

Rev 2.0アダプタ付きDUTに 単線ケーブルで接続時の ボードおよびステップ負荷試験

岩本純一
シニアFAEマネージャー
MPSジャパン

トピック

- なぜ試験を行うのか
- ボード線図を計測する: 何が必要か
- フックアップハーネスを低減する方法
- ボード計測と解釈の例
- 同じフックアップでのステップ負荷応答
- ステップ負荷応答と解釈の例
- Q&A

なぜ試験を行うのか

スイッチモードPSUの安定性と特性評価は、量産時のばらつきを考慮した安定性解析が非常に重要です。

小信号の安定性解析の場合、ループゲインと位相のボード計測が答えを導きます。

大信号の解析には、ステップ負荷解析が答えを導きます。

ボードおよびステップ負荷の結果は異なるのか

理想的なLTI (linear time invariant) システムの場合、大信号および小信号の応答は同じです。そのため、ボードからステップ負荷までの結果などを予測計算できます。

実世界では、PSU段のゲインとスルーレートは振幅依存で、しばしば大きな振幅 / 励振と交差してノンリニアになります。

実際には、高い安定マージンを示唆する大信号のステップ負荷応答が見られます (例: リンギングのない漸近ステップ負荷)。逆に、小信号の解析では低位相マージンが現れます。

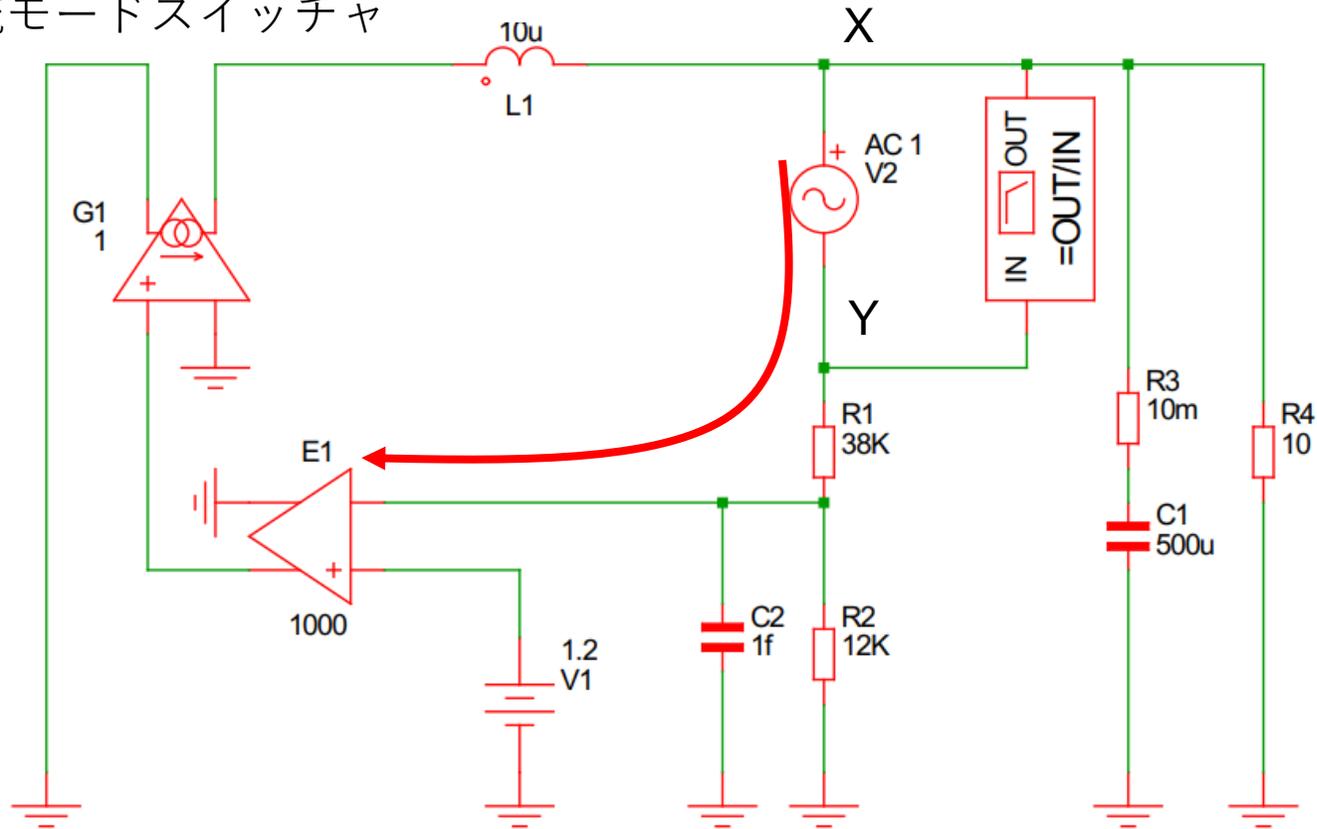
ボード線図で計測されるように、デバイスはリニアな範囲で小信号の励振と比較して異なるポイントで駆動するため、しばしばレギュレーションループはステップ負荷時により少ないゲインとなります。

ボードおよびステップ負荷両方を試験する必要があるのはこのためです。

ボード計測はどのように設定されているか

以下の図の赤い部分のどこでもループを計測可能です。

電流モードスイッチャ



レギュレーションループのどこかに小信号を投入し、 $V(X) / V(Y)$ のベクトルの商を計測します。

交流励振のソースには、インジェクショントランスがフローティング交流ソースを得る目的で使用できます。そして**3つ**の配線がDUT基板に付属しています。

これらの**3つ**の配線はフィードバックループに付いているため、通常長くはありません。

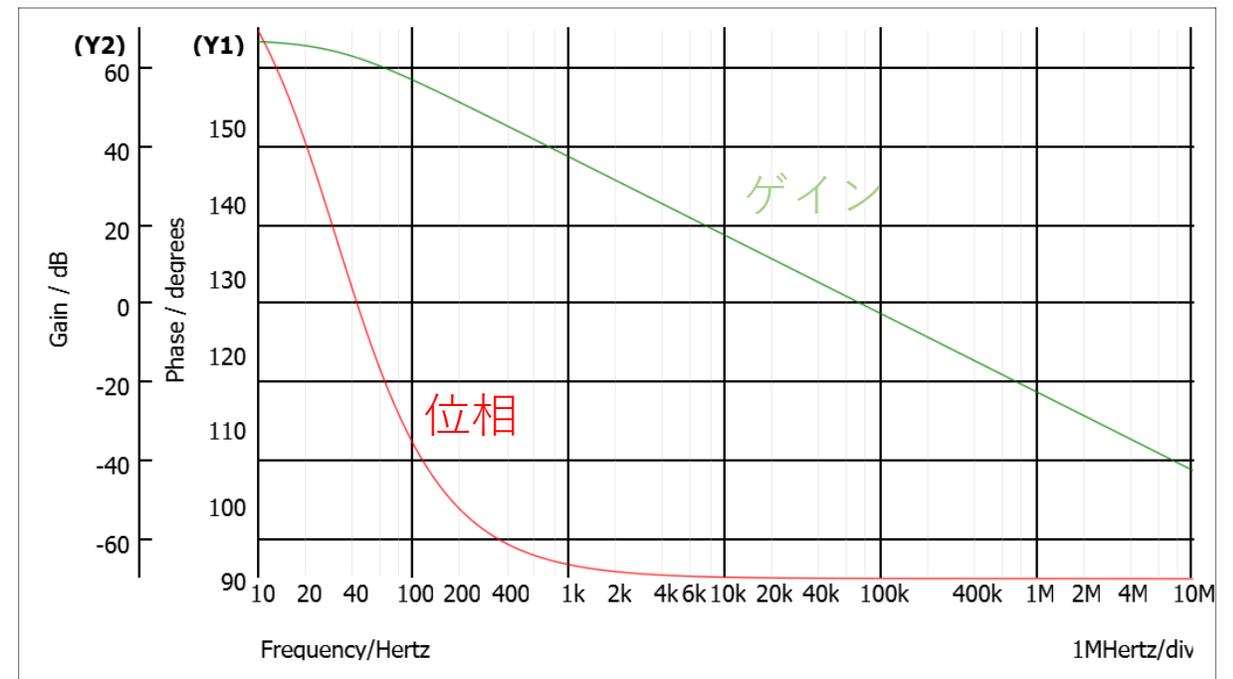
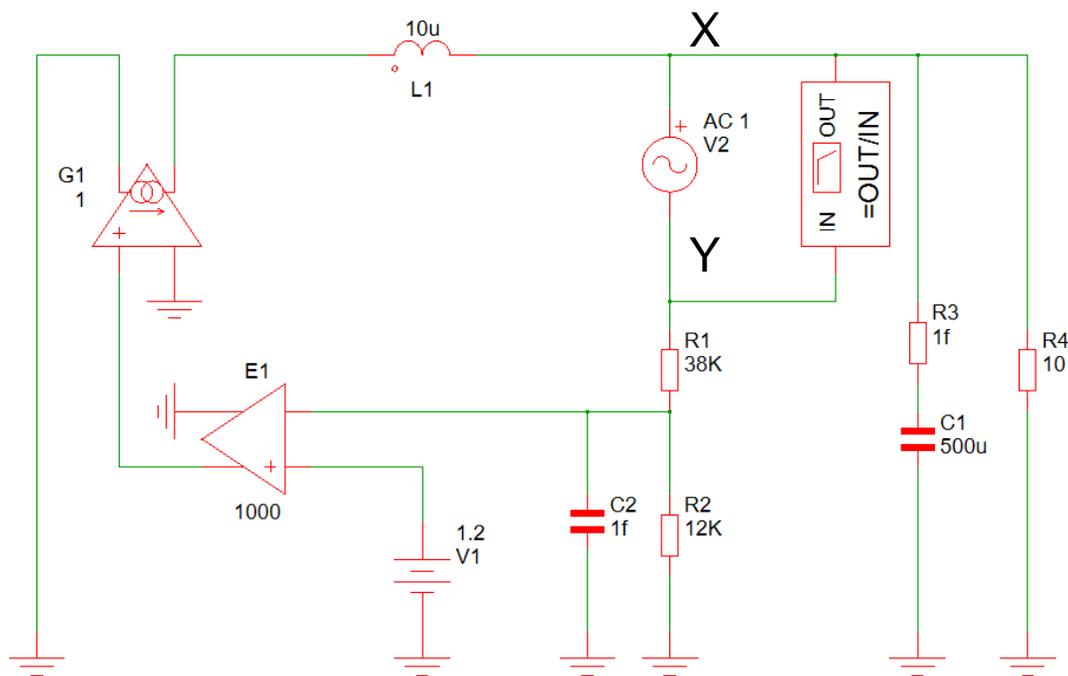
なぜ試験を行うのか

最終生産基盤でのボードの計測には、電氣的なものと同じくらい機械的なプロービングの問題もあります。

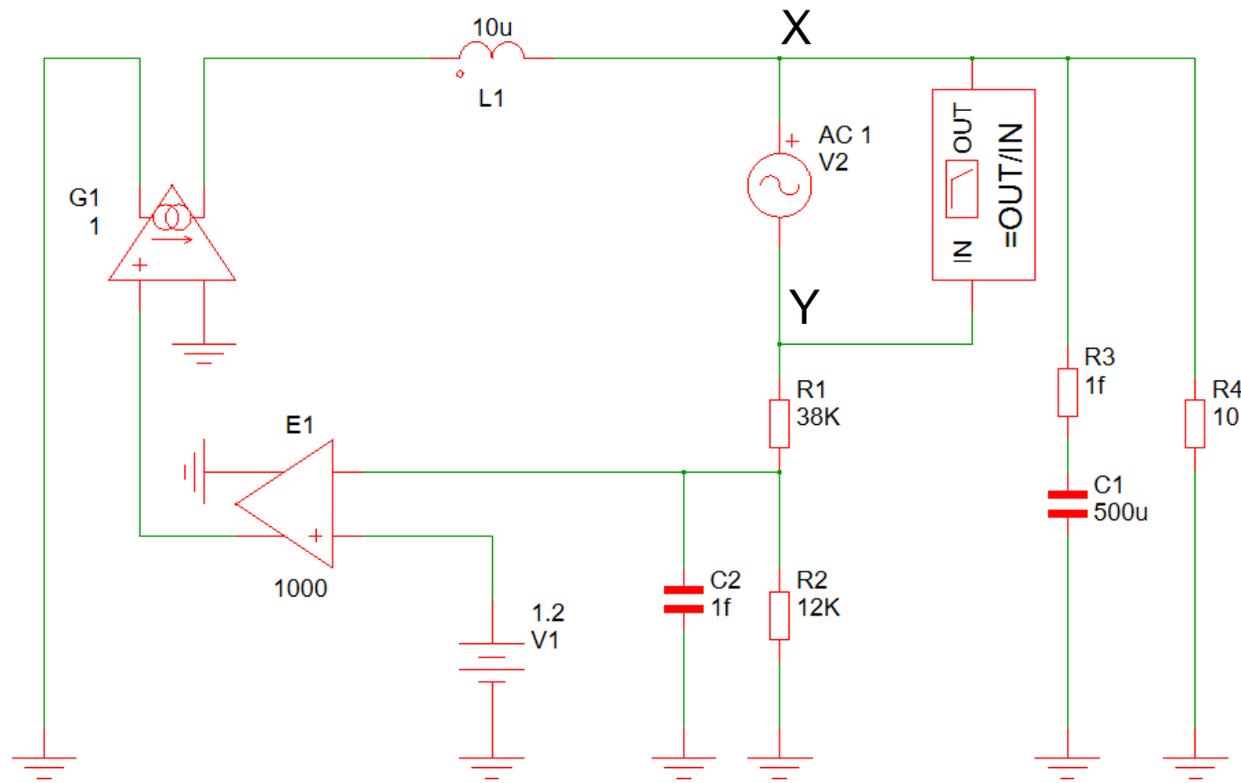
2つのスコーププローブおよびバナナケーブルまたはトランスに接続された黄色い巻線は、恒温室や同じような環境で使用するには機械的に安定したシステムではありません。

