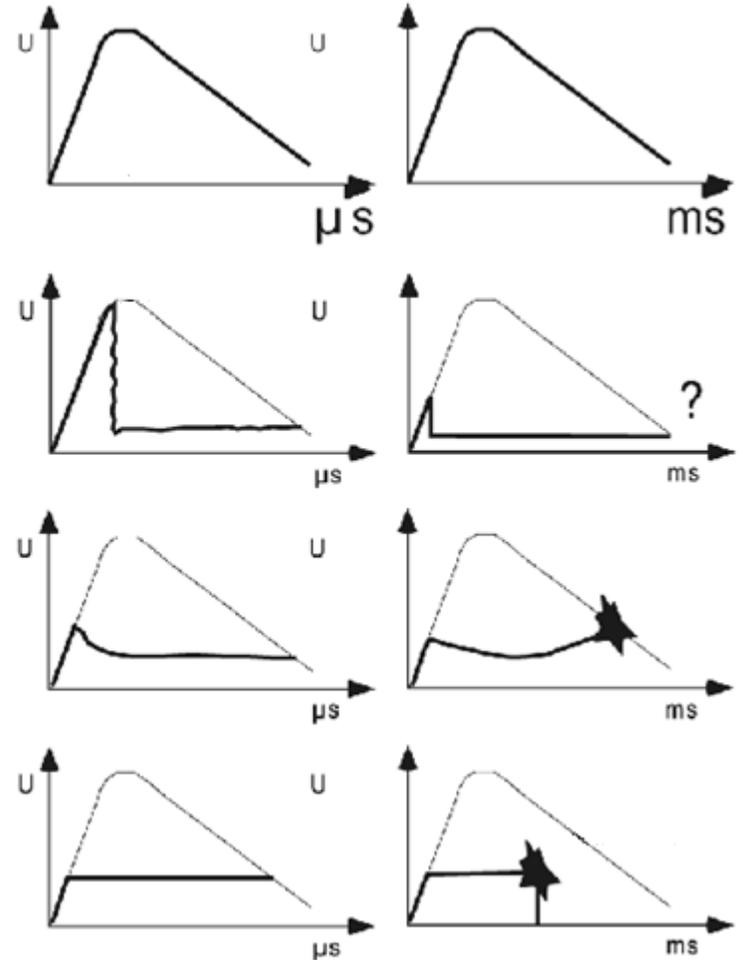
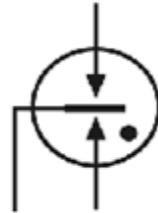


Prüfschärfe-grad	Kontakt-entladung	Luft-entladung
1	2 kV	2 kV
2	4 kV	4 kV
3	6 kV	8 kV
4	8 kV	15 kV
X	Spezial	Spezial

BAUTEILÜBERSICHT

Übersicht

- Gasableiter
 - Grobschutzelement
 - Leiten hohe Impulsenergien ab
 - Geringe Eigenkapazität
 - Langsam
- Varistoren
 - Breites Einsatzspektrum
 - Alterungsprozess
 - Für geringe und mittlere Impulsenergien
 - Teilweise hohe Kapazitäten
- TVS Dioden
 - Schnell
 - Uni- oder bidirektional
 - Bauteilersparnis



Übersicht

Bauteileigenschaften

Bauteil	SURGE	EFT	ESD	Ansprechzeit	Kapazität
Gas discharge tube (GDT)	×			1,5...2 μ s	0,5...2 pF
Disk metal oxide varistor (MOV)	×	×		<25 ns	0,01...10 nF
Multilayer-Metalloxid-Varistor (MOV)	×	×	×	<1 ns	0,07...14 nF
Power-TVS-Diode	×	×	×	<1 ns	0,02...2 nF
TVS-Diode	×	×	×	<1 ns	0,1...30 pF
ESD-Suppressor			×	<1 ns	0,2...100 pF

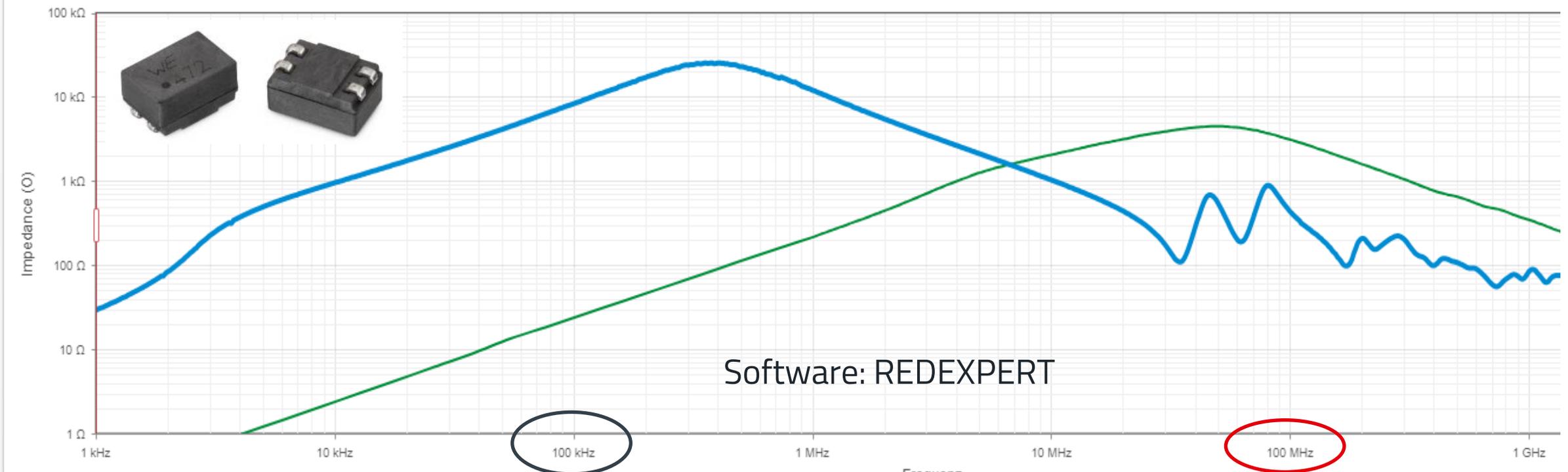


CMCs für Burst & eingekoppelte HF

Störspektrum des Burst Test erstreckt sich von 5/100kHz bis 200MHz

Artikel-Nr.	Serie	Bauform	Sp...	V_R	Z	L	I_R	Windungsart	Länge	Breite	Höhe	Leitungen	T_{max}	Montage
744225S	WE-SL2	9260		80,0 V	3,10 k Ω	40,0 μ H	900 mA	sectional	9,20 mm	6,00 mm	5,00 mm	2	125°C	SMT
744220103	WE-SL2	9260		80,0 V	25,0 k Ω	10,0 mH	350 mA	bifilar	9,20 mm	6,00 mm	5,00 mm	2	125°C	SMT

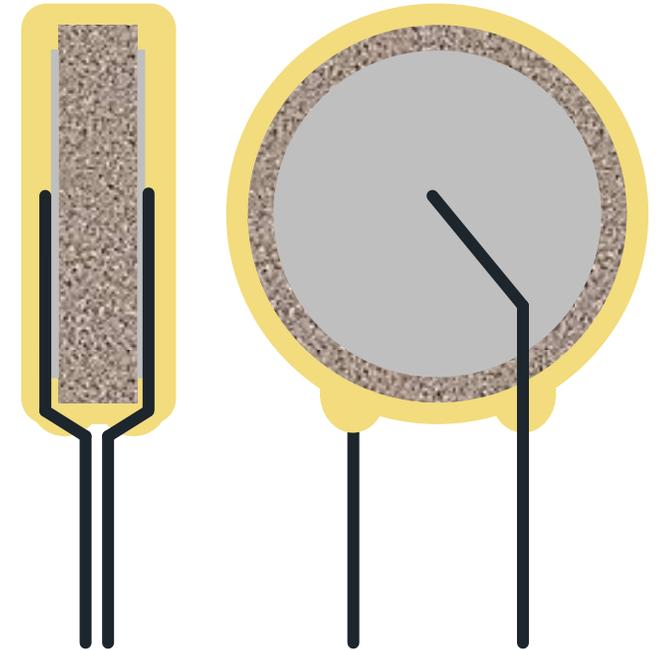
Gleichtaktimpedanz



GRUNDLAGEN VARISTOR

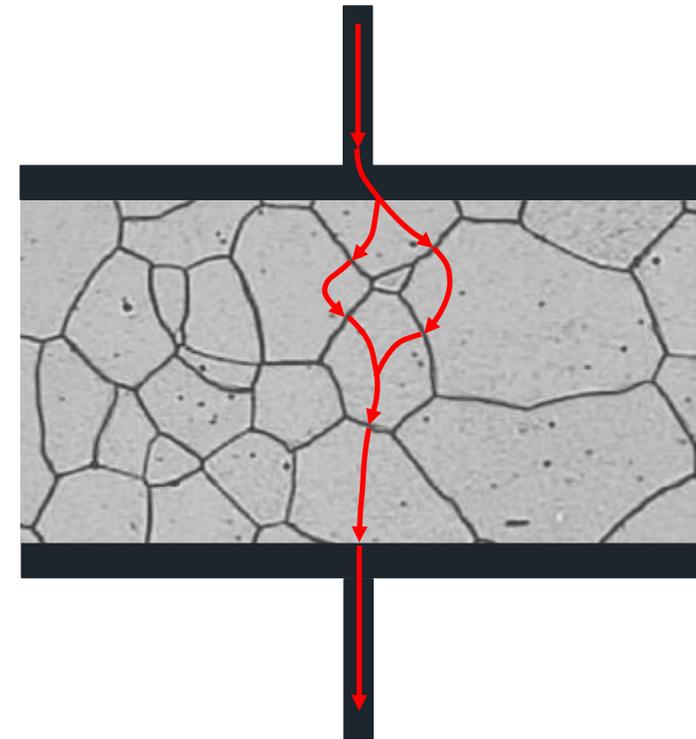
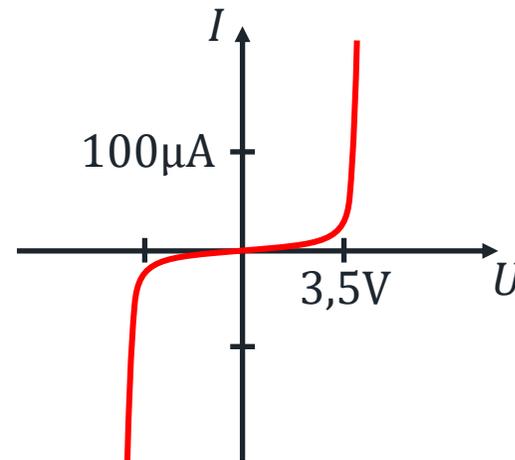
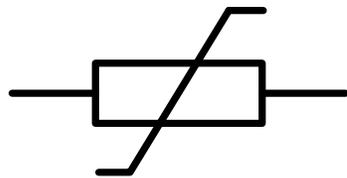
Aufbau von Varistoren

- Scheibenform, THT:
 - Zinkoxid und weitere Oxide werden gemischt, gepresst und gesintert.
 - Elektroden (Al + Cu) werden an den Seitenflächen aufgebracht.
 - Anschlussdrähte werden angelötet.
 - Eintauchen in Epoxidharz zur Isolation und als Schutz bei thermischer Überlast
- Mehrlagenform, SMD:
 - Schichtweiser Aufbau von Zinkoxid und Elektroden
 - Terminierung → Ag + Ni + Sn

