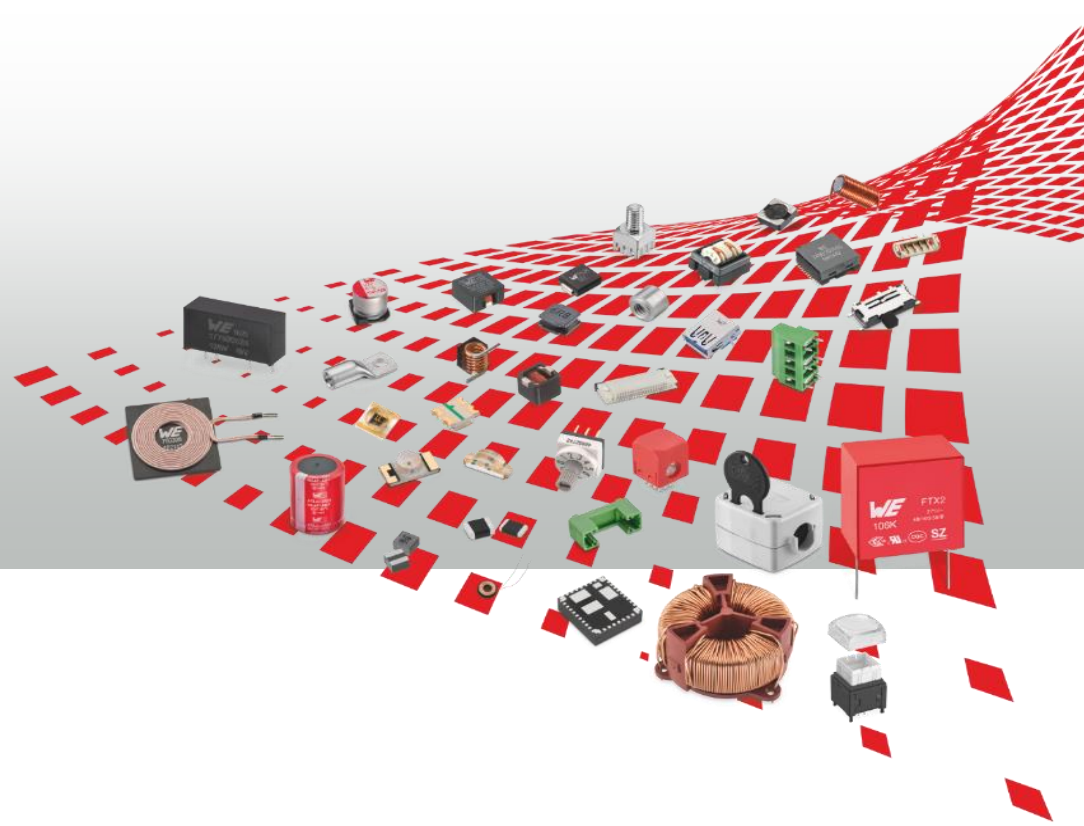


EMV mit LTSpice simulieren

more
than you
expect



Markus Thoß

Field Application
Engineer

EMV mit LTSpice simulieren

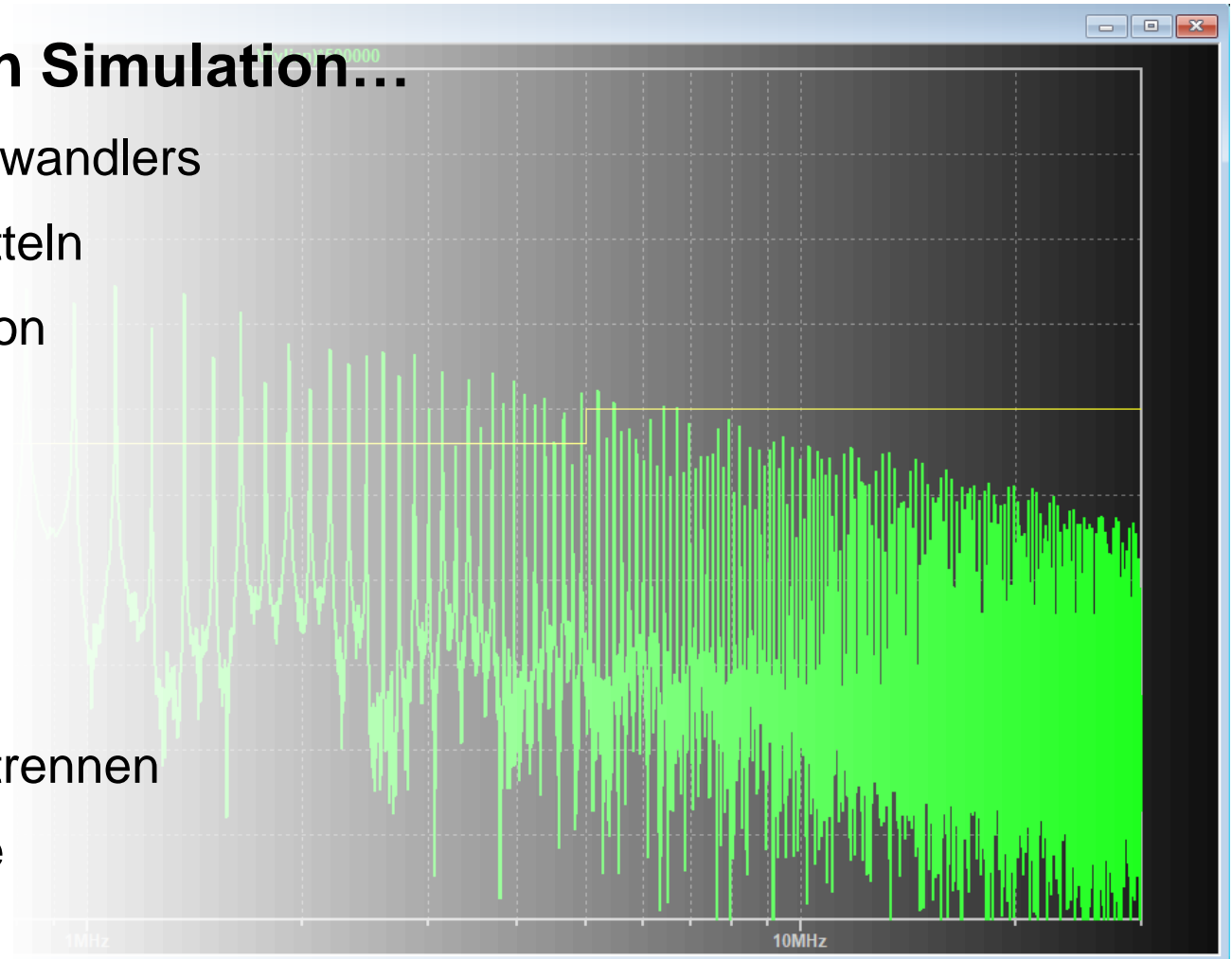
Schaltregler-Design mit LTSpice und REDEXPERT

■ Einführung: Von einer funktionalen Simulation...

- Ausgangsspannungsrippel eines Abwärtswandlers
- Bauteilparameter aus REDEXPERT ermitteln
- Beispiel für eine schlechte Rippelsimulation
- Beispiel für eine gute Rippelsimulation

■ ...zur EMV-Simulation

- EMV-Messung in LTSpice nachstellen
- Fortgeschrittene Simulation
 - Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen
 - Darstellung der Simulationsergebnisse
 - EMV-Filter Design mit LTSpice



Setup

Die verwendeten Tools



NOW PART OF



<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

REDEXPERT

<https://www.we-online.com/redexpert>

Einführung : Von einer funktionalen Simulation...

Ausgangsspannungsrippel eines Abwärtswandlers



Einführung : Von einer funktionalen Simulation...

Ausgangsspannungsrippel eines Abwärtswandlers



LTspice XVII - [Draft2]

File Edit Hierarchy View Simulate Tools Window Help

3975 Draft2

EN Vin

U1

PG OUT

SS Boost

Rt SW

LT3975

GND FB

LTspice XVII

42V, 2.5A, 2MHz Step-Down Switching Regulator with 2.7 μ A Quiescent Current
Note: Sync pin is not modeled; Burst Mode is selected.

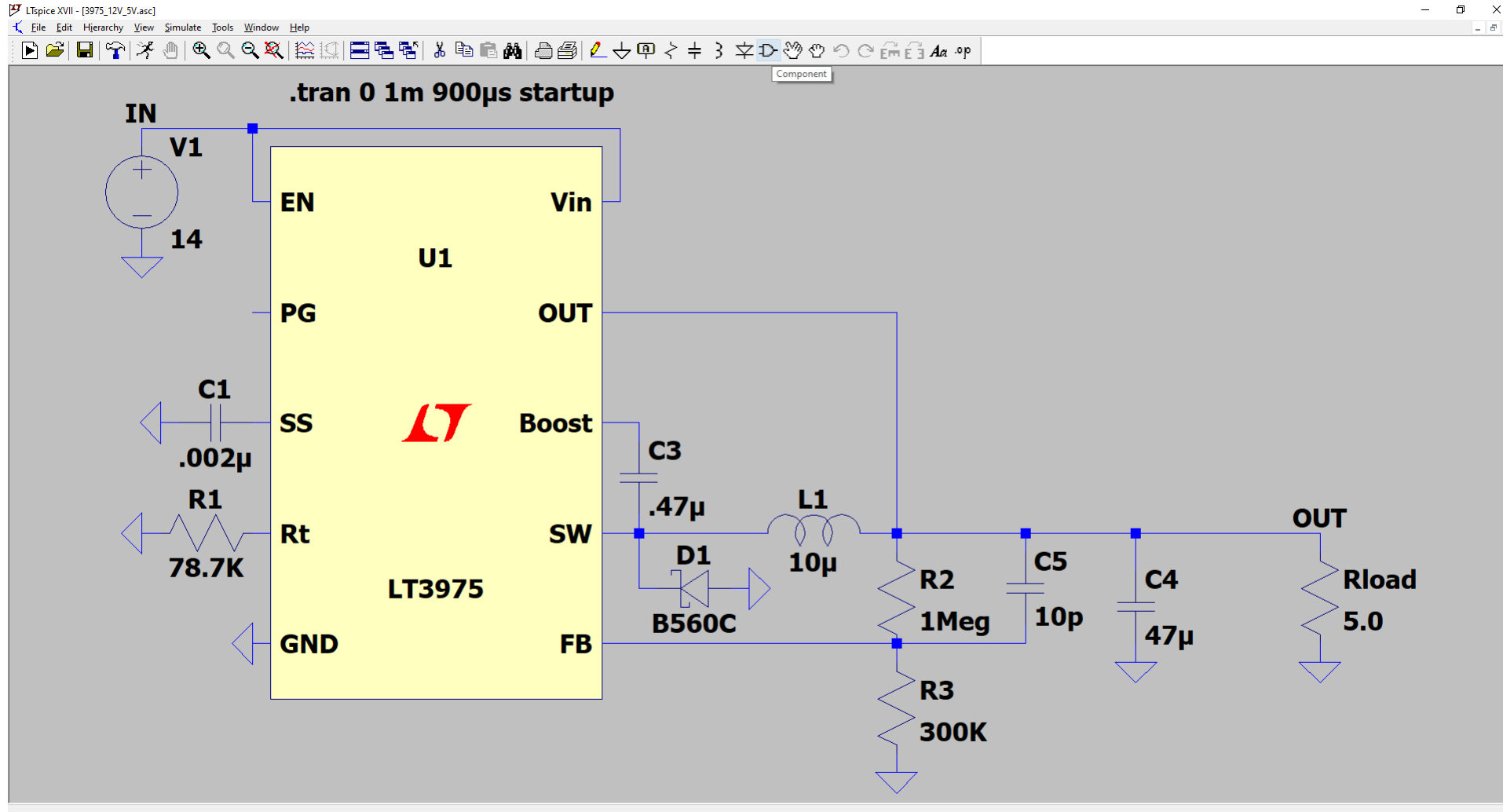
Open this macromodel's test fixture

Go to Linear's website for datasheet

Cancel

Einführung : Von einer funktionalen Simulation...

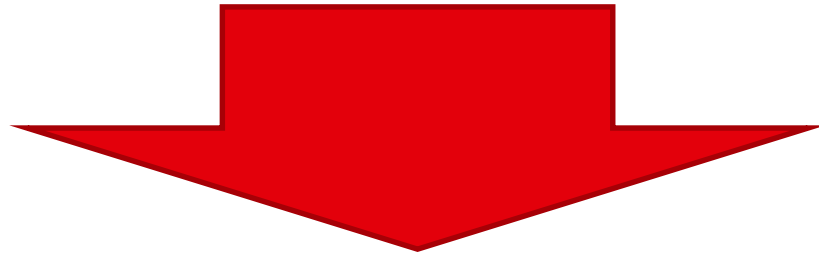
Ausgangsspannungsrippel eines Abwärtswandlers



Ausgangsspannungsrippel

Ein einfacher Zusammenhang?

$$U = R \cdot I$$



$$\Delta U = Z_C \cdot \Delta I_L$$

Ausgangsspannungsrippel

REDEXPERT: Eine große Hilfe



REDEXPERT® ALUMINIUM-POLYMERKONDENSATOREN | ANWENDUNG | ANLEITUNG

Filter: 6,30 V ≤ V_R ≤ 25,0 V Artikel-Nr. 875015119003, 875105359004, 875105240003

Artikel-Nr.	Serie	Artikelbeschreibung	Sp...	C	V _R	ESR _{max} @100kHz
875015119003	WCAP-PHGP	H-Chip General Purpose	100	100 µF	6,30 V	15,0 mΩ
875105240003	WCAP-PSLP	V-Chip Large Capacitance	100	22,0 µF	10,0 V	45,0 mΩ
875105359004	WCAP-PSLP	V-Chip Large Capacitance	100	33,0 µF	16,0 V	30,0 mΩ

Z@600 kHz

7,46 mΩ

13,9 mΩ

11,5 mΩ

Ein- / Ausblenden: Z vs. F, F vs. ESR, F vs. F, F vs. T

UBER WÜRTH ELEKTRONIK | SITEMAP | KONTAKT | IMPRESSUM | COPYRIGHT © 2020 WÜRTH ELEKTRONIK GMBH. ALLE RECHTE VORBEHALTEN.

Z_C

ΔI_L

REDEXPERT® SPEICHERINDUKTIVITÄTEN | ANW

Buck Non-Sync Converter

PARAMETER					BEARBEITEN
Eingang	Ausgang	Schaltregler	Induktor	Diode	
10,0-14,0 V	5,00 V 1,00 A	600 kHz	40 %	0,30 V	

DETAILS

$I_{L,max,opt}$ ≥ 1,20 A	L_{opt} 13,9 µH	I_L ≥ 1,00 A
-----------------------------	----------------------	-------------------

WE-MAPI - 74438357100

DC	ΔI_L	$I_{L,max}$	T_{on}
0,37	556 mA	≥ 1,28 A	618 ns

Ausgangsspannungsrippel

REDEXPERT: Eine große Hilfe



Buck Non Sync - Speicherindukt...

https://redexpert.we-online.com/redexpert/#/module/4/selecteditems/74438336100,74438356150,74438357100/productdata/=74438357100/type/+or+Single+Single_HV/Isat/gte:1.2A/Ir/gt:

REDEXPERT® SPEICHERINDUKTIVITÄTEN | ANWENDUNG | ANLEITUNG | TEILEN

ITEMS MARKUS

Filter: Typ = Single, Single HV | Isat ≥ 1,20 A | Ir ≥ 1,01 A | 9,73 µH ≤ L₀ ≤ 18,1 µH | ΔT_{TOT} ≤ 80,0 K | Serie = WE-MAPI | 3 Produkte

Artikel-Nr.	Serie	Bauform	Spez	Typ	L ₀	R _{DC,typ}	Δl %	I _R	I _{sat}	f _{res}	P _{AC}	P _{DC}	P _{TOT}	ΔT _{TOT}	L	W	H _{Ma}
74438336100	WE-MAPI	3020		Single	10,0 µH	280 mΩ	55,6 %	1,20 A	2,35 A	18,0 MHz	66,7 mW	280 mW	347 mW	31,9 K	3,00 mm	3,00 mm	2,0
74438356150	WE-MAPI	4020		Single	15,0 µH	200 mΩ	37,1 %	1,90 A	2,10 A	14,0 MHz	31,6 mW	200 mW	232 mW	12,0 K	4,10 mm	4,10 mm	2,0
74438357100	WE-MAPI	4030		Single	10,0 µH	101 mΩ	55,6 %	2,70 A	4,60 A	15,0 MHz	43,1 mW	101 mW	144 mW	6,64 K	4,10 mm	4,10 mm	3,0

WE-MAPI - 74438357100

DC: 0,37 | ΔI_L: 556 mA | I_{L,max}: ≥ 1,28 A | T_{on}: 618 ns

Verluste

AC	DC	Total	ΔT _{tot}
43,1 mW	101 mW	144 mW	6,64 K

P vs. V_{ein}

P vs. f_{sw}

Induktivität / DC-Strom (Umgebungstemperatur) T = 20°C

Erwärmung / DC-Strom (Umgebungstemperatur) T = 20°C

ÜBER WÜRTH ELEKTRONIK | SITMAP | KONTAKT | IMPRESSUM | COPYRIGHT © 2020 WÜRTH ELEKTRONIK GMBH. ALLE RECHTE VORBEHALTEN.

Link

Ausgangsspannungsrippel

REDEXPERT: Eine große Hilfe



Aluminium-Polymerkondensat

https://redexpert.we-online.com/redexpert/#/module/14/infopanel/FZ/sel/600kHz/selecteditems/875015119003,875105240003,875105359004/productdata/=875015119003/V/gte:6.3V+lte:25V

REDEXPERT® ALUMINIUM-POLYMERKONDENSATOREN | ANWENDUNG | ANLEITUNG | TEILEN

Filter: 6,30 V ≤ V_g ≤ 25,0 V 100 / 184 Produkte

Artikel-Nr.	Serie	Artikelbeschreibung	Spez	C	V _R	DF	ESR _{max} @100kHz	I _{ripple}	I _{leak}	Z@600 kHz	Ø	Breite	Länge	Höhe	Lebensdauer	T _{min}	T _{max}	Montage	Pins	Pin
875015119003	WCAP-PHGP	H-Chip General Purpose		100 µF	6,30 V	6,0 %	15,0 mΩ	5,10 A @45,0°C	63,0 µA	7,46 mΩ		4,30 mm	7,30 mm	1,90 mm	2000,0 h	-55,0°C	105°C	SMT		
875015119006	WCAP-PHGP	H-Chip General Purpose		220 µF	6,30 V	6,0 %	15,0 mΩ	5,10 A @45,0°C	139 µA	7,93 mΩ		4,30 mm	7,30 mm	1,90 mm	2000,0 h	-55,0°C	105°C	SMT		
875015119004	WCAP-PHGP	H-Chip General Purpose		150 µF	6,30 V	6,0 %	15,0 mΩ	5,60 A @45,0°C	94,5 µA	10,2 mΩ		4,30 mm	7,30 mm	1,90 mm	2000,0 h	-55,0°C	105°C	SMT		
875075555001	WCAP-PSLC	V-Chip Large Capacitance		39,0 µF	25,0 V	8,0 %	15,0 mΩ	4,21 A @105°C	195 µA	10,6 mΩ	8,0 mm	8,30 mm	8,30 mm	11,7 mm	2000,0 h	-55,0°C	105°C	SMT		
875105359004	WCAP-PSLP	V-Chip Large Capacitance		33,0 µF	16,0 V	8,0 %	30,0 mΩ	2,20 A @105°C	400 µA	11,5 mΩ	5,0 mm	5,30 mm	5,30 mm	5,80 mm	2000,0 h	-55,0°C	105°C	SMT		
875105242005	WCAP-PSLP	V-Chip Large Capacitance		39,0 µF	10,0 V	8,0 %	30,0 mΩ	1,97 A @105°C	300 µA	11,9 mΩ	5,0 mm	5,30 mm	5,30 mm	5,50 mm	2000,0 h	-55,0°C	105°C	SMT		
870025574002	WCAP-PTGS	THT General Purpose +105°C		47,0 µF	25,0 V	8,0 %	20,0 mΩ	4,50 A @105°C	235 µA	11,9 mΩ	8,0 mm			8,00 mm	2000,0 h	-55,0°C	105°C	THT	0,600 mm	
875105445006	WCAP-PSLP	V-Chip Large Capacitance		47,0 µF	20,0 V	8,0 %	25,0 mΩ	2,67 A @105°C	600 µA	12,1 mΩ	6,3 mm	6,60 mm	6,60 mm	7,70 mm	2000,0 h	-55,0°C	105°C	SMT		

875015119003 x 875105240003 x 875105359004 x

ZUR LISTE MEHR

Ein- / Ausblenden: Z vs. F F vs. ESR I vs. E I vs. T

Impedanz / Frequenz

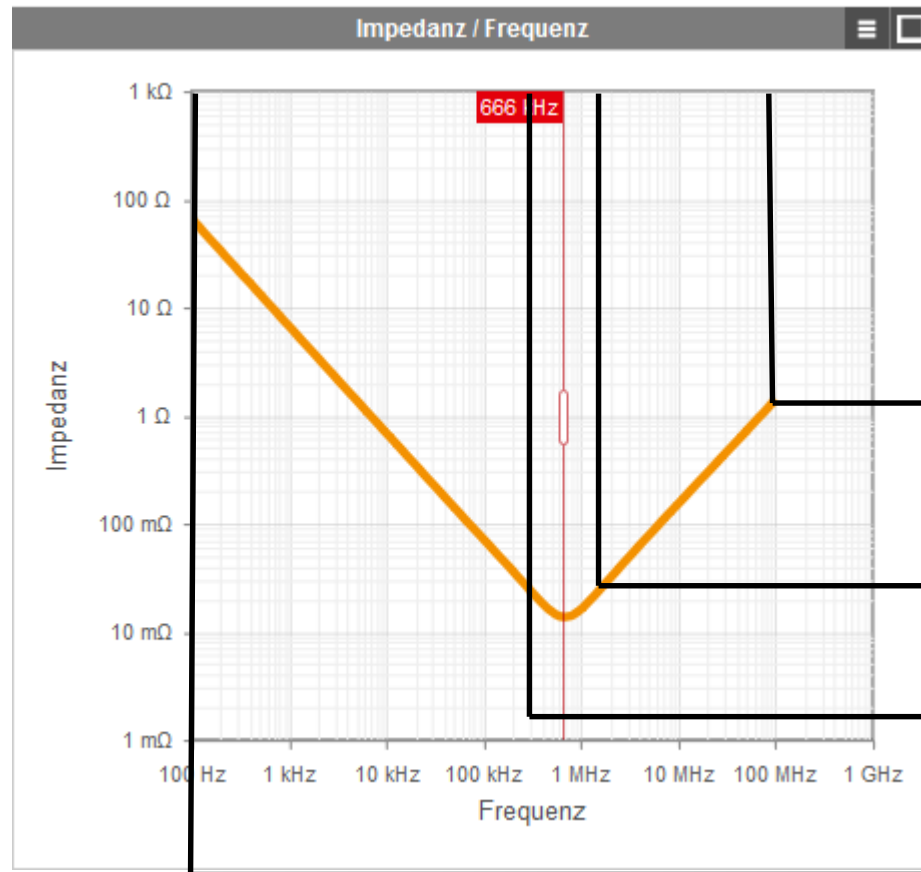
ESR / Frequenz

ÜBER WÜRTH ELEKTRONIK | SITEMAP | KONTAKT | IMPRESSUM | COPYRIGHT © 2020 WÜRTH ELEKTRONIK GMBH. ALLE RECHTE VORBEHALTEN.