ボード計測はどのように設定されているか

MPSmartシミュレーションで生成されたボード線図は
ほぼ理想的な電流モードのPSUを示している



従来のボード計測

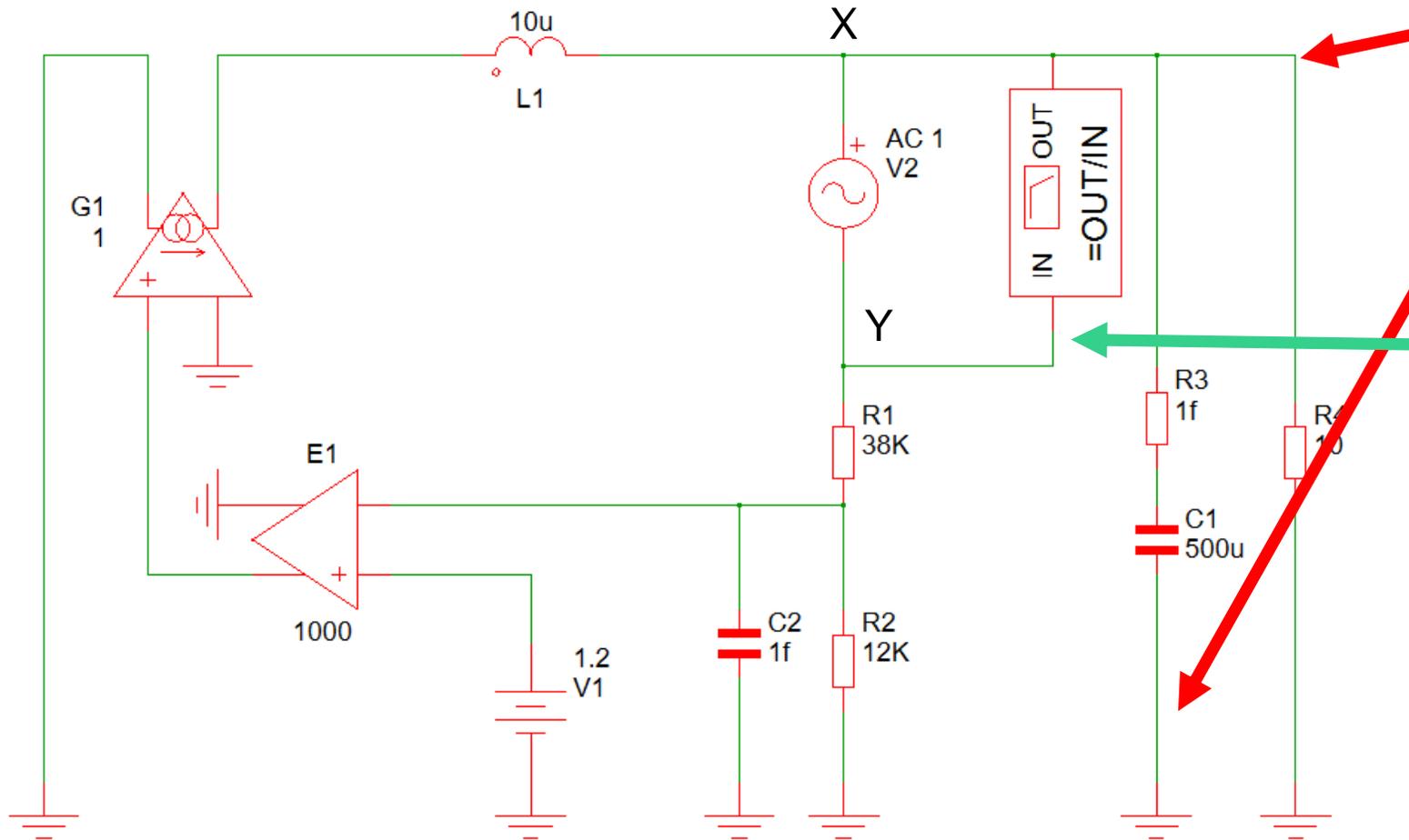


インジェクショントランスおよび他のプローブに接続した補助基板上で、DUTボードに3つの配線があります。これらの3つの配線はフィードバックループに付いているため、通常長くはありません。



交流ソースには、フローティング交流ソースを得るためにインジェクショントランスが必要です。

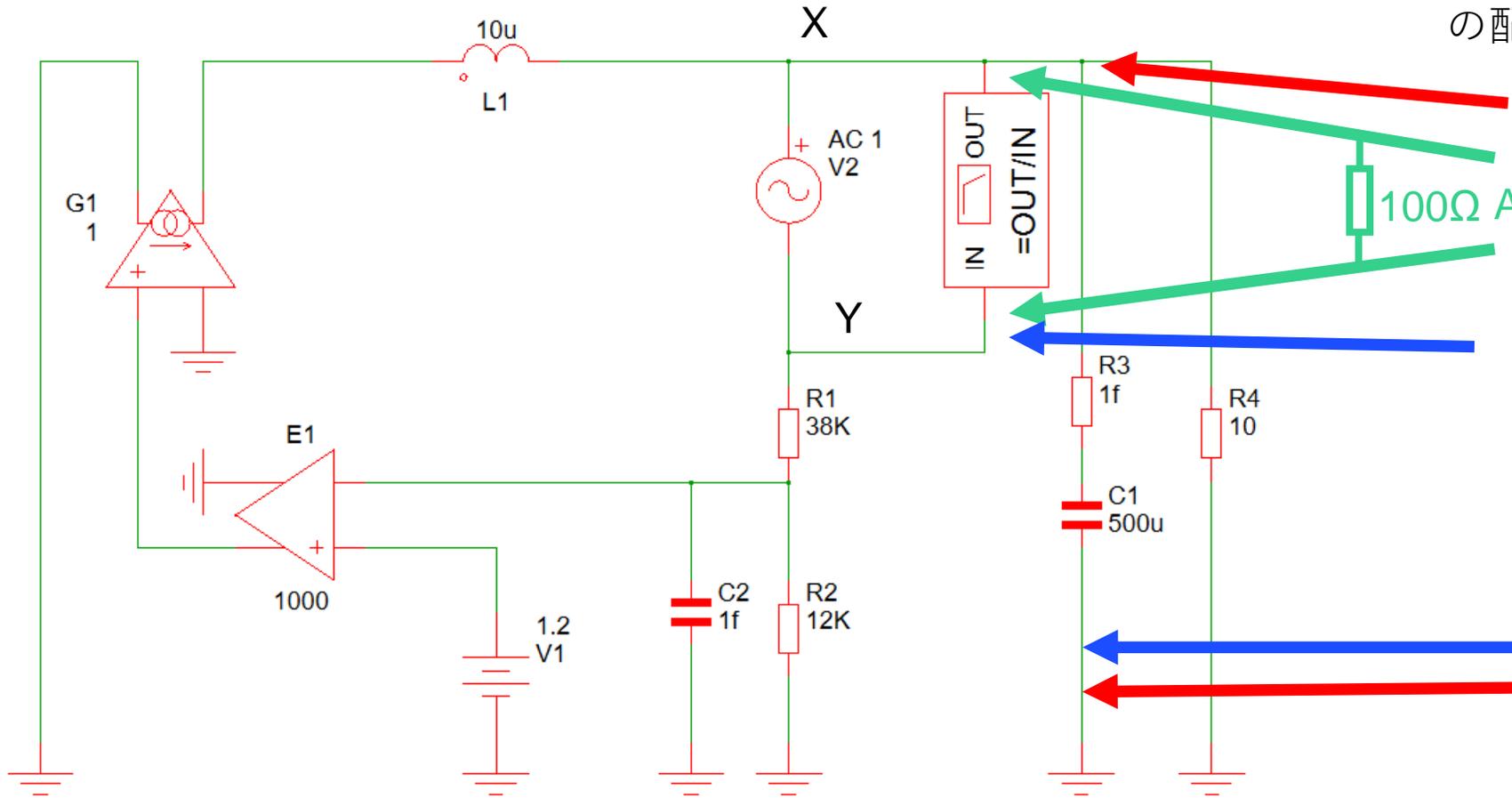
どこでボードに接続するか



低インピーダンス接続。 V_{OUT} と GND が出力コンデンサで見られる。プローブが簡単で、低インピーダンスのポイントで機械的にも堅牢。

Yノードはより高いインピーダンス。通常、インピーダンスを低く保つために、X-ノードとY-ノードの間の基板上に 51Ω または 100Ω の抵抗を使用することが推奨される。

アイデア: アナライザで出力コンデンサを接続し絶縁交流源を残す



同じように定義されたRF特性の3つの配線ペアが必要。

V(X) 計測

100Ω AC インジェクション信号

V(Y) 計測

ACインジェクション信号をDUTで100Ωでターミネートし、ある程度でV(Y)信号も終端。V(X)信号は低インピーダンスで、DUTでは終端しない。

もしきちんと仕事をしてくれるシングルケーブルを探しているなら、LAN / イーサネットパッチケーブルが最適のソリューション

以下の機能が組み合わされています:

- 4チャンネルを使用可能にするための4つのペア (最低3ペアが必要)
- 特定のインピーダンス: $100\Omega \pm 10\%$
- 1ペア間のRF絶縁が良好
- 手頃な価格
- 標準的なRJ45コネクタですべての長さでカラーが入手可能
- RJ45コネクタは低価格で、表面実装パッケージで入手可能
- 高信頼の金のコンタクト
- 60V定格で小信号を使用 (約1A、ただし抵抗に注意)

注意:

ペア2はピン3とピン6上にあり

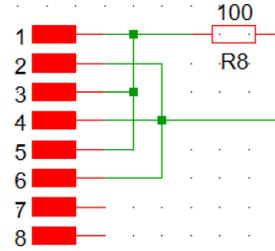
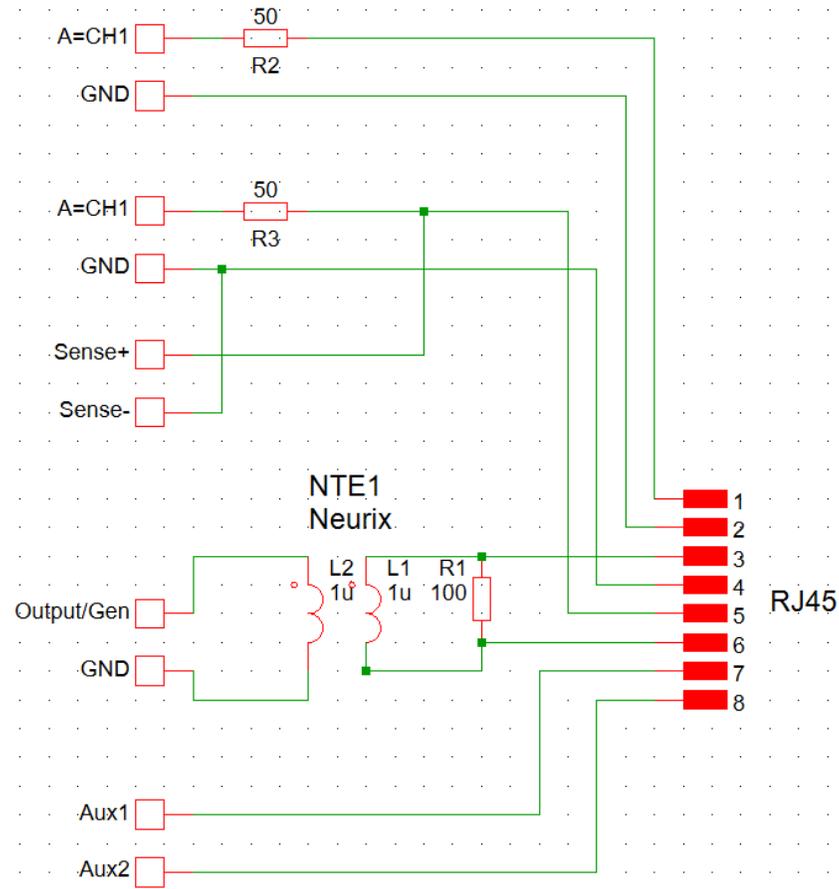
スルーホールRJ4コネクタは、時に非標準、非シーケンスのピン配列となる。SMT RJ45のみを使用することを推奨します。

なぜなのか見てみましょう....