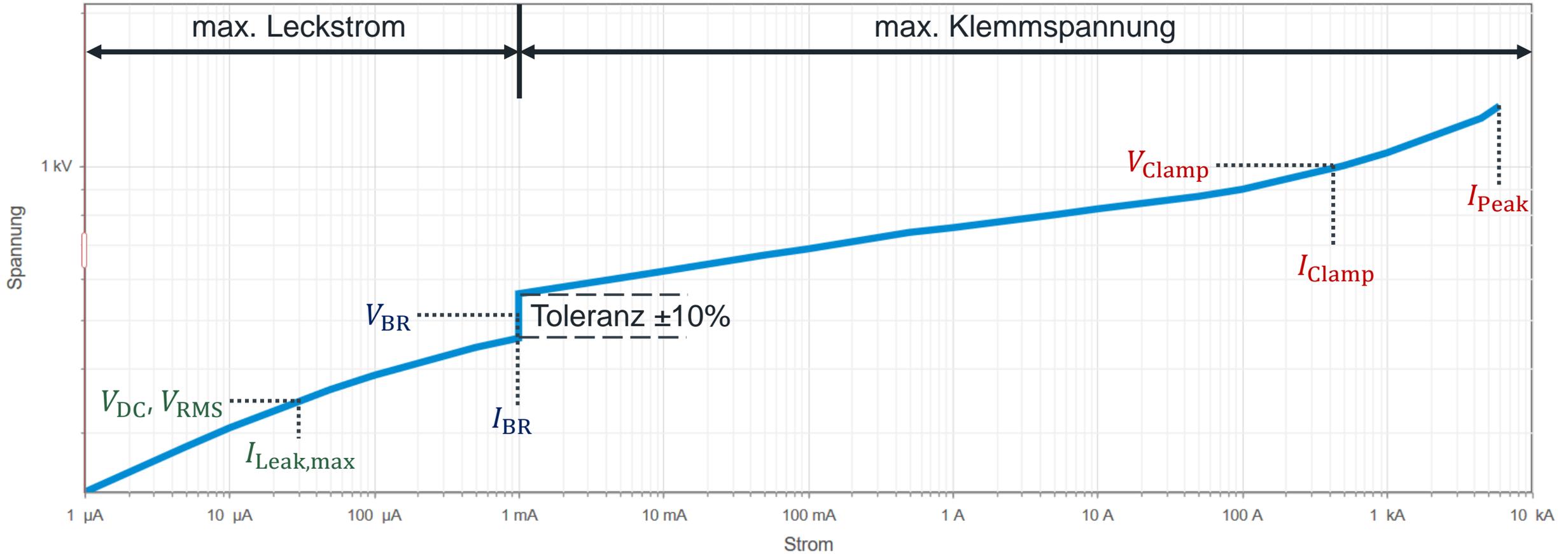


Aufbau von Varistoren

- Mikrovaristor am **Übergang** zwischen den ZnO-Körnern wird ab einer bestimmten **Schwellspannung** niederohmig.
- Parallele **Strompfade** bilden sich aus.
- Spannungsabfall über den einzelnen ZnO-Körnern addiert sich zur resultierenden **Klemmspannung V_c**
- **Durch einen zu hohen Energieeintrag altert der Varistor!**



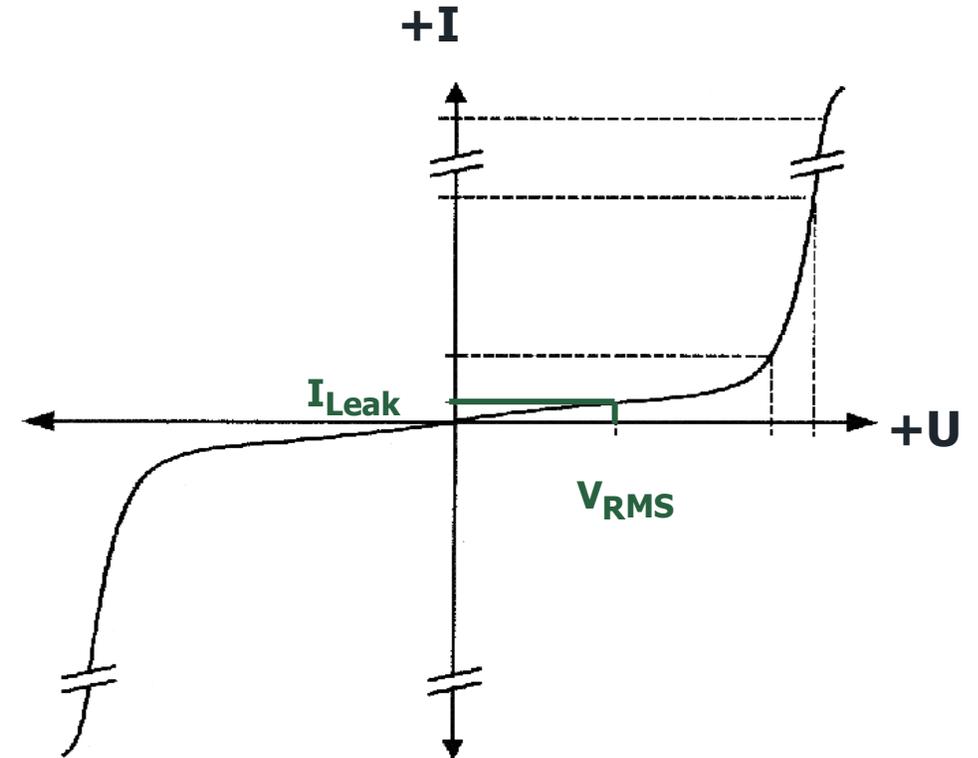
U/I - Kennline



Varistorkenngrößen

maximale Betriebsspannung V_{RMS}/V_{DC}

- Die maximale dauerhafte Betriebsspannung ist spezifiziert für AC (V_{RMS}) und DC (V_{DC}) Spannungen.
- Bei dieser Betriebsspannung ist die Leistungsaufnahme des Varistors fast Null.
- Der noch fließende Strom I_L ist vernachlässigbar und wird als Leckstrom bezeichnet.

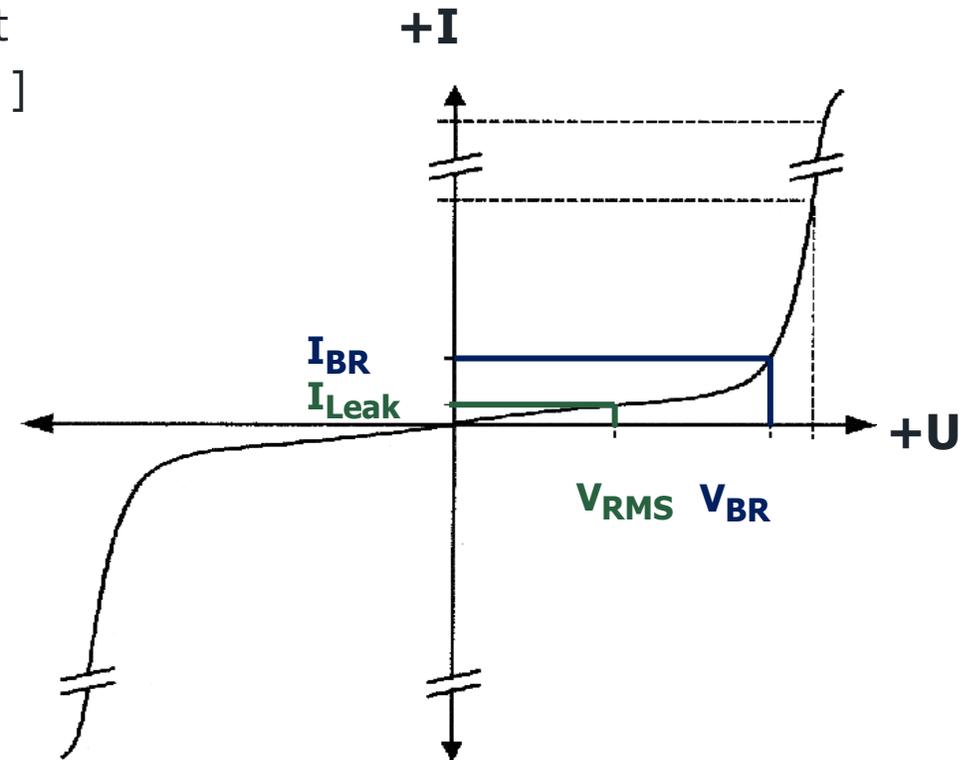


V_{RMS} sollte ca. 15-20% über der Betriebsspannung liegen

Varistorkenngrößen

Durchbruchspannung V_{BR}

- Ab „diesem Punkt“ wird der Varistor niederohmig. Der Strom steigt exponentiell in Abhängigkeit der anliegenden Spannung an. [$i = f(u)$]
- Die Durchbruchspannung V_{BR} ist erreicht, wenn ein definierter Strom durch den Varistor fließt. [z.B. 0,1mA oder 1,0mA]

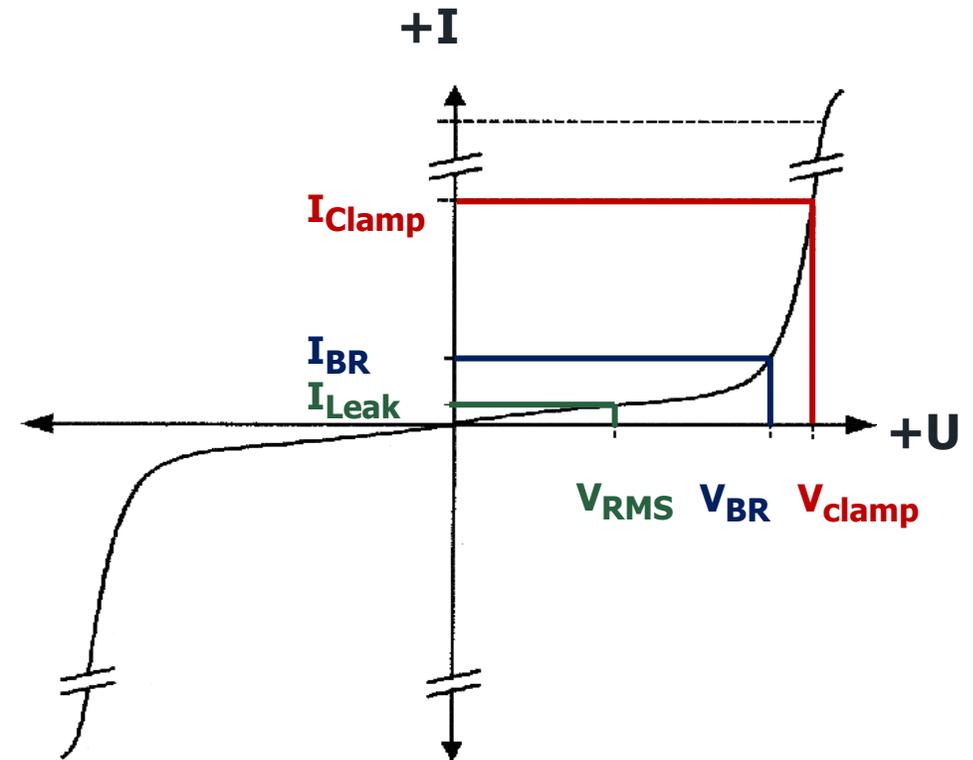


V_{BR} ist ein Nennwert zum Vergleich von Bauteilen aber technisch nicht relevant

Varistorkenngrößen

Klemmspannung V_{Clamp}

- Die Klemmspannung V_{Clamp} ergibt sich durch den definierten Kurzschlussstrom I_{Clamp} .
- Dieser Kurzschlussstrom ist charakterisiert durch die 8/20 μs Stromkurve.
- die typische Definition ist "U @ xx A"
(z. B. 710V @ 50A)
- V_{Clamp} Definition ist weder die maximal erlaubte Spannung, noch die maximal mögliche Spannung am Varistor



V_{Clamp} ist ein Nennwert zum Vergleich von Bauteilen aber technisch nicht relevant

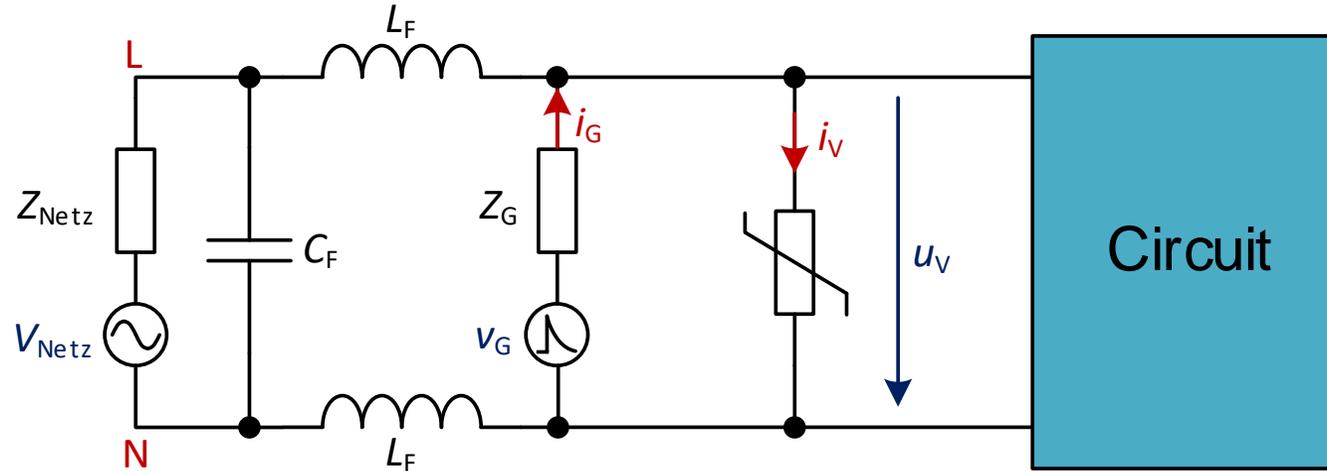
BAUTEIL- DIMENSIONIERUNG

Surge auf Netzleitung
Varistor

Dimensionierungsbeispiel

Testumgebung

- Schaltbild mit Prüfgenerator zwischen L und N



- L_F & C_F : Filterkomponenten im Koppel-/Entkoppelnetzwerk (CDN)
- $Z_{\text{Netz}} = R_{\text{Netz}} + j\omega L_{\text{Netz}}$: Impedanz des Versorgungsnetzes
- $Z_G = 2\Omega$: Innenwiderstand des Generators