[Link](#)

Ausgangsspannungsrippel

Bauteilparameter aus REDEXPERT ermitteln



22μF/10V
WCAP-PSLP
875105240003

L1
2.2n

R1
14m

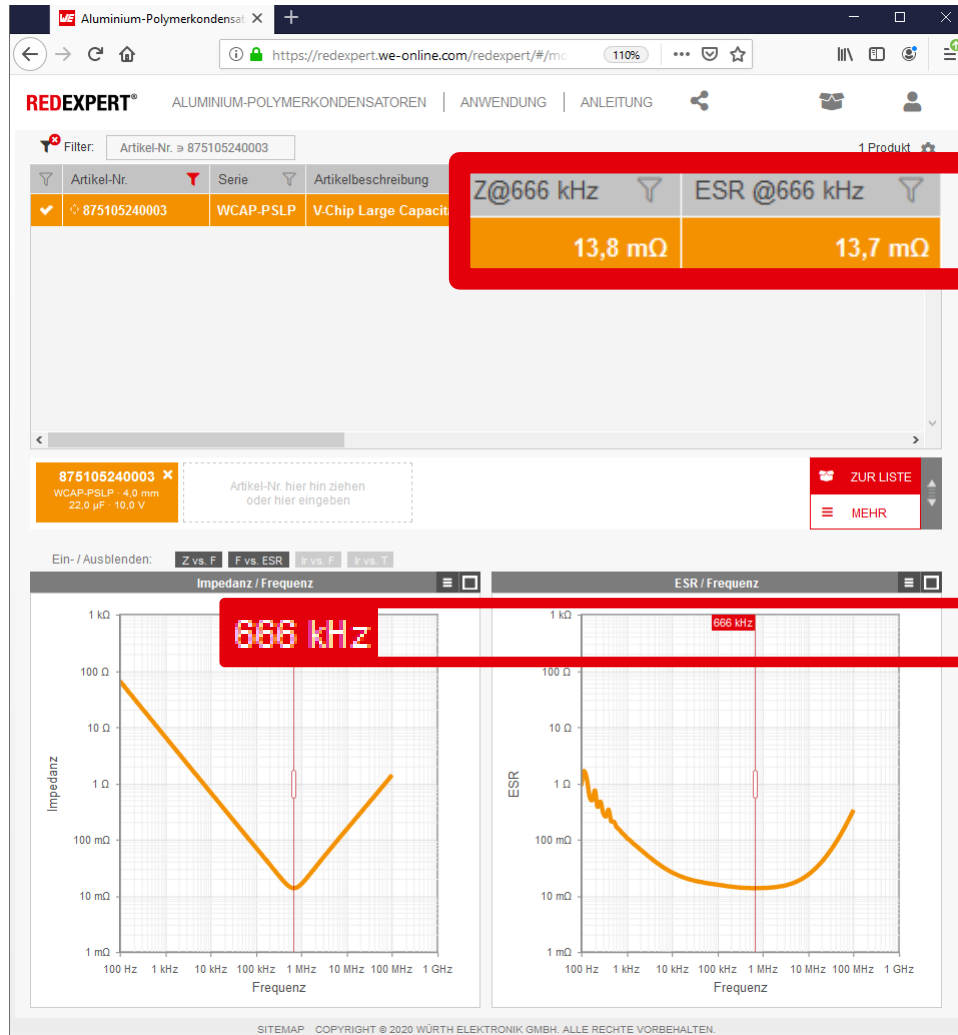
C1
22μ

$$Z_C = \sqrt{ESR^2 + (X_L - X_C)^2}$$



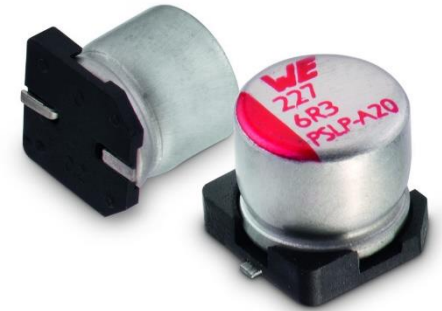
Ausgangsspannungsrippel

Bauteilparameter aus RED EXPERT ermitteln

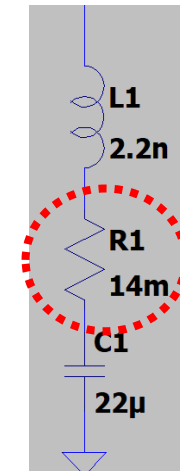


ESR

$$Z_C = ESR$$



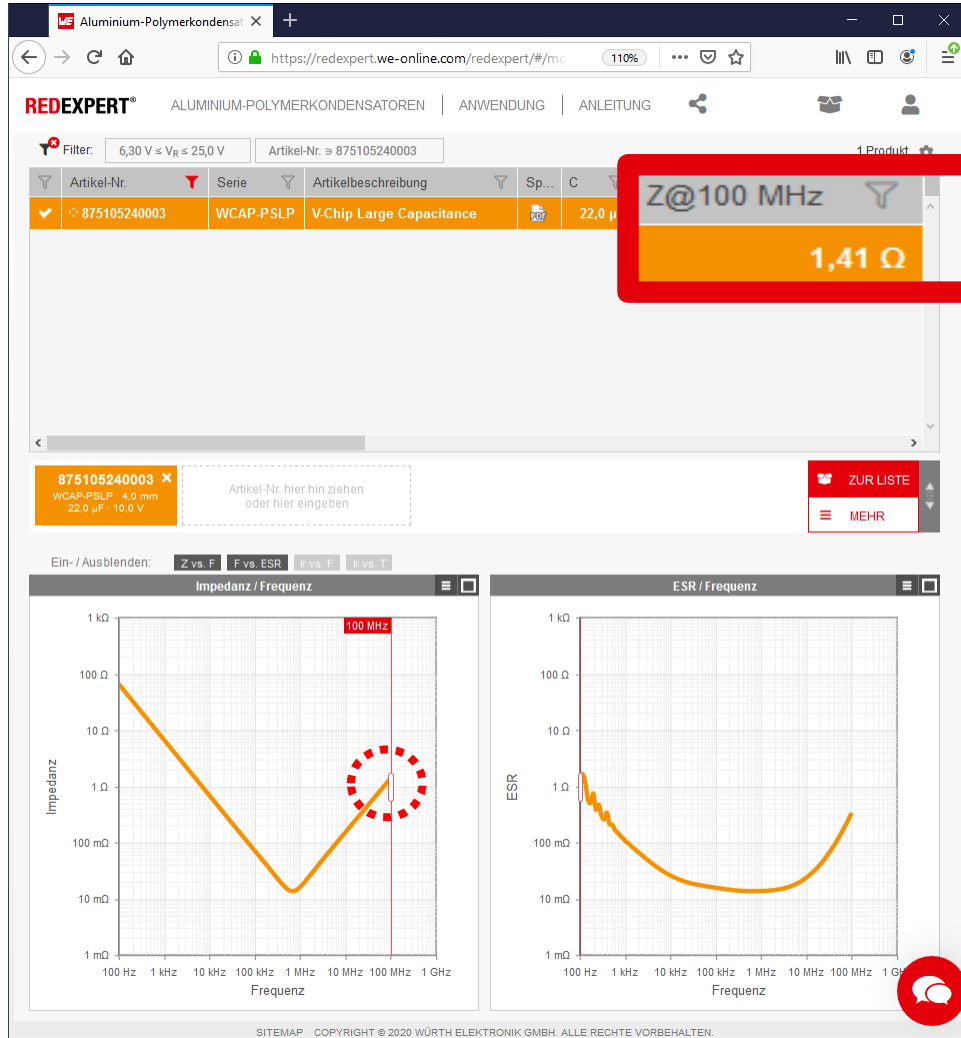
Resonanzfrequenz ermitteln



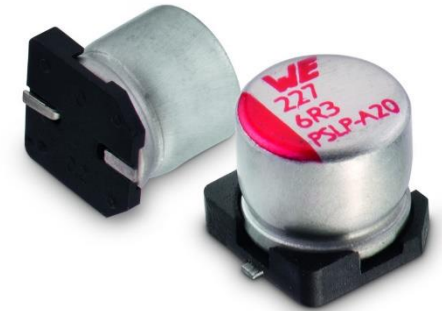
[Link](#)

Ausgangsspannungsrippel

Bauteilparameter aus RED EXPERT ermitteln



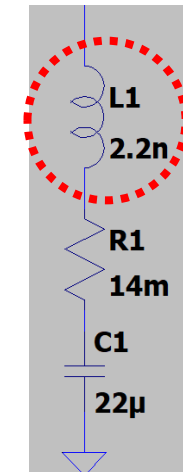
ESL:
Z@100MHz



$$|X_L| = \omega L$$

$$\frac{X_L}{\omega} = L$$

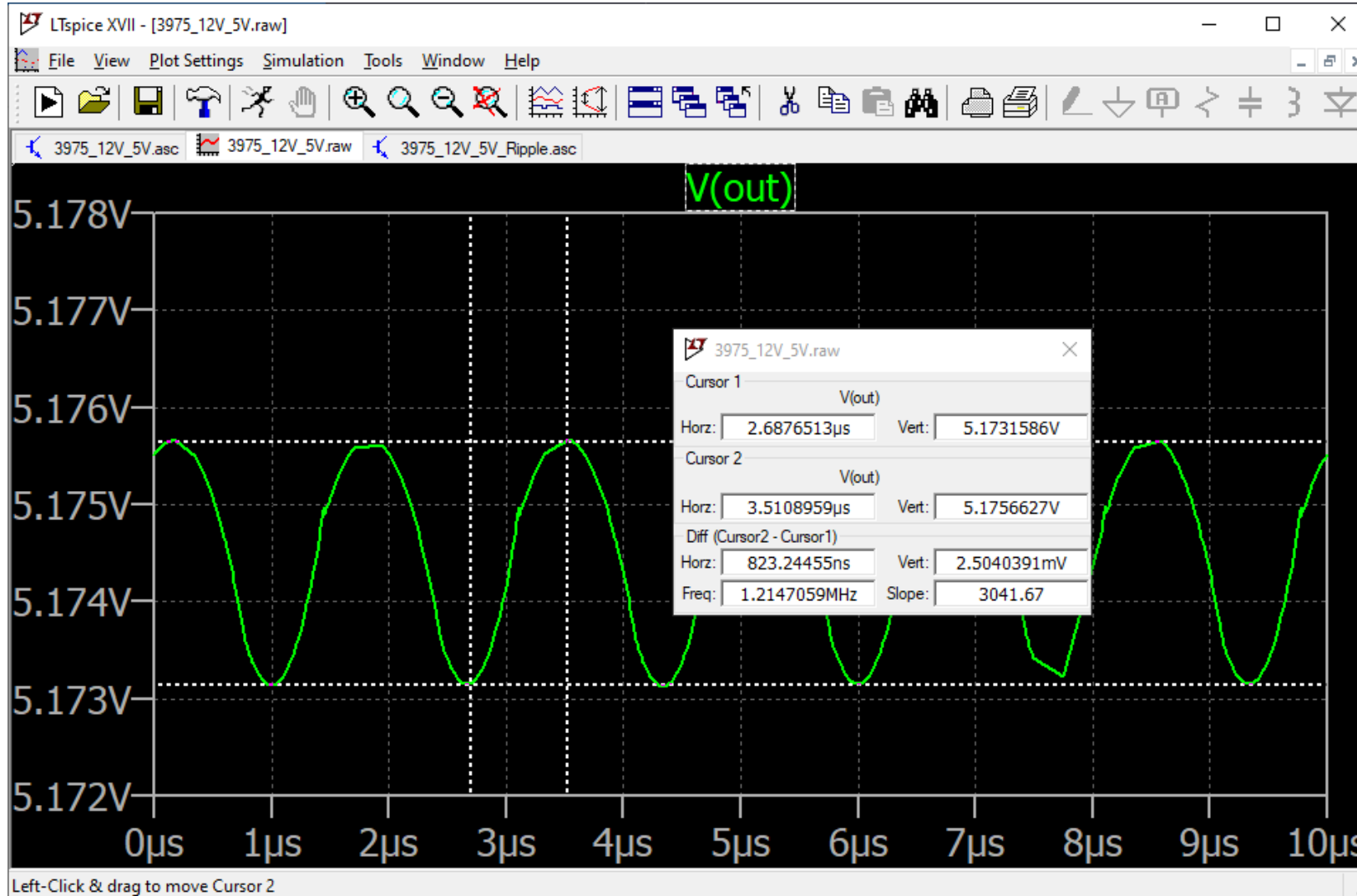
$$L = \frac{|X_L|}{2\pi f} = \frac{1,41\Omega}{2\pi \cdot 100 \cdot 10^6} \cong 2,2 \text{ nH}$$



[Link](#)

Ausgangsspannungsrippel

Beispiel für eine schlechte Rippelsimulation



Capacitor - C4

Manufacturer: TDK
Part Number: C4532X5R0J47@M
Type: X5R

OK
Cancel

Select Capacitor

Capacitor Properties

Capacitance[F]: 47µ

Voltage Rating[V]: 6.3

RMS Current Rating[A]: 0

Equiv. Series Resistance[Ω]: 0.002

Equiv. Series Inductance[H]: 0

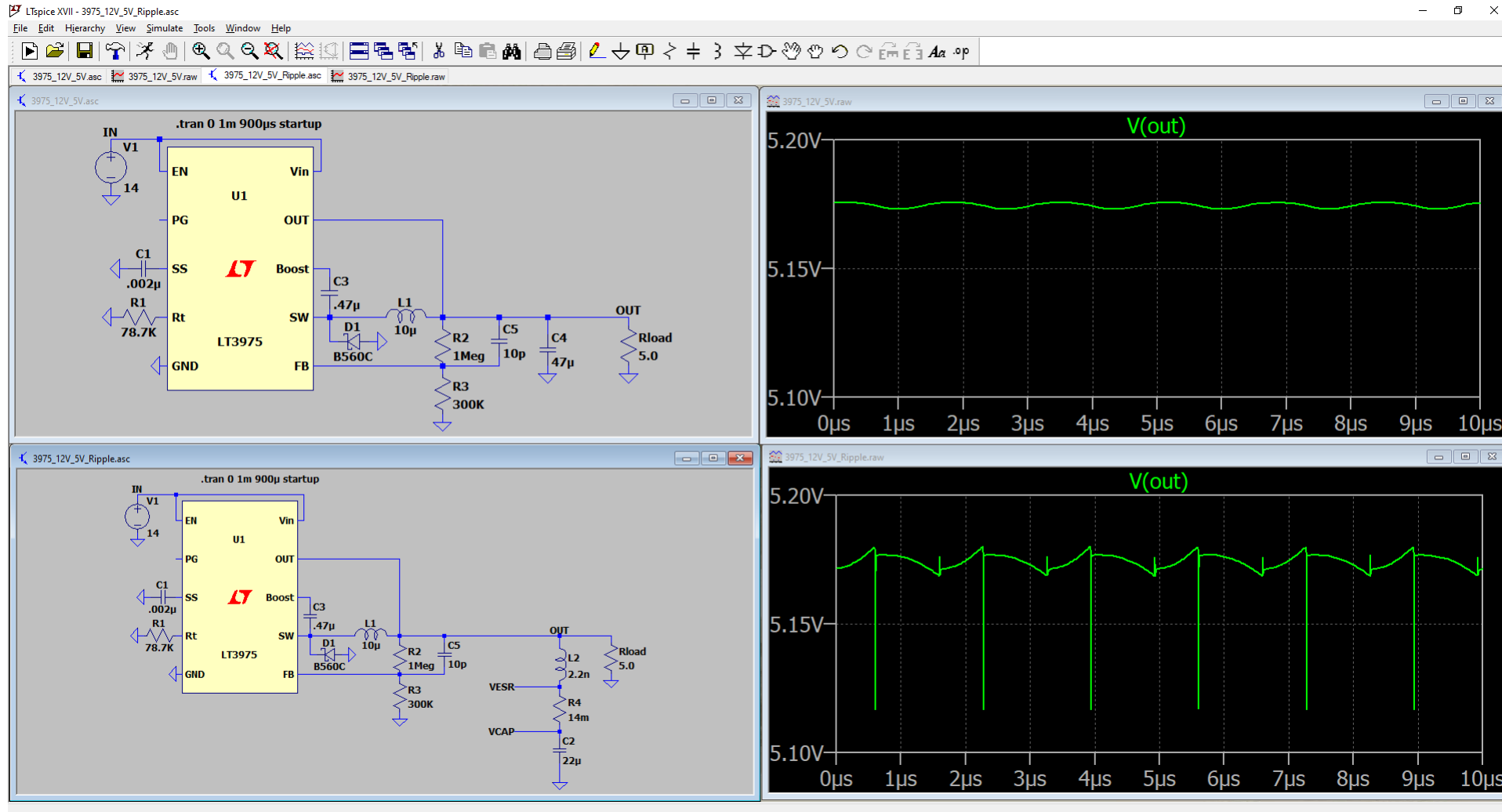
Equiv. Parallel Resistance[Ω]:

Equiv. Parallel Capacitance[F]:

- ESR = 2 mOhms
- ESL = 0 nH
- DC-bias?

Ausgangsspannungsrippel

Beispiel für eine exakte Rippelsimulation



Ausgangsspannungsrippel

Beispiel für eine exakte Rippelsimulation



2 mV_{pp} für niedrige Frequenzen
 64 mV_{pp} für hohe Frequenzen

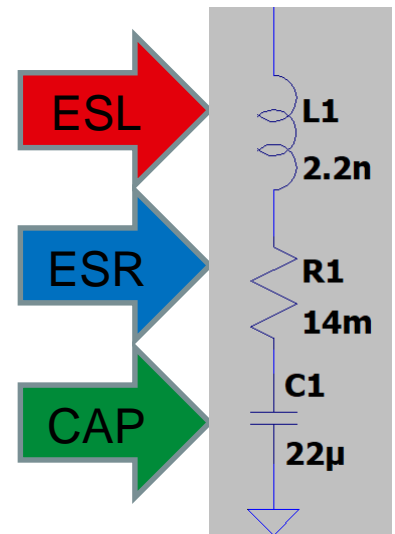
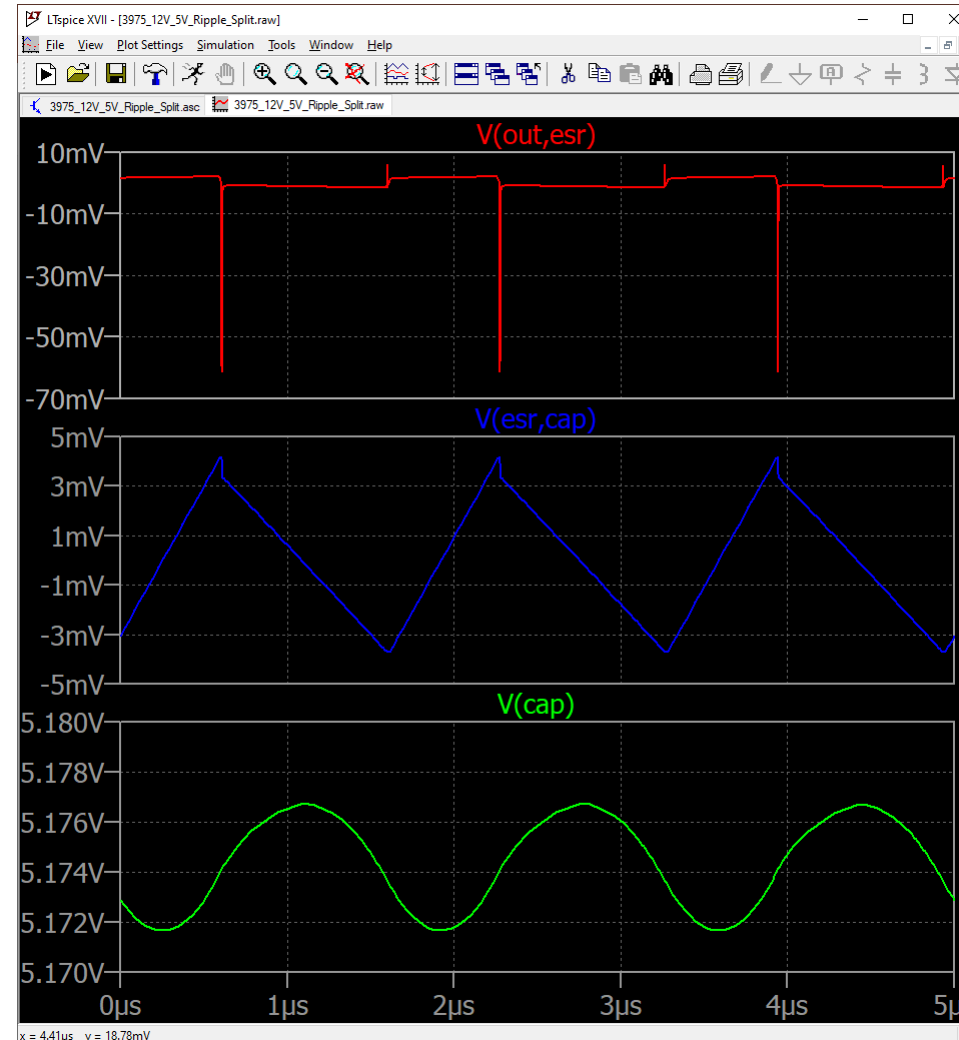


8 mV_{pp}

Ladung und Entladung des Kondensators



5 mV_{pp}



... zur EMV-Simulation

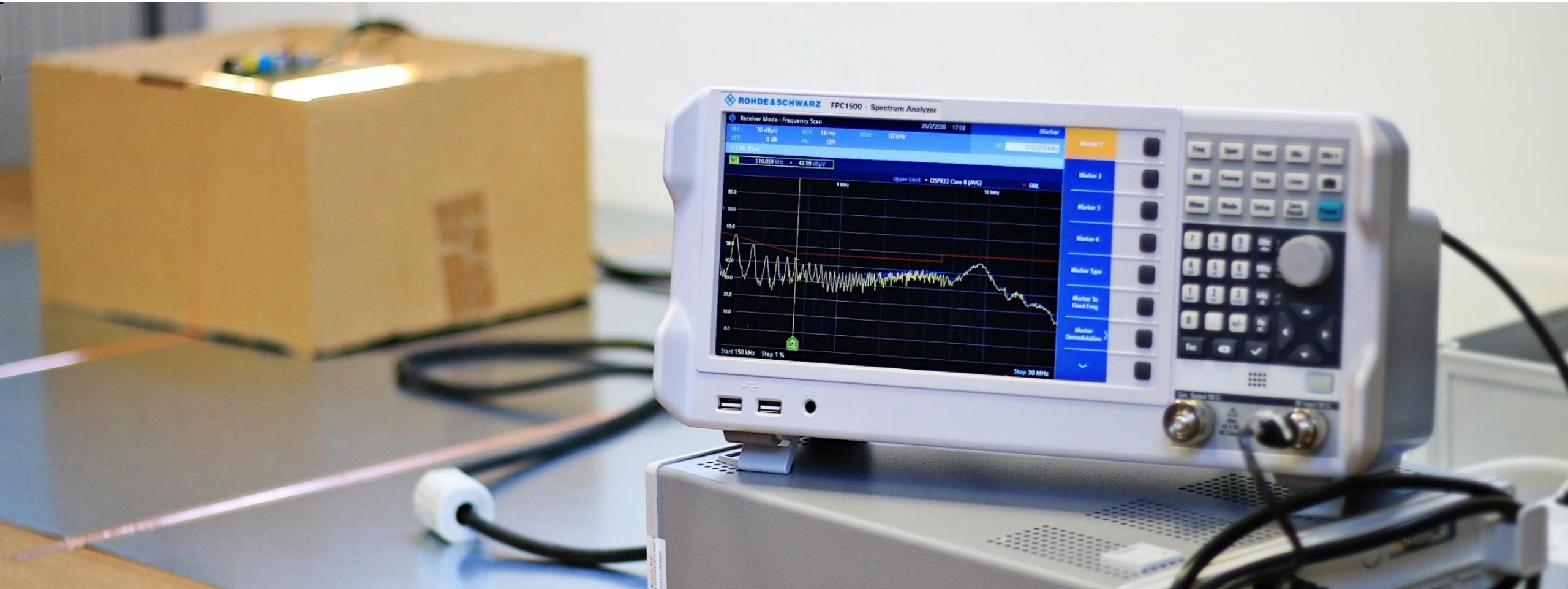
Irgendetwas fehlt noch?



WE eiSos / Sylvain LE BRAS

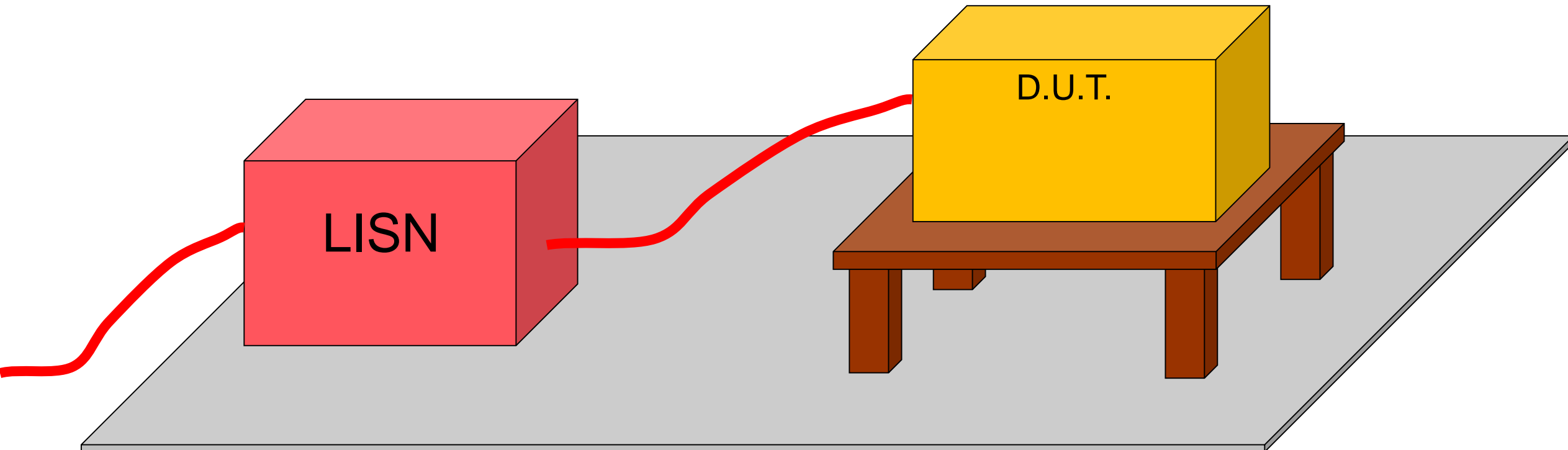
EMV-Messung in LTSpice nachstellen

Was ist die Schnittstelle zu den leitungsgeführten Emissionen?