ボードコネクタ回路図

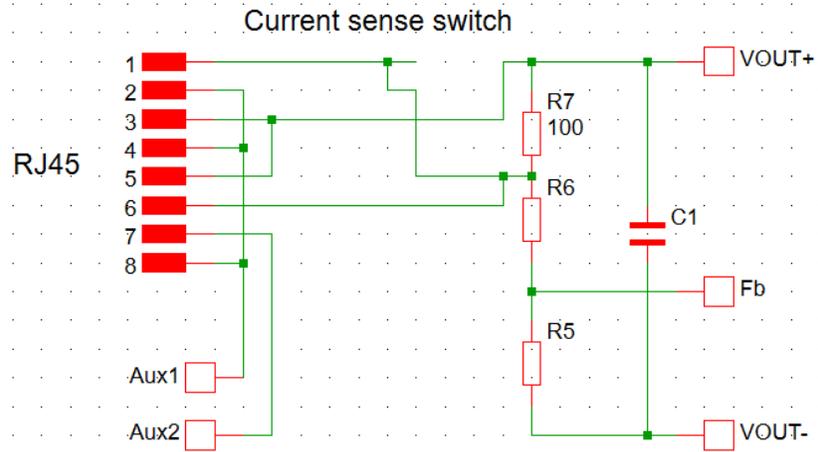
ボード分析基板上のCALアダプタ



Cal adapter



R7 short plug

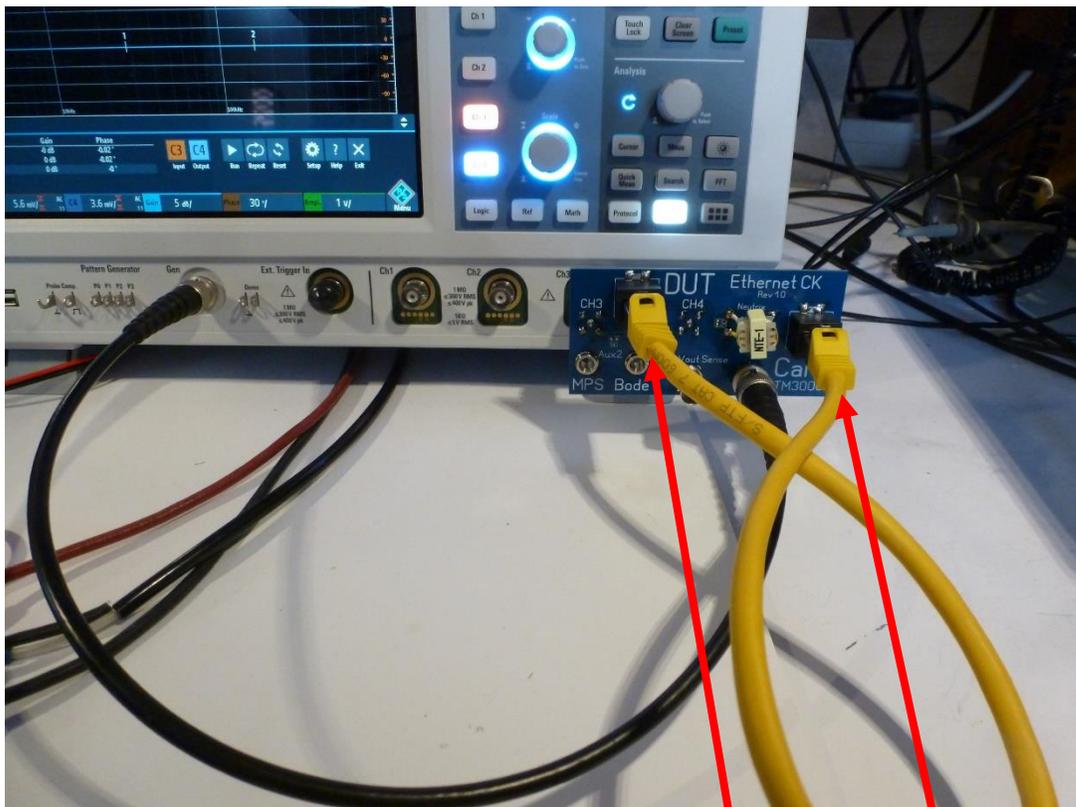


DUT RJ45 adapter
Bode part

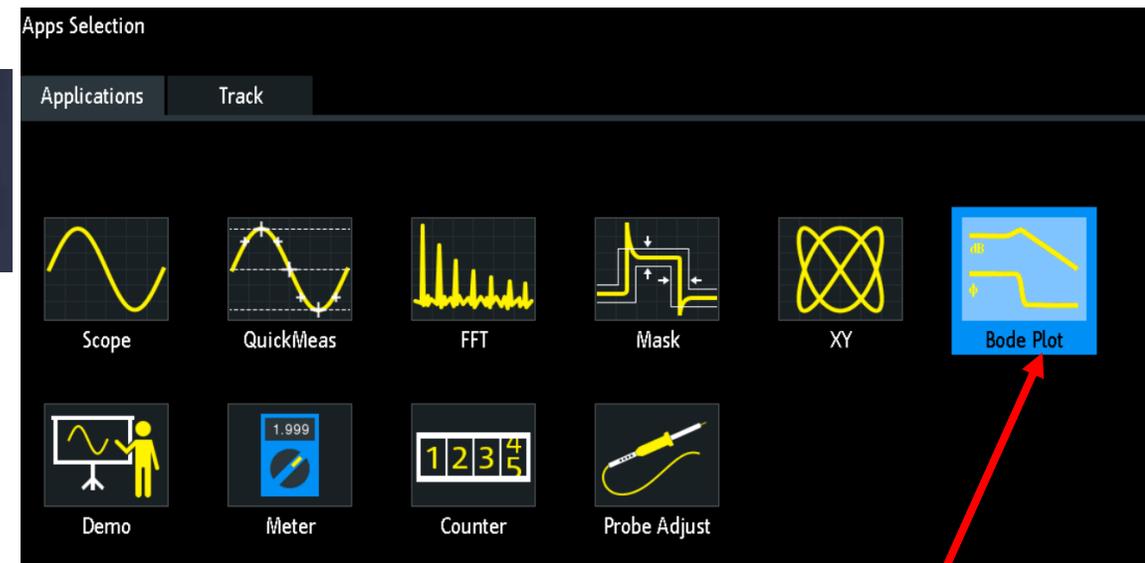
DUT

MPS Christian Kueck 26. Nov. 2021

ボード用RTM3000設定



CALプラグへの接続パスケーブル

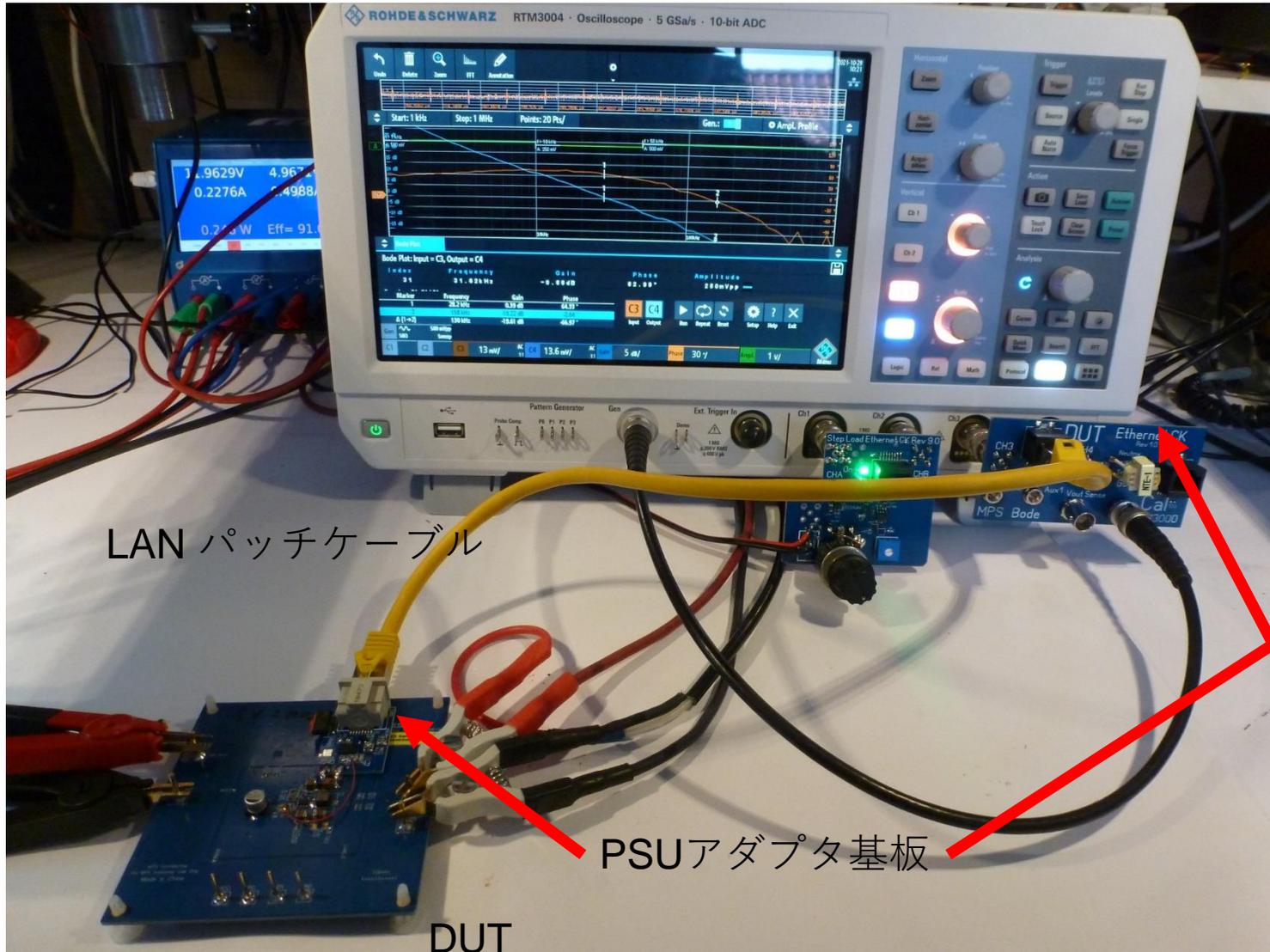


アプリケーション選択メニュー ボード線図をアクティベート



C3を入力として、CH4を出力チャネルとしてアクティベート

ボード設定



Fb接続付きPSUアダプタ基板



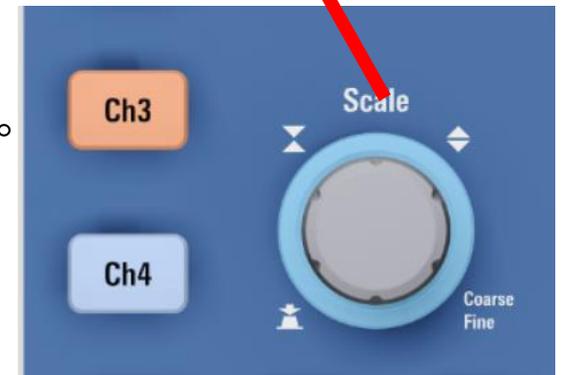
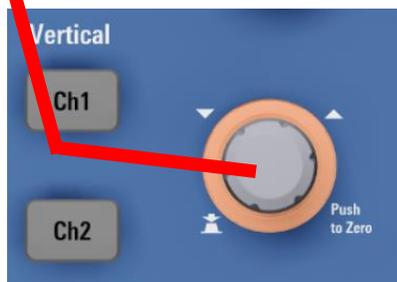
ボード分析基板

ボード設定: 位相



Scaleノブで位相スケールを $30^\circ / \text{div}$ などの適切なスケールに設定
タッチスクリーンでの自動スケールリングやズームは使用できない結果をもたらす。

0dBゲインとして 0° を同じラインに設定するとグラフの解釈が容易になる。



ボード設定: 振幅

Index	Frequency	Amplitude
1	1 kHz	500 mV
2	10 kHz	250 mV
3	50 kHz	500 mV

Bode Plot

Amplitude Profile

Points 3

Configuration

Load 50Ω High-Z

Points per Decade 20 Pts

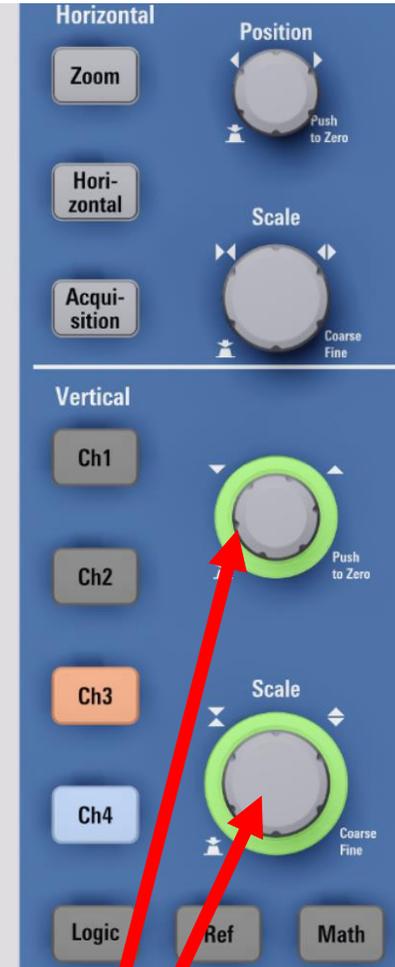
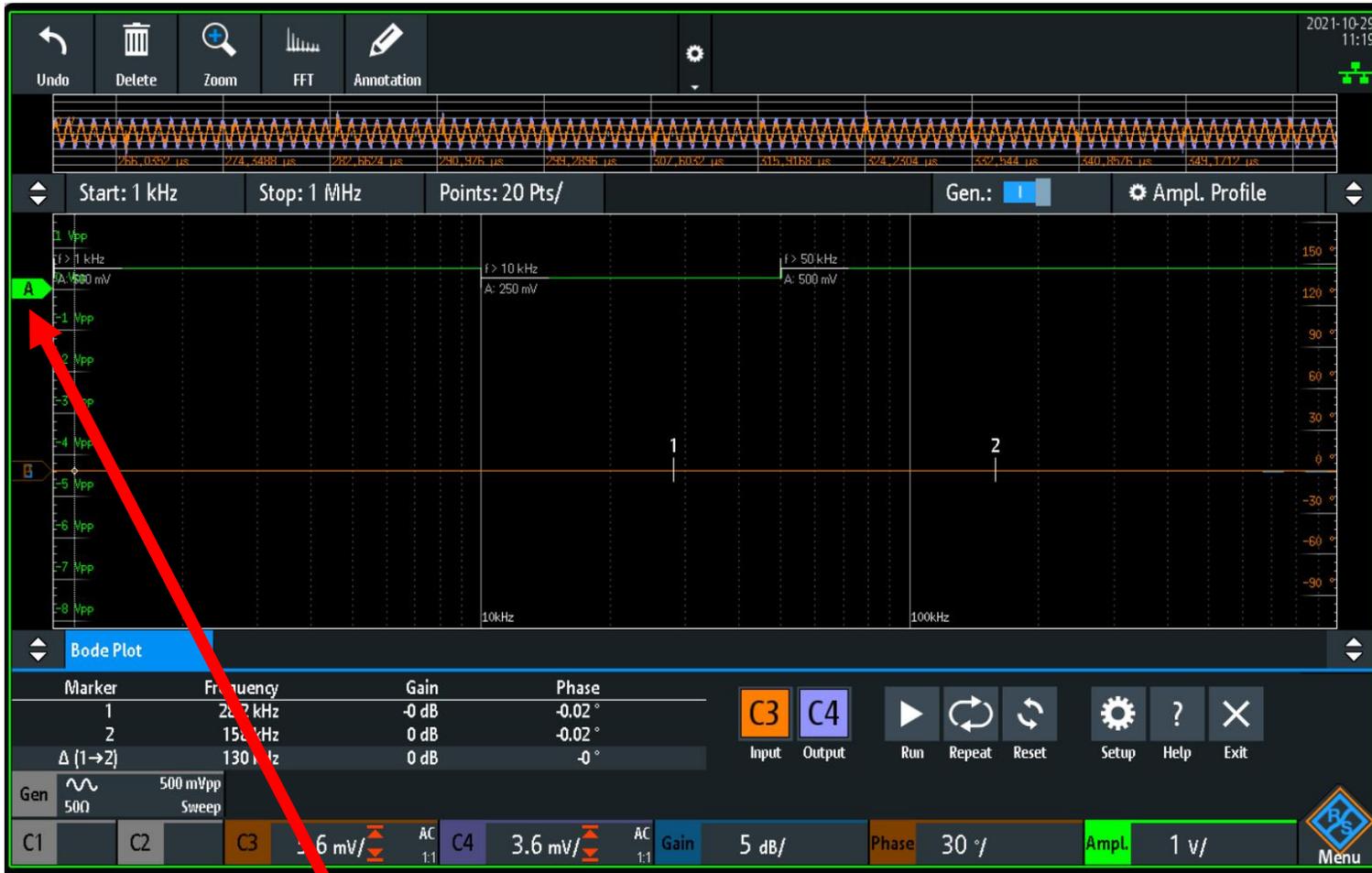
Maximum Phase 180°