Dimensionierungsbeispiel

Industrie-PC am 230V-Netz

- Prüfung erfolgt nach Installationsklasse 4
 - 2kV Prüfspannung zwischen L und N bei 2Ω Koppelimpedanz
 - 30 Impulse mit Wiederholrate 3/min (0° , 90° , 270° , je $5\times$ positiv und $5\times$ negativ)
- Annahme:
 - 1,2kV Spannungsfestigkeit des zu schützenden Geräts
- für 230V: mindestens 14mm Scheibenvaristor WE-VD mit $320V_{RMS}$ zwischen L und N
- maximaler Kurzschlussstrom:

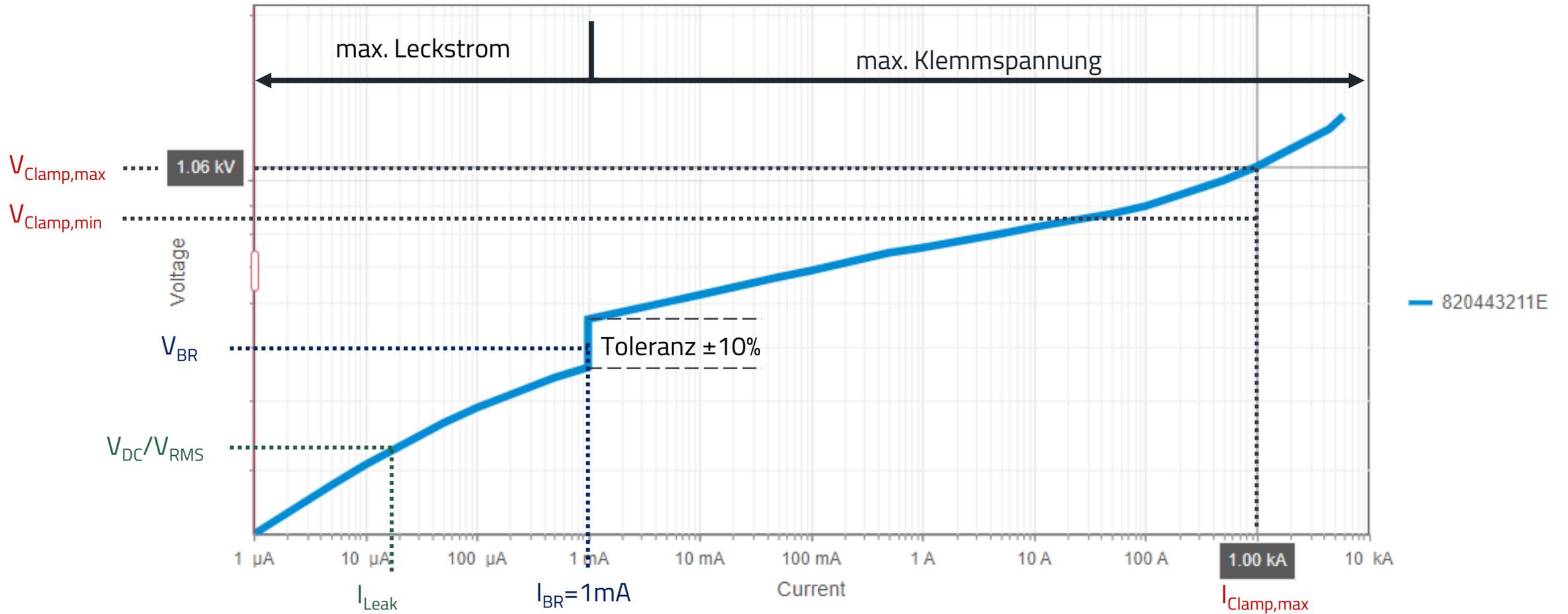
$$i_{G,max} = \frac{\hat{V}_G}{Z_G} = \frac{2000V}{2\Omega} = 1kA$$

Electrical Properties: WE-VD 820 44 321 1E

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
AC Operating Voltage	V_{RMS}		320	V	max.
DC Operating Voltage	V_{DC}		418	V	max.
Clamping Voltage	V_{Clamp}	50 A @ 8/20 μ s	842	V	max.
(Reverse) Peak Pulse Current	I_{Peak}	8/20 μ s	6000	A	max.
Power Dissipation	P_{Diss}		0.6	W	max.
Energy Absorption	W_{max}	10/1000 μ s	190	J	max.
Nominal Discharge Current	I_n		3	kA	max.
Measured Limiting Voltage	V_{ML}		1270	V	max.
(Reverse) Breakdown Voltage	V_{BR}	1 mA	510	V	$\pm 10\%$
(Channel) Input Capacitance	C_{Ch}	1 kHz	370	pF	typ.

Dimensionierungsbeispiel

Industrie-PC am 230V-Netz



Dimensionierungsbeispiel

Industrie-PC am 230V-Netz

- Für den ungünstigsten Fall wird die minimale Klemmspannung benötigt. (Toleranz: $\pm 10\%$)

$$V_{\text{clamp_min}} = V_{\text{clamp_max}} * \frac{0,9}{1,1} = 1060 \text{ V} * \frac{0,9}{1,1} = 870 \text{ V}$$

- Der maximale Strom durch den Varistor tritt bei der um die minimale Klemmspannung verringerten Pulsspannung auf.

$$i_{\text{clamp_max}} = \frac{\hat{V}_G + \hat{V}_{\text{mains}} - V_{\text{clamp_min}}}{Z_G} = \frac{2000 \text{ V} + 325 \text{ V} - 870 \text{ V}}{2 \Omega} = 727,5 \text{ A}$$

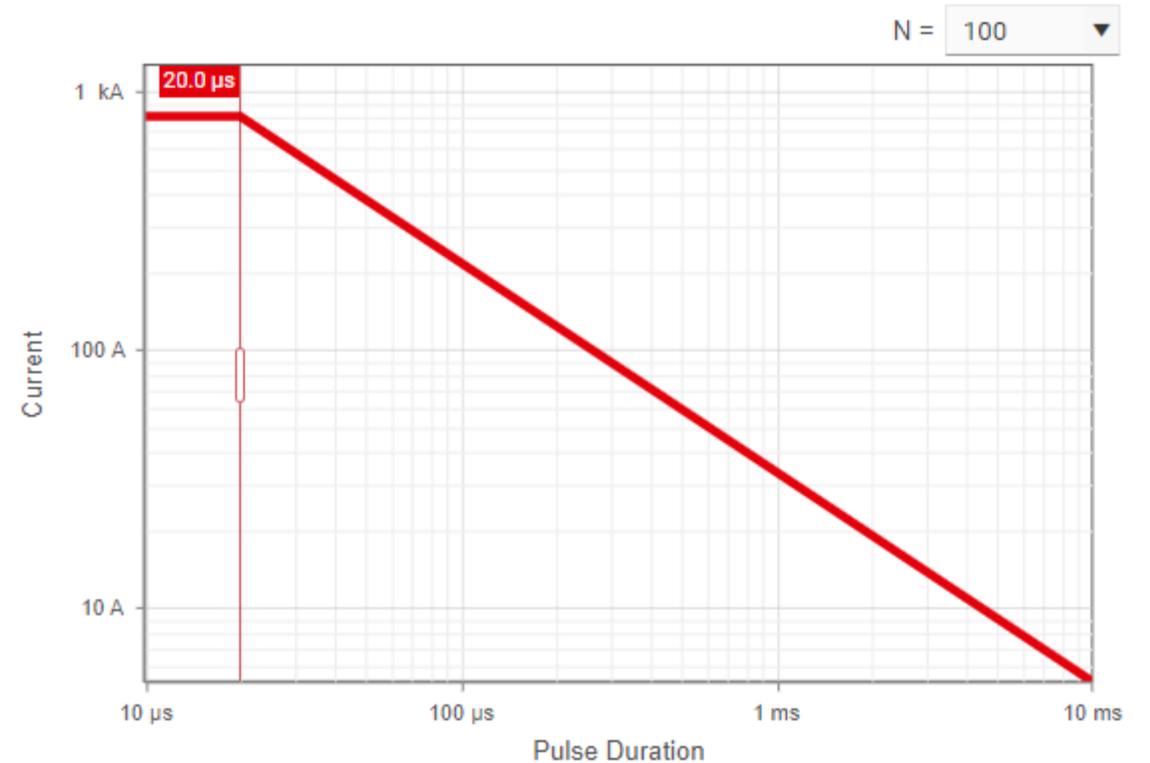
- Klemmspannung bei maximal möglichem Strom, abgelesen aus dem Diagramm/RedExpert

$$v_{\text{clamp_max@728A}} = 1,04 \text{ kV}$$

Dimensionierungsbeispiel

Industrie-PC am 230V-Netz

- Prüfbedingung: 30 Impulse von je 20µs
- Aus dem Strom-Derating geht hervor, dass der Varistor diese Anforderung erfüllt:
- max. 100 Impulse zu 800A@20µs



Dimensionierungsbeispiel

Industrie-PC am 230V-Netz

- Überprüfung des Energieabsorptionsvermögens und der Verlustleistung unter Verwendung der berechneten Spitzenwerte und der U/I-Kennlinie

$$W_{\text{var_max}} = V_{\text{clamp_max}}(i_{\text{clamp_max}}) * i_{\text{clamp_max}} * t_{\text{pulse}}$$
$$= 1010 \text{ V} * 728 \text{ A} * 21,16 \mu\text{s} = \mathbf{15,5 \text{ J}}$$

- Überprüfung der Verlustleistung
eigenes Kriterium: 3Pulse/min

$$P_{\text{var_max}} = \frac{W_{\text{var_max}}}{T} = \frac{15,5 \text{ J}}{60\text{s}} = \mathbf{0,26 \text{ W}}$$

Electrical Properties: WE-VD 820 44 321 1E

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
AC Operating Voltage	V_{RMS}		320	V	max.
DC Operating Voltage	V_{DC}		418	V	max.
Clamping Voltage	V_{Clamp}	50 A @ 8/20 μs	842	V	max.
(Reverse) Peak Pulse Current	I_{Peak}	8/20 μs	6000	A	max.
Power Dissipation	P_{Diss}		0.6	W	max.
Energy Absorption	W_{max}	10/1000 μs	190	J	max.
Nominal Discharge Current	I_{n}		3	kA	max.
Measured Limiting Voltage	V_{ML}		1270	V	max.
(Reverse) Breakdown Voltage	V_{BR}	1 mA	510	V	$\pm 10\%$
(Channel) Input Capacitance	C_{Ch}	1 kHz	370	pF	typ.

Dimensionierungsbeispiel

Industrie-PC am 230V-Netz

Table 1 – Test levels

Level	Open-circuit test voltage	
	kV	
	Line-to-line	Line-to-ground ^b
1	---	0,5
2	0,5	1
3	1	2
4	2	4
X ^a	Special	Special

^a "X" can be any level, above, below or in between the others. The level shall be specified in the dedicated equipment specification.

^b For symmetrical interconnection lines the test can be applied to multiple lines simultaneously with respect to ground, i.e. "lines to ground".

The test levels shall be selected according to the installation conditions; classes of installation are given in Annex C.

The test shall be applied at all test levels in Table 1 up to and including the specified test level (see 8.3).

Dimensionierungsbeispiel

Industrie-PC am 230V-Netz

- Überprüfung des Energieabsorptionsvermögens und der Verlustleistung unter Verwendung der berechneten Spitzenwerte und der U/I-Kennlinie

$$W_{\text{var_max}} = V_{\text{clamp_max}}(i_{\text{clamp_max}}) * i_{\text{clamp_max}} * t_{\text{pulse}}$$
$$= 1010 \text{ V} * 728 \text{ A} * 21,16 \mu\text{s} = 15,5 \text{ J}$$

- Überprüfung der Verlustleistung
eigenes Kriterium: 3Pulse/min

$$P_{\text{var_max}} = \frac{W_{\text{var_max}}}{T} = \frac{15,5 \text{ J}}{20\text{s}} = 0,78 \text{ W}$$

Electrical Properties: WE-VD 820 44 321 1E

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
AC Operating Voltage	V_{RMS}		320	V	max.
DC Operating Voltage	V_{DC}		418	V	max.
Clamping Voltage	V_{Clamp}	50 A @ 8/20 μs	842	V	max.
(Reverse) Peak Pulse Current	I_{Peak}	8/20 μs	6000	A	max.
Power Dissipation	P_{Diss}		0.6	W	max.
Energy Absorption	W_{max}	10/1000 μs	190	J	max.
Nominal Discharge Current	I_{n}		3	kA	max.
Measured Limiting Voltage	V_{ML}		1270	V	max.
(Reverse) Breakdown Voltage	V_{BR}	1 mA	510	V	$\pm 10\%$
(Channel) Input Capacitance	C_{Ch}	1 kHz	370	pF	typ.