EMV-Messung in LTSpice nachstellen

Die Schnittstelle zu den leitungsgeführten Emissionen...

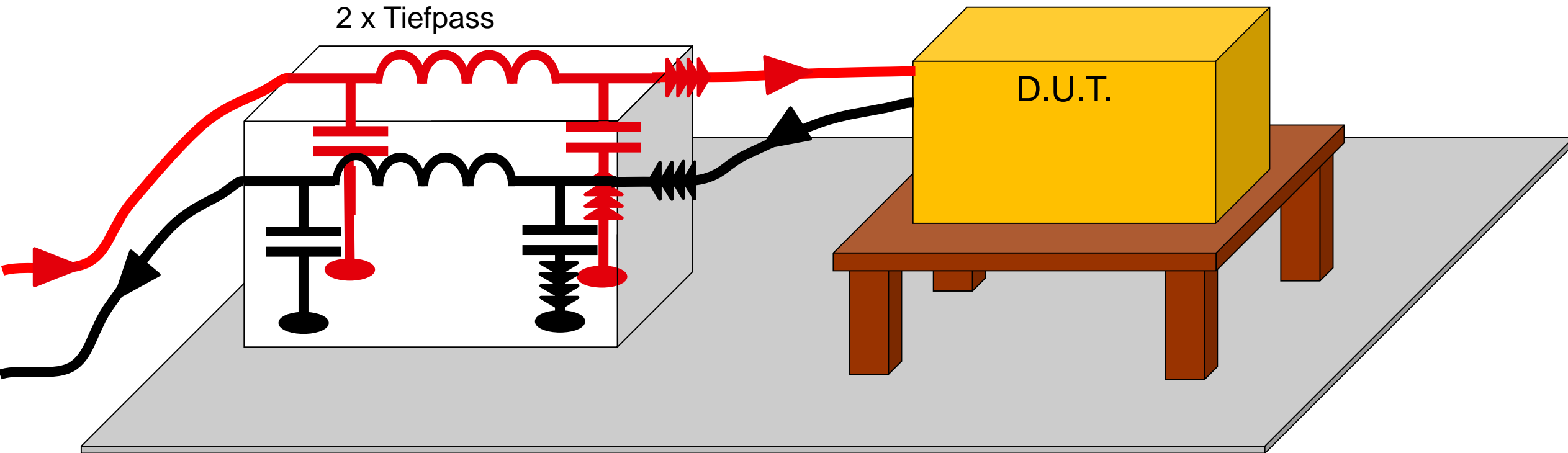


EMV-Messung in LTSpice nachstellen

Die Schnittstelle zu den leitungsgeführten Emissionen...

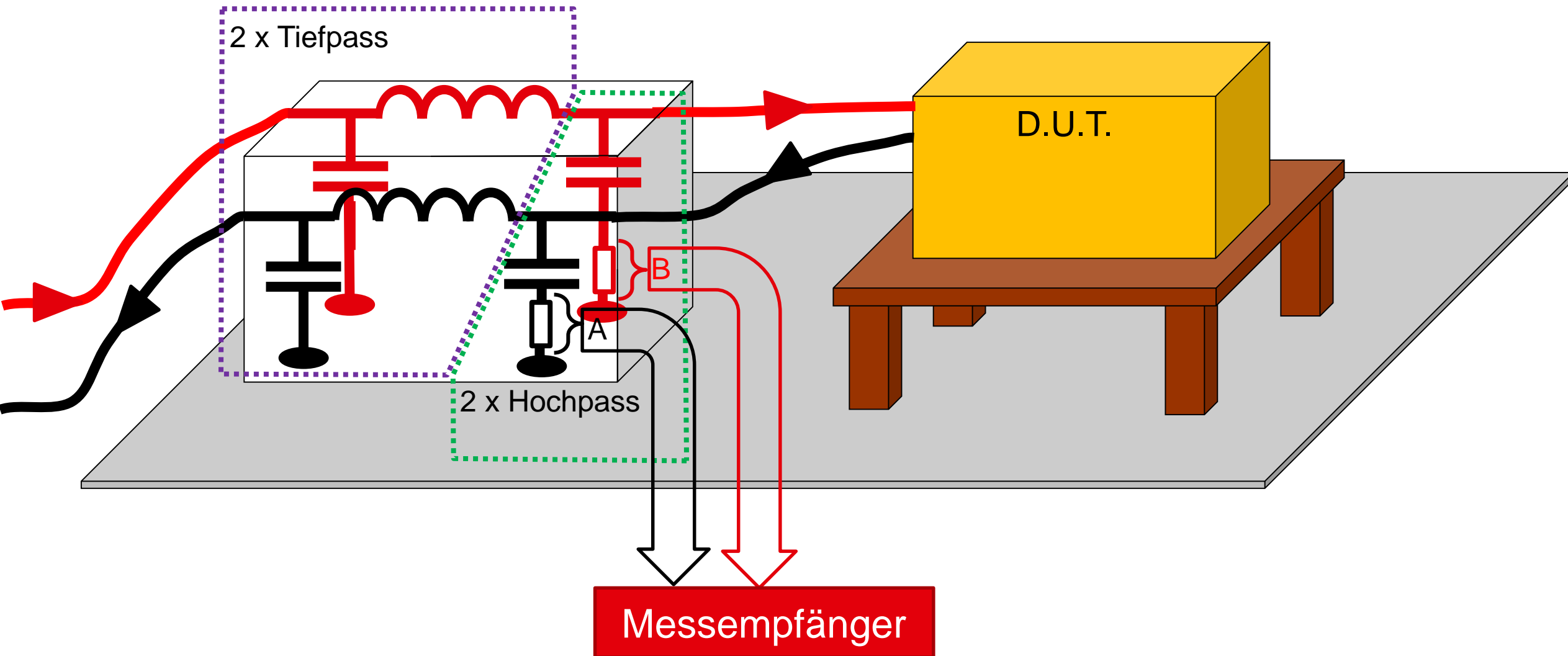
 Niedrige Frequenz

 Hohe Frequenz



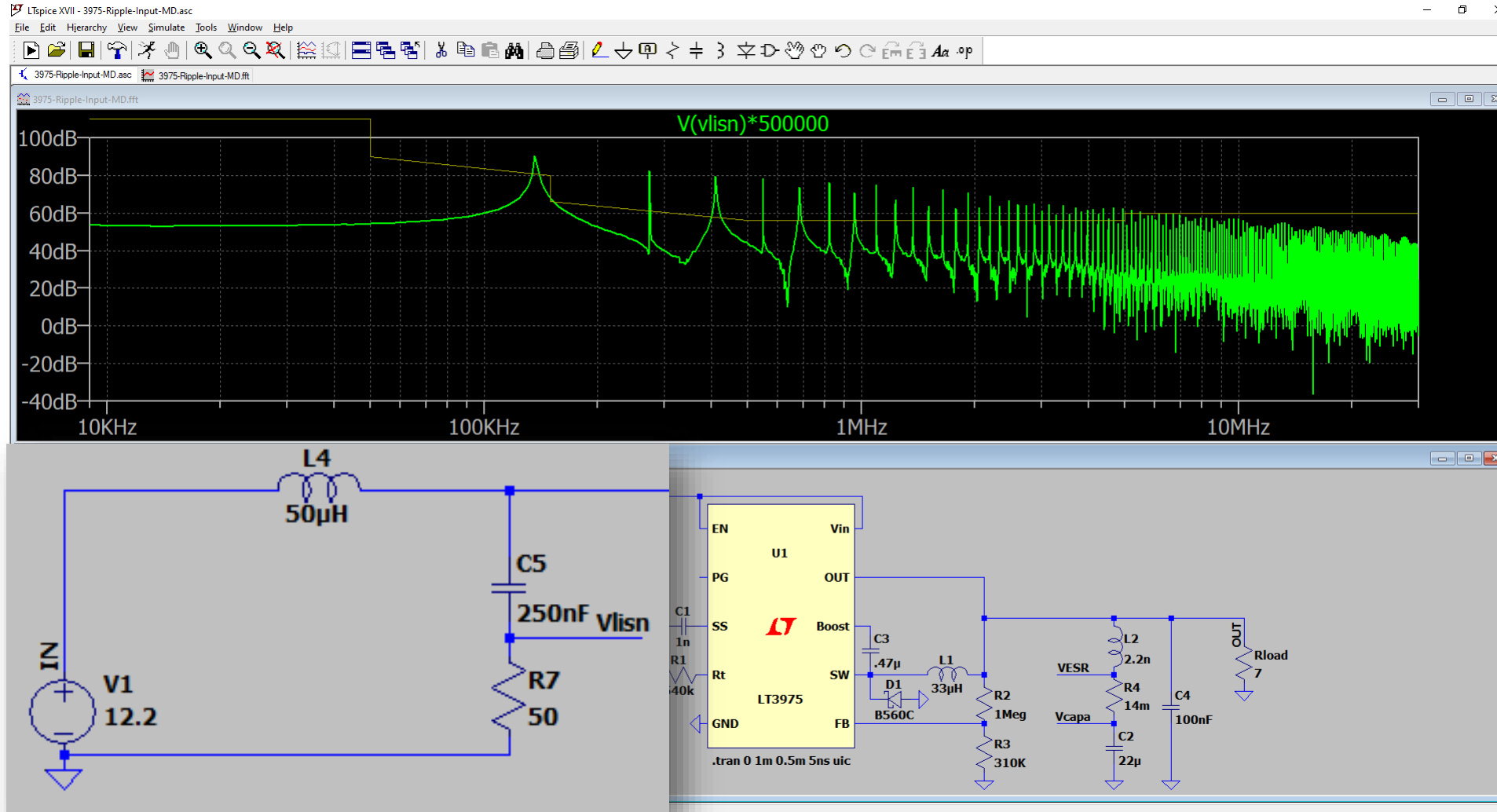
EMV-Messung in LTSpice nachstellen

Die Schnittstelle zu den leitungsgeführten Emissionen...



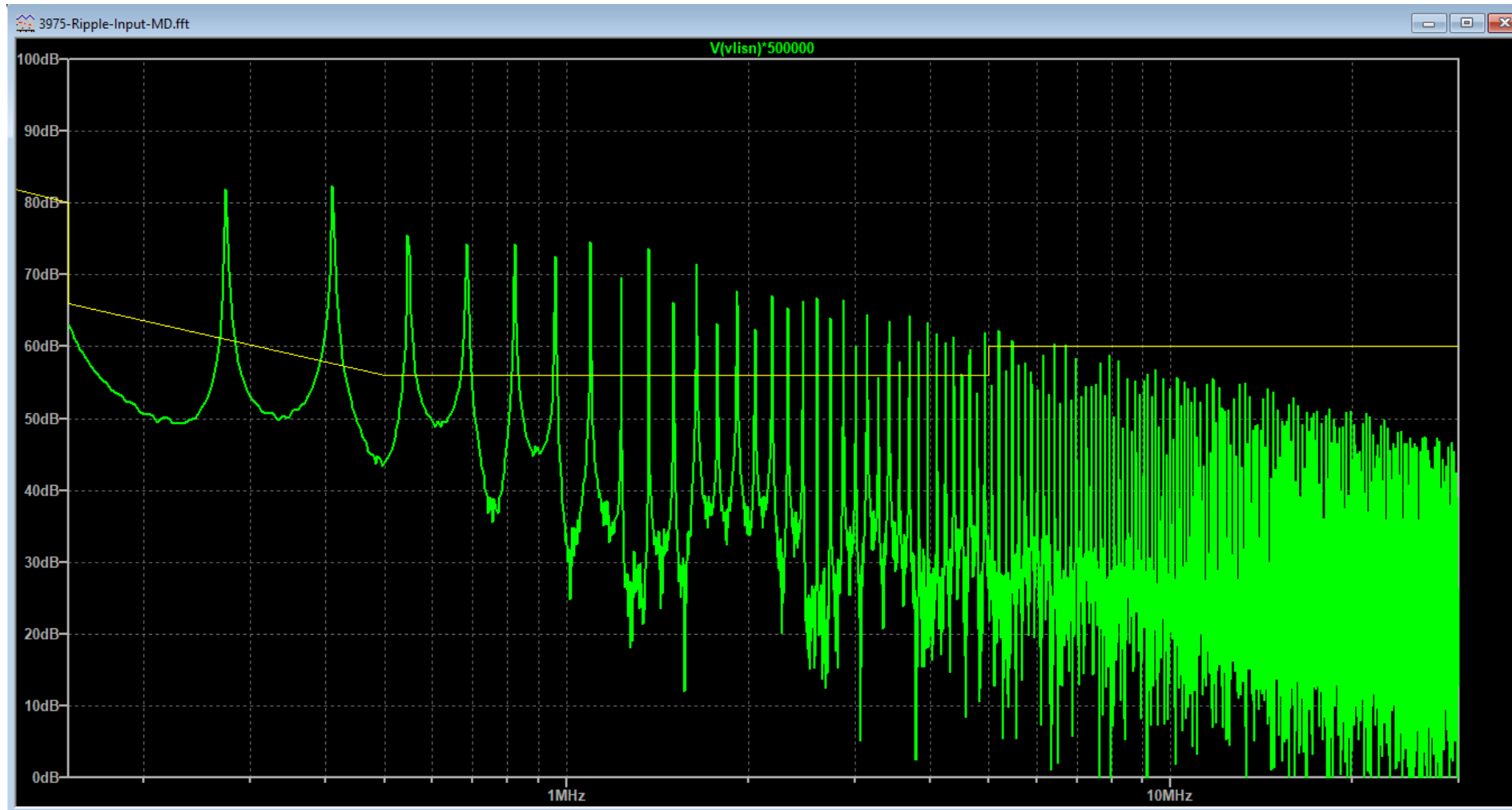
EMV-Messung in LTSpice nachstellen

FFT mit vereinfachter Netznachbildung



Realität / Simulation

FFT mit vereinfachter Netznachbildung





Realität / Simulation

Messung der leitungsgeführten Emissionen



Realität / Simulation

Leitungsgeführte Emissionen



Realität / Simulation

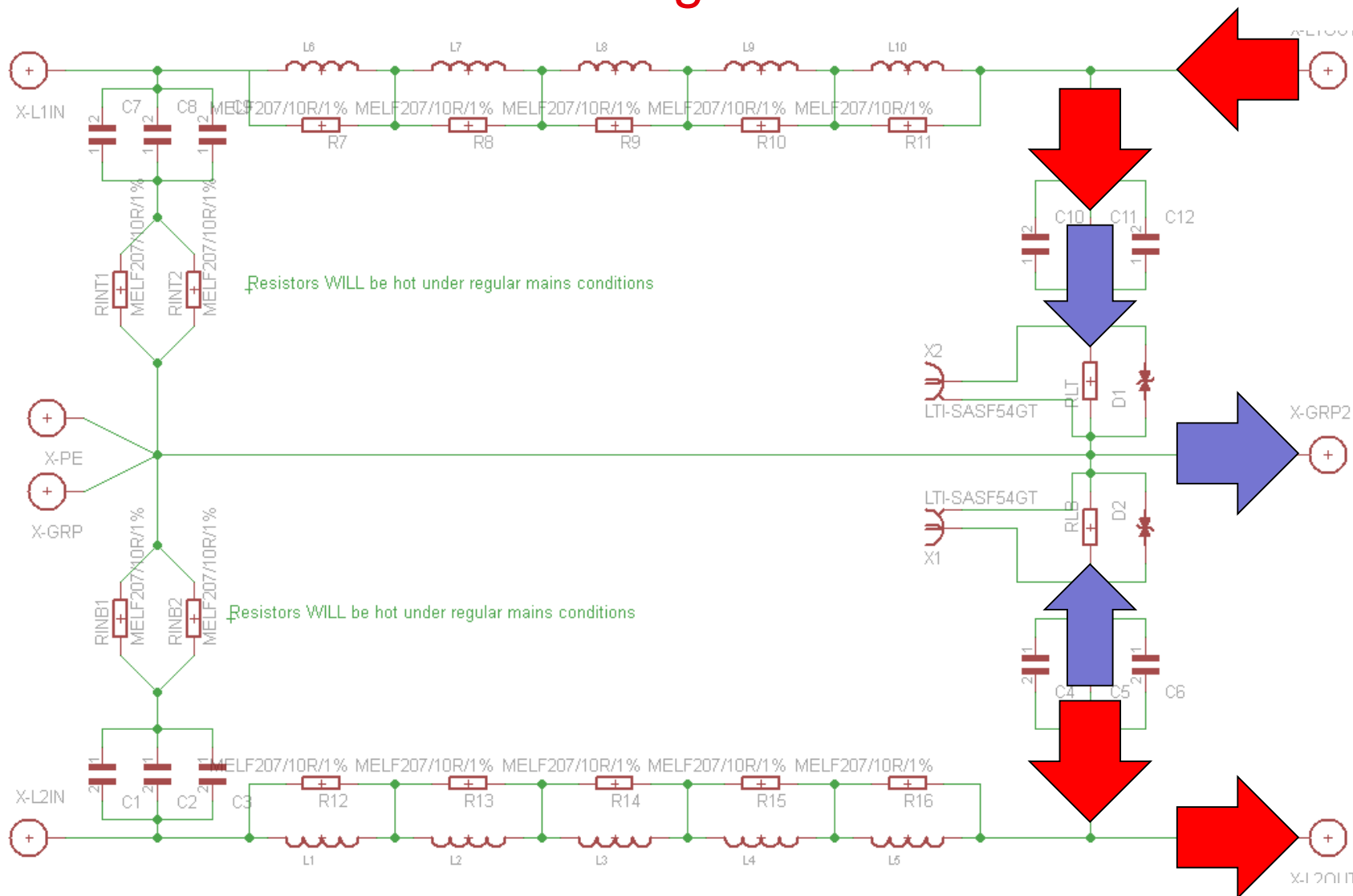


EMV-Messung = \sum (Gleichtaktstörung + Gegentaktstörung)



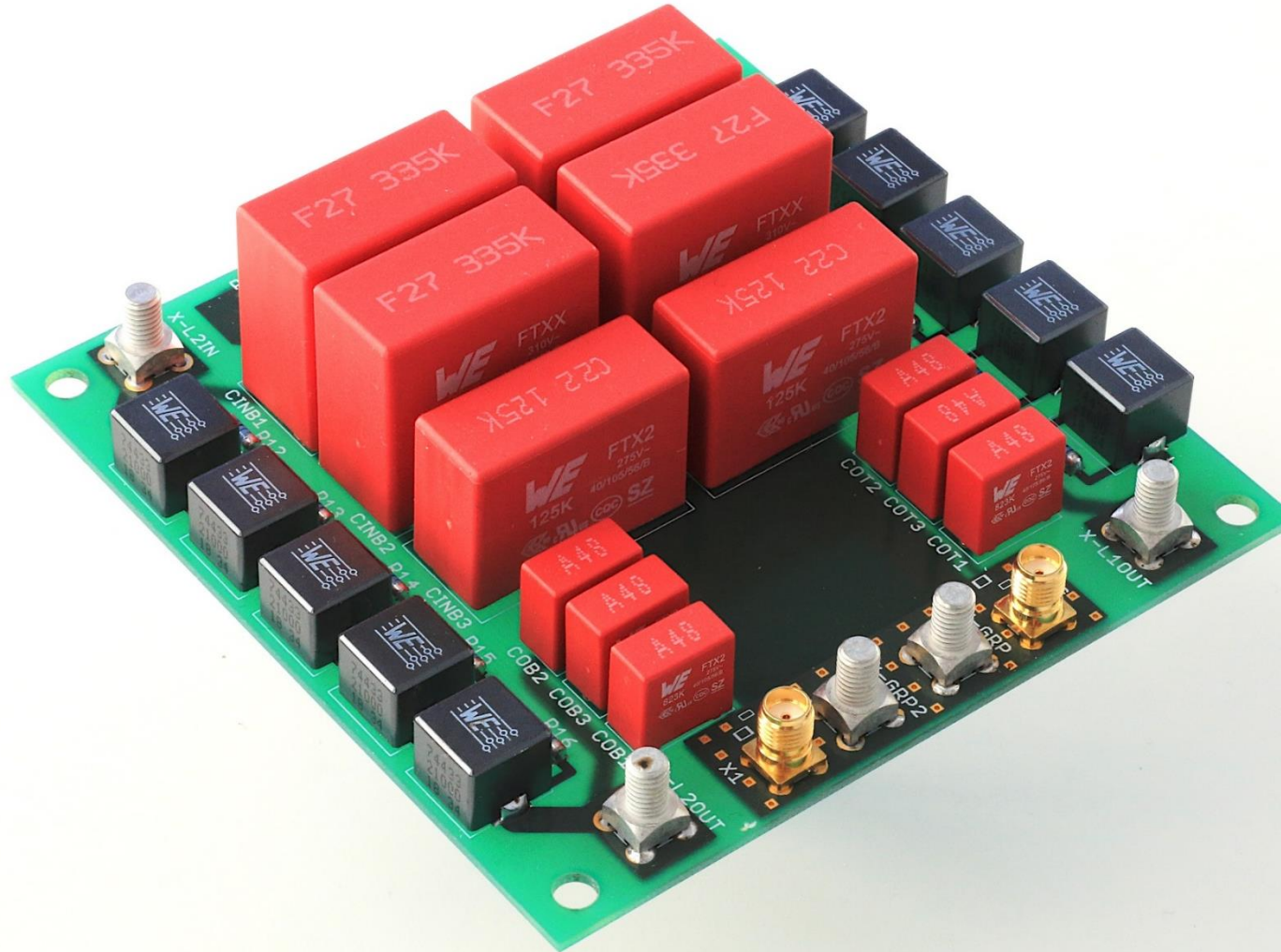
Fortgeschrittene Simulation...

Design einer realen Netznachbildung



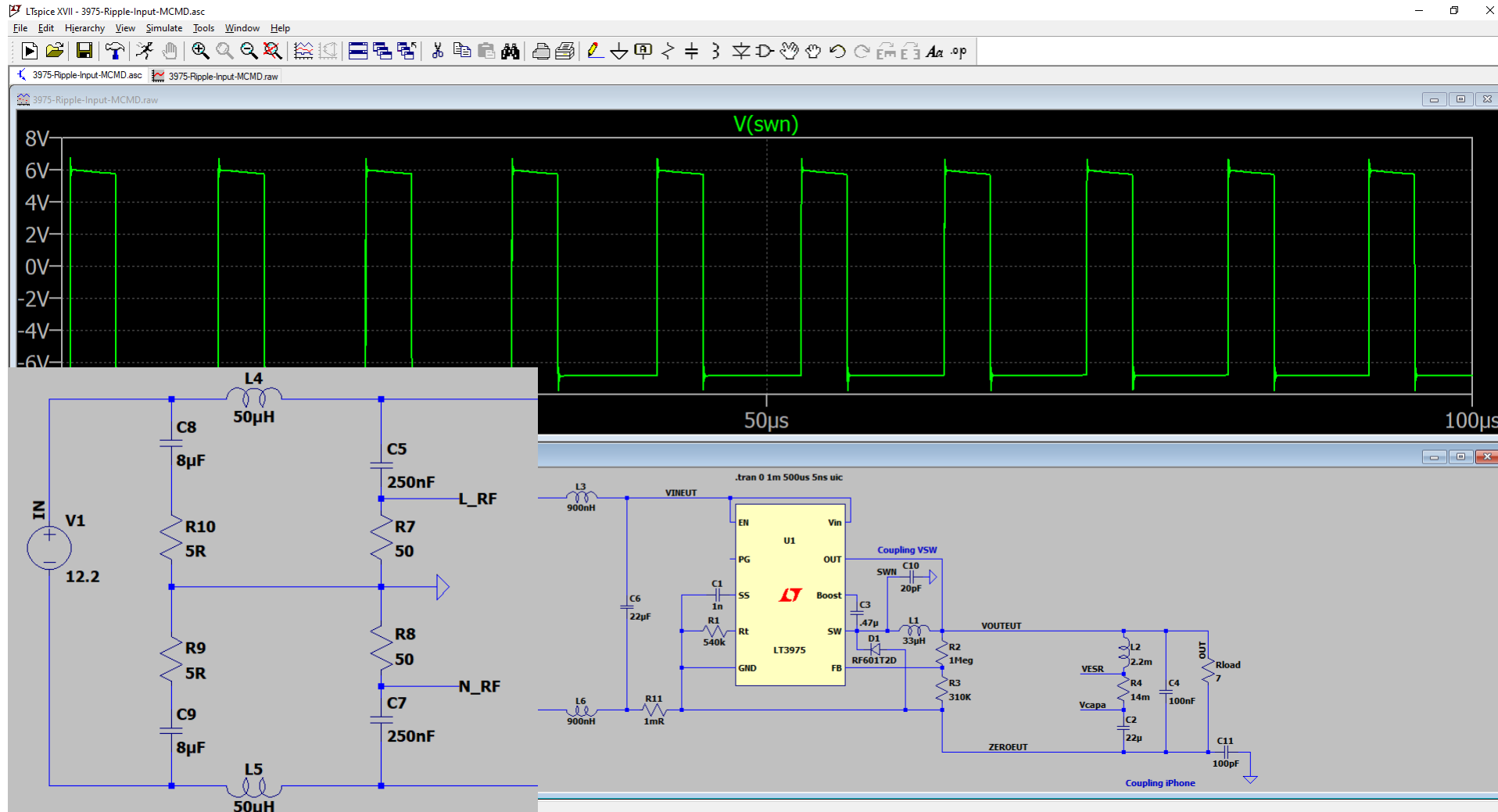
Fortgeschrittene Simulation...