Display Meas. Points

Input C3 Output C4 Run Repeat

Bodeメニューの“Amplitude Profile” をオンにする。

ボード設定: 振幅



グリーンの振幅画面は
バーティカルノブの“A”がアクティベートされていれば調整可能

ボード設定: 振幅

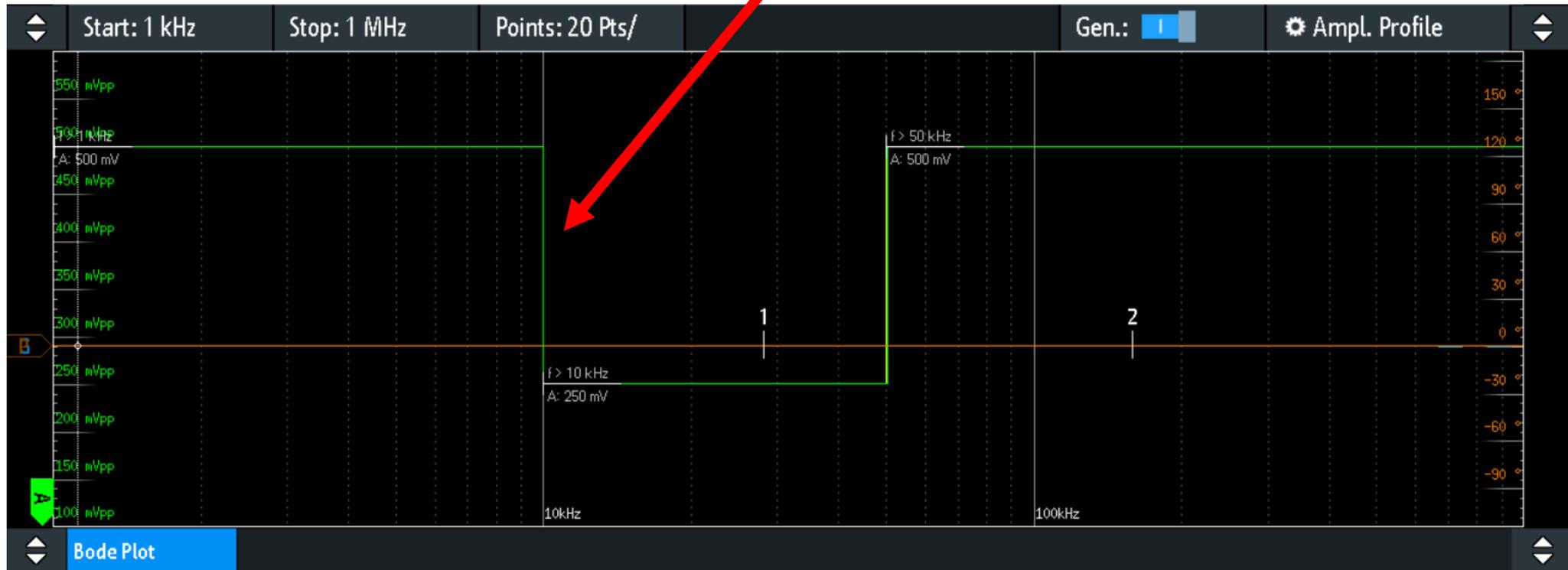


選択した周波数と振幅は"Analysis"ノブで調整可能。
ポイントを必要に応じて追加。

ボード設定: 振幅

Amplitude Profile		
Index	Frequency	Amplitude
1	1 kHz	500 mV
2	10 kHz	250 mV
3	50 kHz	500 mV

振幅プロファイルの下降は急なステップで振幅を変える。
ボード線図でのアーチファクトによって影響を受けるかもしれない
ので、変更は少しだけ行い、必要に応じてもっと変更を行う。



設定: CH3とCH4

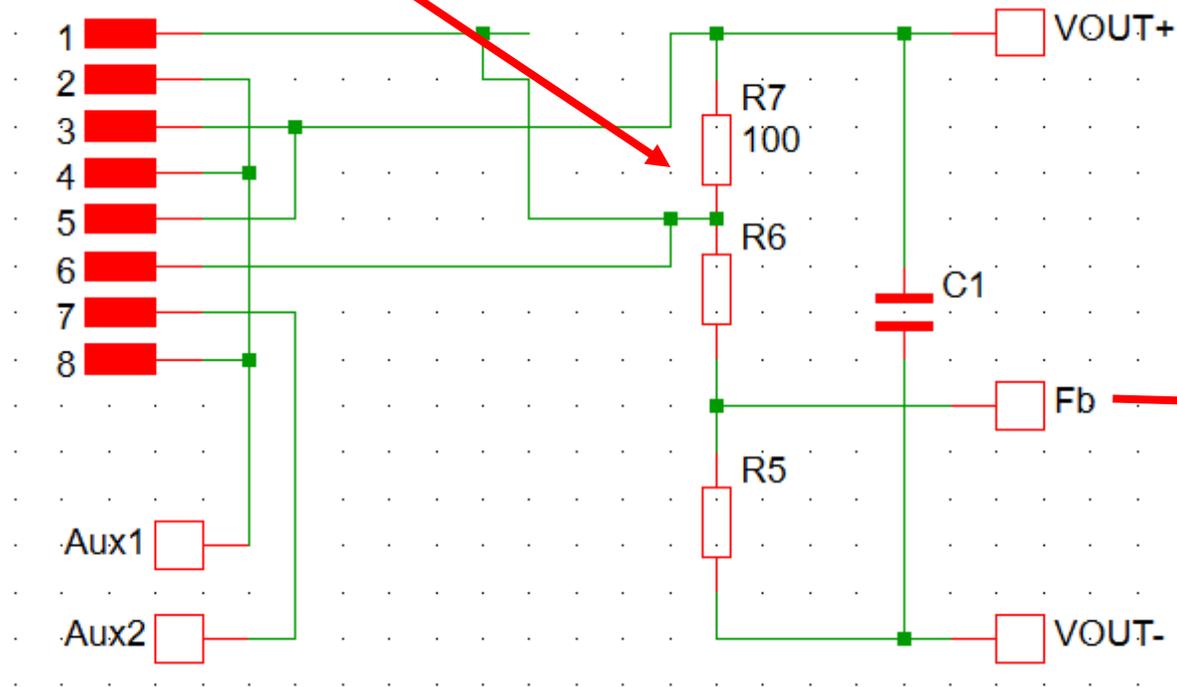
CH3とCH4の高インピーダンスモード(1M Ω)を駆動し、ACを連結する。
RTM3000は最大300Vとなる。

注) これはRTM3000を使用する場合

注意点

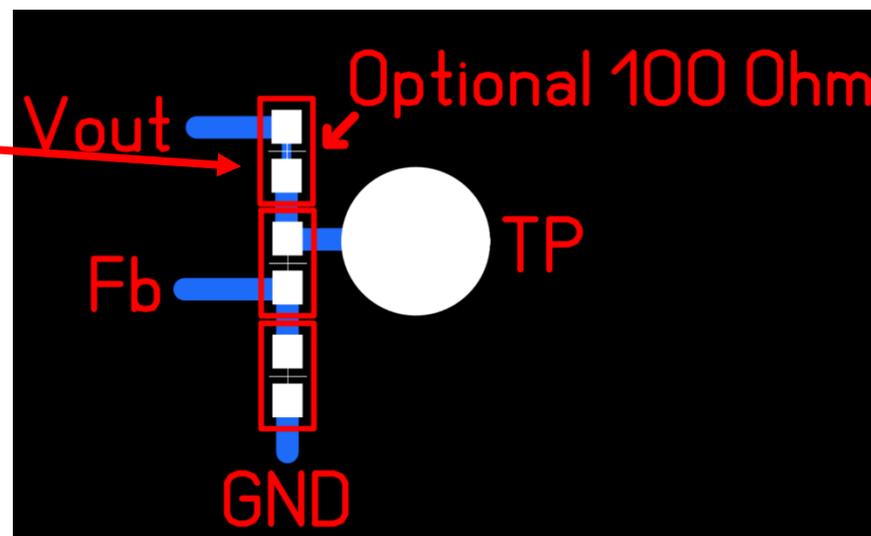
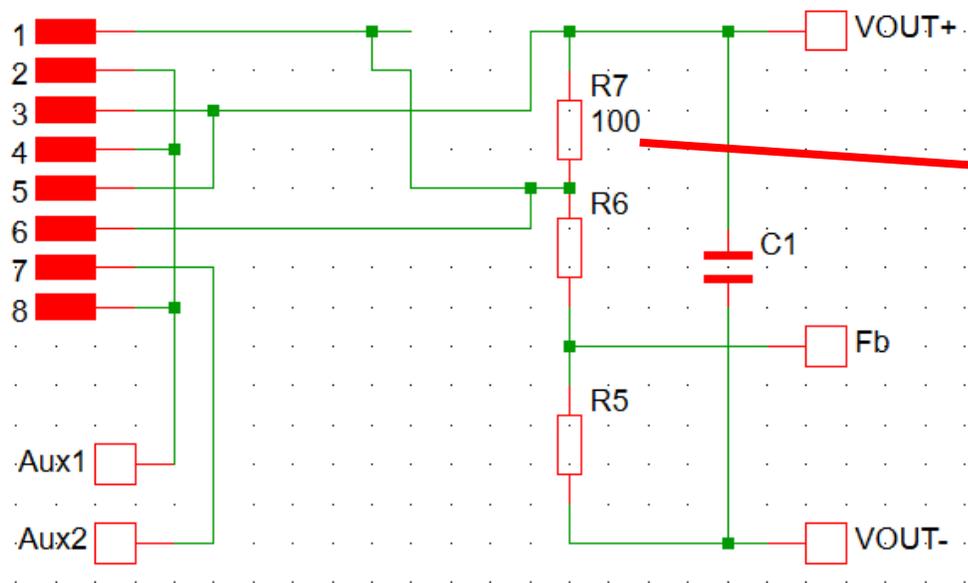
FBループはPSUボードの場合のみ小さな黄色いワイヤで巻かれています。降圧レギュレータで接続が壊れると、典型的な $V_{IN} = V_{OUT}$ の状況が起きます。昇圧レギュレータは過電圧条件を生成することにより、自身を破壊します。

オプションのR7 (100 Ω) を最終PCBにすぐ設置するのが最善。実行可能かどうか確認してください。



ヒント

PCBのサイズが許せば、短絡の0402プレースホルダをPCB上にR7の代わりに設置することができます。ボード試験では、このR7に100Ωの終端抵抗を配置して、測定器のサイン波をR7に注入しながら測定をすることができます。R7が無い場合、このラインをカットしジャンパーで抵抗を挿入するなどを行う必要があるため危険であり、R7を用意しておけばヒートガン、機械的負荷などに対してFBループが開放してしまうのを防ぎます。