Dimensionierungsbeispiel

Industrie-PC am 230V-Netz

- sicherer Betrieb mit nächstgrößerer Bauform → 20mm

$$V_{\text{clamp_min}} = 1040 \text{ V} * \frac{0,9}{1,1} = 853 \text{ V}$$

$$i_{\text{clamp_max}} = \frac{2000 \text{ V} + 325 \text{ V} - 853 \text{ V}}{2 \Omega} = 736 \text{ A}$$

$$V_{\text{clamp_max@736A}} = 1010 \text{ V}$$

- 30 Pulse mit 20µs Breite, 3Pulse/min

$$W_{\text{var_max}} = 1010 \text{ V} * 736 \text{ A} * 21,16 \mu\text{s} = 15,73 \text{ J}$$

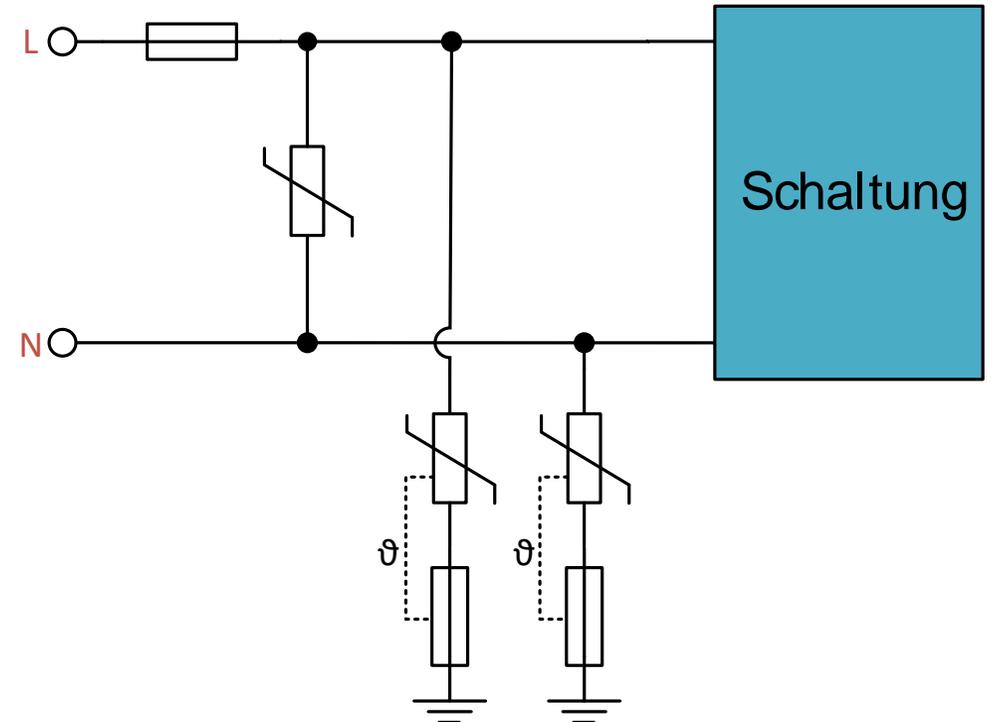
$$P_{\text{var_max}} = \frac{15,73 \text{ J}}{20 \text{ s}} = 0,79 \text{ W}$$

Electrical Properties: WE-VD 820 42 321 1

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
AC Operating Voltage	V_{RMS}		320	V	max.
DC Operating Voltage	V_{DC}		418	V	max.
Clamping Voltage	V_{Clamp}	100 A @ 8/20 µs	842	V	max.
(Reverse) Peak Pulse Current	I_{Peak}	8/20 µs	10000	A	max.
Power Dissipation	P_{Diss}		1	W	max.
Energy Absorption	W_{max}	10/1000 µs	382	J	max.
Nominal Discharge Current	I_{n}		5	kA	max.
Measured Limiting Voltage	V_{ML}		1200	V	max.
(Reverse) Breakdown Voltage	V_{BR}	1 mA	510	V	±10%
(Channel) Input Capacitance	C_{Ch}	1 kHz	760	pF	typ.

Schutzmaßnahmen bei Asymmetrischer Belastung

- Ein Varistor wird primär für den **symmetrischen Schutz** einer Schaltung verwendet.
- Ein **asymmetrischer Schutz** zwischen Phase und Erde (PE) bedarf spezieller Maßnahmen.
- Lösung 1 → **Thermisch** gekoppelte **Schmelzsicherung**
- Lösung 2 → **Gasableiter** in Serie zu den Varistoren (Y-Verzweigung)
- Ansonsten wird der Puls über **Y-Kondensatoren** abgeleitet



Varistorauswahl - praxisbezogen

- Je höher Betriebsspannung, desto höher die Klemmspannung!
- Je niedriger die Kapazität, desto höher die Klemmspannung!
- Je schneller die Datensignale desto kleiner die Kapazität!
- Je niedriger die Klemmspannung, desto besser der Schutz!
- Je höher die Leistung desto größer das Bauteil!

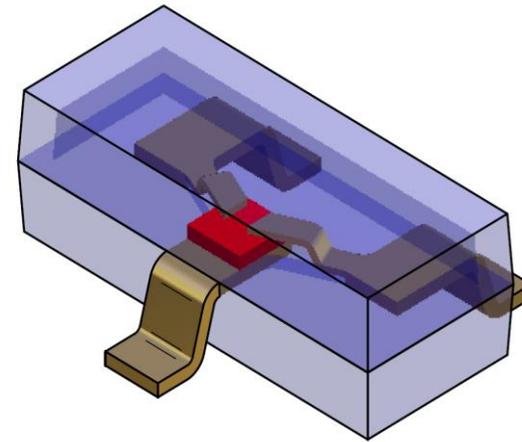
Es gibt auch hier nicht das Idealbauteil für jede Applikation!

GRUNDLAGEN

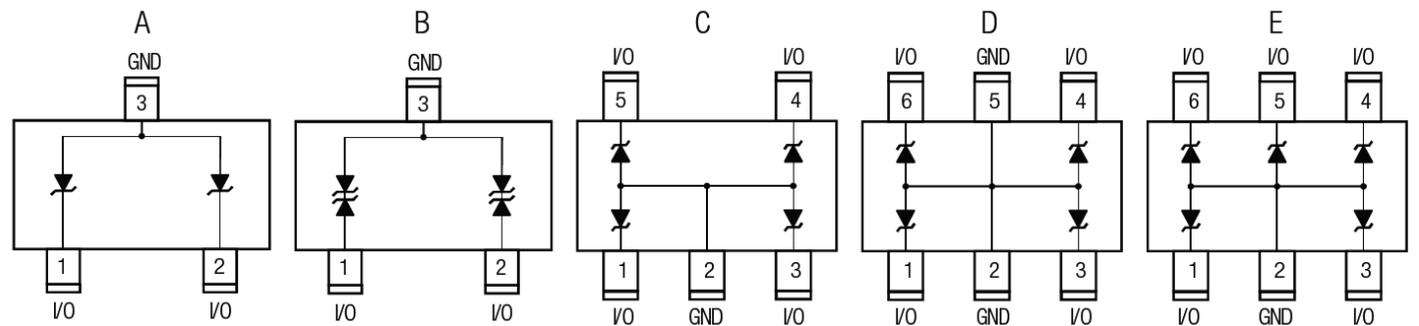
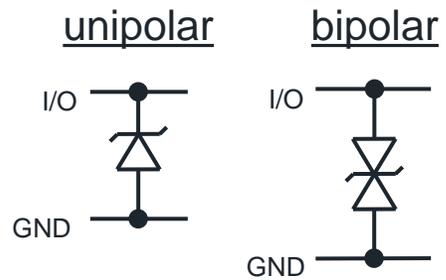
TVS DIODEN

WE-TVS

- Materialien:
 - TVS-Diode: Silizium

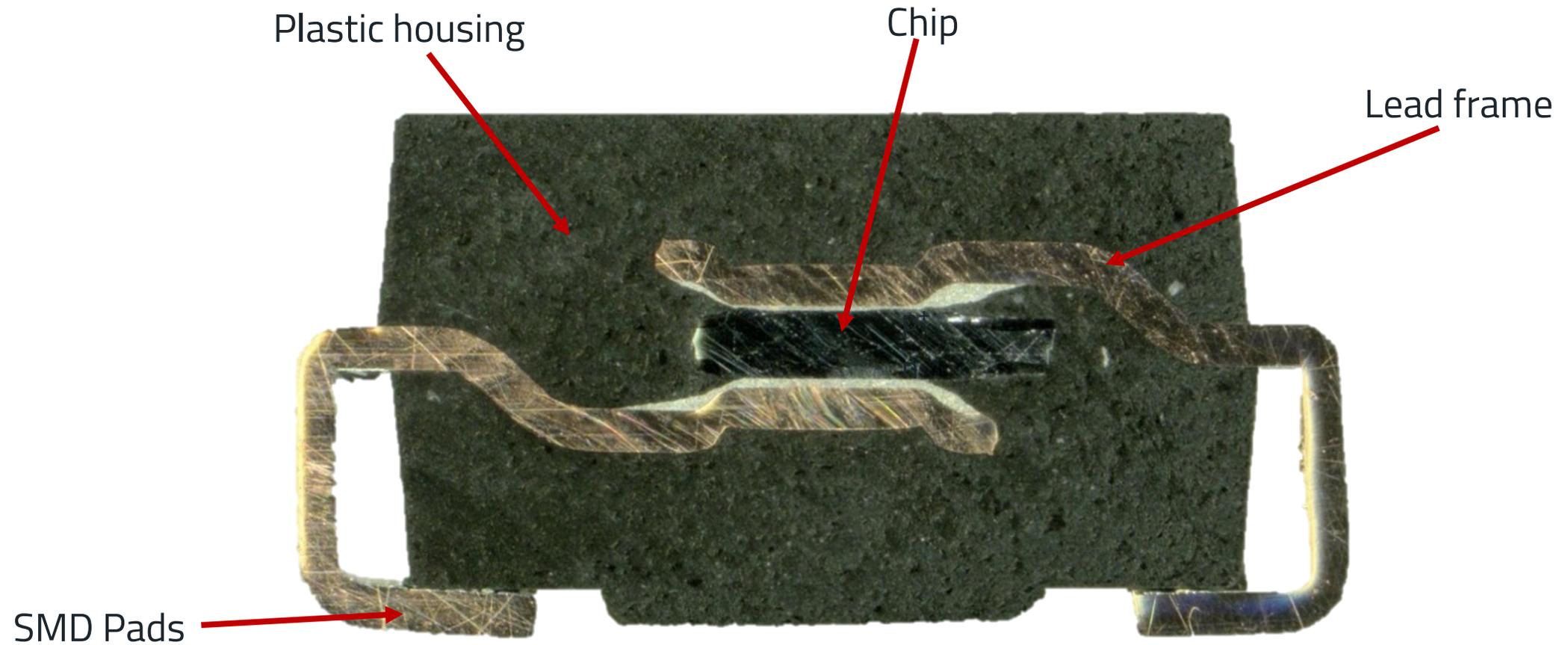


- Typen von TVS-Dioden:



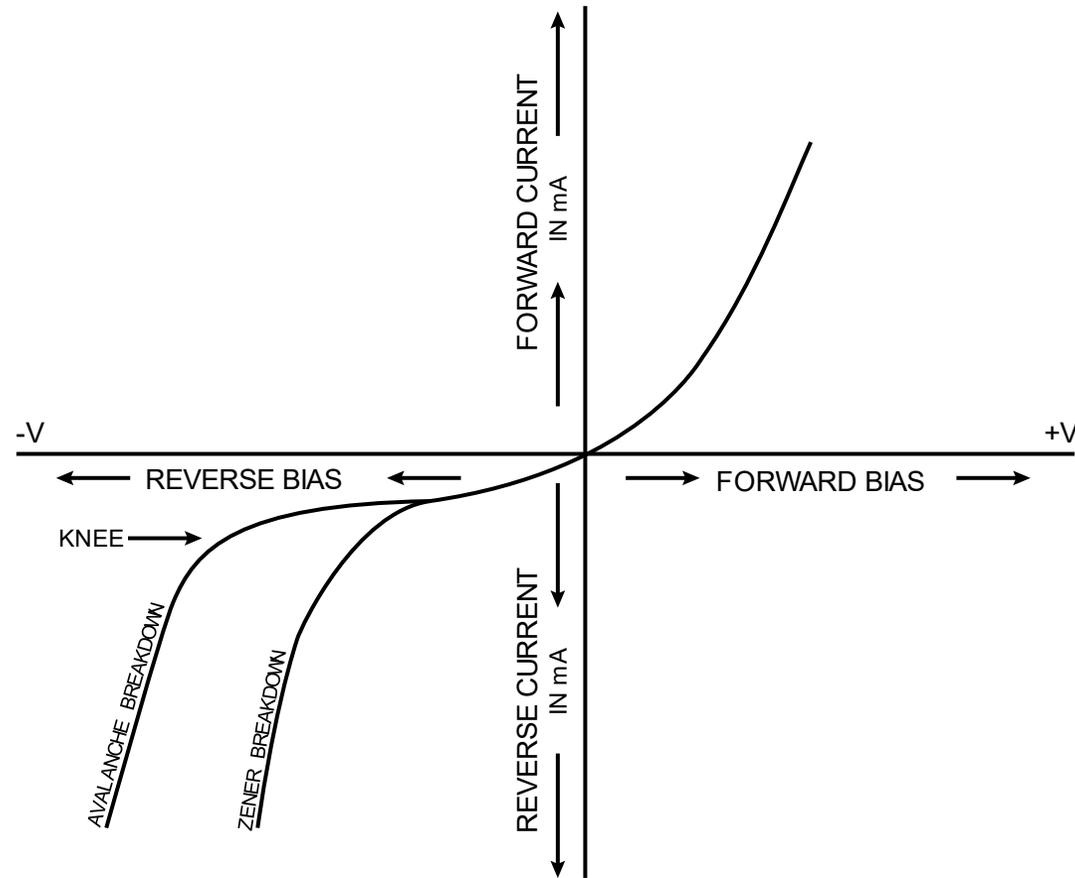
WE-TVSP

Schliffbild



Zener/Avalanche Effekt

U/I-Kennlinie



BAUTEILAUSWAHL

ESD auf Datenleitung
TVS-Diode

Kriterien der Bauteilauswahl

- Suppressordioden unterscheiden sich von SMD-Varistoren durch ihre niedrigere und spezifizierte Kapazität.
 - 1) Bestimmen der Betriebsspannung und Applikation**
 - 2) Auswahl der richtigen Kapazität für die Anwendung**
 - 3) Überprüfen der Klemmspannung (Baugruppenschutz)**

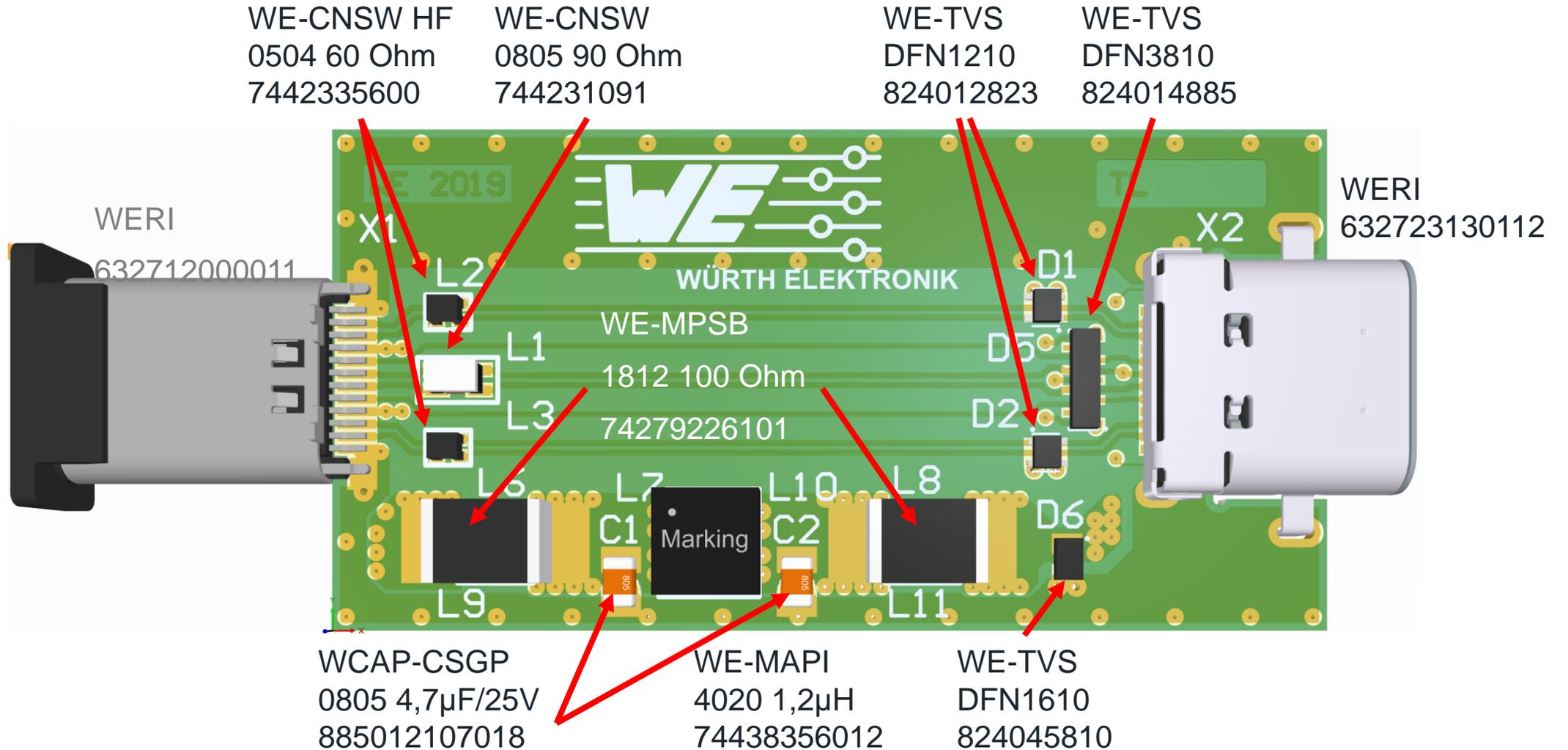
EXKURS:

APPLICATION GUIDE

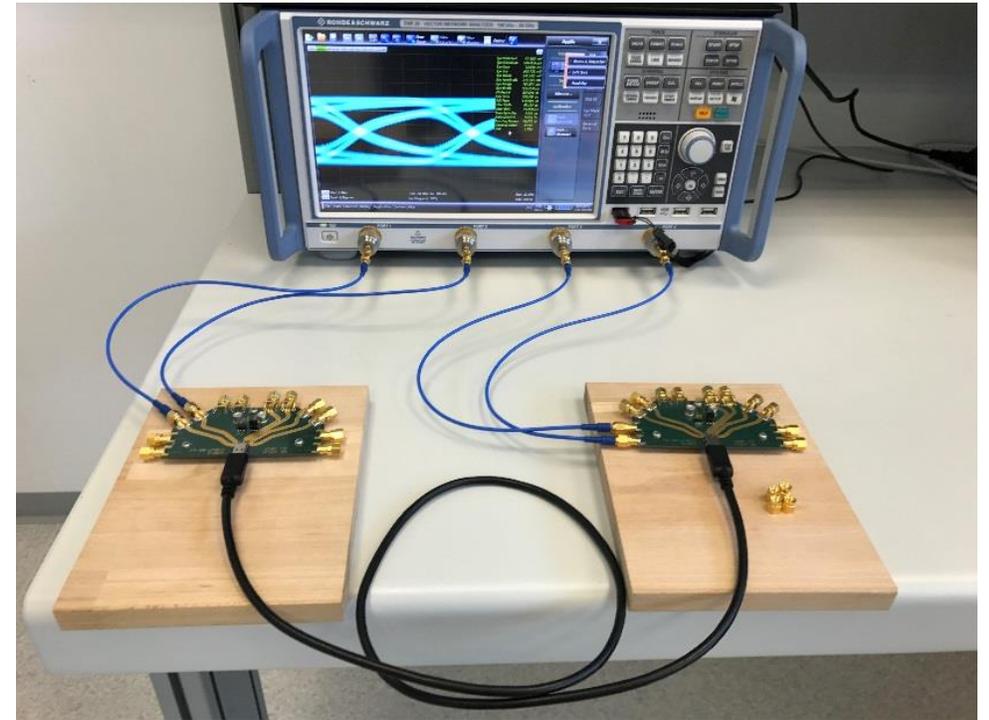
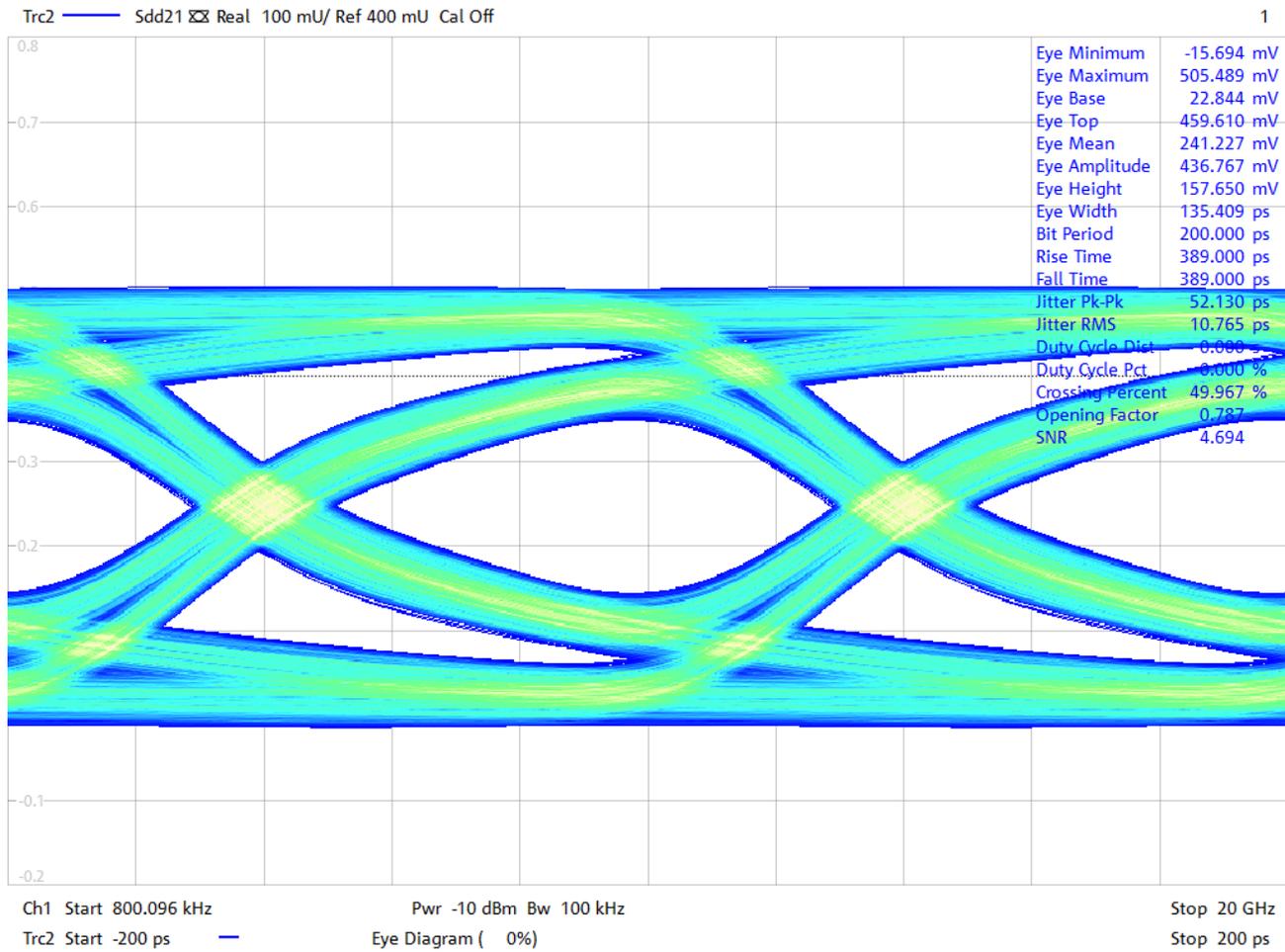