Design einer realen Netznachbildung



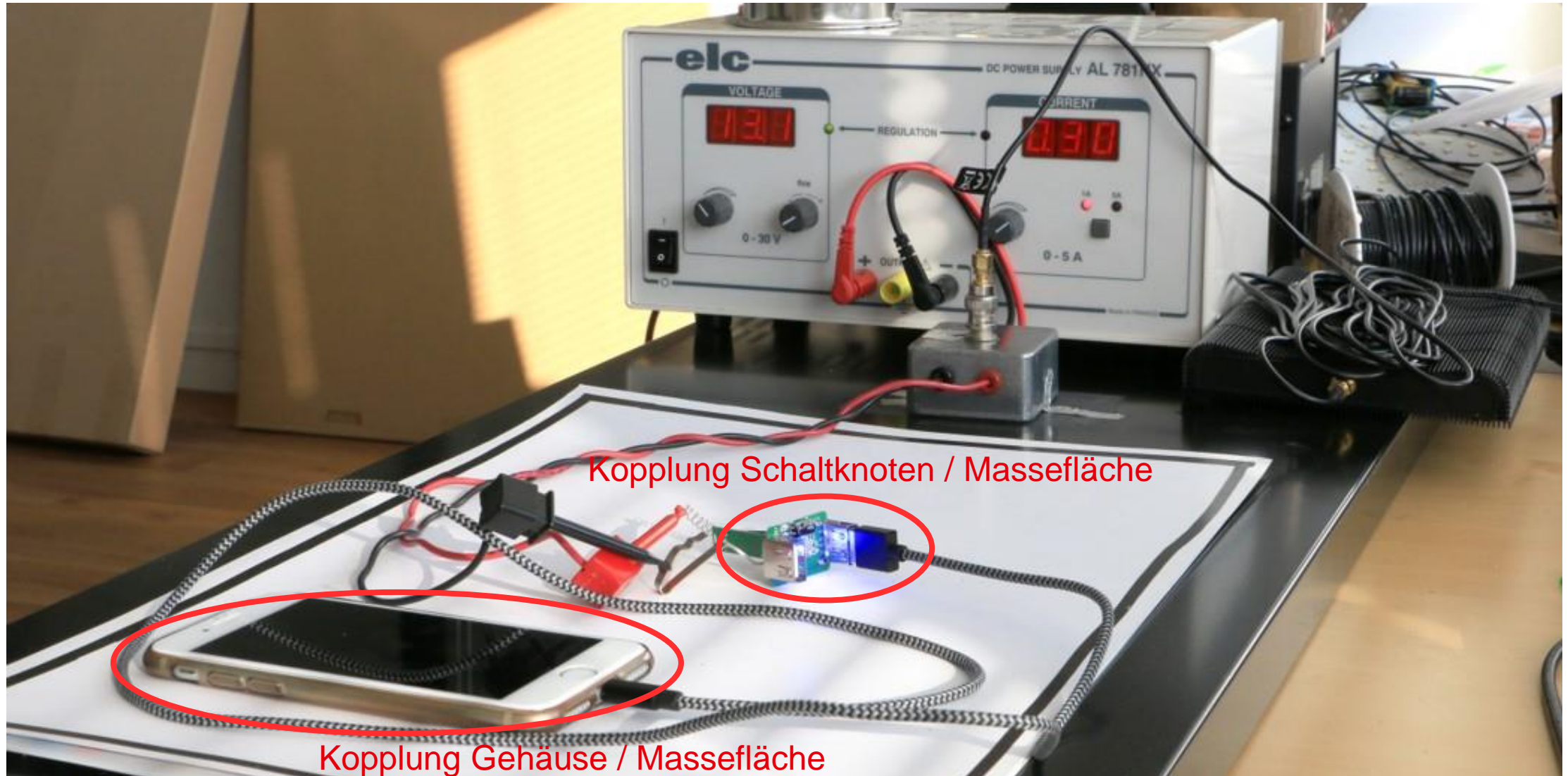
Fortgeschrittene Simulation...

Simulation der Netznachbildung



Fortgeschrittene Simulation...

E-Feldkopplung in der Realität



Fortgeschrittene Simulation...

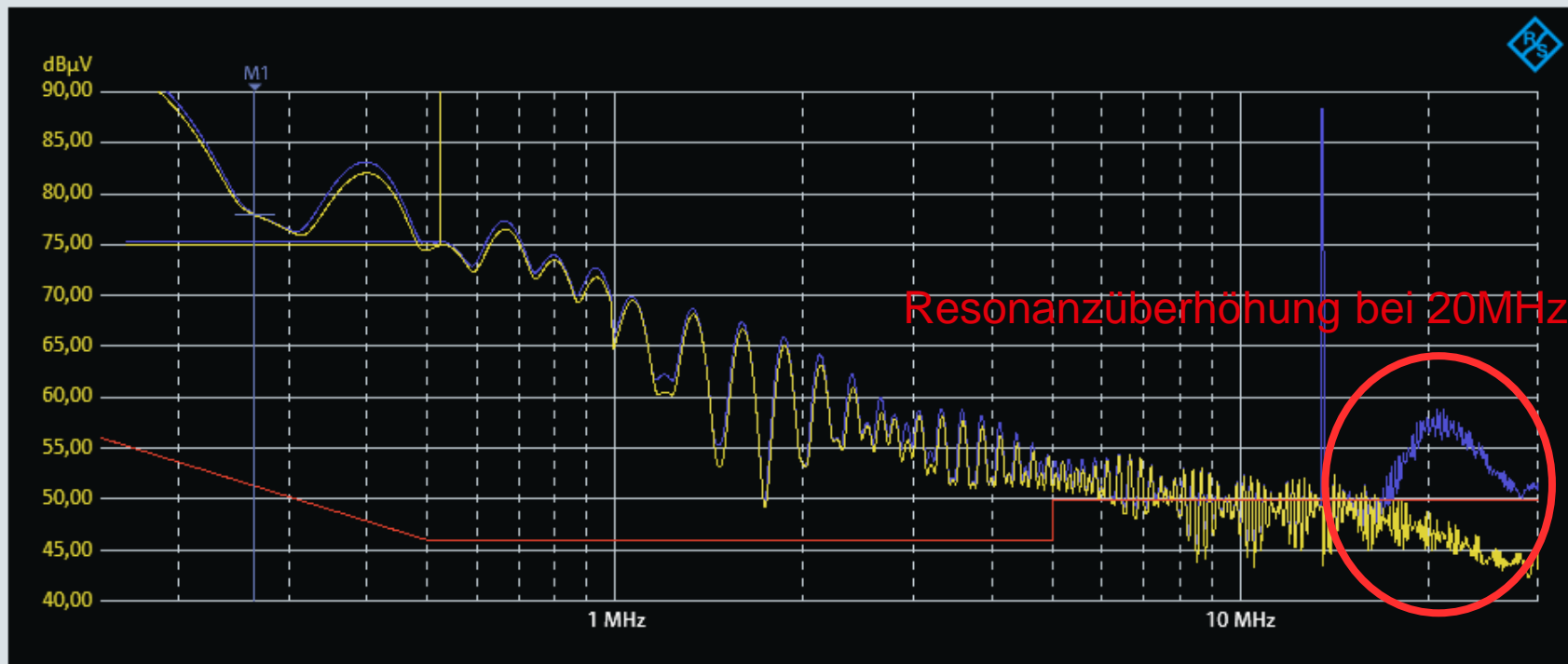
Realität / Simulation



Frequency Scan

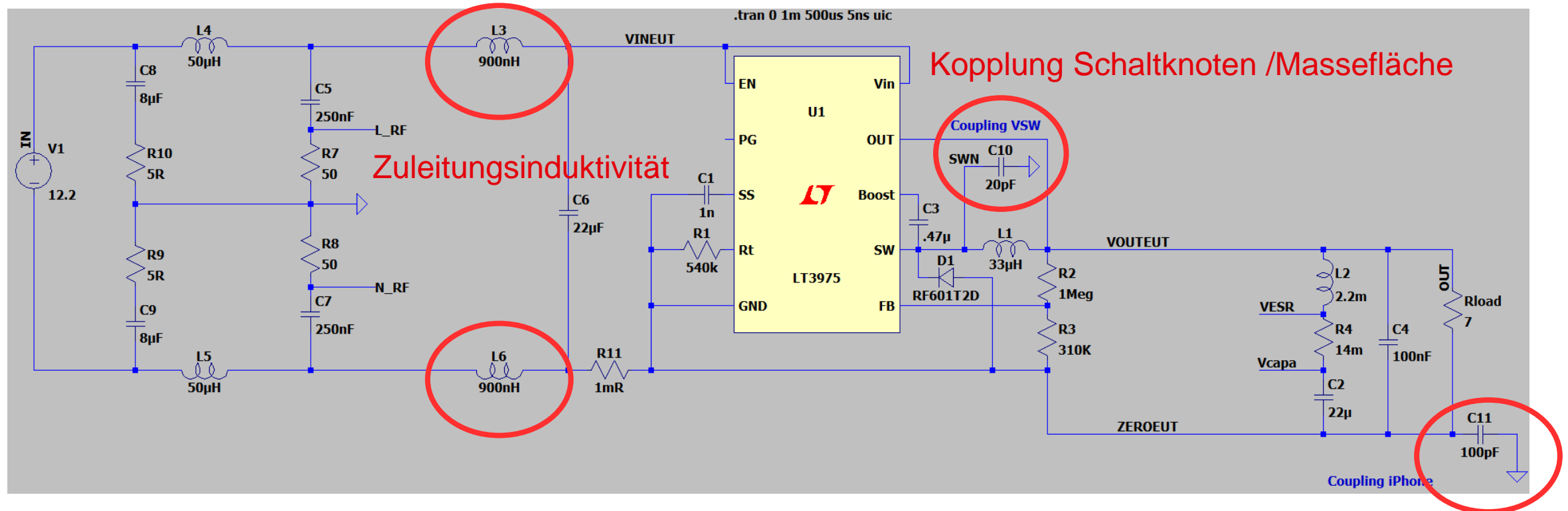
Ref Level 80 dB μ V
 ■ RF Attenuator 10 dB
 RBW 100 kHz
 Start Frequency 150 kHz
 Stop Frequency 30 MHz

Measurement Time 10 ms
 Trace Mode Clear / Write
 Trigger Mode Free Run
 Trace Detector Average
 Scan step 0,5 %



Fortgeschrittene Simulation...

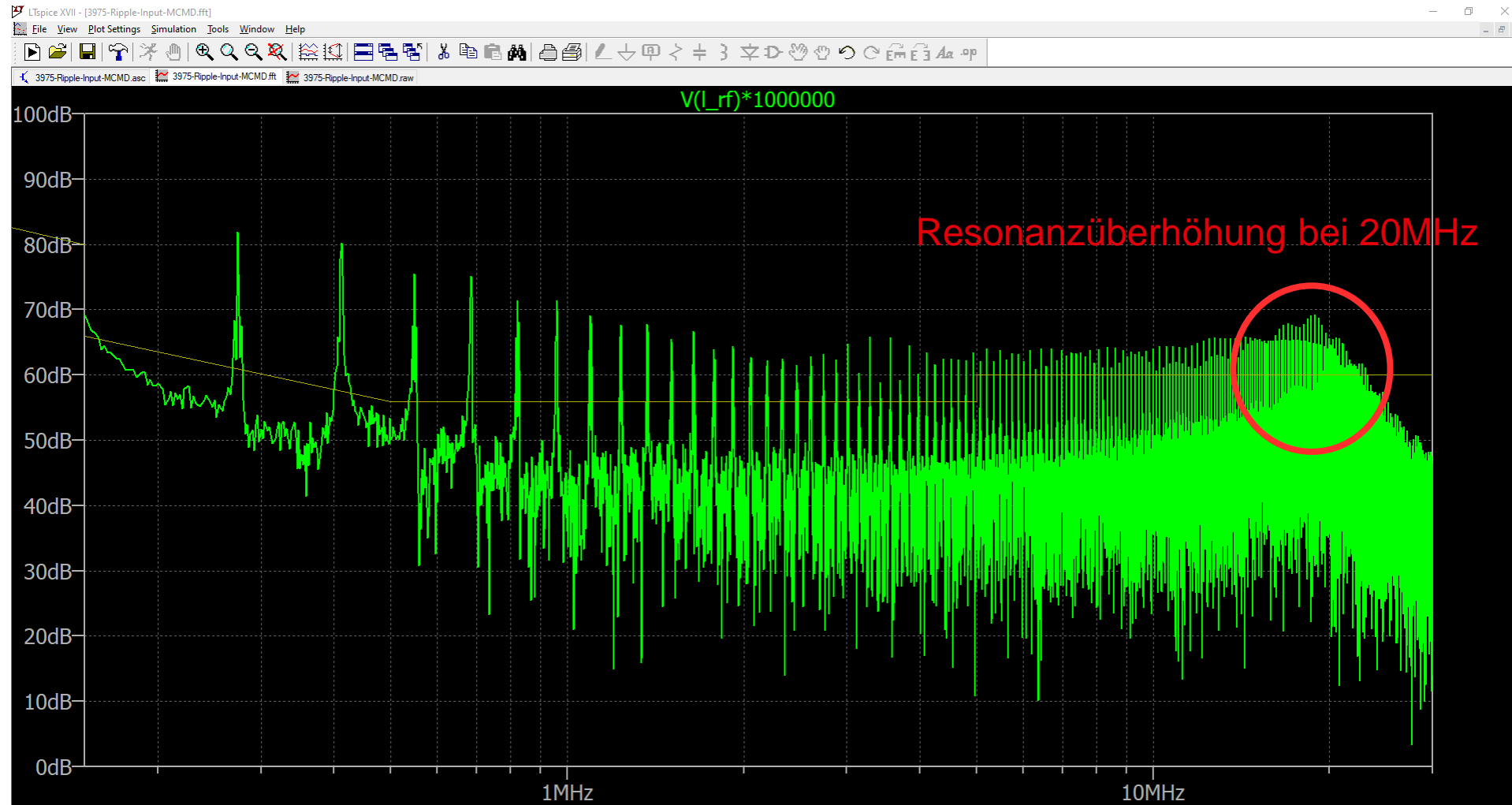
E-Feldkopplung in der Simulation hinzufügen



Kopplung Gehäuse/Massefläche

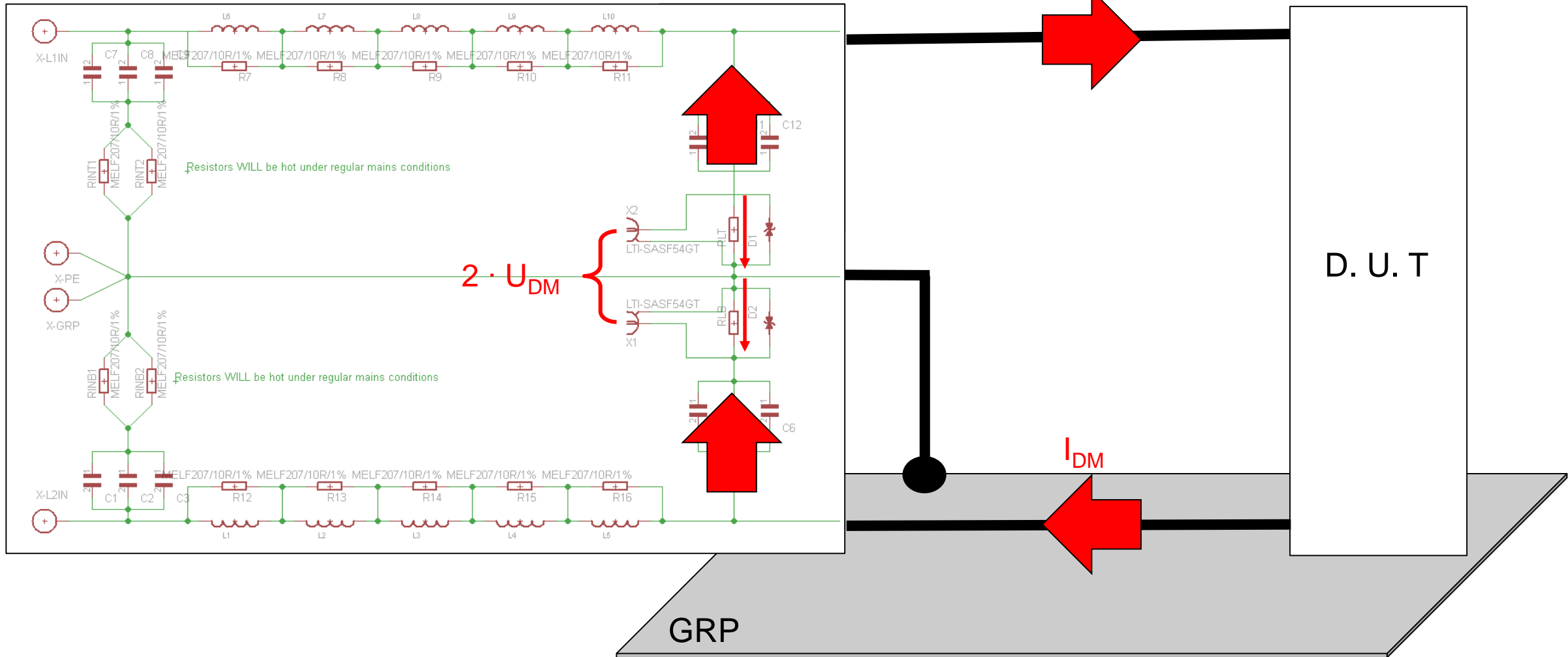
Fortgeschrittene Simulation...

Realität / Simulation



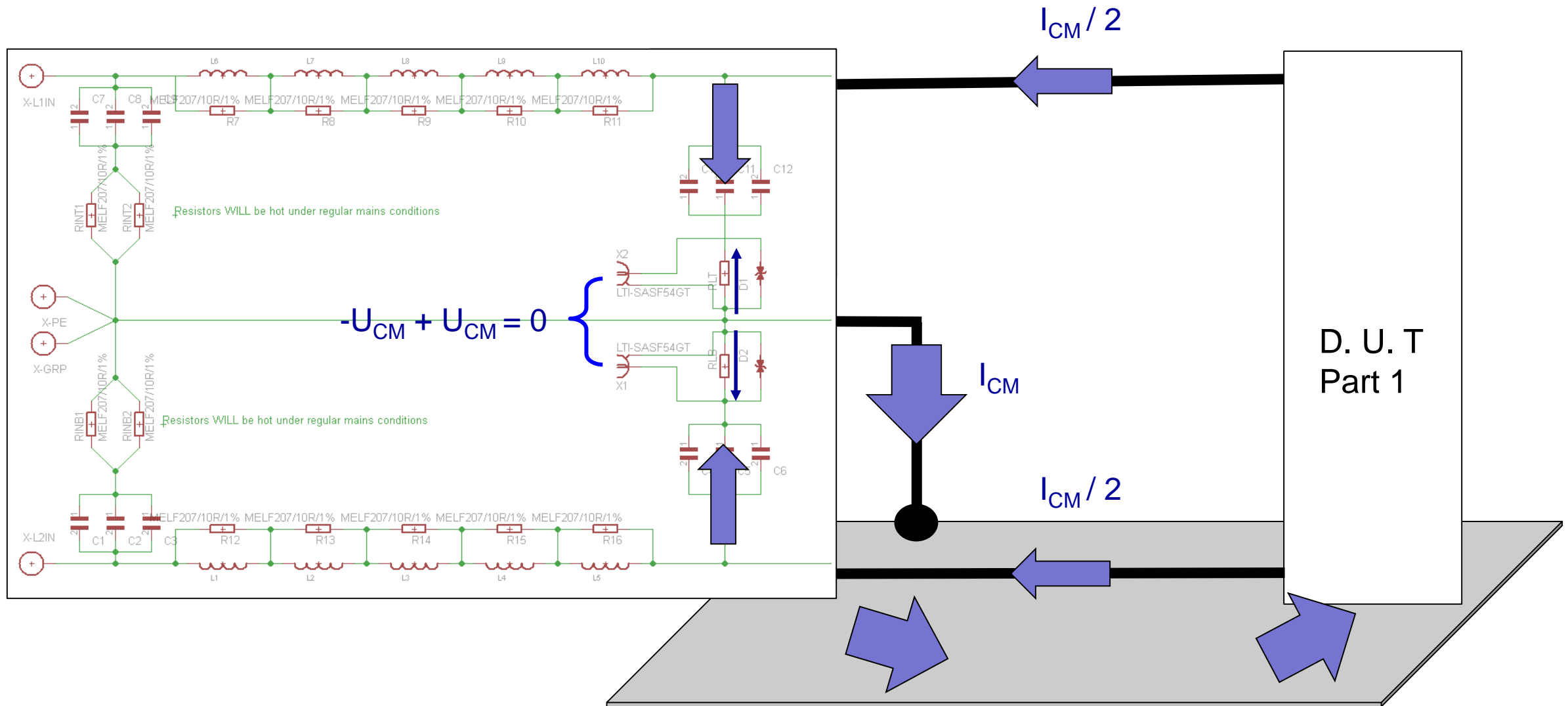
Fortgeschrittene Simulation...

Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen...



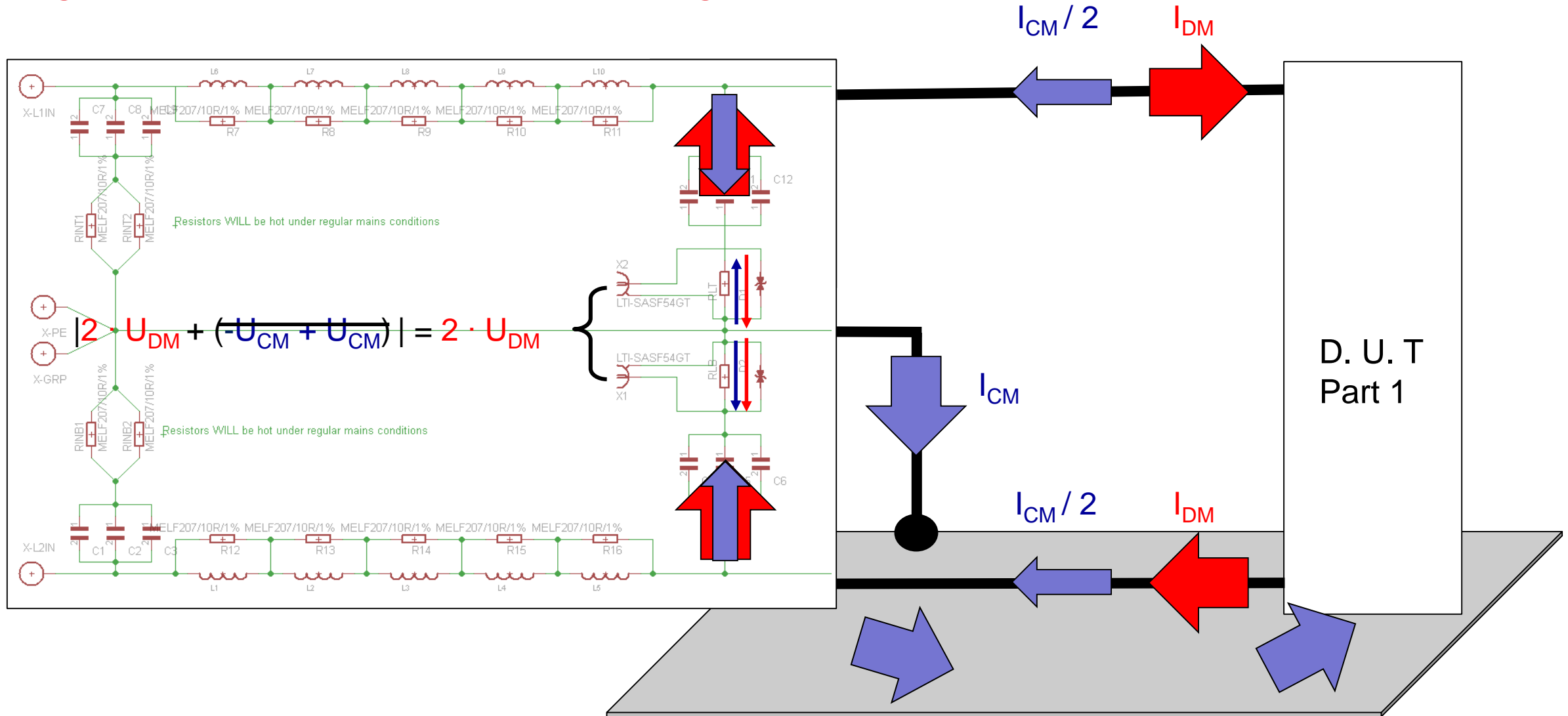
Fortgeschrittene Simulation...

Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen...



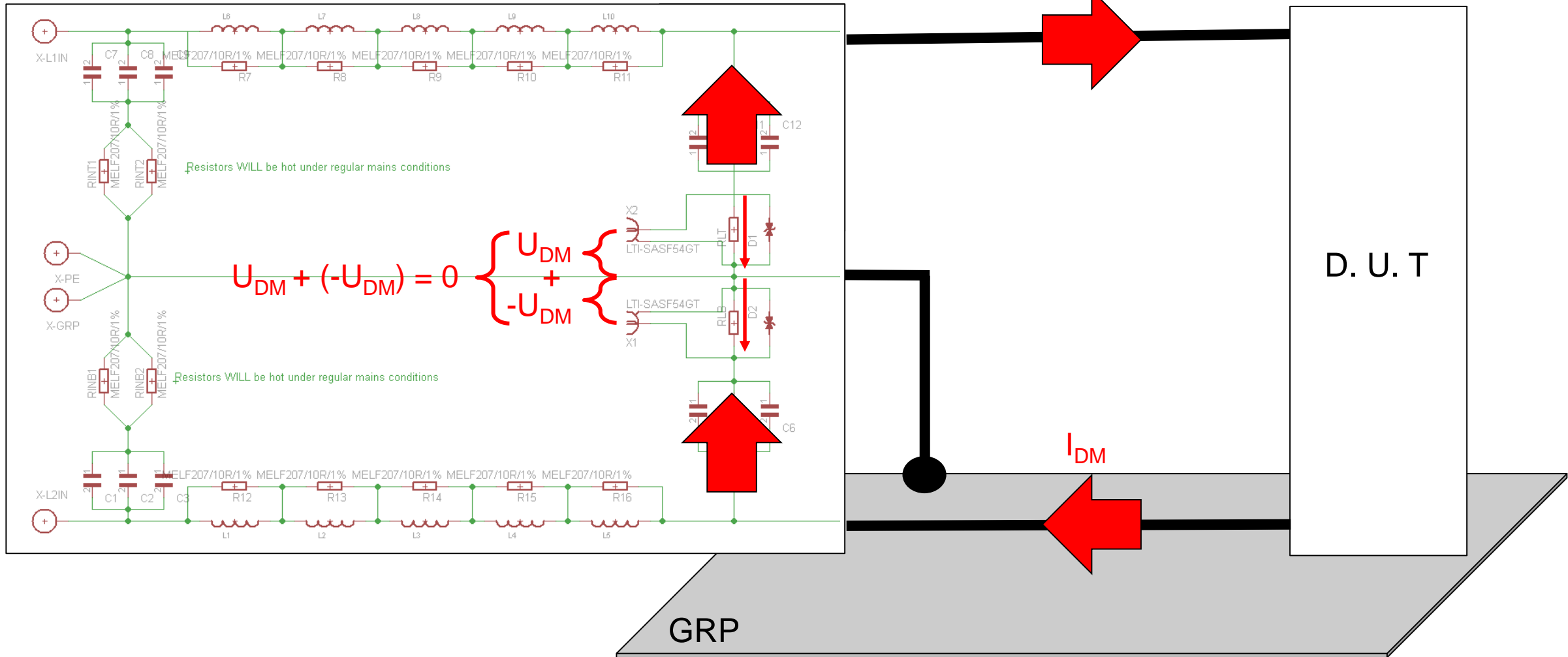
Fortgeschrittene Simulation...

Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen...



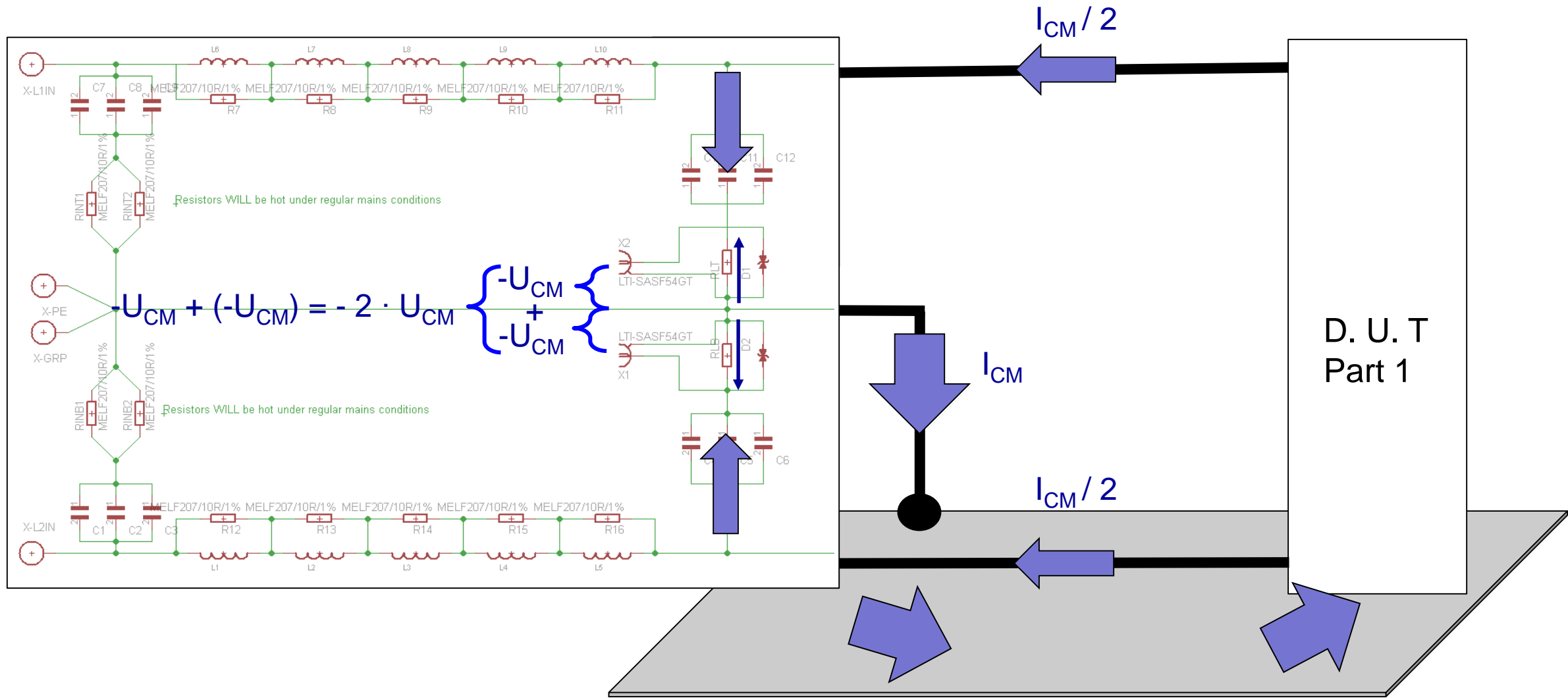
Fortgeschrittene Simulation...

Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen...



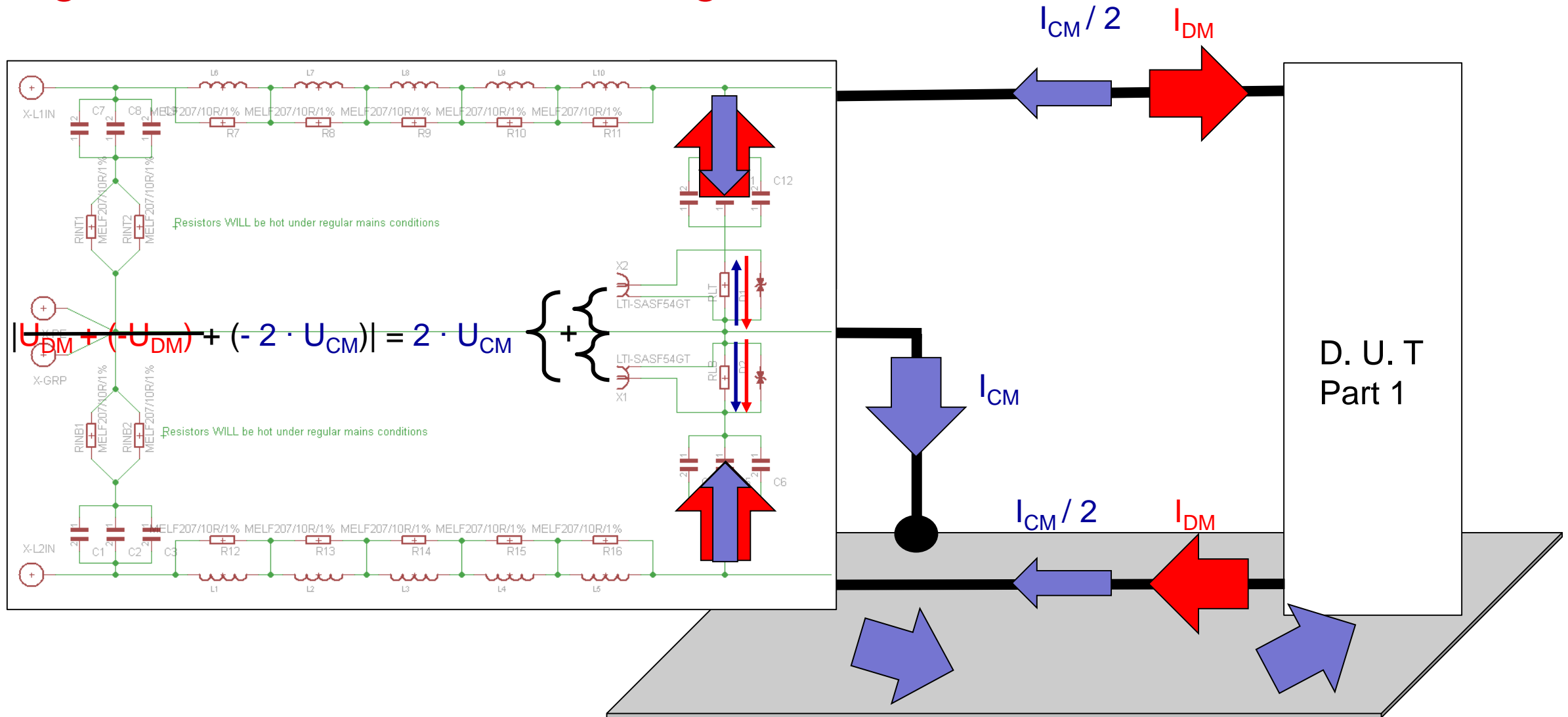
Fortgeschrittene Simulation...

Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen...



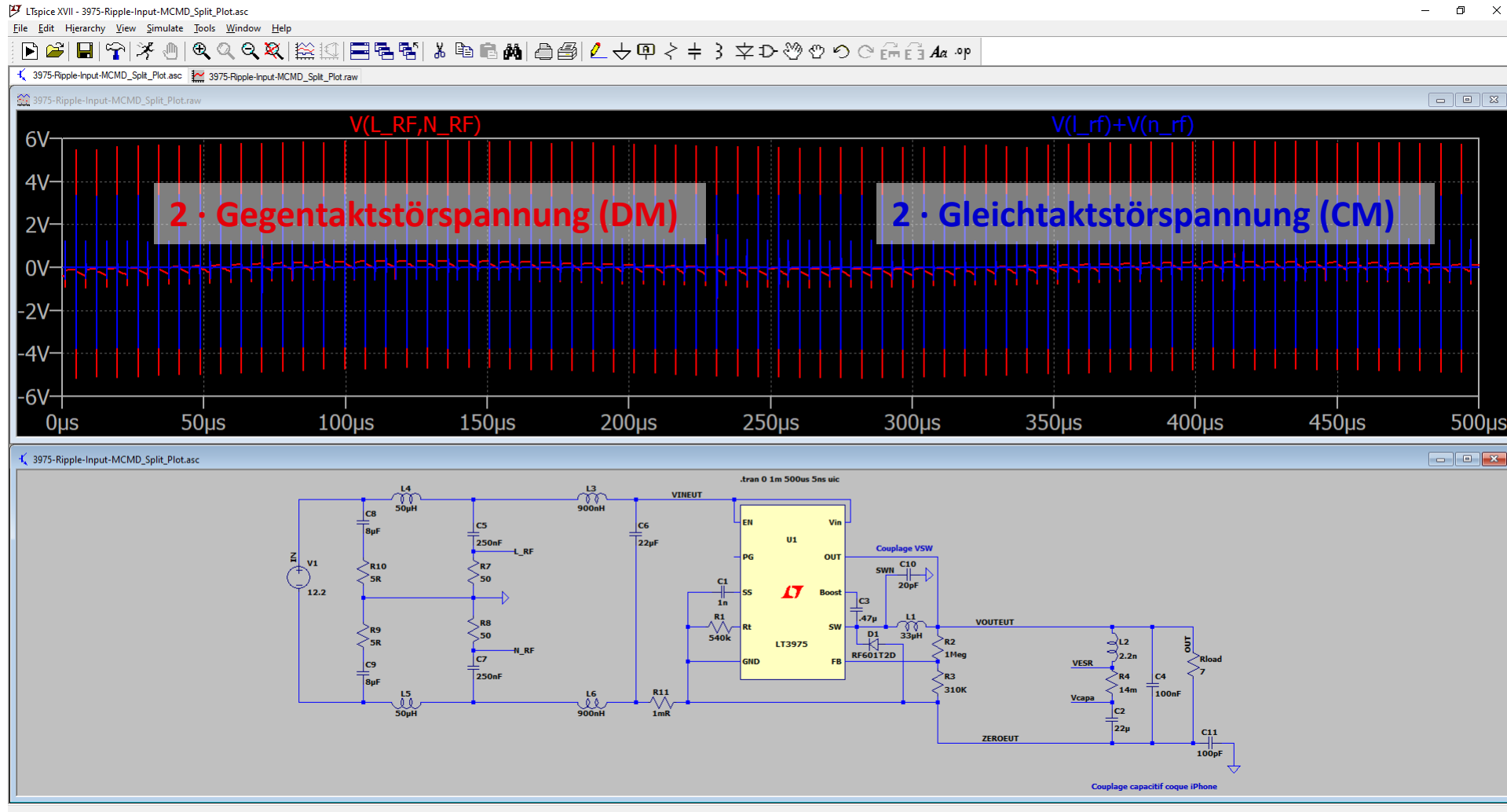
Fortgeschrittene Simulation...

Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen...



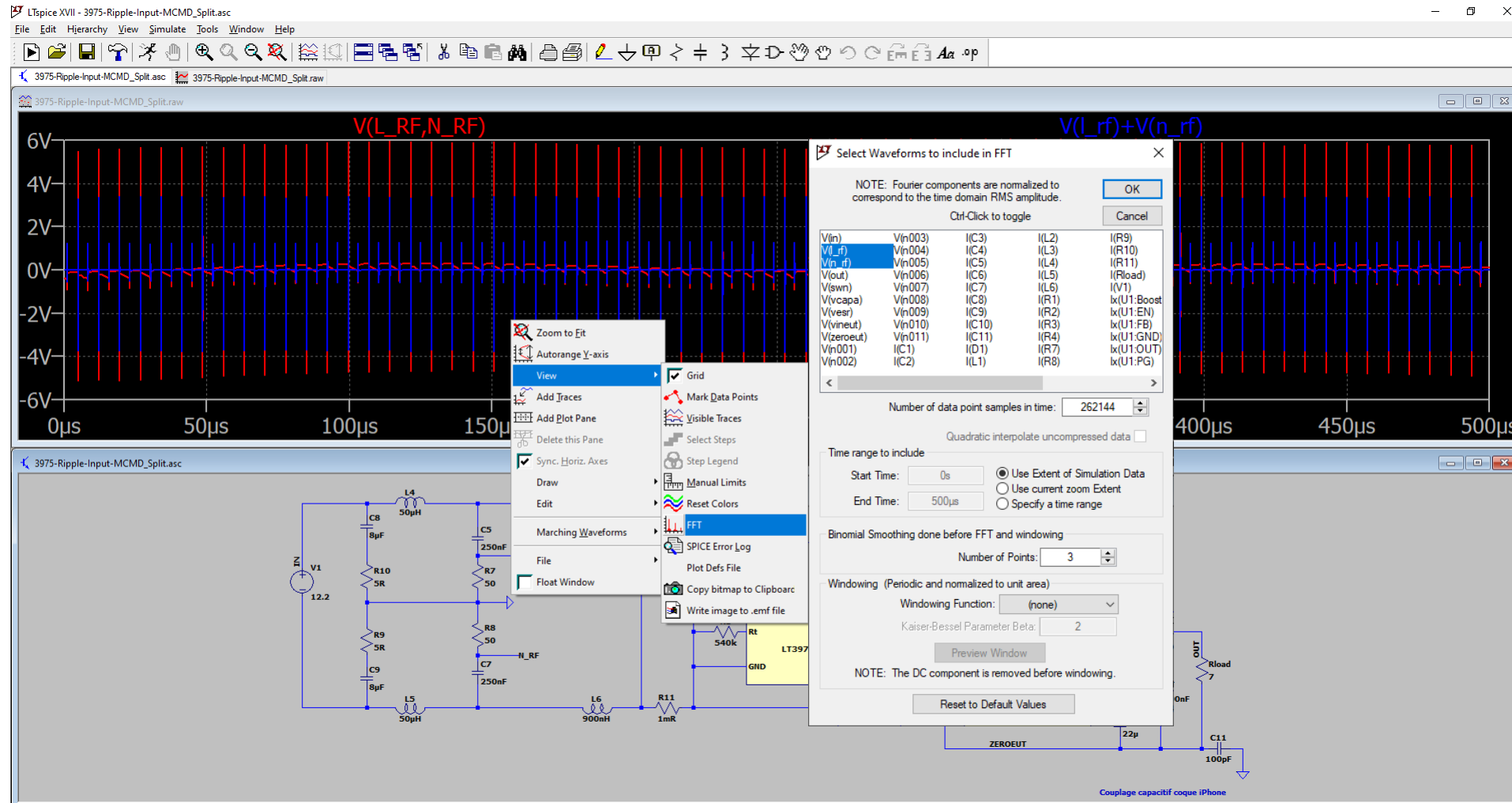
Fortgeschrittene Simulation...

Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen...



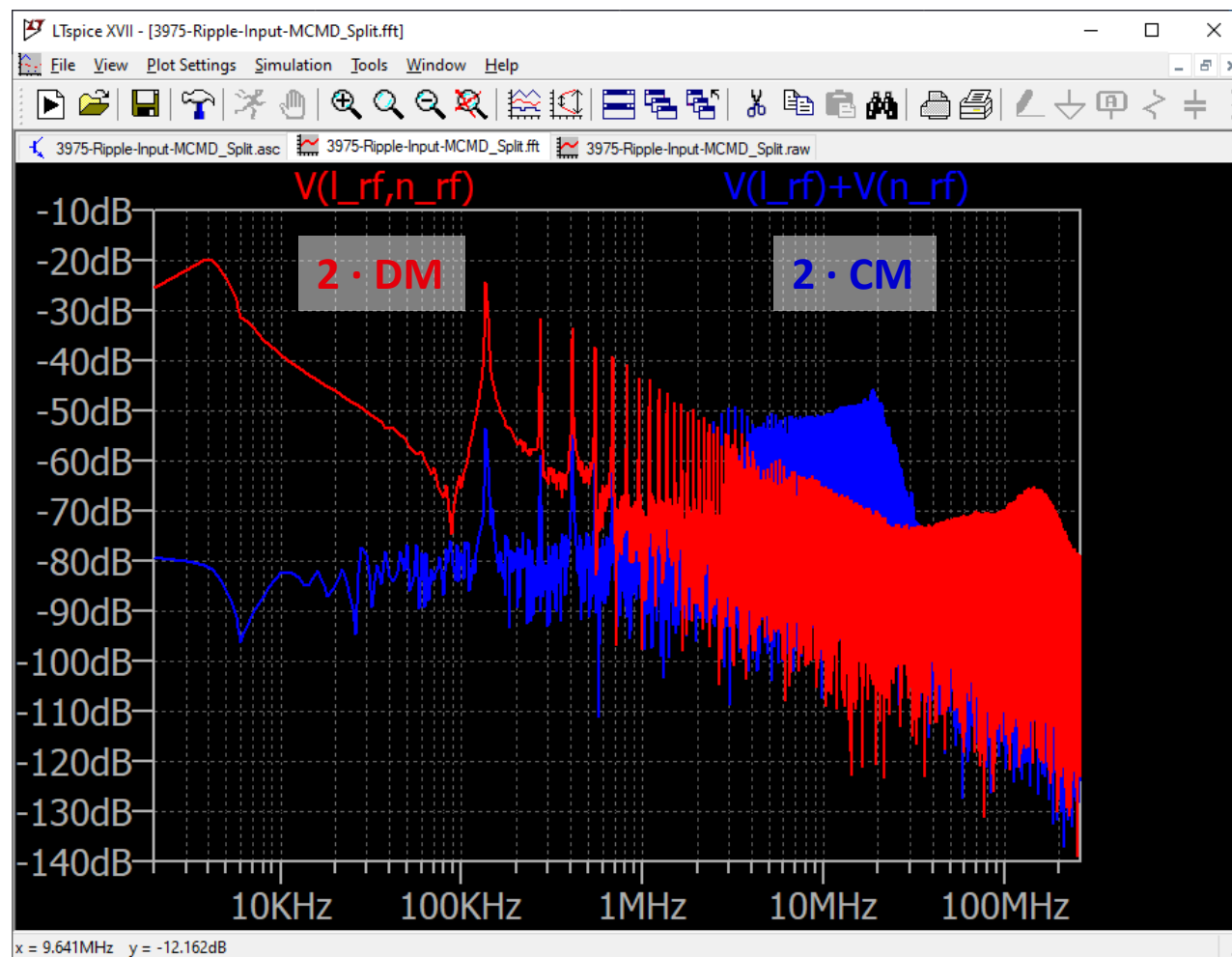
Fortgeschrittene Simulation...

Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen...



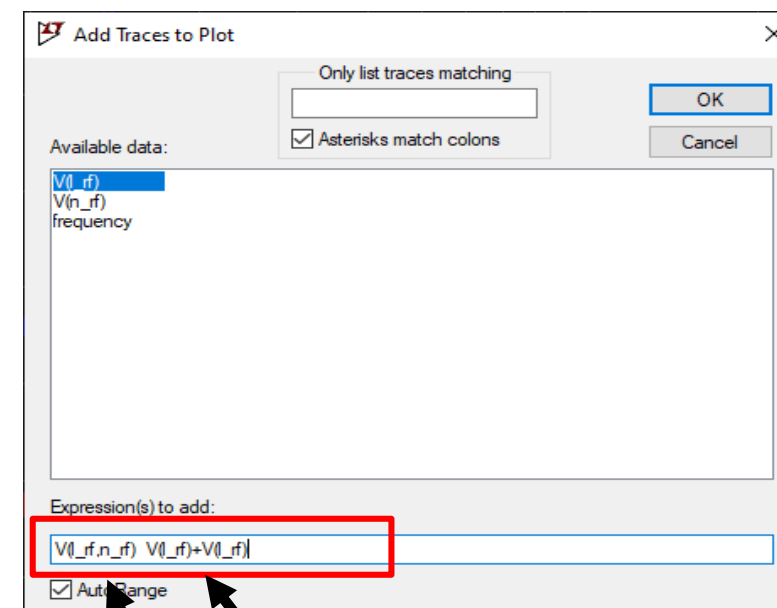
Fortgeschrittene Simulation...