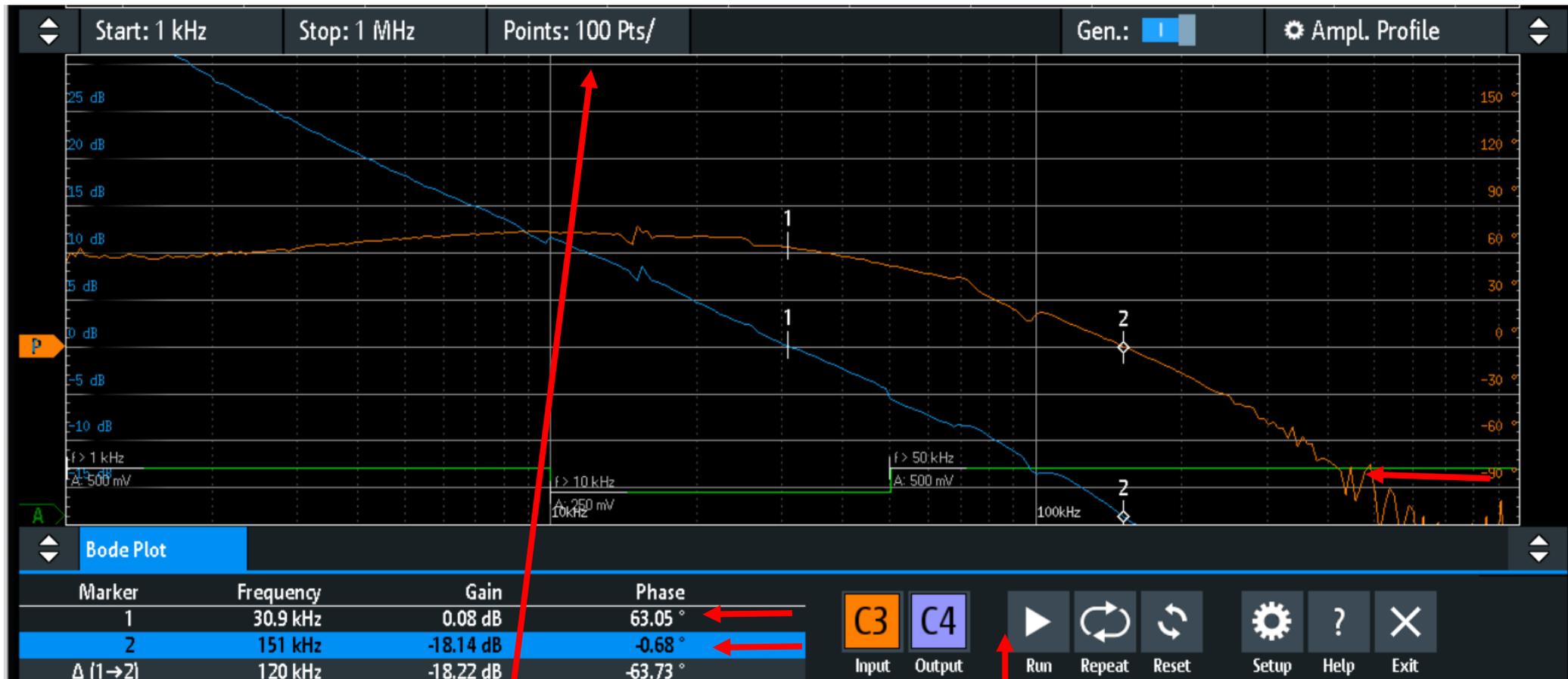
PSUの解析を容易にするボード設定



ゲインと位相のグラフが0dBおよび0°位相になっていることを確認

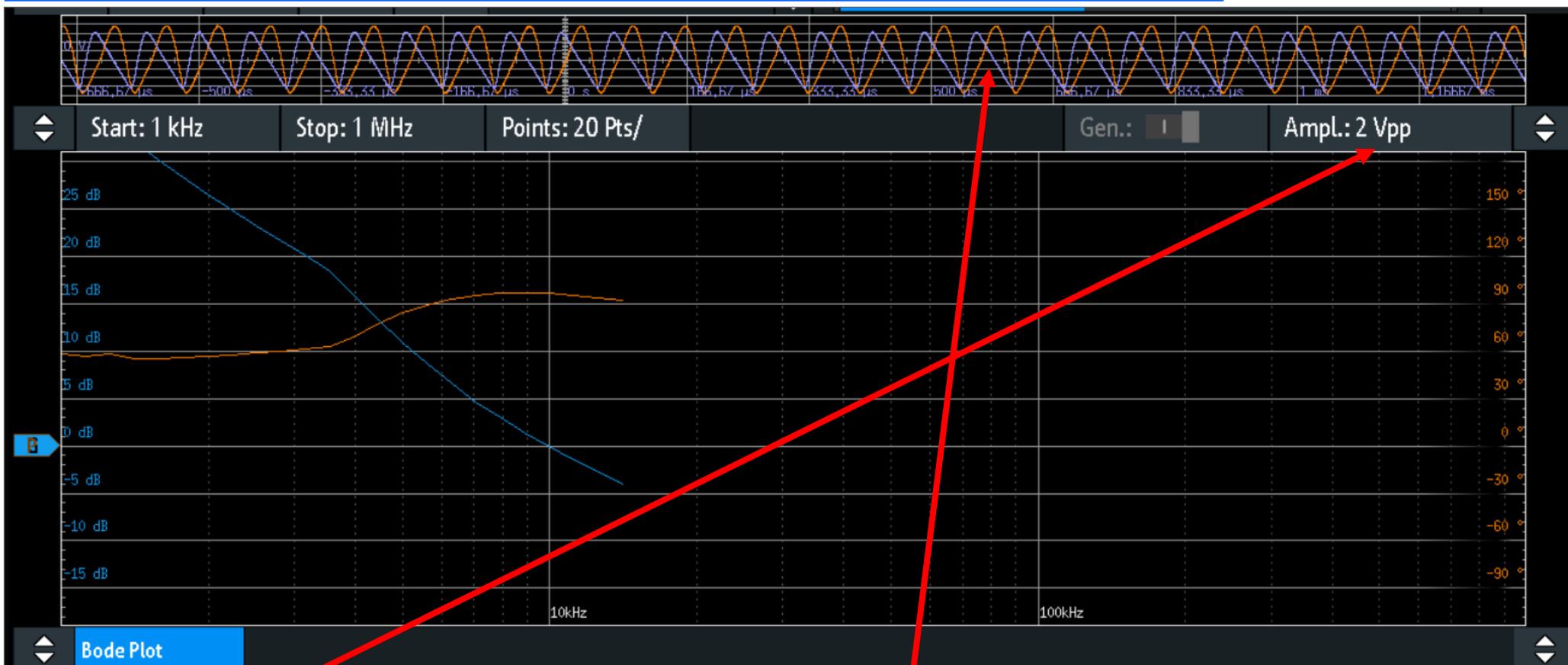
0dBおよび0°の位相地点を表すためマーカーを使用

PSUの解析を容易にするボード設定



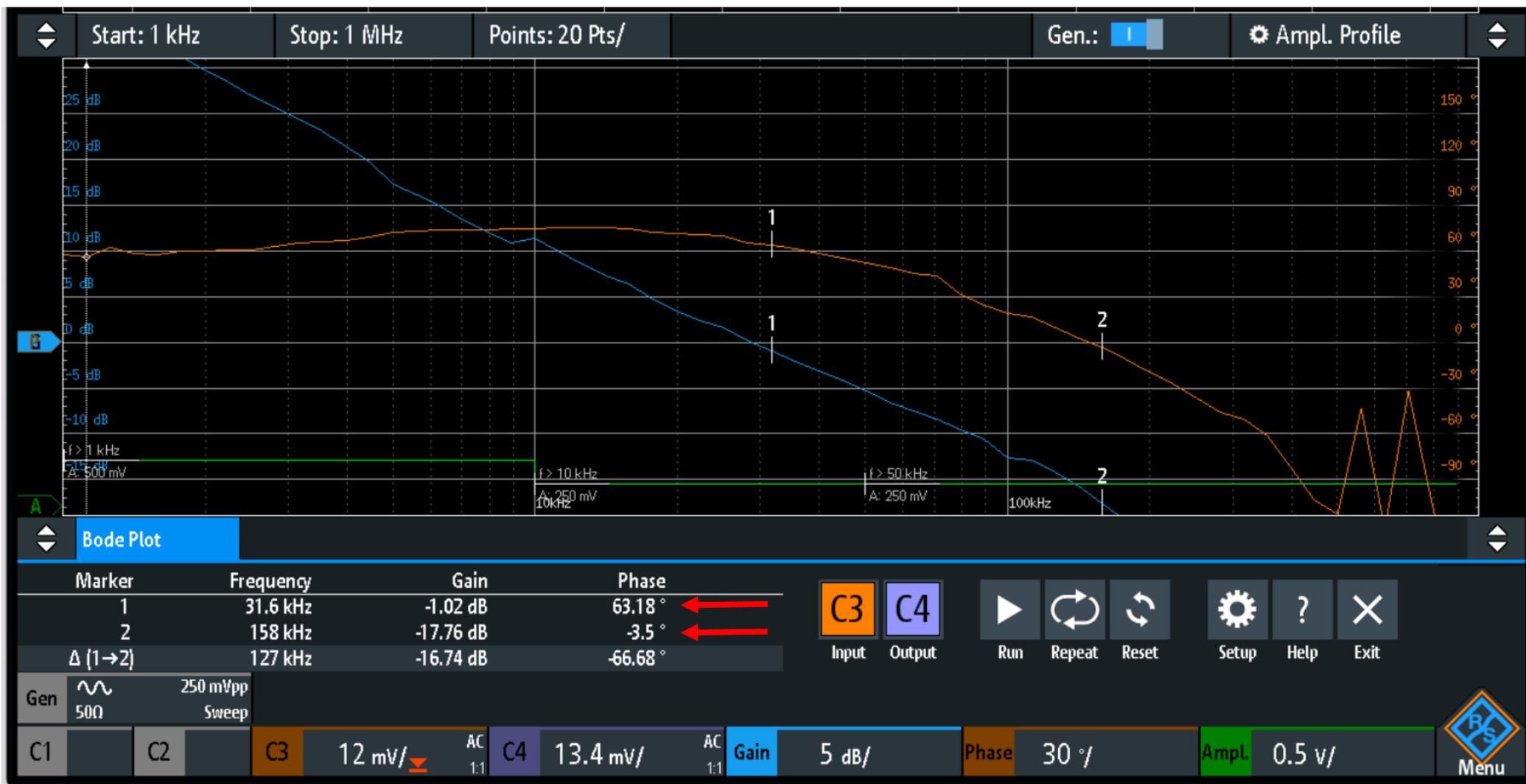
分解能を高いポイントの数字に設定すると計測を遅くします (RBWの低減)が、ゲインと位相プロットのよりよい分解能表示が行えます。

ボード設定: あまりに高いジェネレータ振幅



あまりに高いジェネレータ振幅は、ゲインと位相カーブ同様とともに間違ったPSUの交流応答をもたらすことがあります。上段のウィンドウを見ると、計測中にその間違いを推測することができます。アーチファクトが増えずにボード線図が安定するまで、より小さな振幅を試みましょう。

プロットがレベル低下して変わらなくなるまでソースレベルを調整



ヒント

健全性試験として、ボード線図が同じであることを確かめるために、最終設定から少なくとも3dB分は励振振幅を減らしましょう。

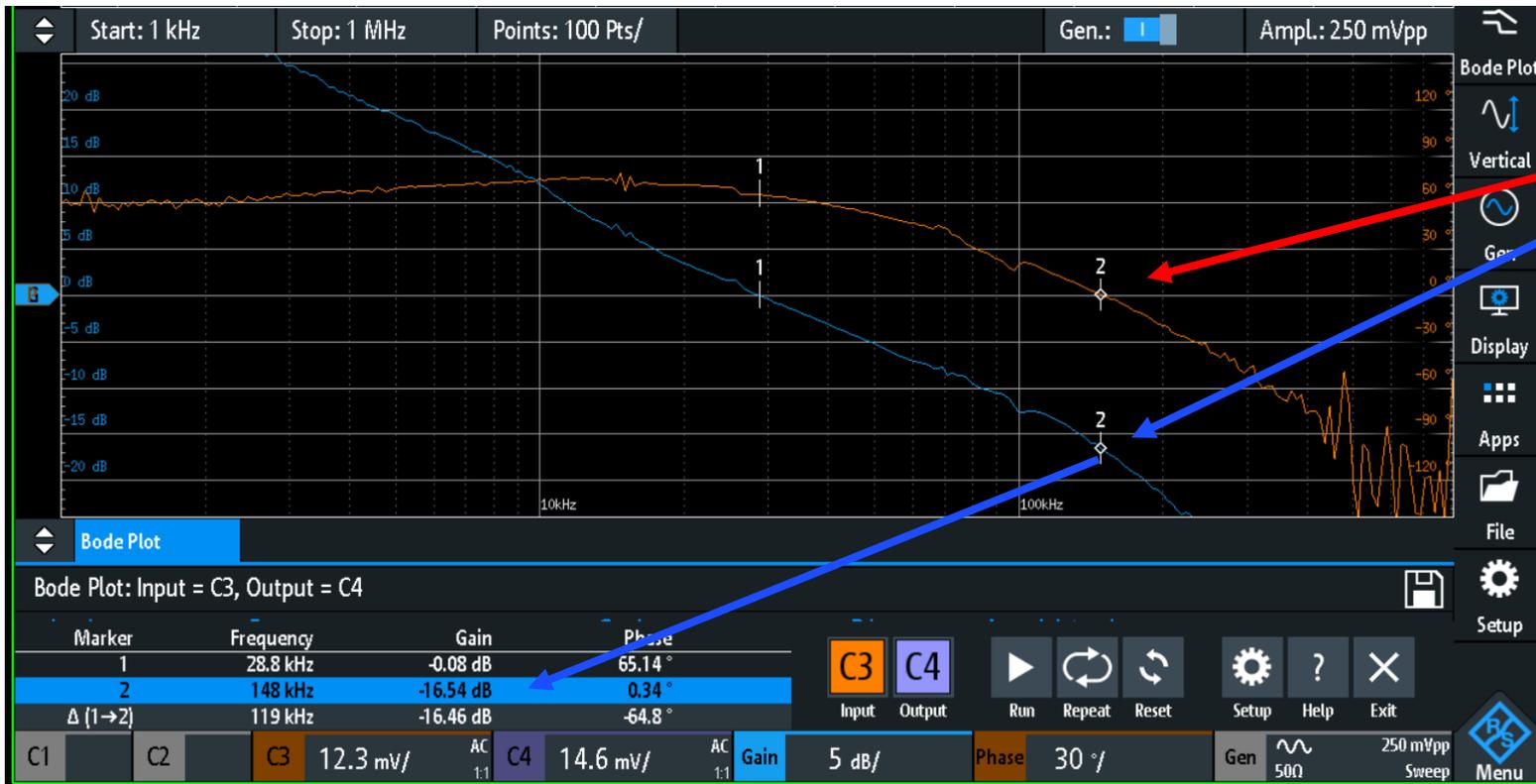
多くの場合、有用な情報が得られず計測がスローダウンするので、非常に低い始動周波数は必要ありません。

見るべきもの: 位相マージン



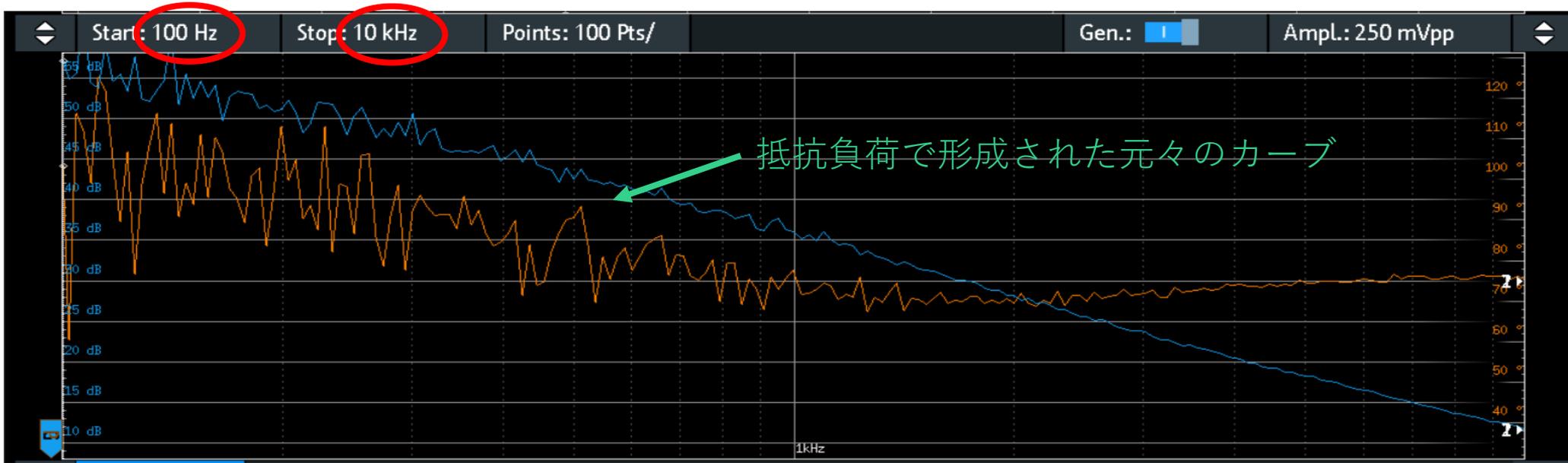
ゲインカーブは温度や生産変動によって少々上下動し、0dB地点では周波数によって多少動きます。これに備えて余裕を持っておくことが重要です。

見るべきもの: ゲインマージン

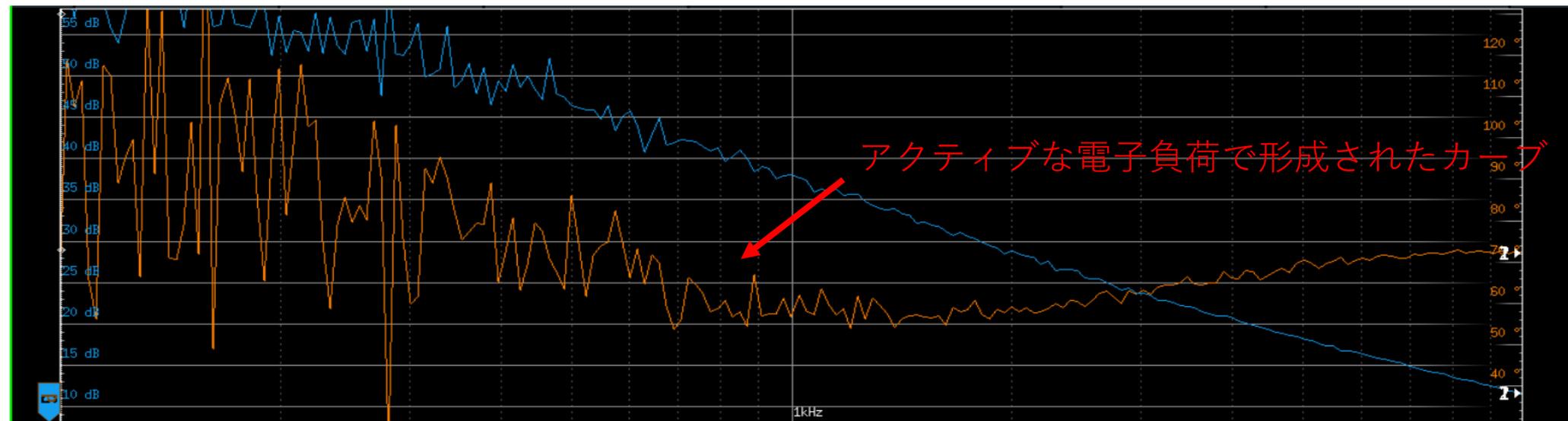


0° 位相地点では、ループを発振させない**10dB**以下の減衰が必要です。負荷や電流ループゲインによる発振のようなメカニズムは、このゲイン余裕が足りないことによって引き起こされる可能性があります。