Type-C filterboard

Overview

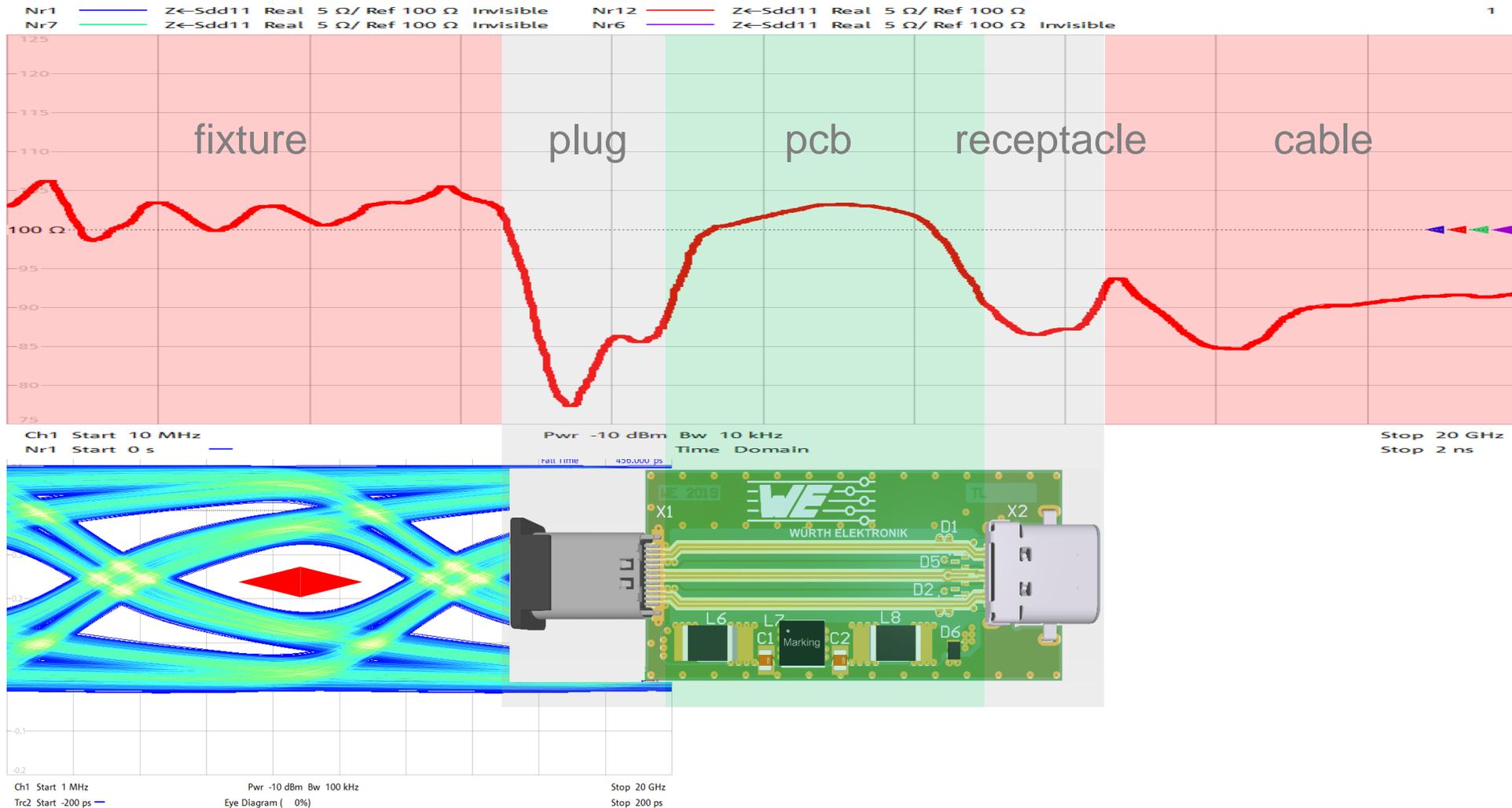


Testequipment



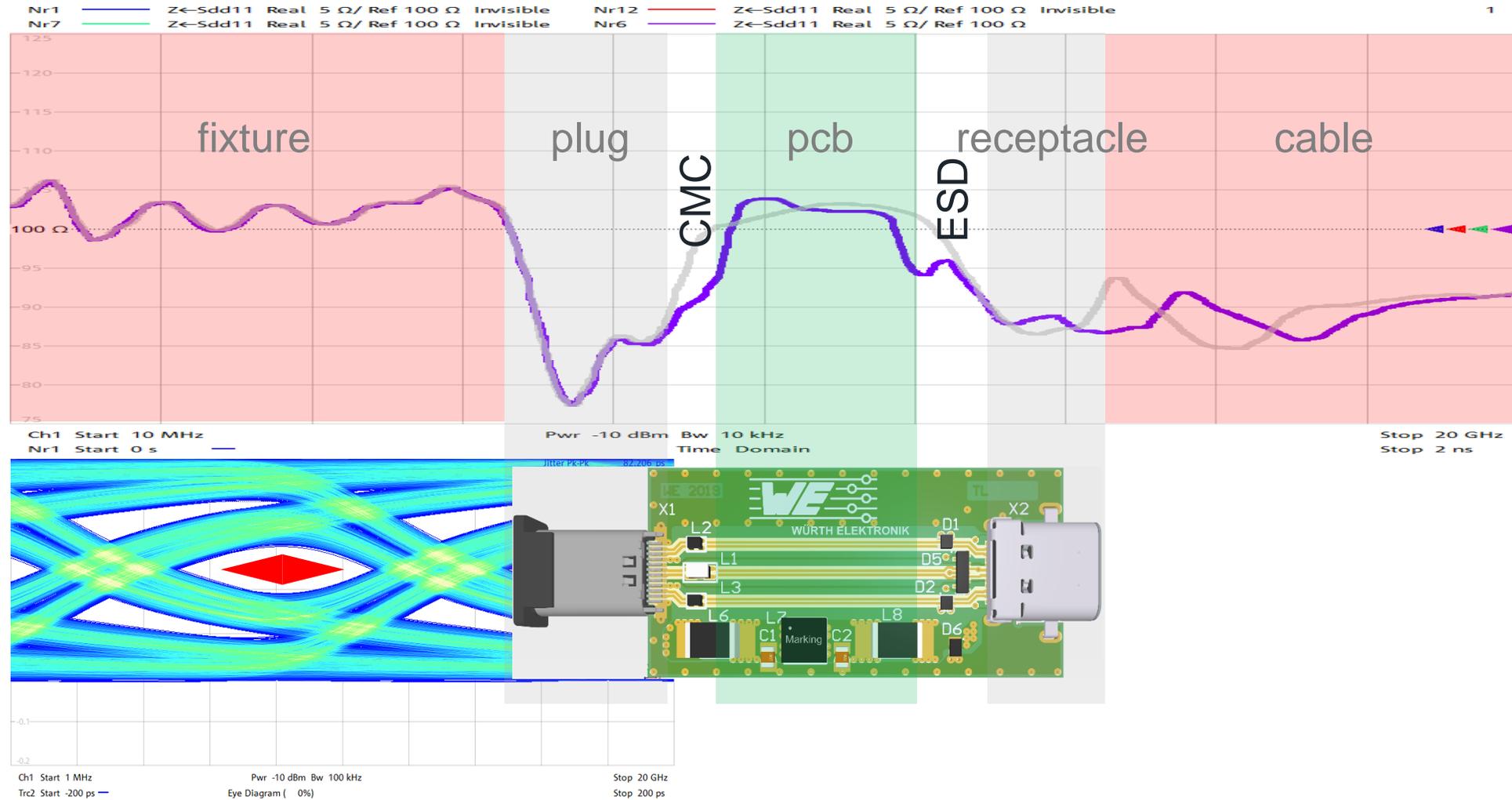
Filteradapter

No Components



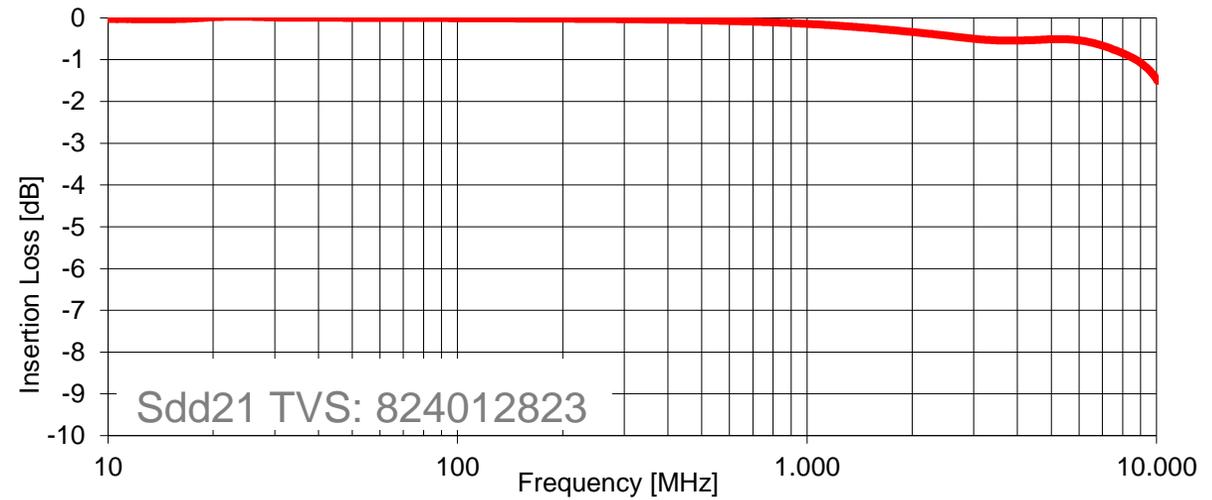
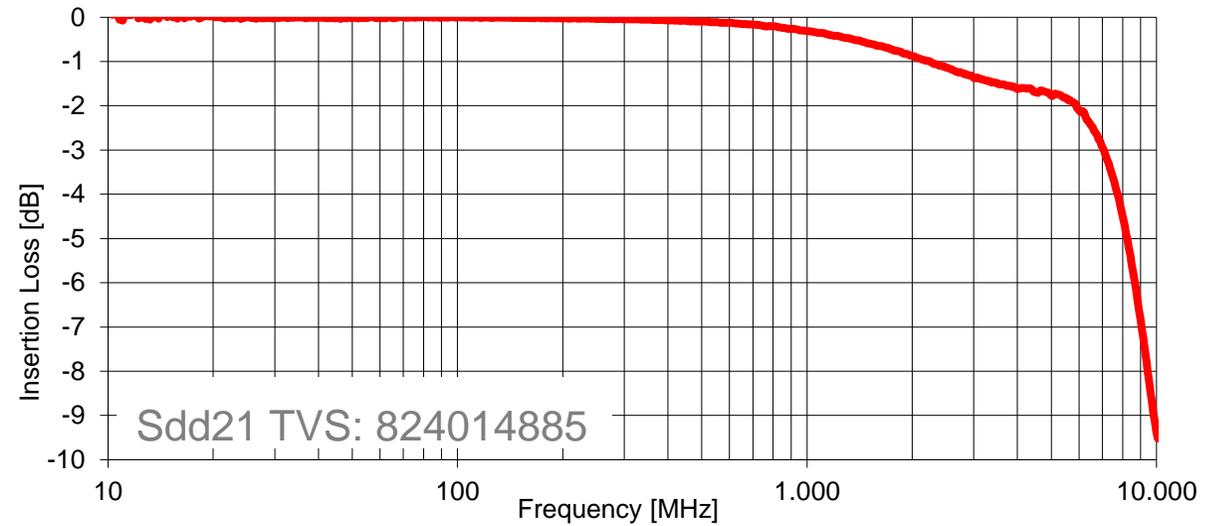
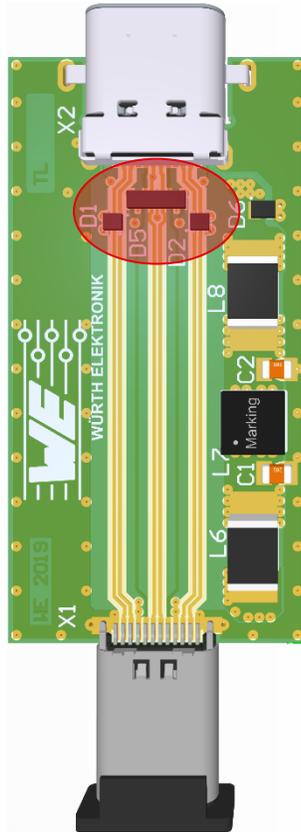
Filteradapter