Gegentakt- und Gleichtaktstörungen trennen...



Traces einfügen:

- rechts Klick
- Add Traces



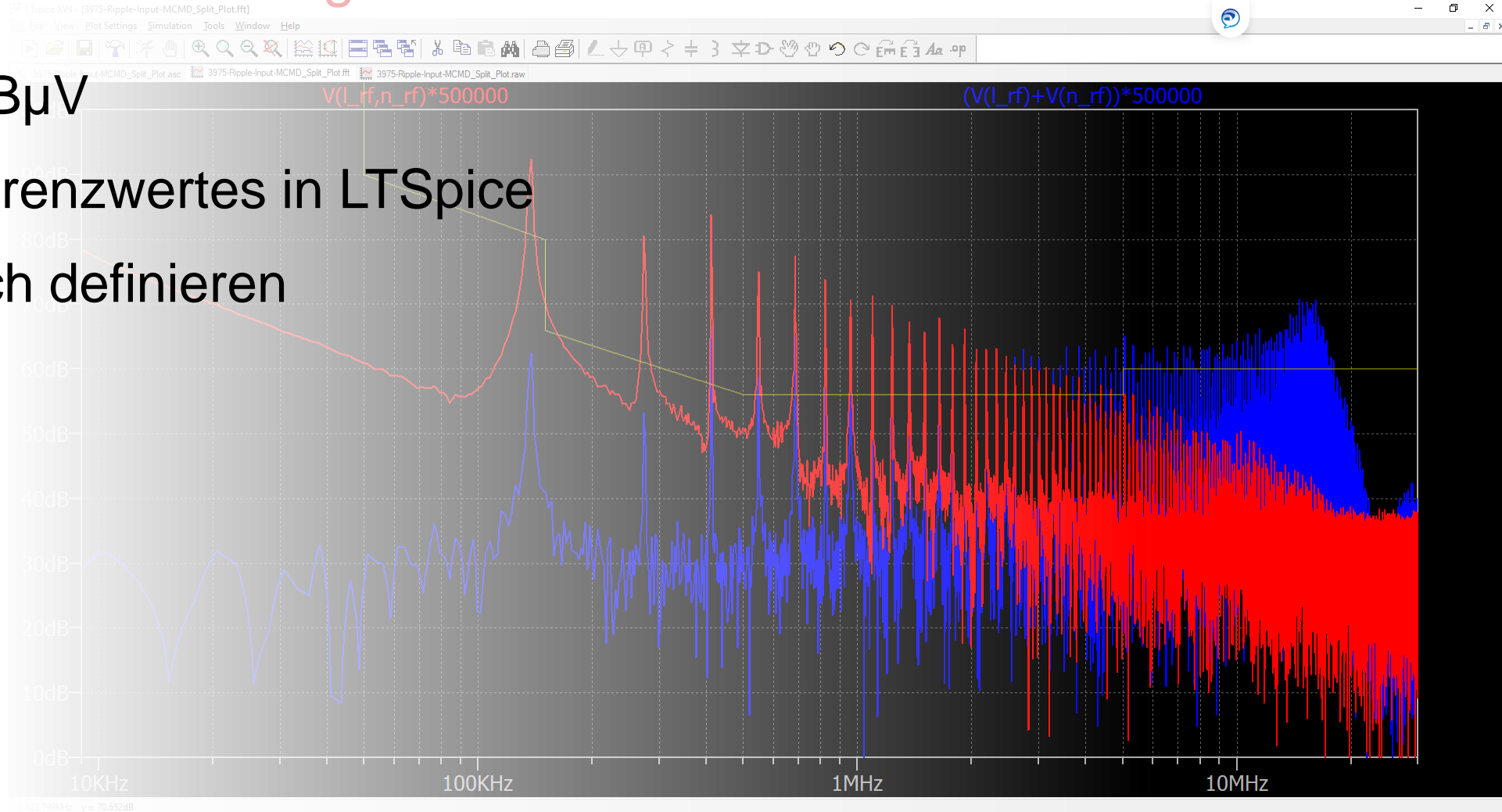
2 · DM 2 · CM

Fortgeschrittene Simulation...

Darstellung der Simulationsergebnisse

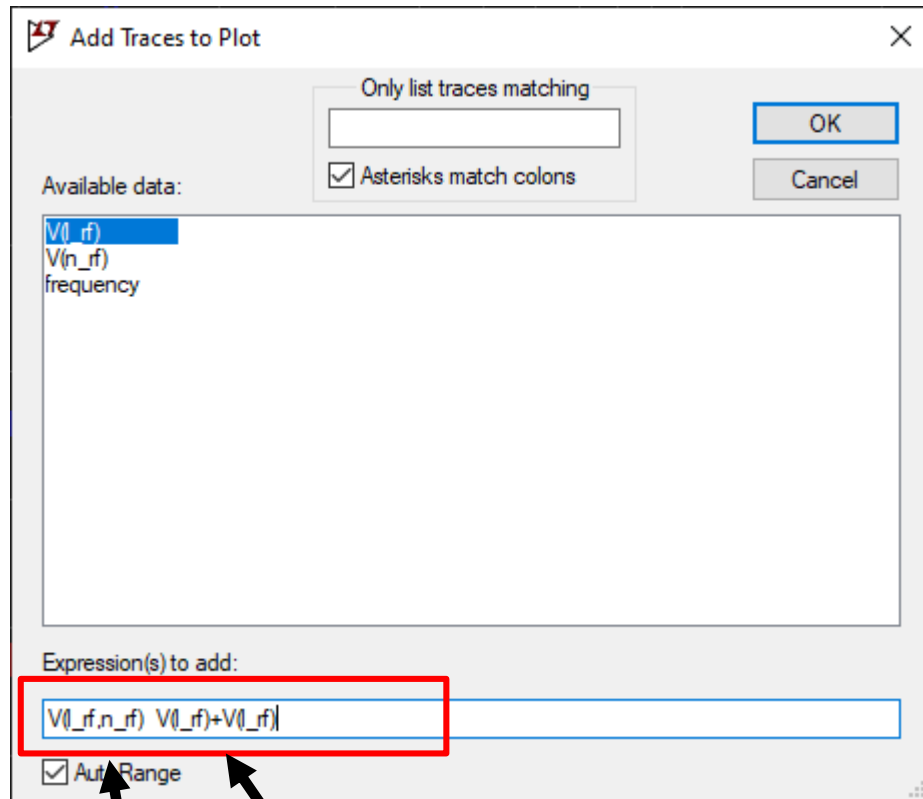


- Skalierung in dB μ V
- Einfügen des Grenzwertes in LTSpice
- Frequenzbereich definieren



Fortgeschrittene Simulation...

Darstellung der Simulationsergebnisse



2 · DM

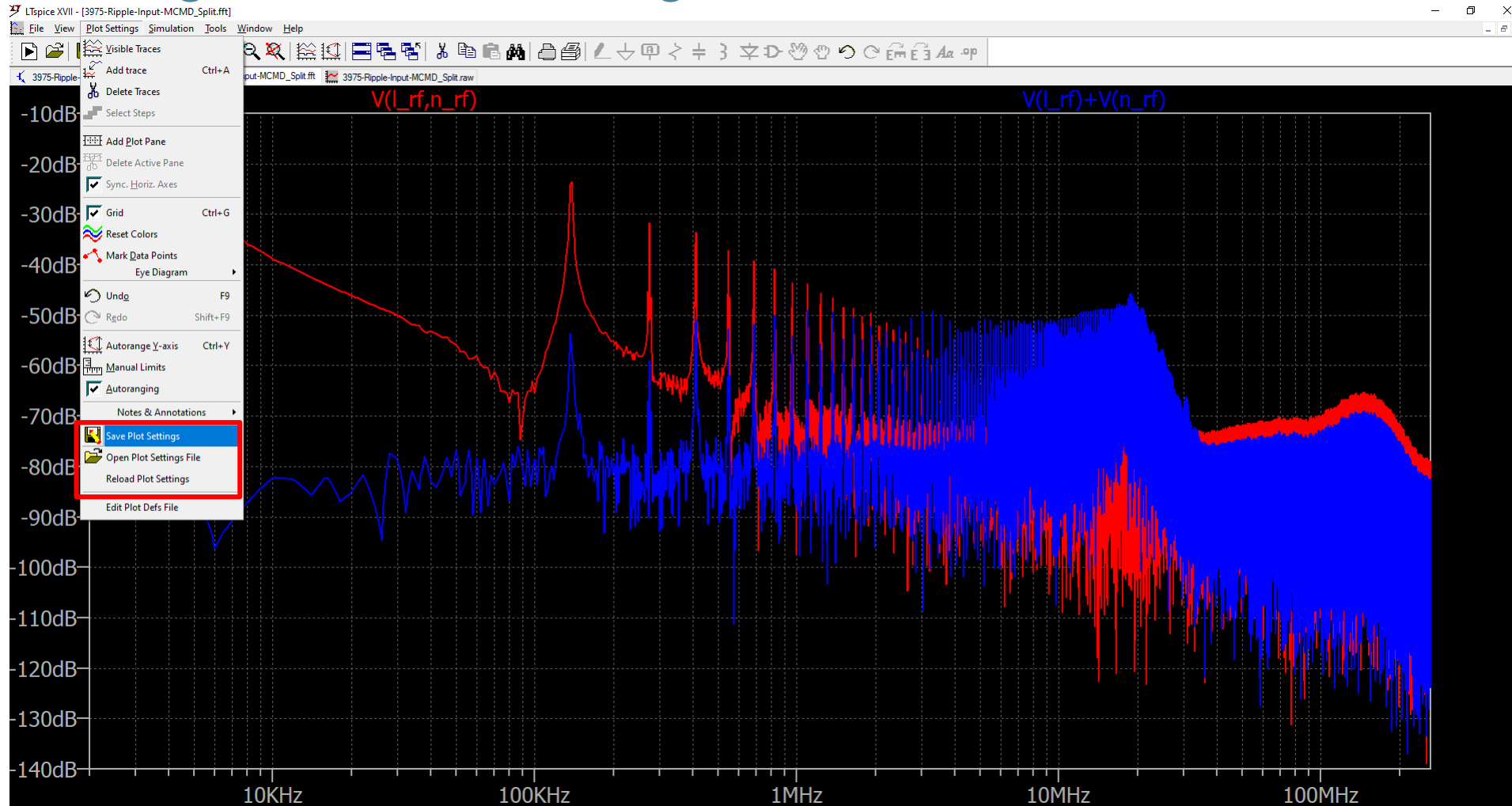
2 · CM

$$1V = 1000000\mu V$$

$$1dBV = 120dB\mu V$$

Fortgeschrittene Simulation...

Darstellung der Simulationsergebnisse



Fortgeschrittene Simulation...

Darstellung der Achsen

Messwerte

9kHz bis 30 MHz

0 bis 100dB μ V

```

3975-Ripple-Input-MCMD_Split_Plot.plt - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht Hilfe
[FFT of time domain data]
{
  Npanes: 1
  {
    traces: 2 {65540,0,"V(1_rf,n_rf)*500000"} {3,0,"(V(1_rf)+V(n_rf))*500000"}
    X: ('M',0,9000,2.9991e+006,3e+007)
    Y[0]: ('',0,1,10,100000)
    Y[1]: ('K',0,-77000,7000,7000)
    Log: 1 2 0
    GridStyle: 1
    PltMag: 1
    Line: "dB" 13 0 (9000,316227.766016838) (50000,316227.766016838)
    Line: "dB" 13 0 (50000,316227.766016838) (50000,31622.7766016838)
    Line: "dB" 13 0 (50000,31622.7766016838) (150000,10000)
    Line: "dB" 13 0 (150000,10000) (150000,1995.26231496888)
    Line: "dB" 13 0 (150000,1995.26231496888) (500000,630.957344480193)
    Line: "dB" 13 0 (500000,630.957344480193) (5000000,630.957344480193)
    Line: "dB" 13 0 (5000000,630.957344480193) (5000000,1000)
    Line: "dB" 13 0 (5000000,1000) (30000000,1000)
  }
}
Ze 2, Sp 2      100%      Unix (LF)      UTF-16 LE

```

Fortgeschrittene Simulation...

Darstellung des Grenzwertes



Line	Start	End	Amp dB μ V start	Amp dB μ V stop	Line def for LTSPICE
1	9000	50000	110	110	Line: "dB" 13 0 (9000,316227.766016838) (50000,316227.766016838)
2	50000	50000	110	90	Line: "dB" 13 0 (50000,316227.766016838) (50000,31622.7766016838)
3	50000	150000	90	80	Line: "dB" 13 0 (50000,31622.7766016838) (150000,10000)
4	150000	150000	80	66	Line: "dB" 13 0 (150000,10000) (150000,1995.26231496888)
5	150000	500000	66	56	Line: "dB" 13 0 (150000,1995.26231496888) (500000,630.957344480193)
6	500000	5000000	56	56	Line: "dB" 13 0 (500000,630.957344480193) (5000000,630.957344480193)
7	5000000	5000000	56	60	Line: "dB" 13 0 (5000000,630.957344480193) (5000000,1000)
8	5000000	3E+07	60	60	Line: "dB" 13 0 (5000000,1000) (30000000,1000)

Grenzwert laut
Norm

```

3975-Ripple-Input-MCMD_Split_Plot.plt - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht Hilfe
[FFT of time domain data]
{
  Npanes: 1
  {
    traces: 2 {65540,0,"V(1_rf,n_rf)*500000"} {3,0,"(V(1_rf)+V(n_rf))*500000"}
    X: ('M',0,9000,2.9991e+006,3e+007)
    Y[0]: ('',0,1,10,100000)
    Y[1]: ('K',0,-77000,7000,7000)
    Log: 1 2 0
    GridStyle: 1
    PltMag: 1
    Line: "dB" 13 0 (9000,316227.766016838) (50000,316227.766016838)
    Line: "dB" 13 0 (50000,316227.766016838) (50000,31622.7766016838)
    Line: "dB" 13 0 (50000,31622.7766016838) (150000,10000)
    Line: "dB" 13 0 (150000,10000) (150000,1995.26231496888)
    Line: "dB" 13 0 (150000,1995.26231496888) (500000,630.957344480193)
    Line: "dB" 13 0 (500000,630.957344480193) (5000000,630.957344480193)
    Line: "dB" 13 0 (5000000,630.957344480193) (5000000,1000)
    Line: "dB" 13 0 (5000000,1000) (30000000,1000)
  }
}

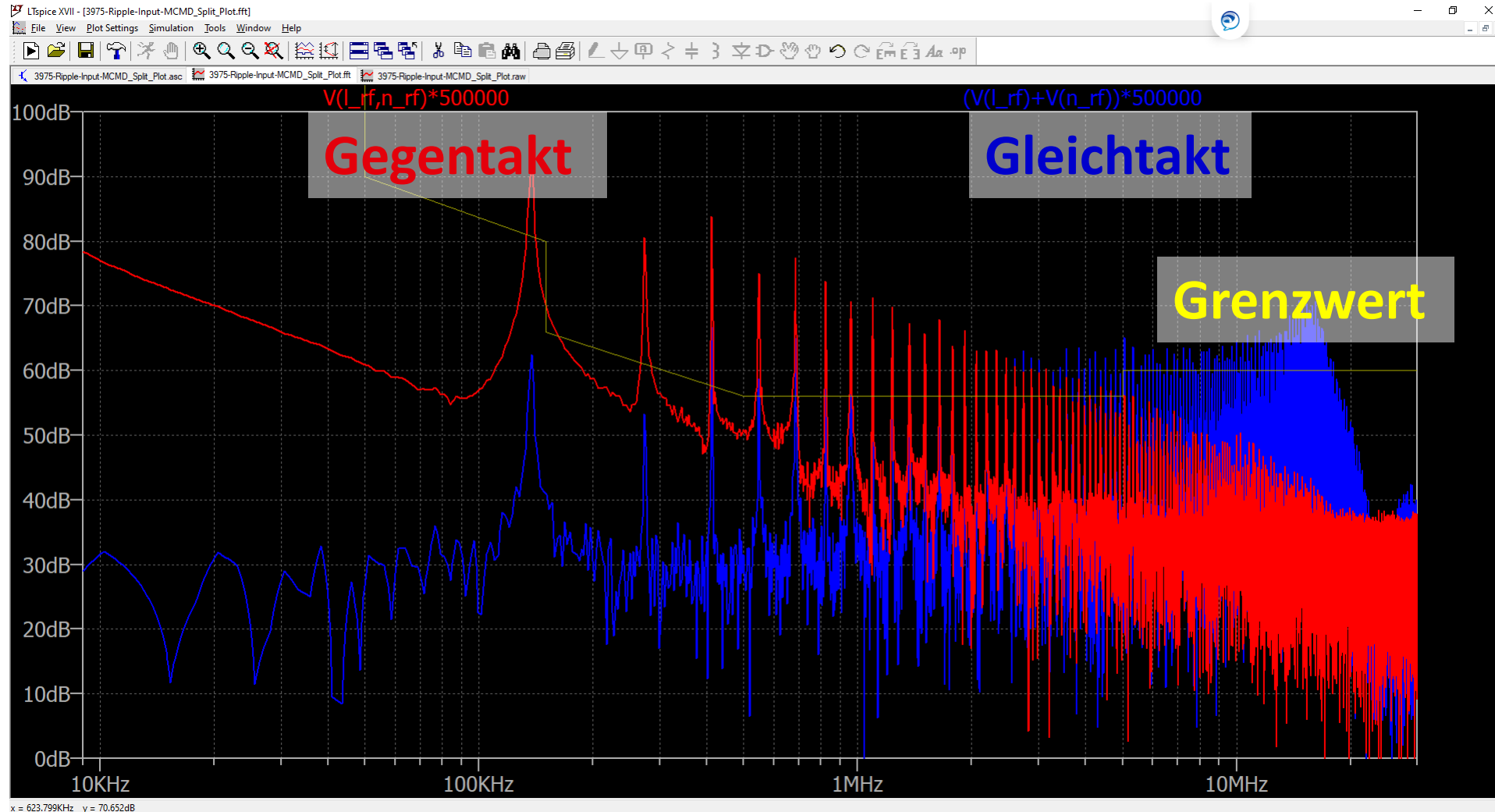
```

hier einfügen

kopieren

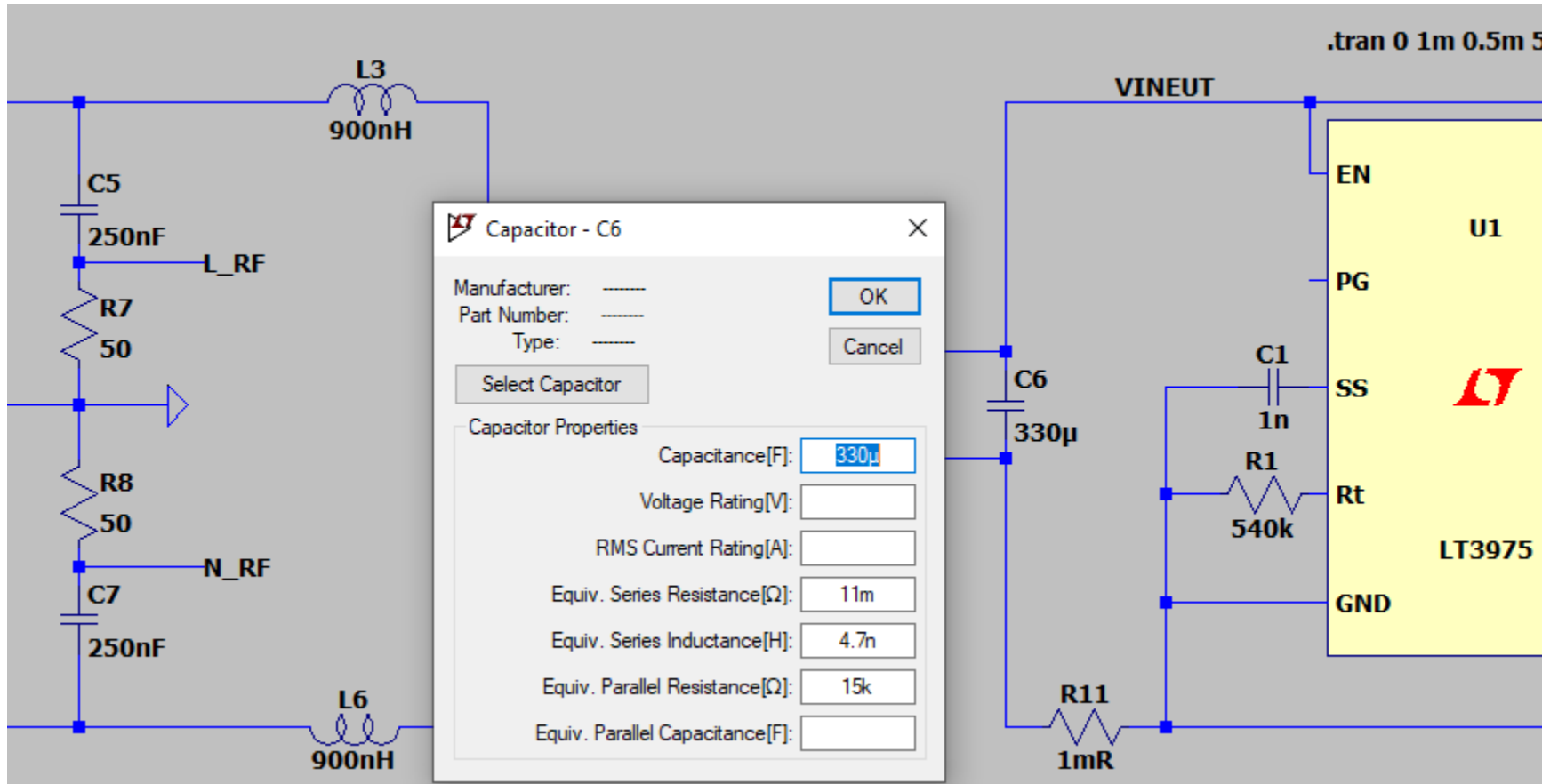
Fortgeschrittene Simulation...