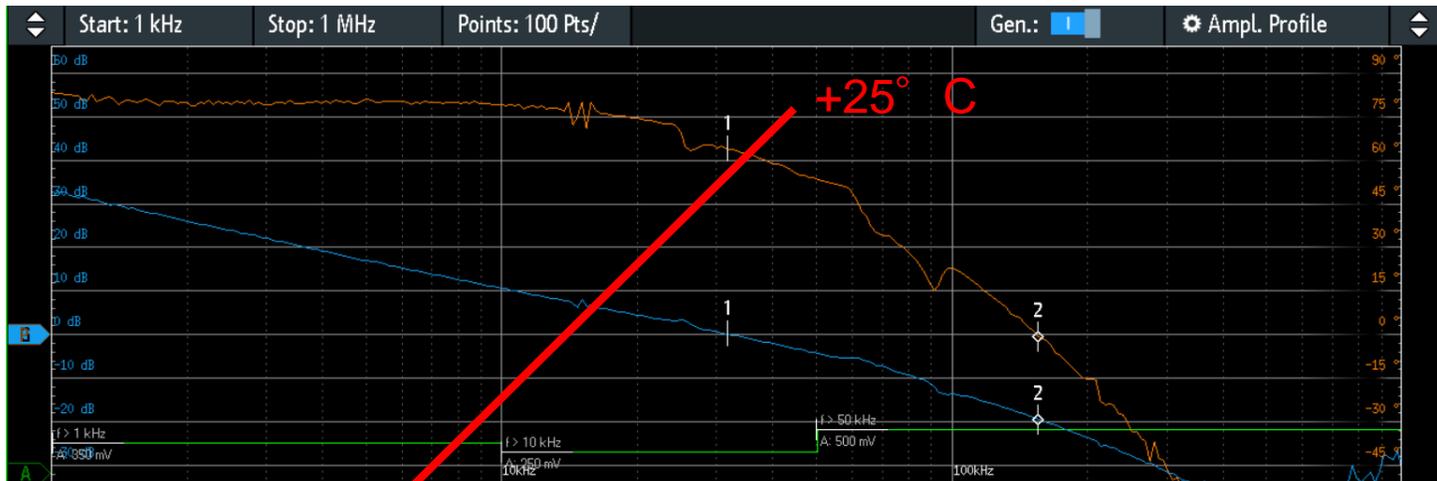
ボードの計測には常に抵抗負荷を使用する



ボード計測時にアクティブな電子負荷の周波数応答を含まない計測が必要。

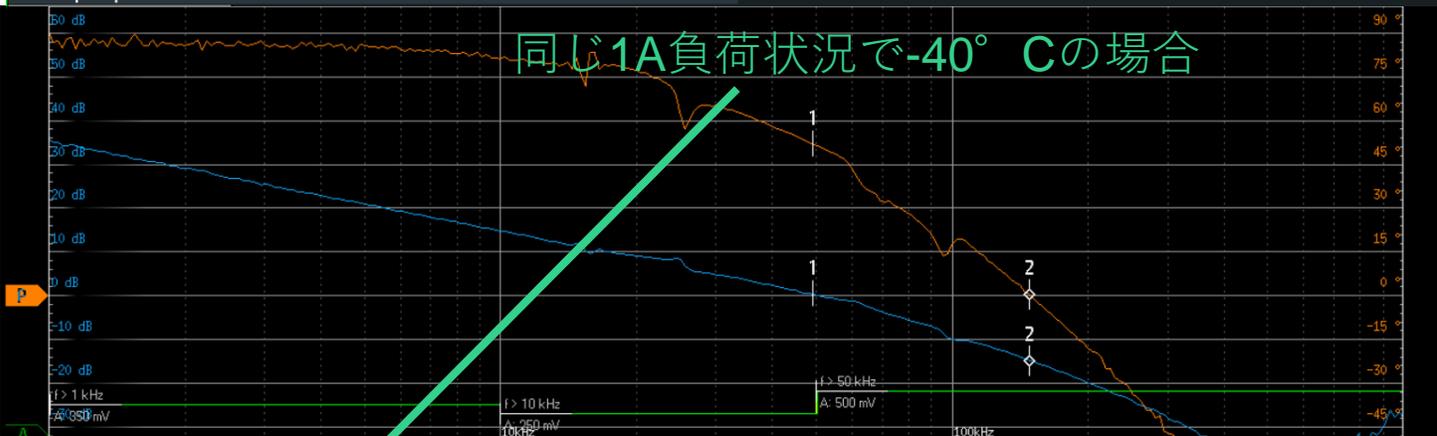


温度によるPSUループゲインへの影響の代表例: MPQ4320



低温は一般的に、MPSFETテクノロジーの中のMLCC C_{OUT} レギュレータにとって最も過酷なループコンディションです。

MLCCの C_{OUT} 容量が低温で下降すると、より低い0dBクロスオーバー周波数での位相余裕が発生します。同時に、エラーアンプゲイン段により高いゲインが発生します。MOSFETアンプの構造は一般的に温度上昇時のゲイン増加を低減します。バイポーラアンプの場合は一般的に温度とともに(ゲインが)増加します。



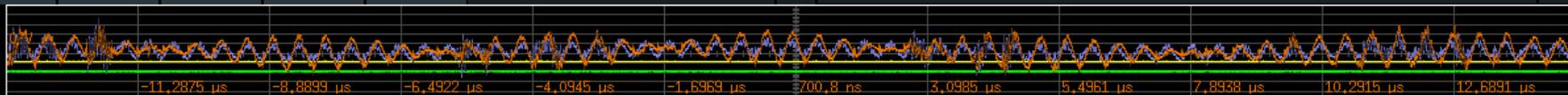
そのため、低温でクロスオーバー付近の位相余裕を増加させるには、常温での位相マージンを良い状態に保つのがベストプラクティスとなります。

RTM3004 100地点

RTM3004; 1335.8794K04; 104834 (01.600 2020-03-20)

2021-02-23
14:53

Undo Delete Zoom FFT Annotation



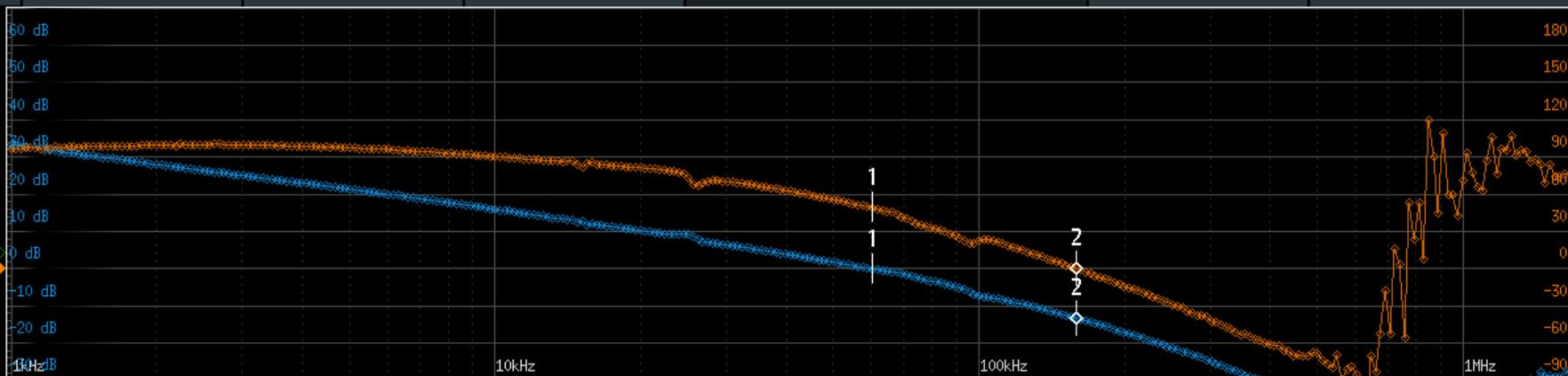
Start: 978 Hz

Stop: 1.8 MHz

Points: 100 Pts/

Gen.: 1

Ampl. Profile



Bode Plot

Bode Plot: Input = C3, Output = C4

Index	Frequency	Gain	Phase	Amplitude
1	1.00 kHz	33.05 dB	96.13°	1 Vpp

Marker	Frequency	Gain	Phase
1	60.3 kHz	-0.27 dB	48.39°
2	158 kHz	-13.47 dB	-0.49°
Δ (1→2)	98.2 kHz	-13.21 dB	-48.88°

C3 Input C4 Output

Run Repeat Reset

Setup Help Exit

Ampl. 0.5 v/ Gen 1.5 Vpp Sweep 50Ω

C1 500 mV/ AC 1:1 C2 200 mV/ AC 1:1 C3 9.1 mV/ AC 1:1 C4 12 mV/ AC 1:1

Gain 10 dB/

Phase 30°



MPQ4430:
12V~5V、1.2A

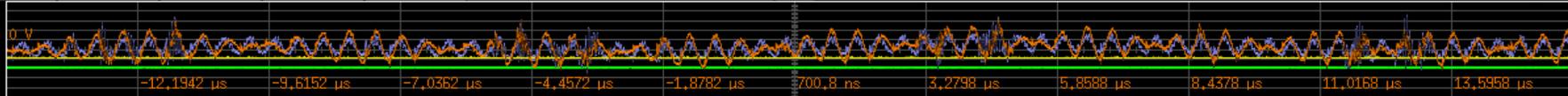


RTM3004 500地点

RTM3004; 1335.8794K04; 104834 (01.600 2020-03-20)

2021-02-23
15:02

Undo Delete Zoom FFT Annotation



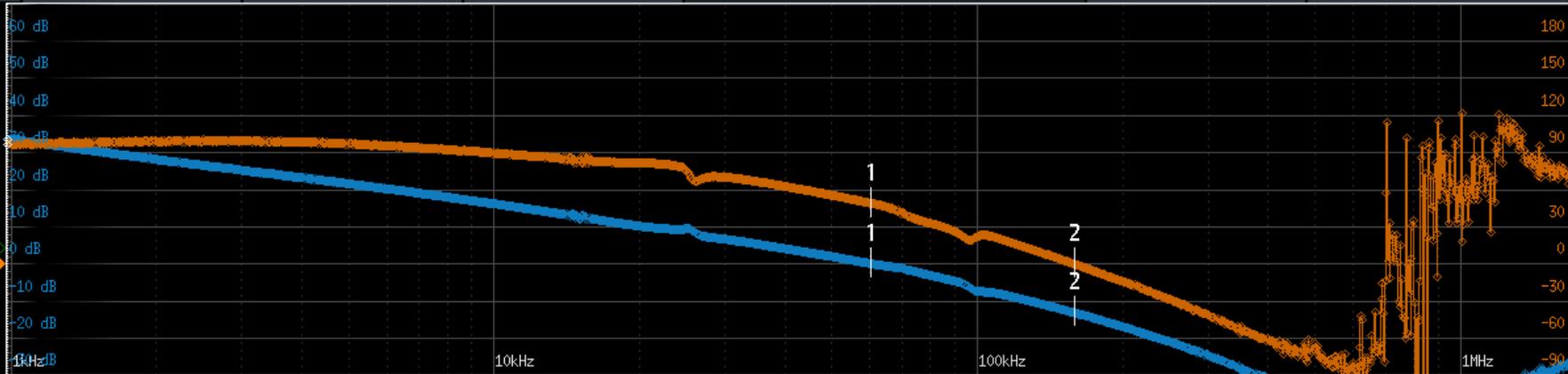
Start: 978 Hz

Stop: 1.8 MHz

Points: 500 Pts/

Gen.: I

Ampl. Profile



Bode Plot

Bode Plot: Input = C3, Output = C4

Index	Frequency	Gain	Phase	Amplitude
1	978.00 Hz	33.45 dB	96.29 °	1 Vpp

Marker	Frequency	Gain	Phase
1	60.3 kHz	-0.08 dB	48.48 °
2	159 kHz	-13.27 dB	-0.53 °
Δ (1→2)	98.3 kHz	-13.18 dB	-49.01 °