Common Mode Choke and TVS Diode



Type-C filterboard

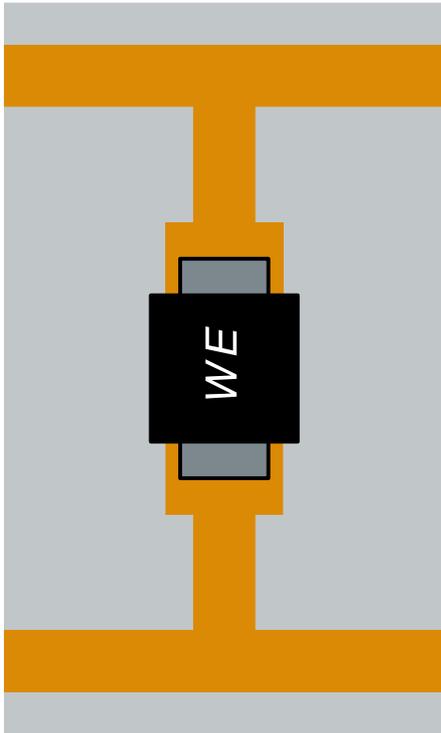
Component Selection ESD



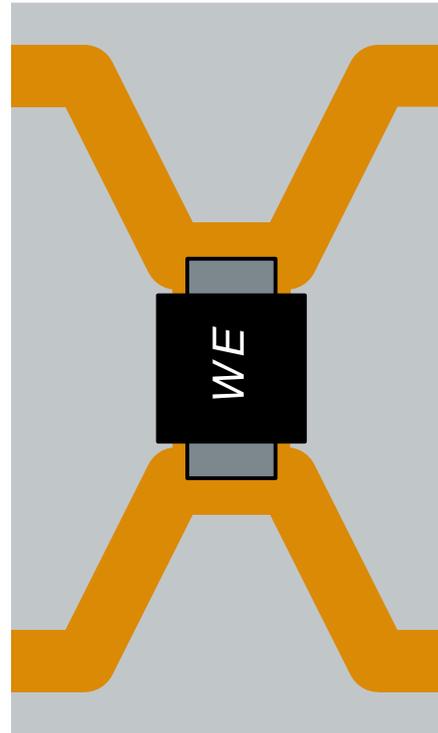
DESIGN TIPPS

Routing OVP-Components

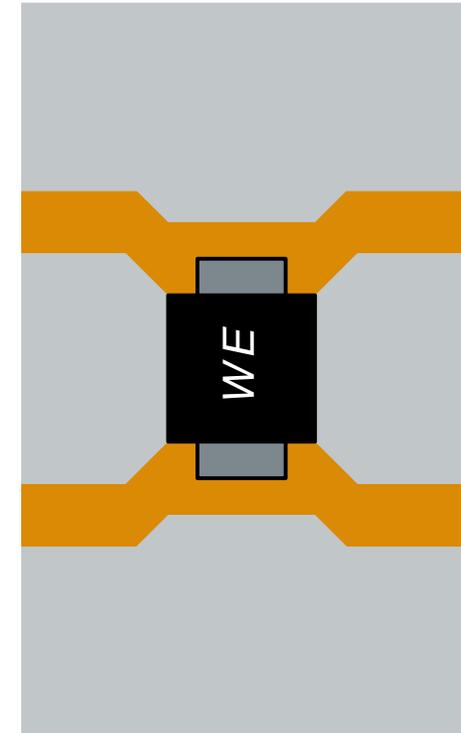
Keep Traces short and low impedance



Bad
Stub Traces



Good
Routing across SMD Pads



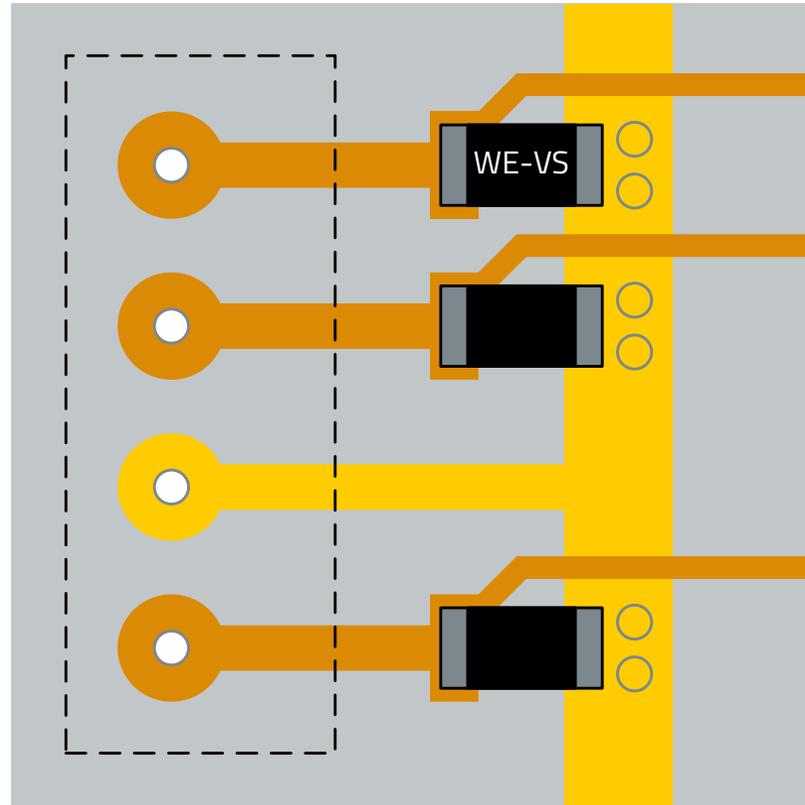
Best
Using Constrictions at SMD Pads

WE eiSos

Connecting SMD Varistors

Separating Overvoltage Stressed Ports

Wide traces to
Varistor terminals



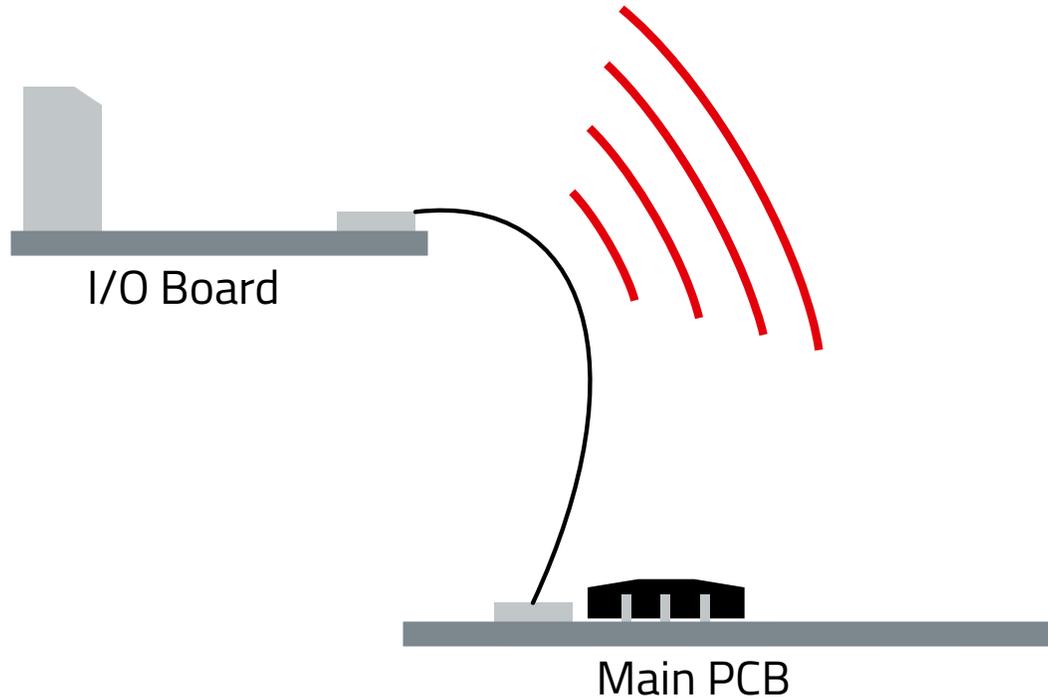
Regular traces for
useful Signal

GND Trench

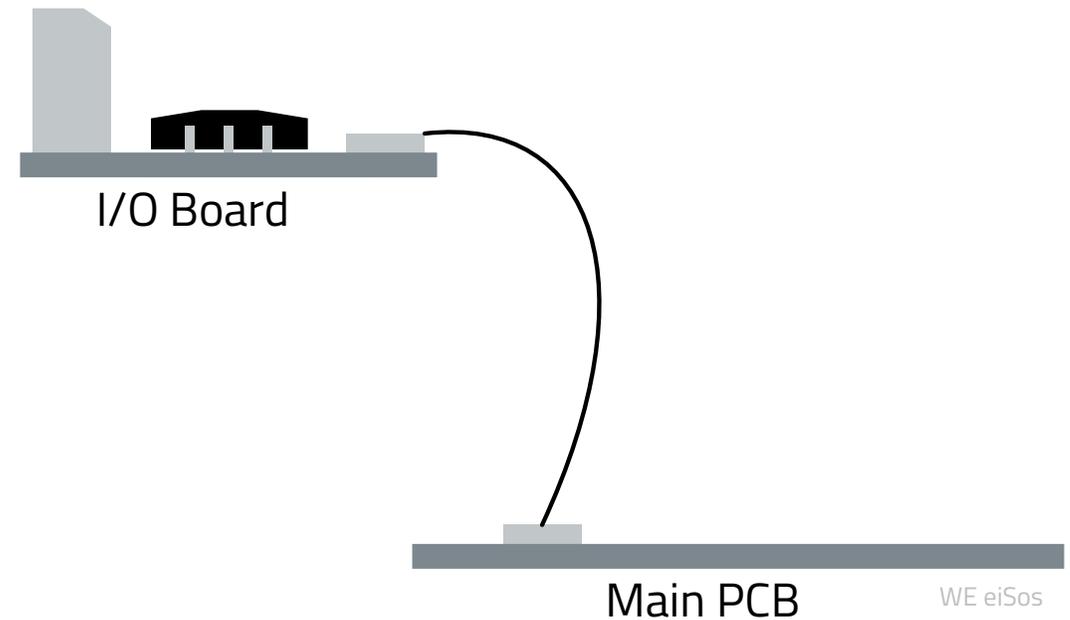
WE eiSos

I/O Boards

Where to Place Overvoltage Protection

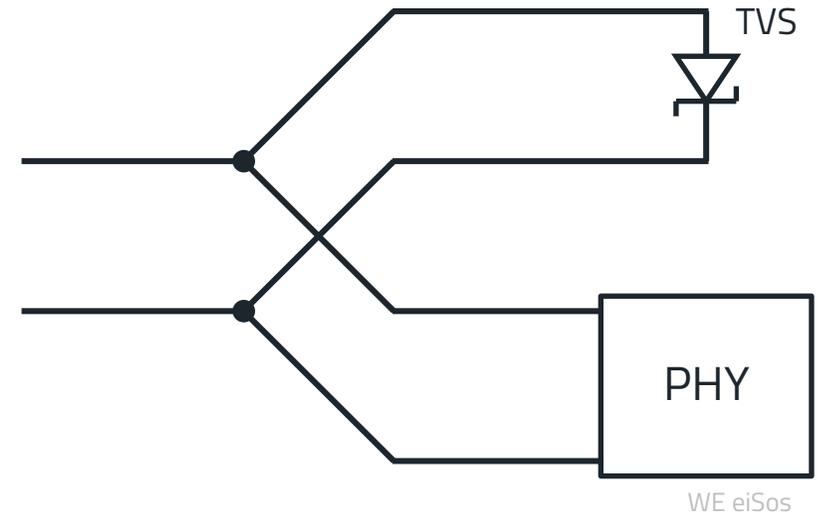
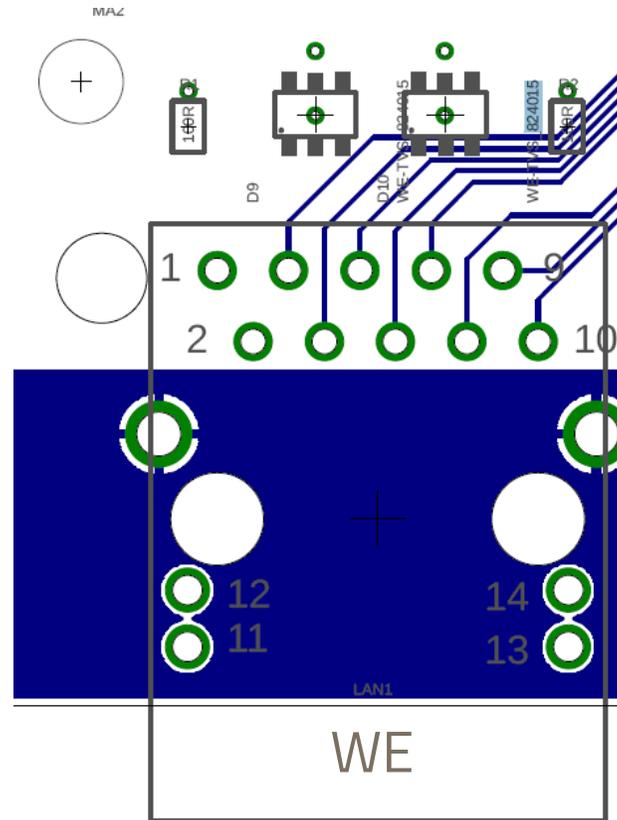
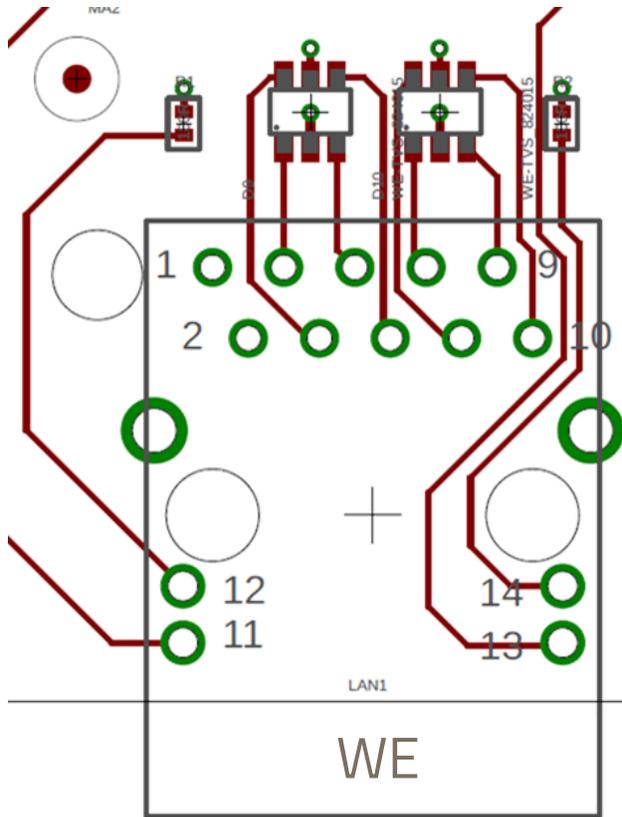