Darstellung der Simulationsergebnisse – Gelungenes Ergebnis



EMV-Filter Design mit LTSpice

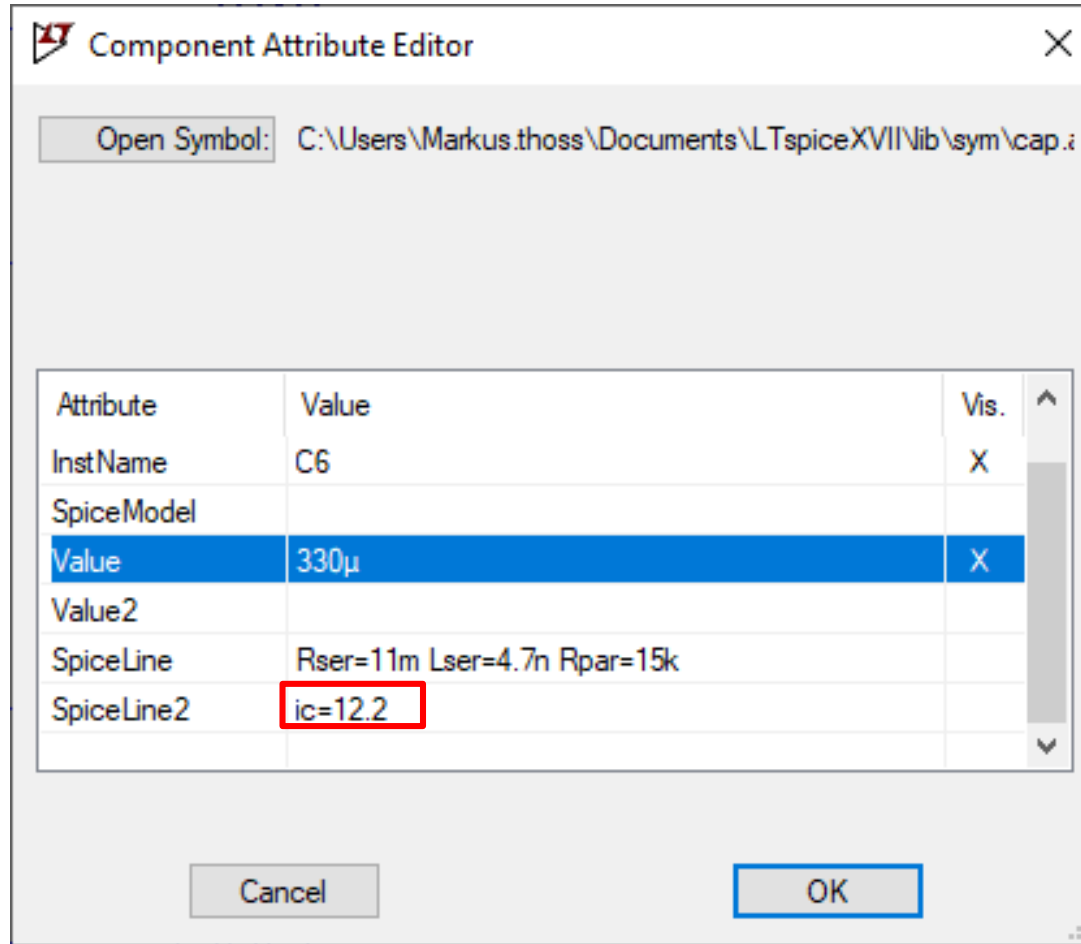
Polymerkondensator



C6 = 330µF/35V
 WCAP-PSLC
 875075661010

EMV-Filter Design mit LTSpice

Gut zu wissen – Simulation beschleunigen

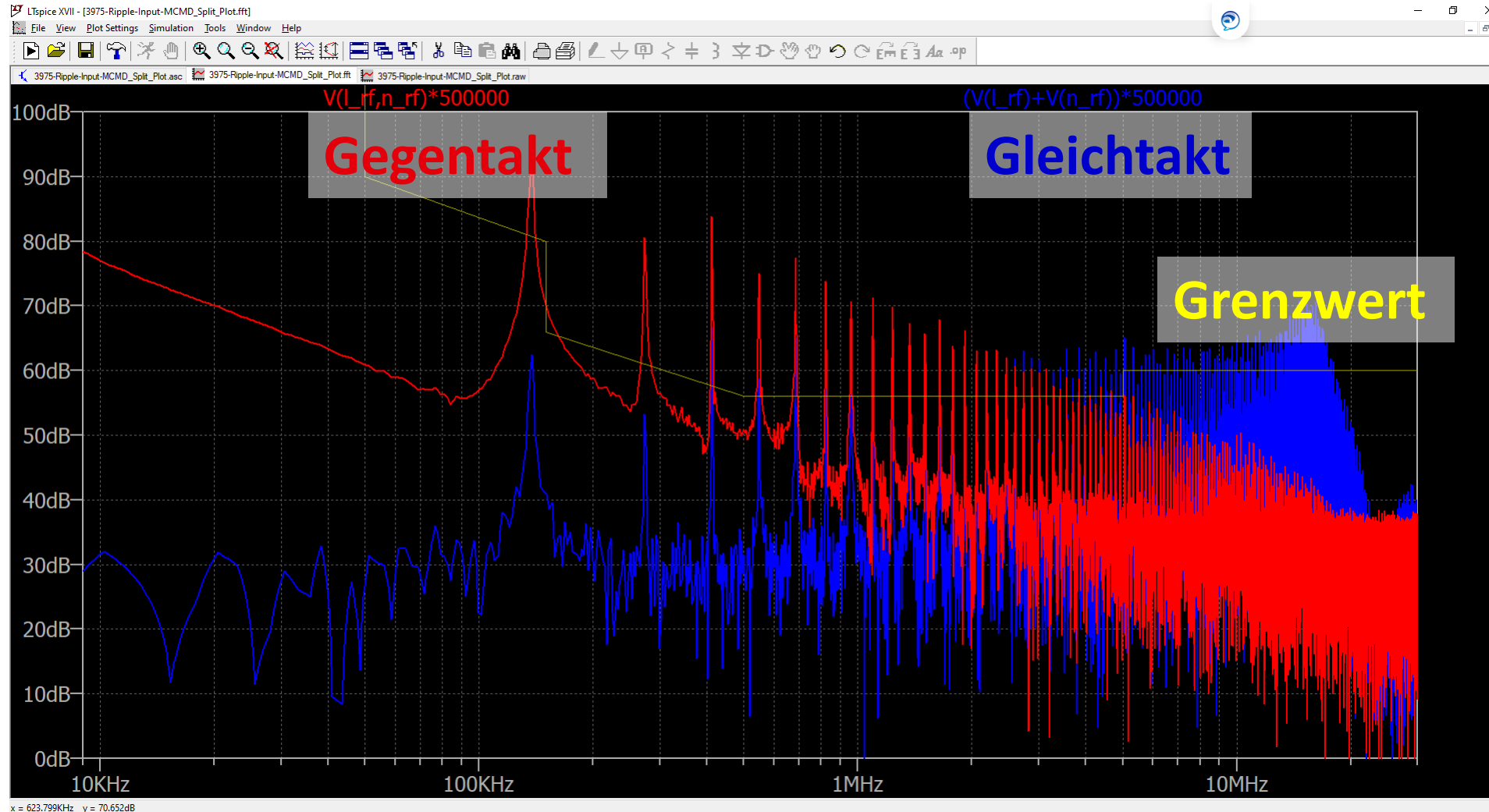


Initialzustand setzen:

- Strg + Rechts Klick
- SpiceLine2
 - ic=12.2V

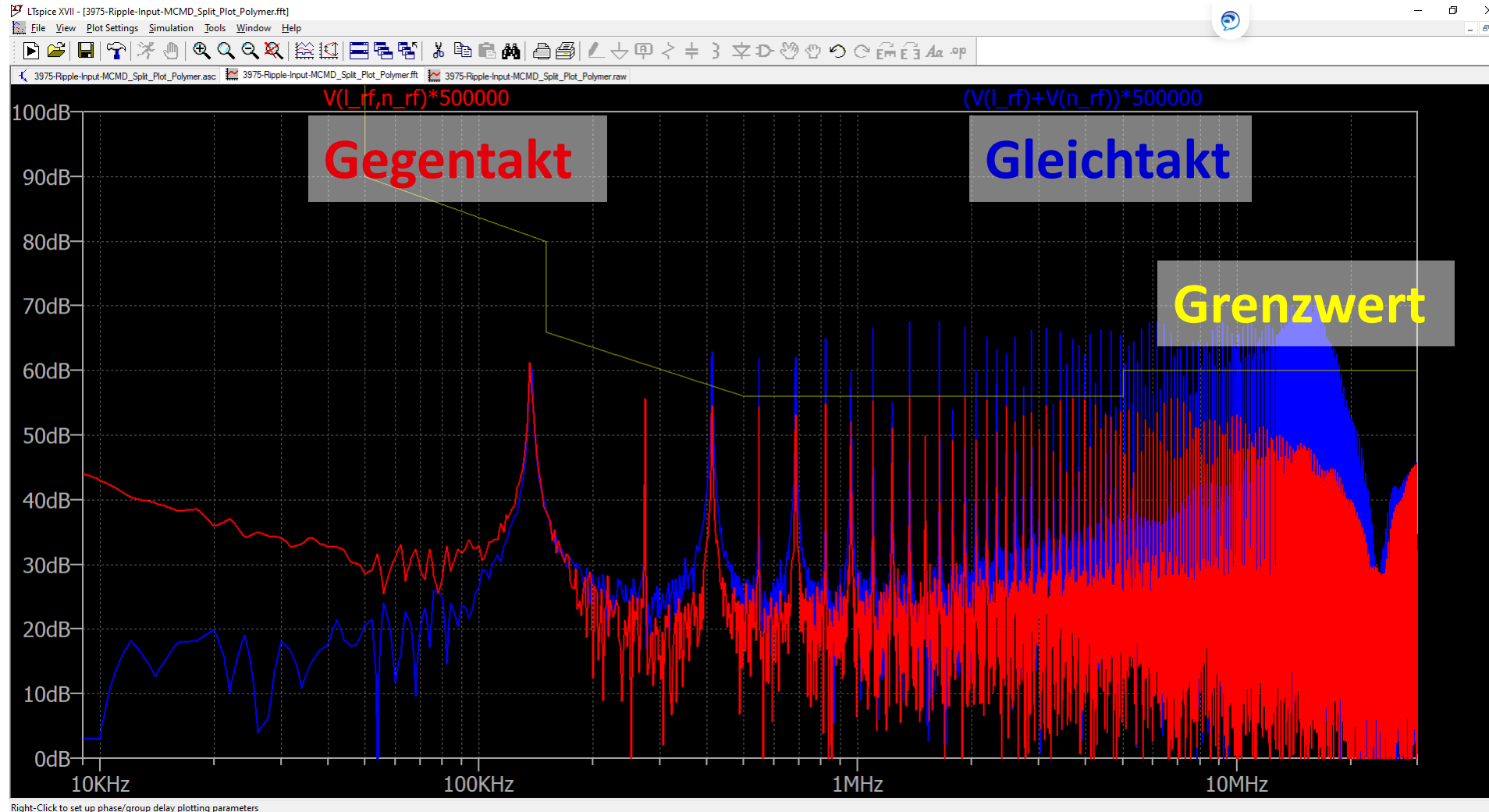
EMV-Filter Design mit LTSpice

Ohne Polymerkondensator



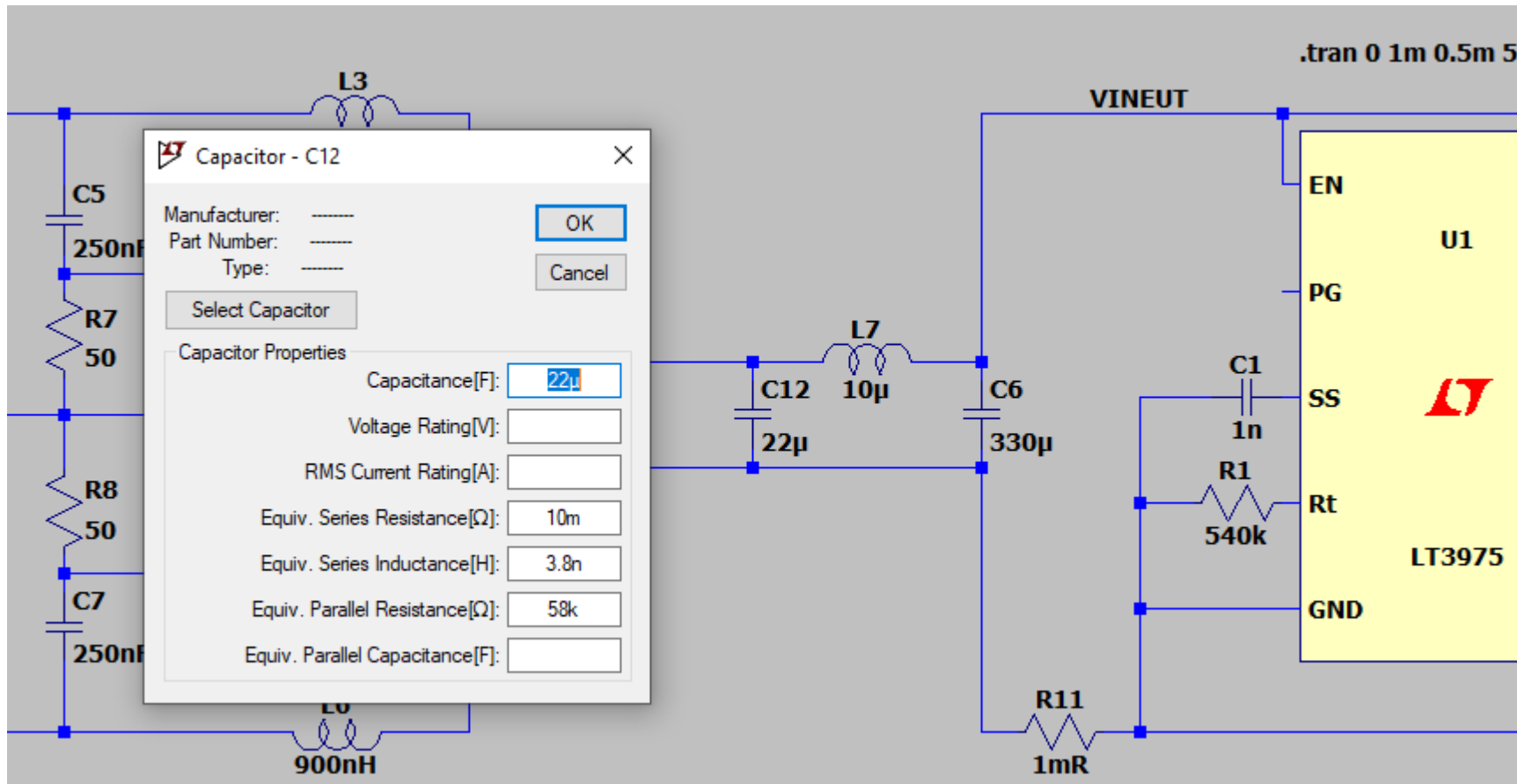
EMV-Filter Design mit LTSpice

Mit Polymerkondensator



EMV-Filter Design mit LTSpice

LC-Filter



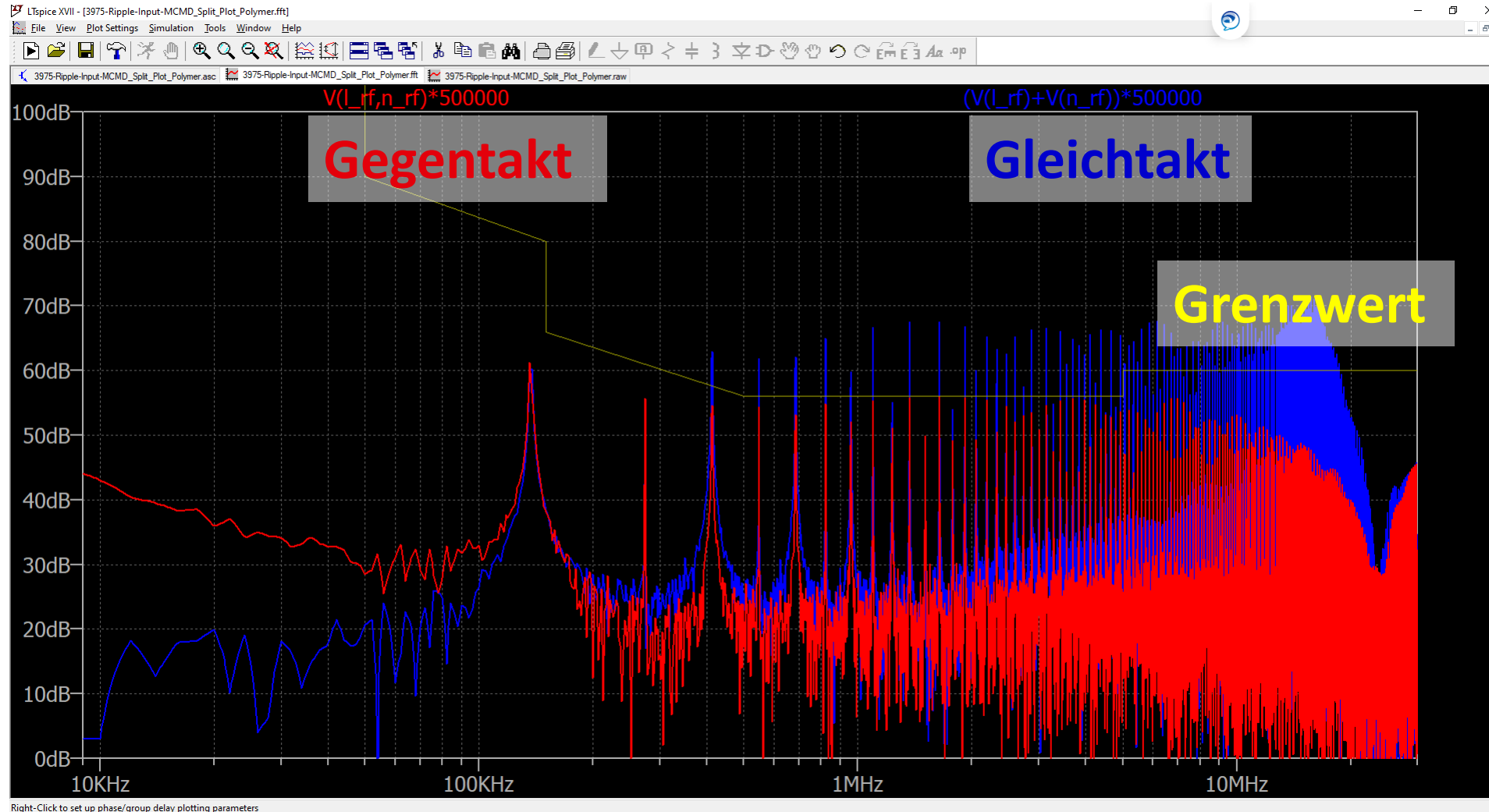
C6 = 330 μ F/35V
WCAP-PSLC
875075661010

L7 = 10 μ H/1.42A
WE-PD2
74477310

C12 = 22 μ F/35V
WCAP-PSHP
875115655011

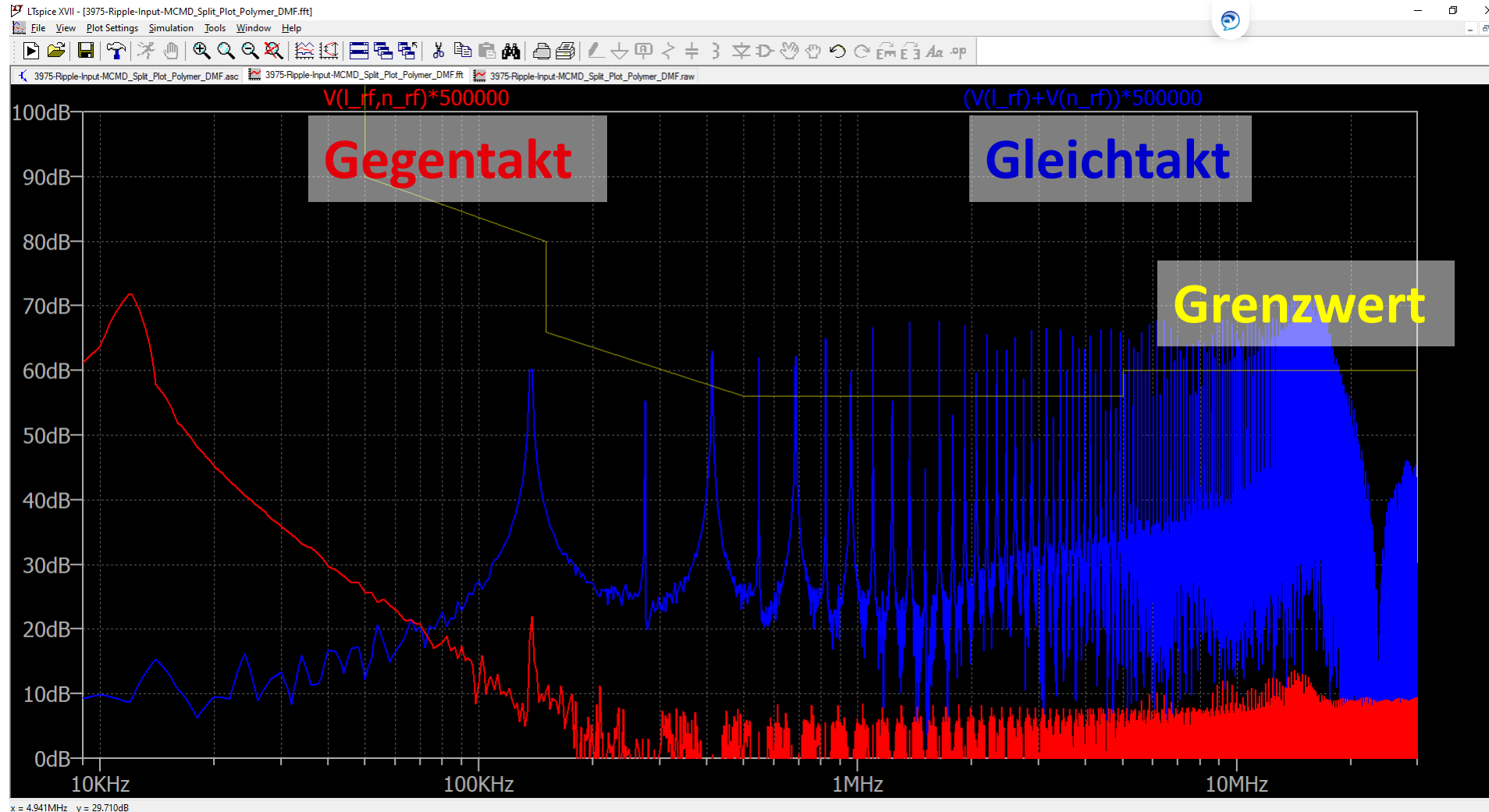
EMV-Filter Design mit LTSpice

Ohne LC-Filter



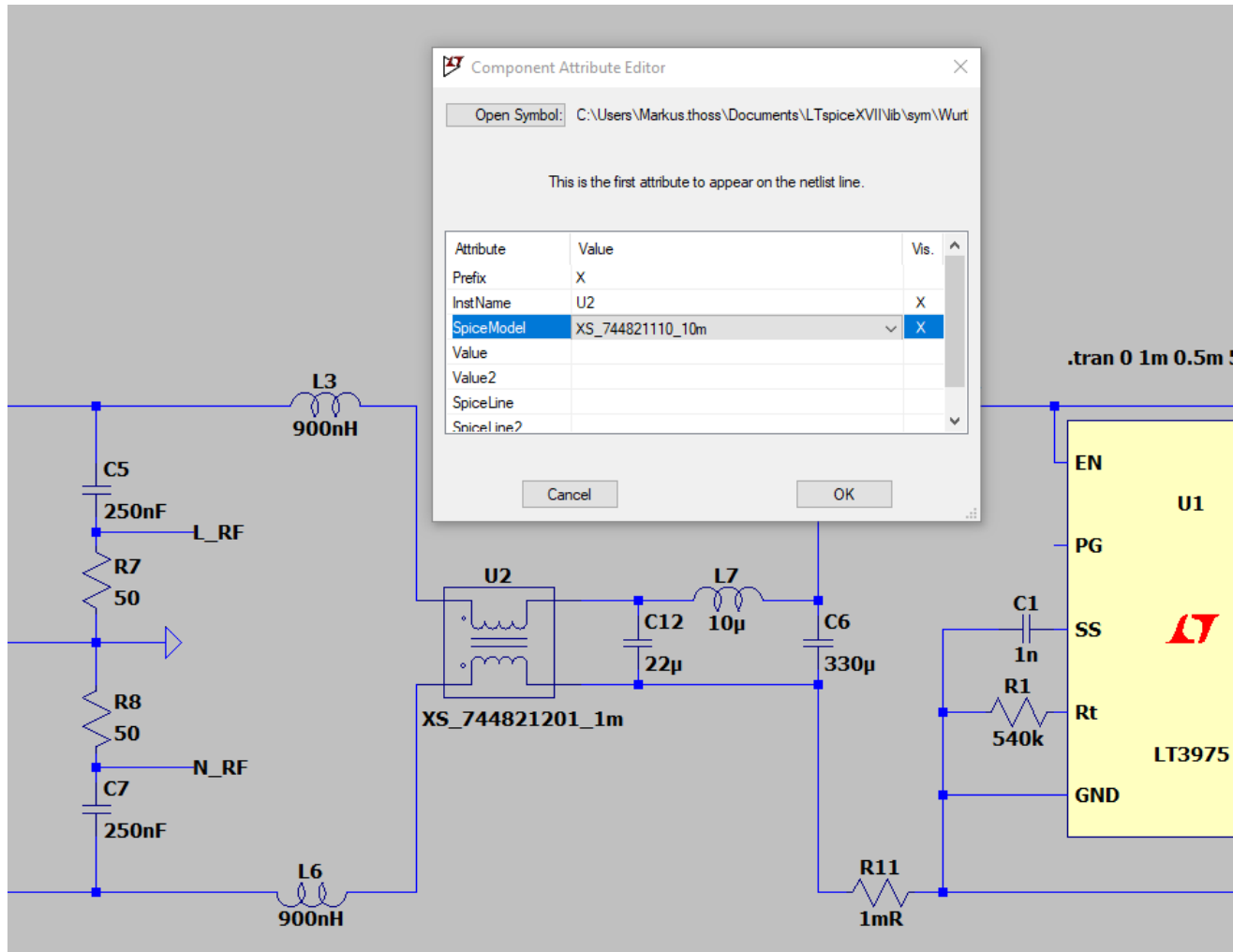
EMV-Filter Design mit LTSpice

Mit LC-Filter



EMV-Filter Design mit LTSpice

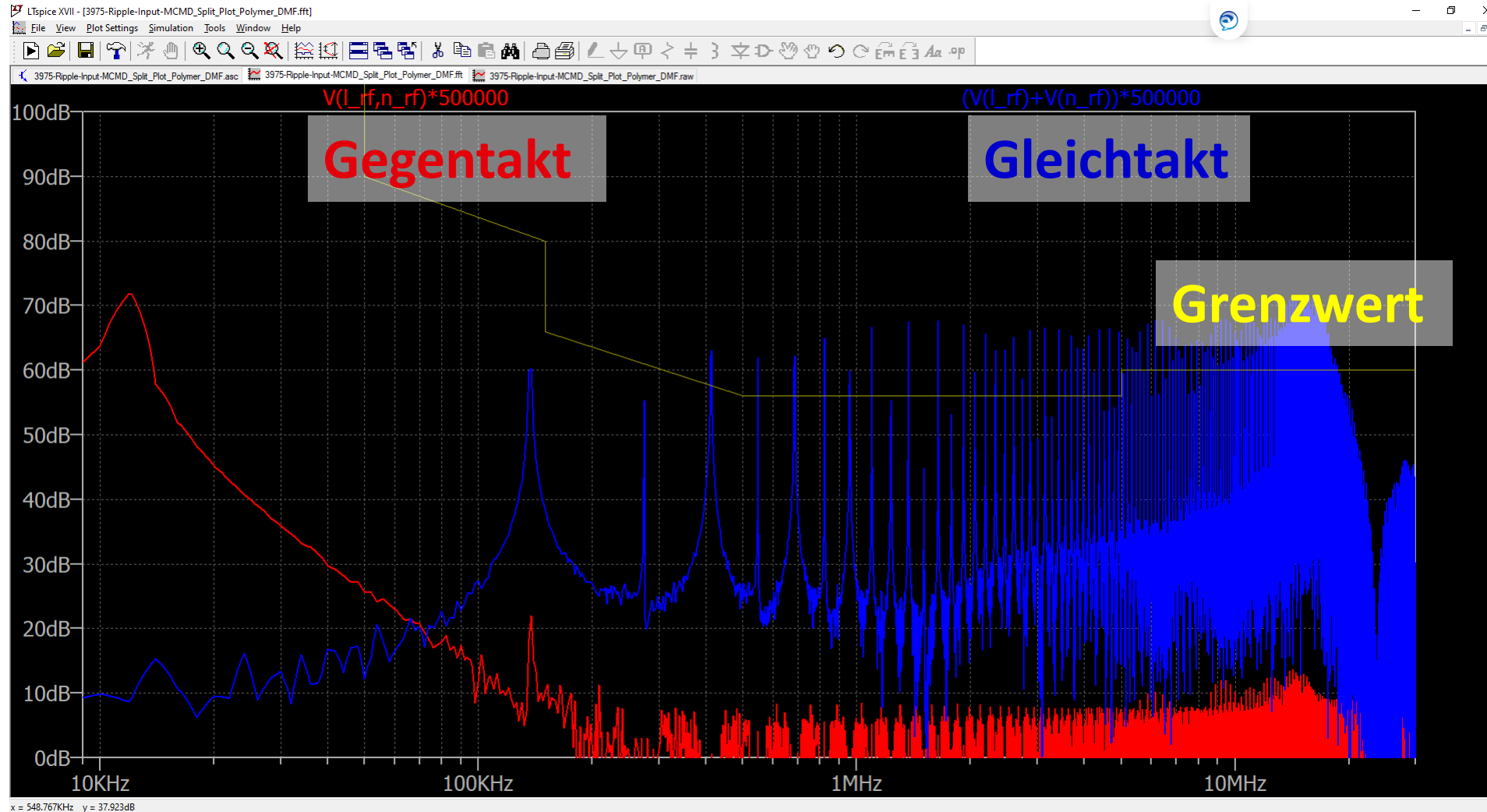
Gleichtaktdrossel



U2 = 2 x 10mH/0.7A
 WE-CMB XS
 744821110

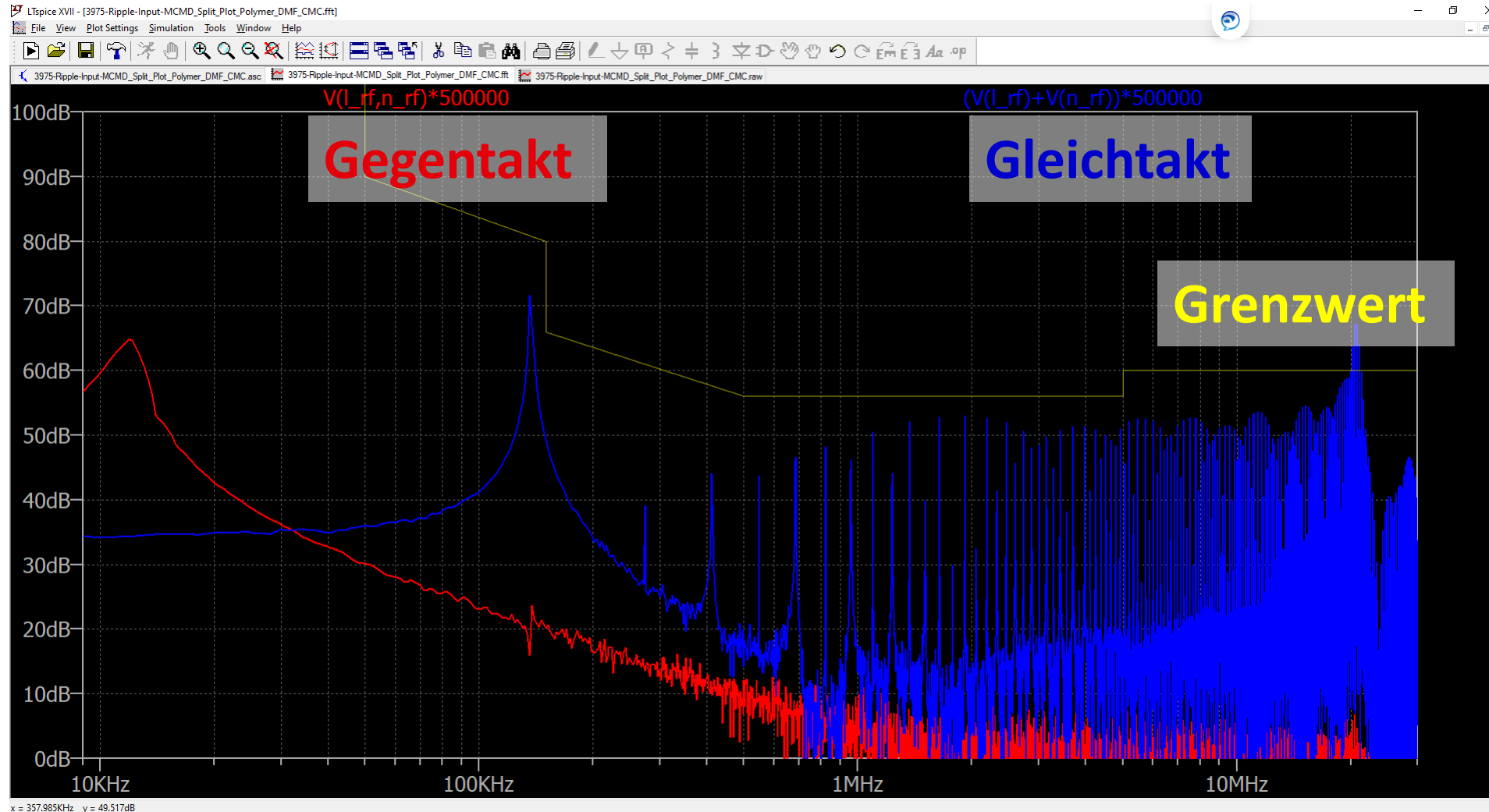
EMV-Filter Design mit LTSpice

Ohne Gleichtaktdrossel



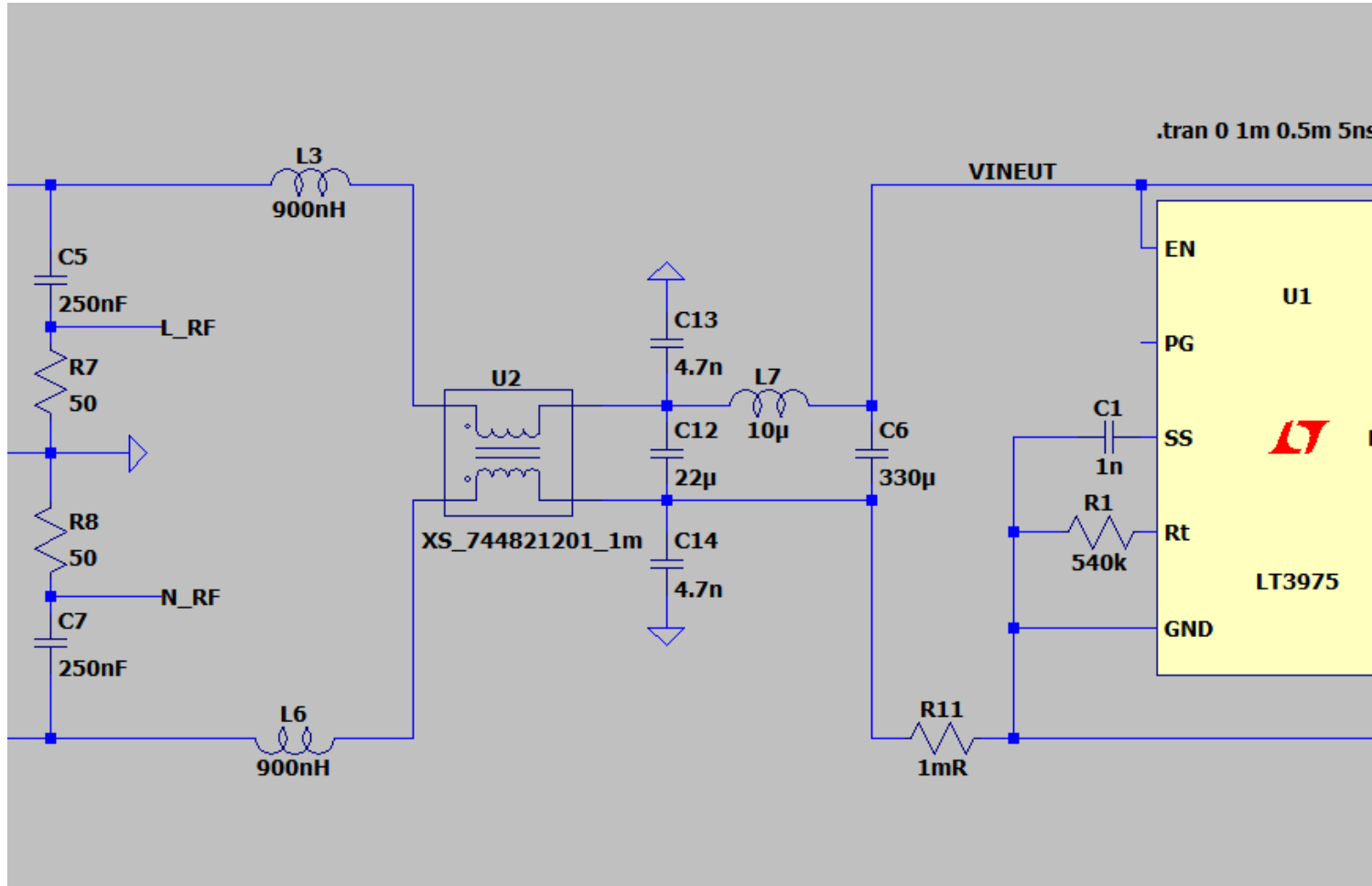
EMV-Filter Design mit LTSpice

Mit Gleichtaktdrossel



EMV-Filter Design mit LTSpice

Y-Kondensatoren

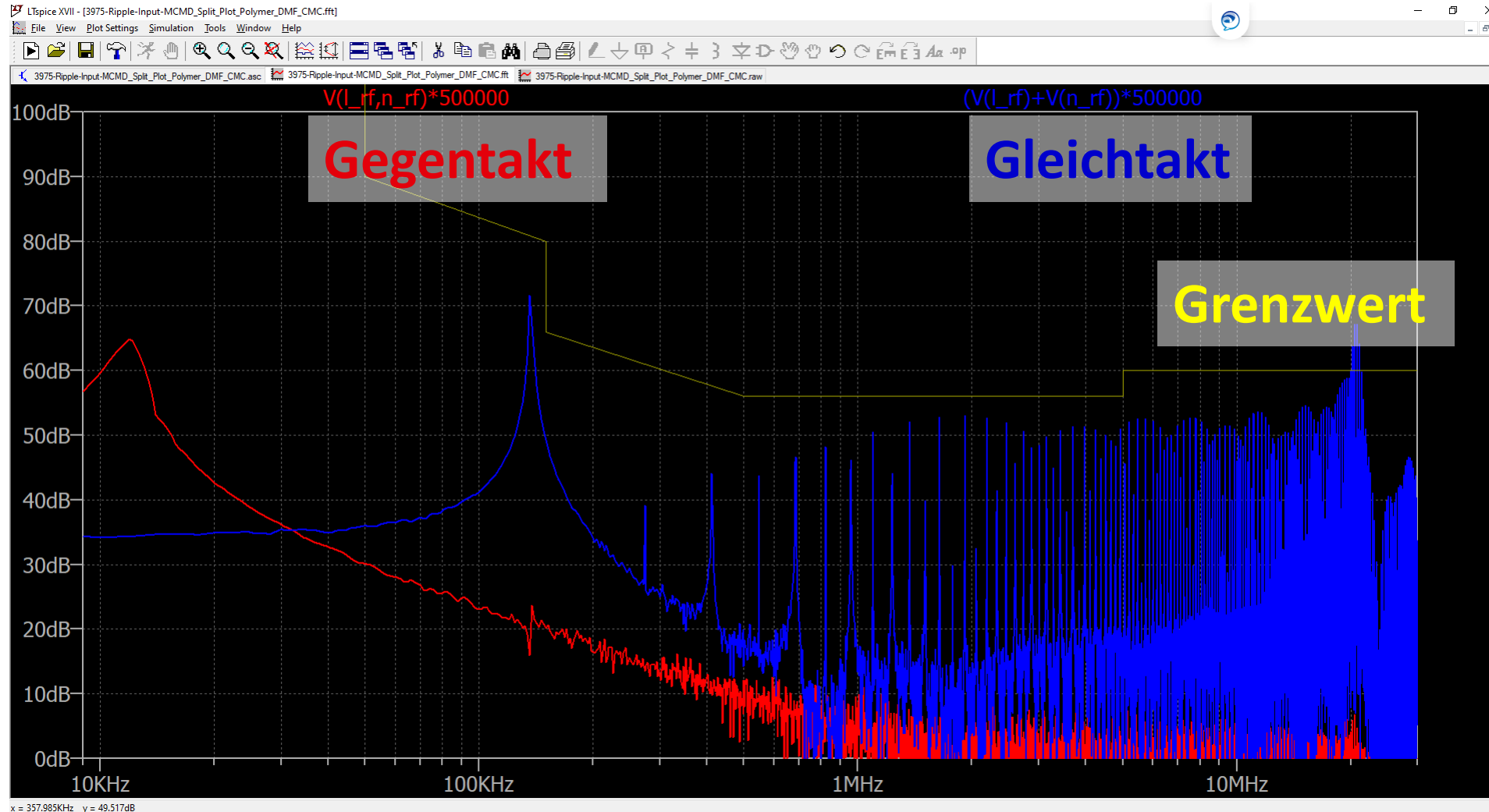


U2 = 2 x 10mH/0.7A
 WE-CMB XS
 744821110

C13-14 = 4.7nF/250VAC
 WCAP-CSSA MLCC
 8853522140011

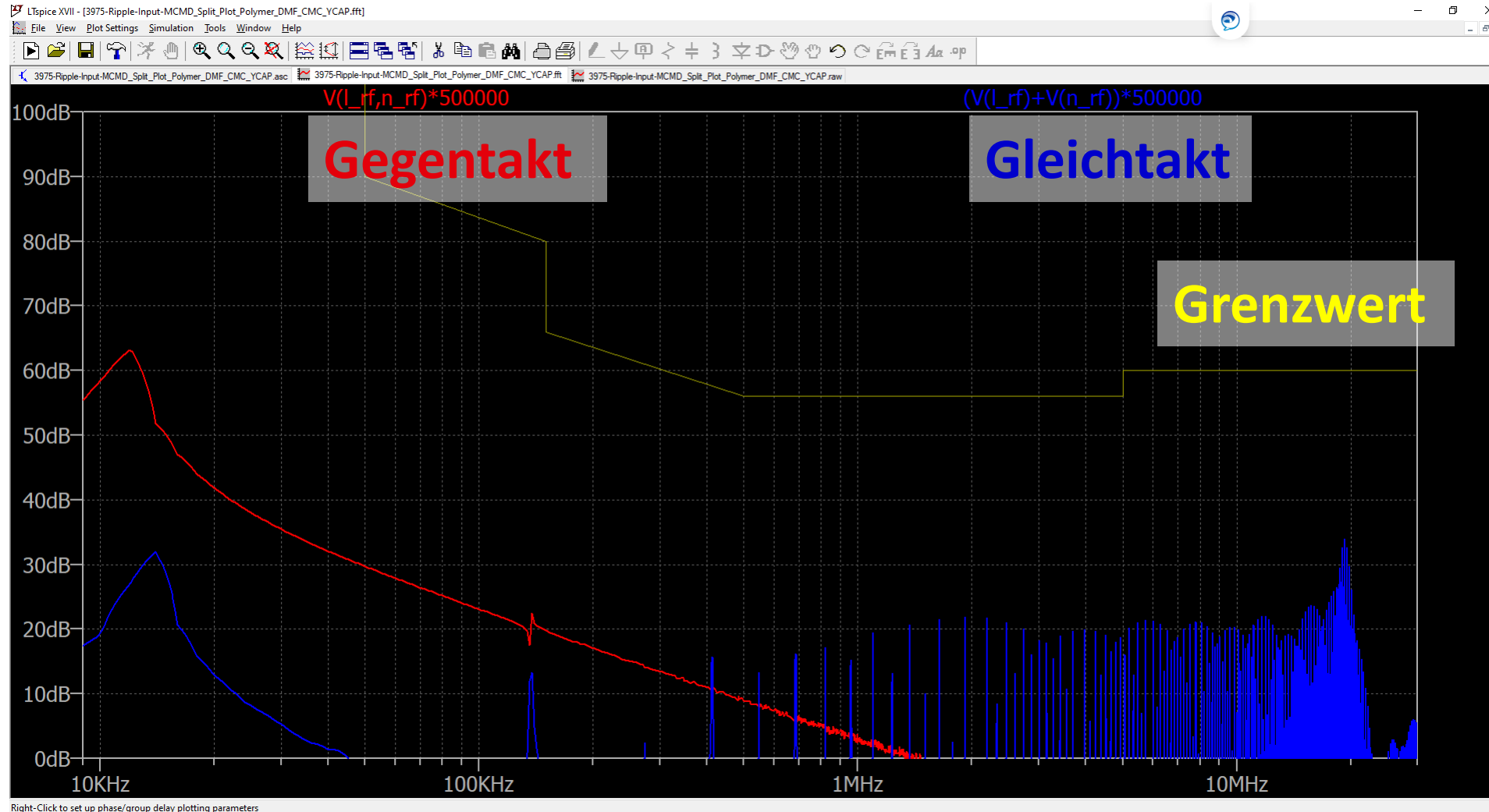
EMV-Filter Design mit LTSpice

Ohne Y-Kondensatoren



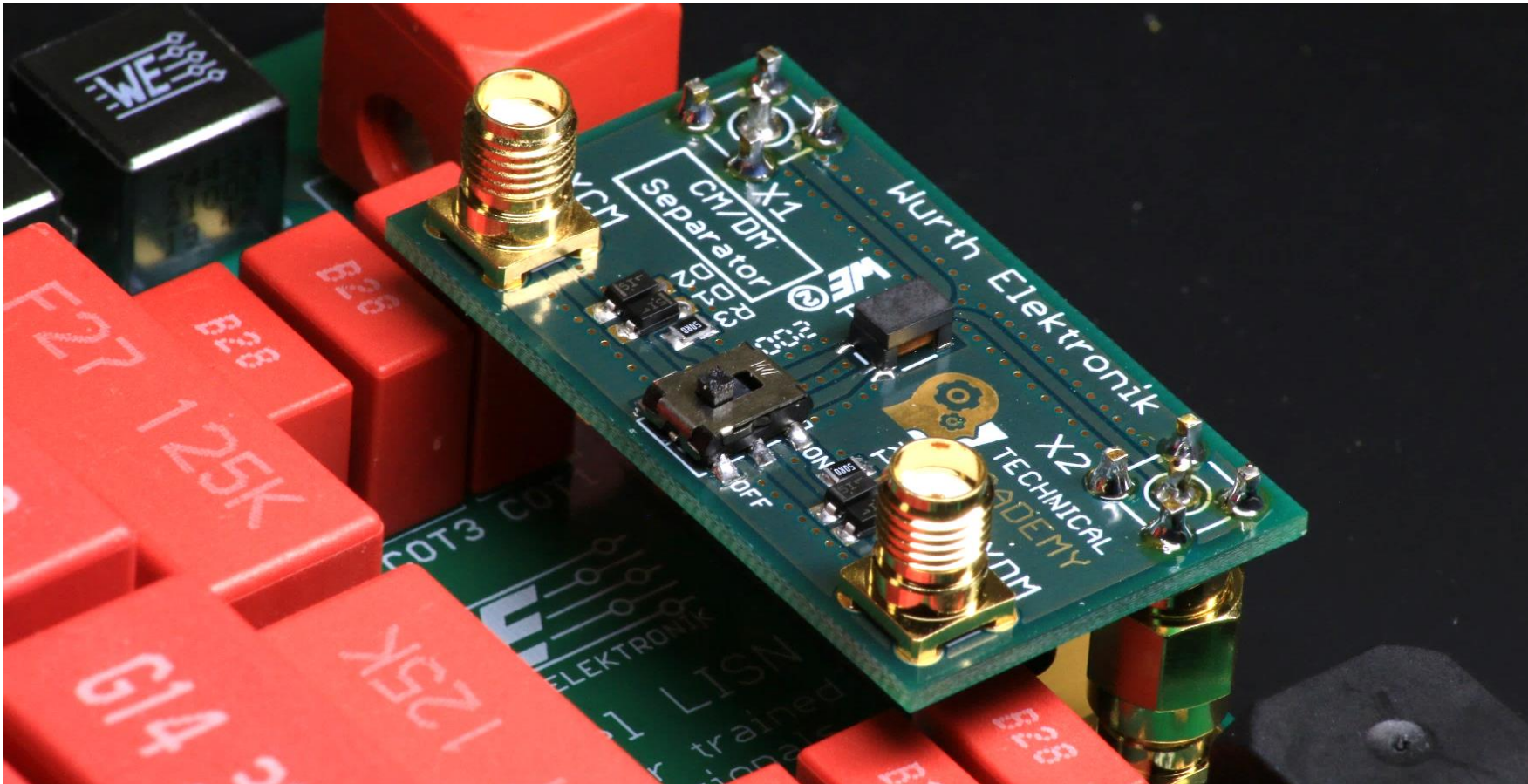
EMV-Filter Design mit LTSpice

Mit Y-Kondensatoren



Zurück zur Realität

Gleichtakt- / Gegentakttrennung mit Netznachbildung



WE-STST
74930000

Toolbox

LTSpice-Modelle finden



WE WÜRTH ELEKTRONIK

Home Karriere Kontakt Deutsch more than you expect

Suche

Elektronische & Elektromechanische Bauelemente Leiterplatten Intelligente Power- und Steuerungssysteme Würth Elektronik Gruppe

Elektronische & Elektromechanische Bauelemente Produkte & Services

Willkommen

Produkte & Services

Online Katalog

Neuprodukte

Innovationen

Applikationen

Service

Toolbox

Qualität

Application Notes

Bauteilebibliotheken

Fachbücher

Referenzdesigns

Download-Center

Über uns

News

Termine

Stellenangebote

Kontakt

PRODUKTE & SERVICES
Elektronische & Elektromechanische Bauelemente

Produkte & Services

Finden Sie das passende Bauteil für Ihre Anwendung und lernen Sie unsere Serviceleistungen kennen!

Zum Online Katalog

Ab Lager verfügbar
Kostenlose Muster
Lieferung innerhalb 24-48h Unter-VPE-Lieferung
Design Kits mit kostenloser Wiederbefüllung

Sie interessieren sich für unsere Neuprodukte, Innovationen oder Applikationen? Dann sind Sie hier genau richtig:

Produktkatalog

[Zum Katalog](#)

REDEXPERT

REDEXPERT

Online-Simulationssoftware für Komponenten.

[Mehr](#)

Toolbox

Hilfreiche Tools für Entwickler und Einkäufer

[Zur Toolbox](#)

Toolbox

- EMV-Lösungen auch für das virtuelle Labor



Fragen & Antworten



**Wir sind jetzt für Sie da. Fragen Sie uns direkt im Chat
oder schreiben Sie uns eine E-Mail.**



eiSos-webinar@we-online.com

Markus.Thoss@we-online.de