C3 Input C4 Output

Run Repeat Reset

Setup Help Exit

Ampl. 0.5 v/ Gen 50Ω 1.5 Vpp Sweep

C1 500 mV/ AC 1:1 C2 200 mV/ AC 1:1 C3 9.8 mV/ AC 1:1 C4 11 mV/ AC 1:1

Gain 10 dB/ Phase 30 °



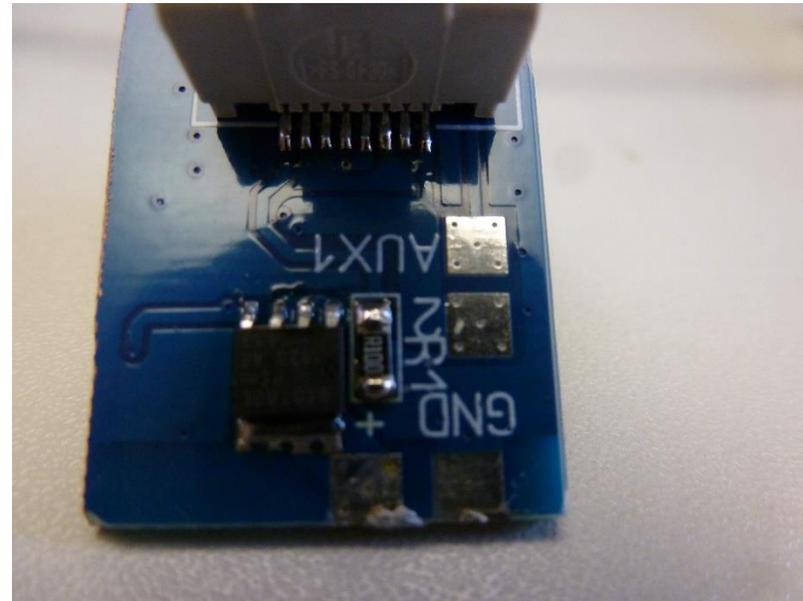
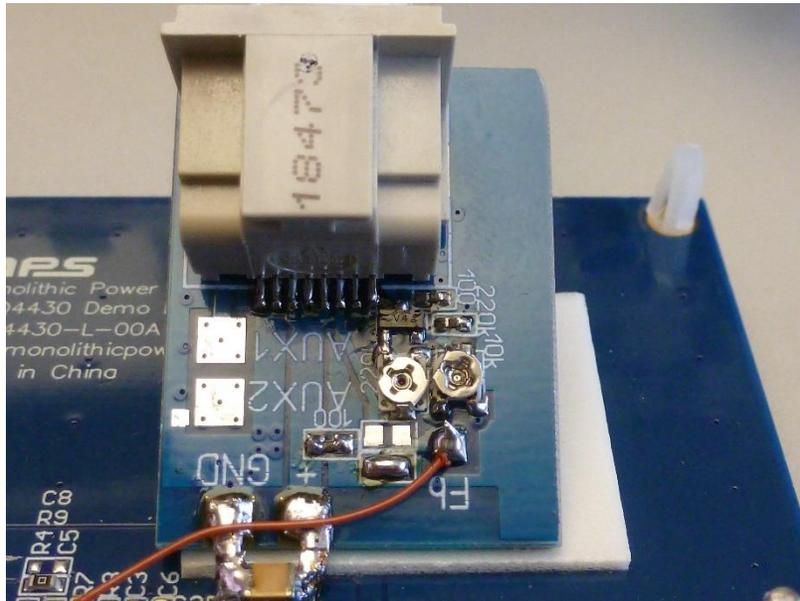
MPQ4430: 12V~5V、1.2A



ステップ負荷

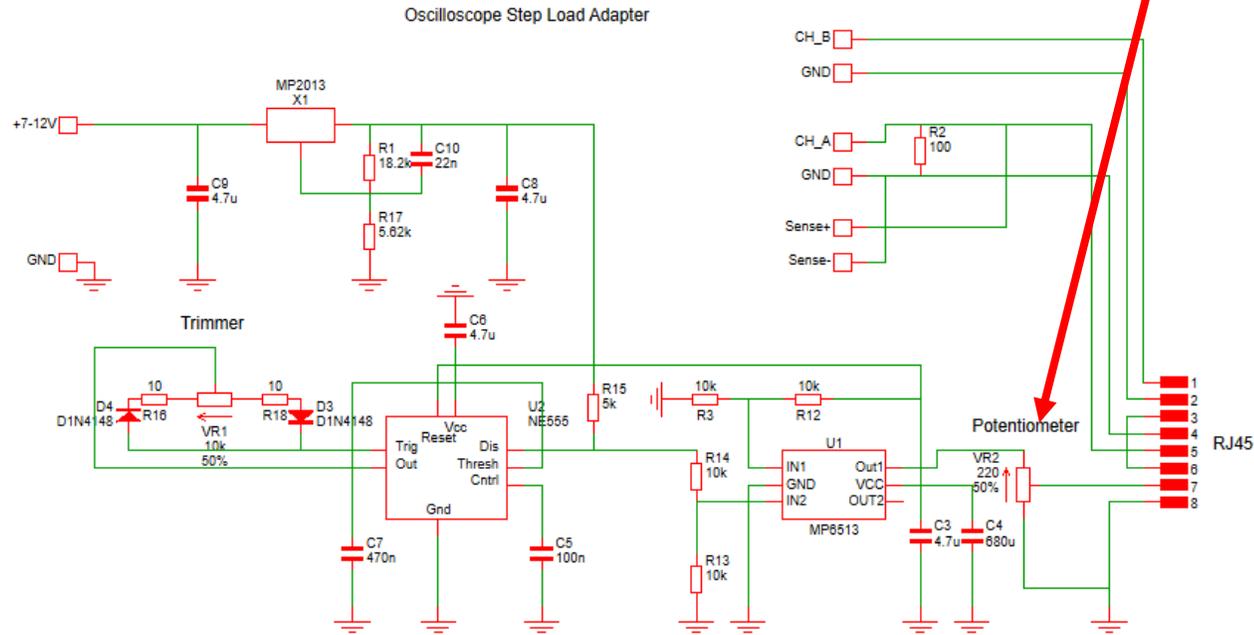
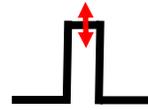
交流の (ステップ) 負荷はDUTのCOUTに最も接近して、最低インピーダンスで行われるべきです。一般的に、電流検知抵抗とともにあるMOSFETを消費するステップ負荷は、DUT出力コンデンサの上または付近に配置されます。ボードの結合とともに、COUTコンデンサへの接続があります。このためステップ負荷にそれを拡張するのは簡単なことです。

直流負荷は常に温度チャンバの外の基板外に追加されます。パルスステップ負荷だけが内側に設置されます。

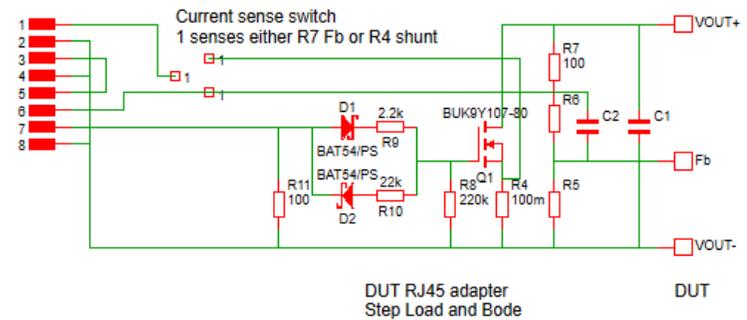


ステップ負荷

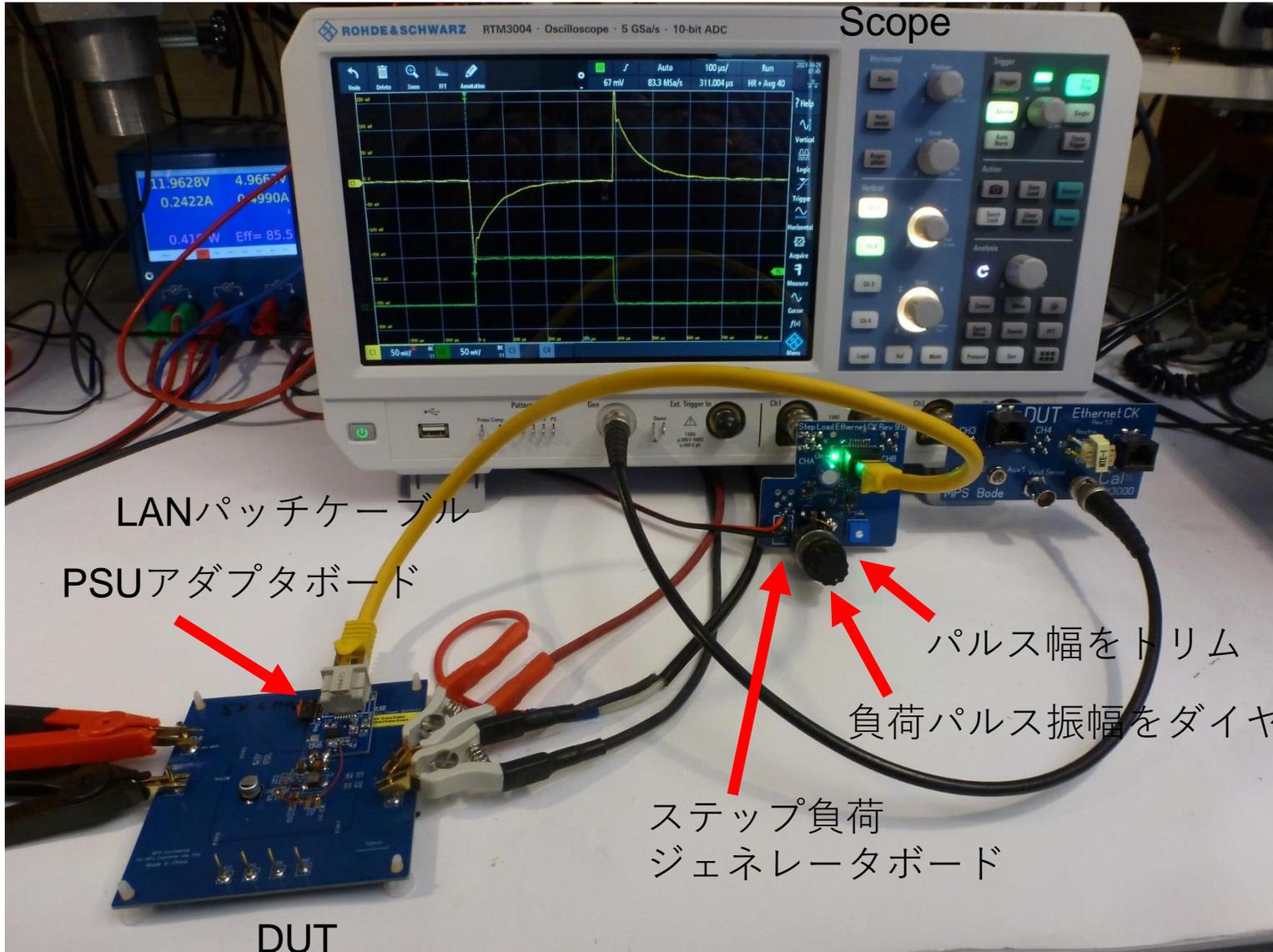
電圧可変パルスが生成される。



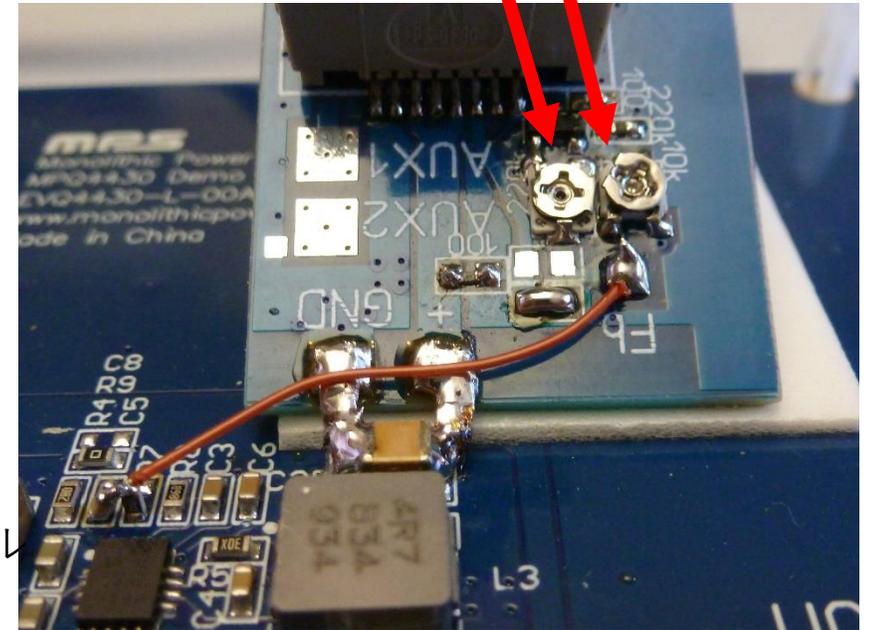
MPS Christian Kueck 26. Nov. 2021 Rev 9.0



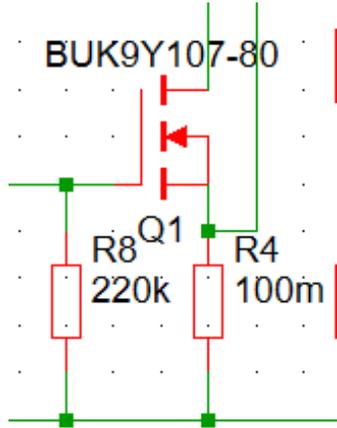
ステップ負荷の設定



下降エッジスロープをトリム
上昇エッジスロープをトリム



ステップ負荷MOSFETの選択はさほど重要ではない



重要なのはSOA (safe operation area: 安全動作領域) です。MOSFETにかかる負荷は電圧と電流=電力を同時に見ています。大体のMOSFETはそのようには設計されていません。ゲートスレッシュホールド (V_{GS}) には強い負の温度係数があり、アナログ動作時の高電力放熱領域でMOSFETを不安定にしてしまいます。さらに、QGドライブ能力は $100\text{m}\Omega$ のケーブルシステムで制限されています。より高い V_{OUT} (5V以上) の値による大きな電流と倍増した負荷/デューティサイクルでの動作に注意してください。負荷MOSFETを選ぶ前に、SOAグラフをよく確認してください。

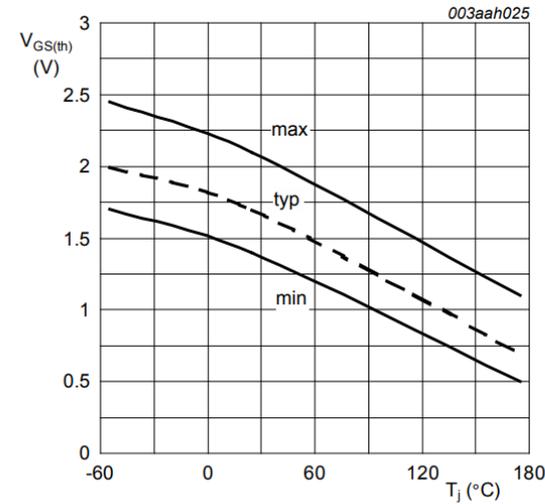
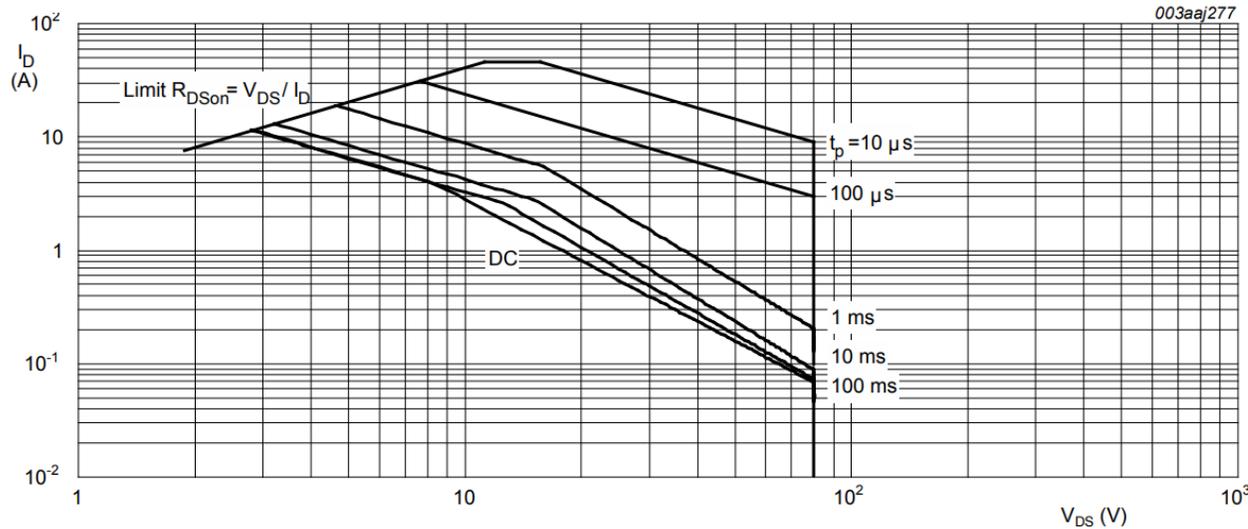