Placement on Main PCB

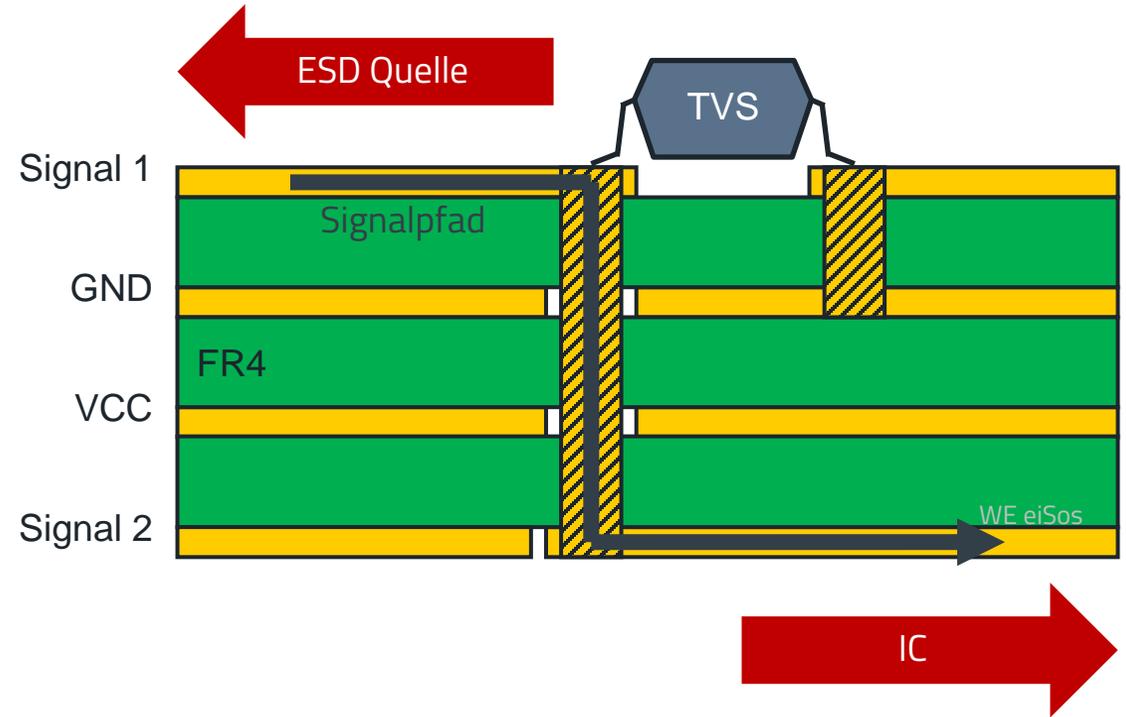
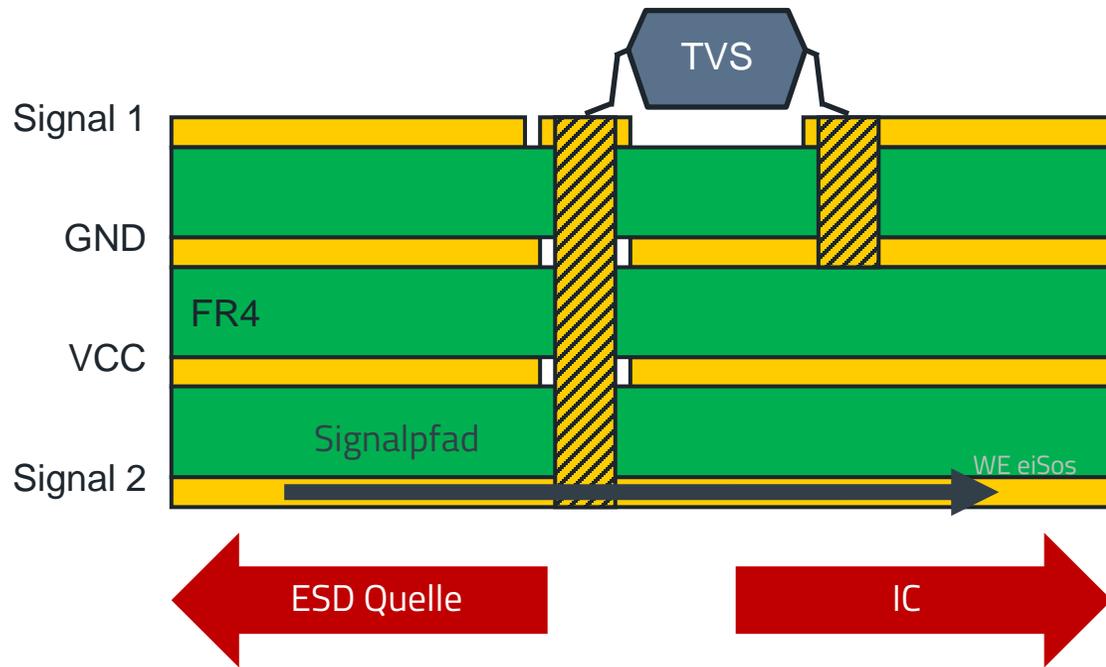


Placement on I/O Board

Routing - Negativbeispiel

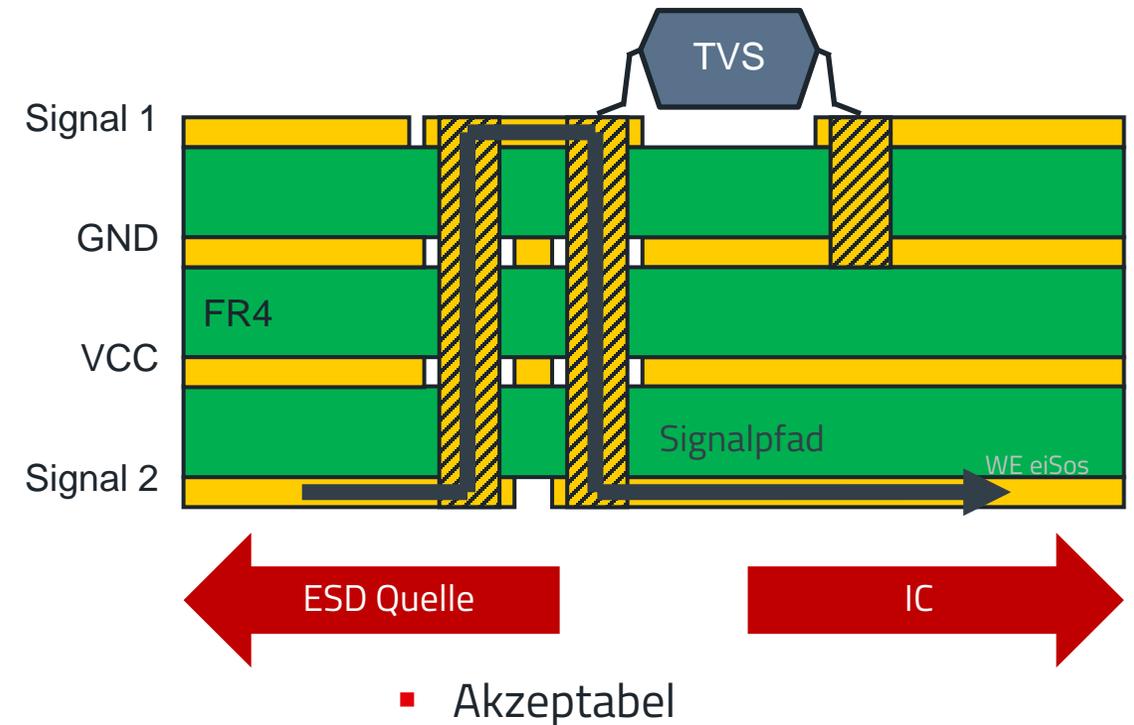


Routing über mehrere Lagen



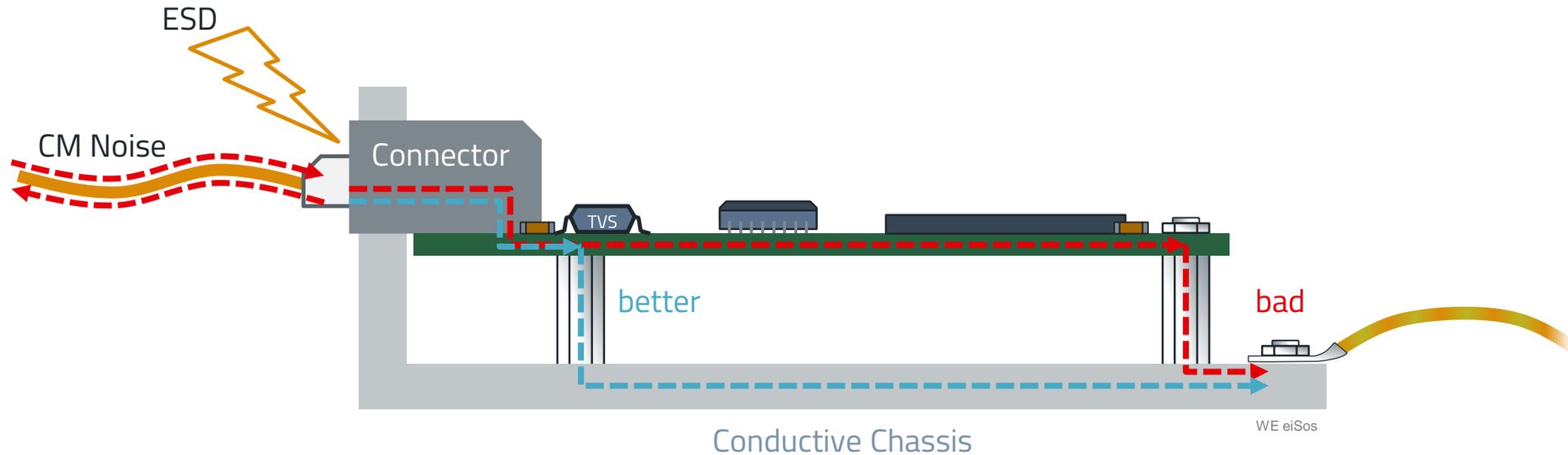
Routing über mehrere Lagen

- In manchen Fällen ist es nicht möglich, die TVS-Diode auf die selbe Seite wie die ESD-Quelle zu setzen
- Der ESD-Strom ist mit dem hier gezeigten Layout gezwungen, an der TVS vorbeizulaufen
- Sind die Vias zu nah beieinander, besteht die Gefahr des Überkoppelns
- Die beste Variante in Bezug auf ESD ist immer, gar keinen Lagenwechsel durchzuführen



Störpfad im Gerät

Störer nach PE ableiten



- Grounding studs have to be placed so that disturbances don't affect the electronic parts
- Reference ground for ESD (and common mode noise) is earth potential