Fig. 4. Safe operating area; continuous and peak drain currents as a function of drain-source voltage

$T_{mb} = 25^\circ\text{C}$; I_{DM} is a single pulse

Fig. 9. Gate-source threshold voltage as a function of junction temperature

$I_D = 1\text{ mA}$; $V_{DS} = V_{GS}$

N-channel 80 V, 107 m Ω logic level MOSFET in LFPAK56

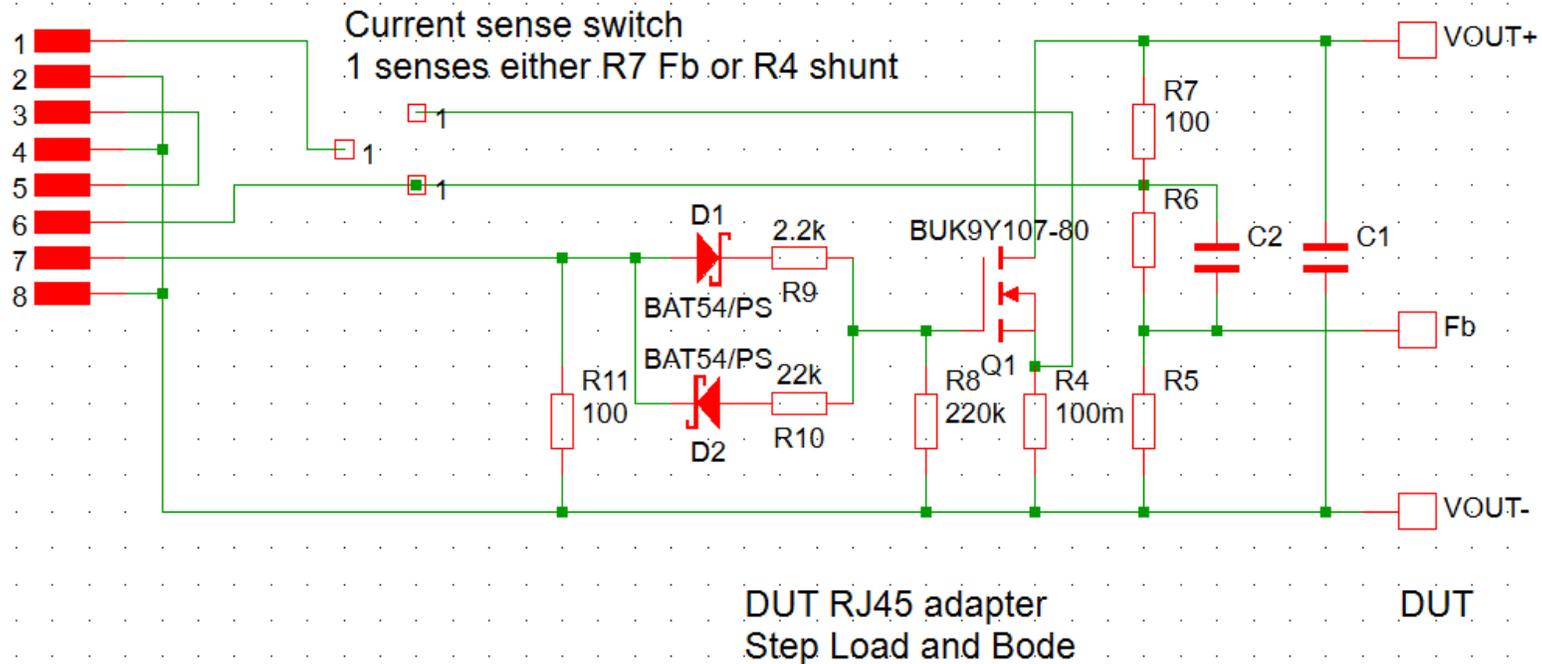
2.5	-	nC
-----	---	----



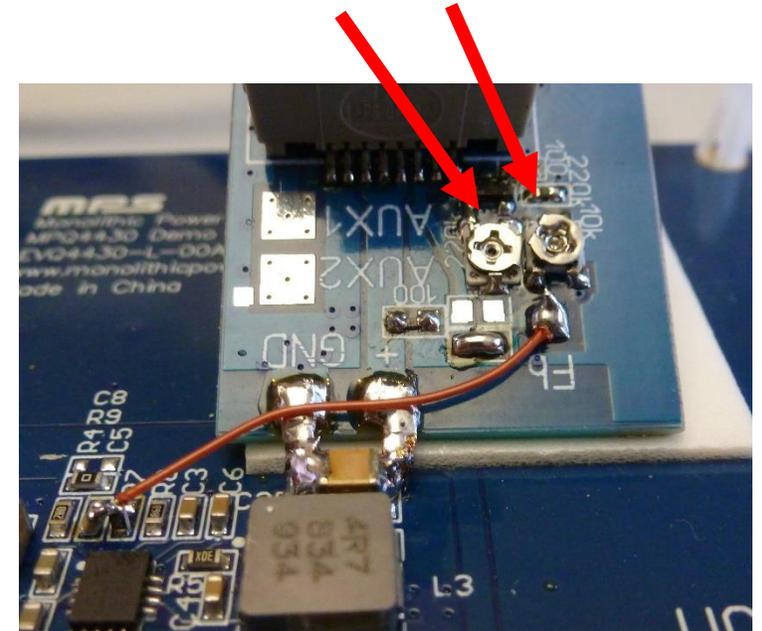
スイッチと組み合わされたボードおよびステップ負荷アダプタ

ボードおよびステップ負荷アダプタは同じ基板に配置され、DUT出力コンデンサ上のGNDとVOUTを共有します。

ステップ負荷スイッチはPSUのCOOUTに直接付加され、ループインピーダンスは低く、ボードの計測に干渉しません。



R9 R10をトリム
降下および上昇エッジスロープ

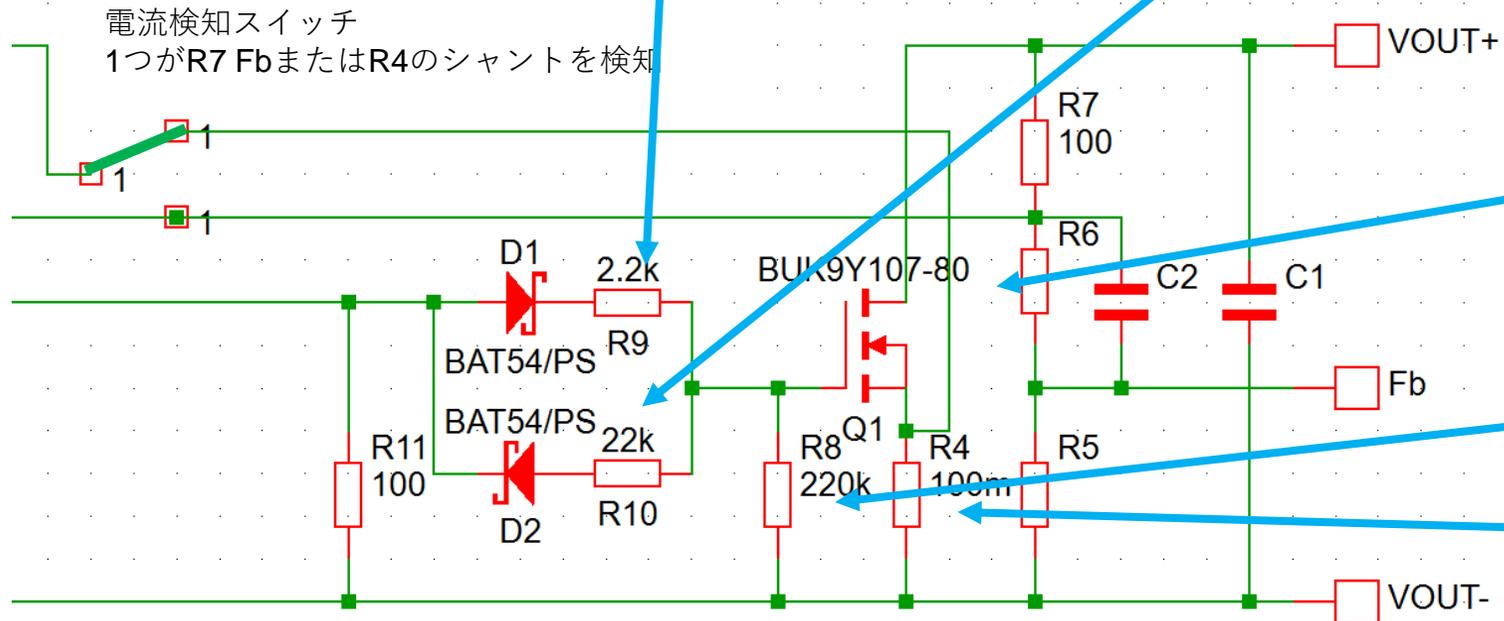


ステップ負荷アダプタ詳細

R9は上昇エッジを選択します。調整必要時にはR9には10kΩのトリマーが使用されます。

D1、D2はシングルSOT23 BAT54S

R10は降下エッジを選択します。調整必要時220kΩのトリマーが使用されます。



電流検知スイッチ
1つがR7 FbまたはR4のシャントを検知

SOAのためにMOSFET M1
を選択し、QGのためあまり
高くしません (この例では
6.2nC)

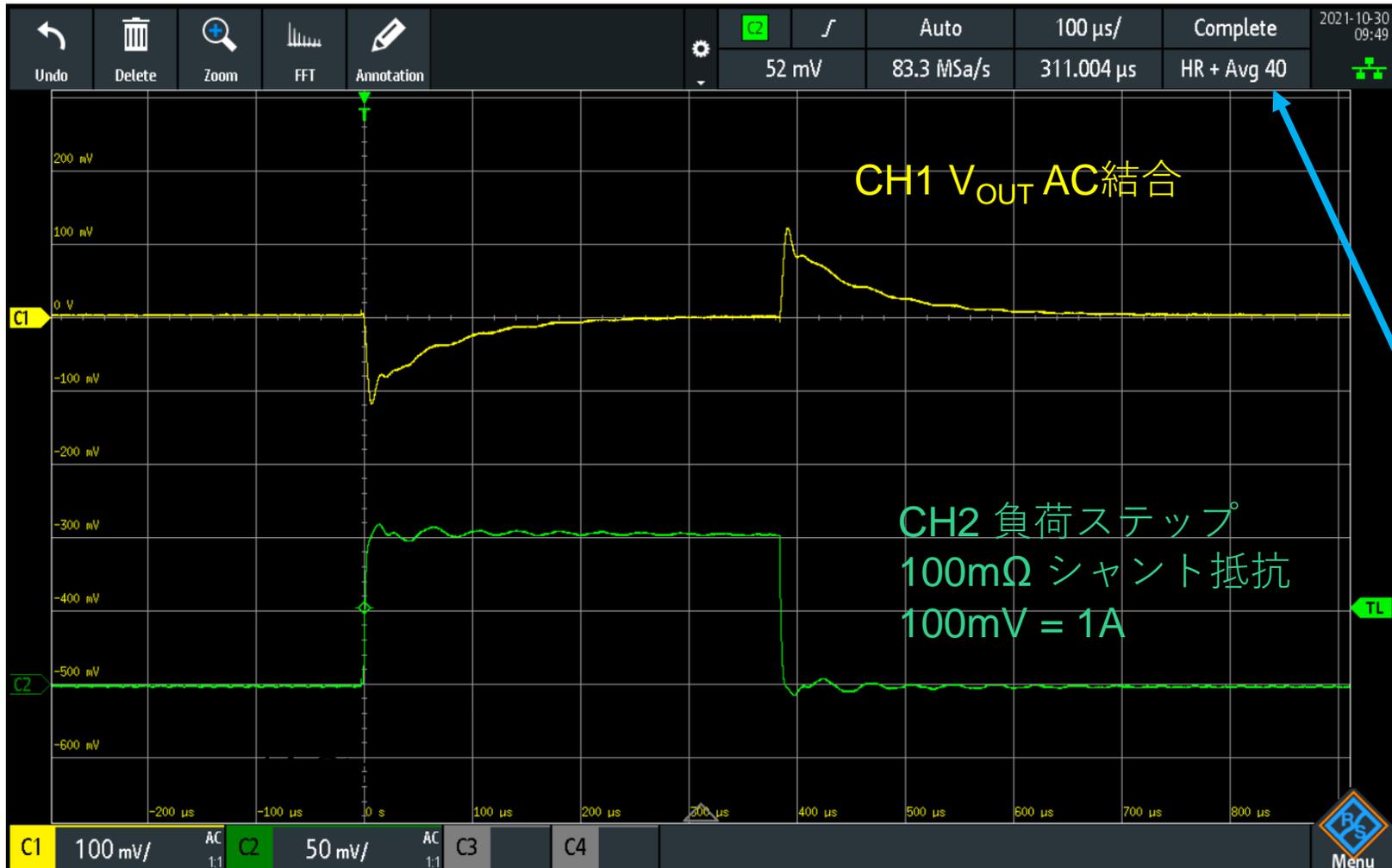
R8はD2の漏損により電流が
上昇するのを防ぎます。

R4は電流計測感度を設定し
ます(この例で100mV=1A)。

DUT RJ45アダプタ
ステップ負荷およびボード

DUT

-40°Cで2m UTPパッチケーブル上で計測された1Aの負荷ステップ

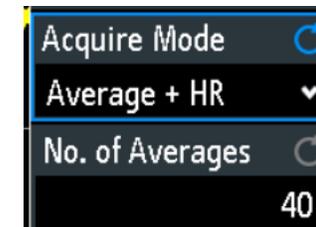


予測どおり、 51° の位相マージンで漸近挙動が見られます。

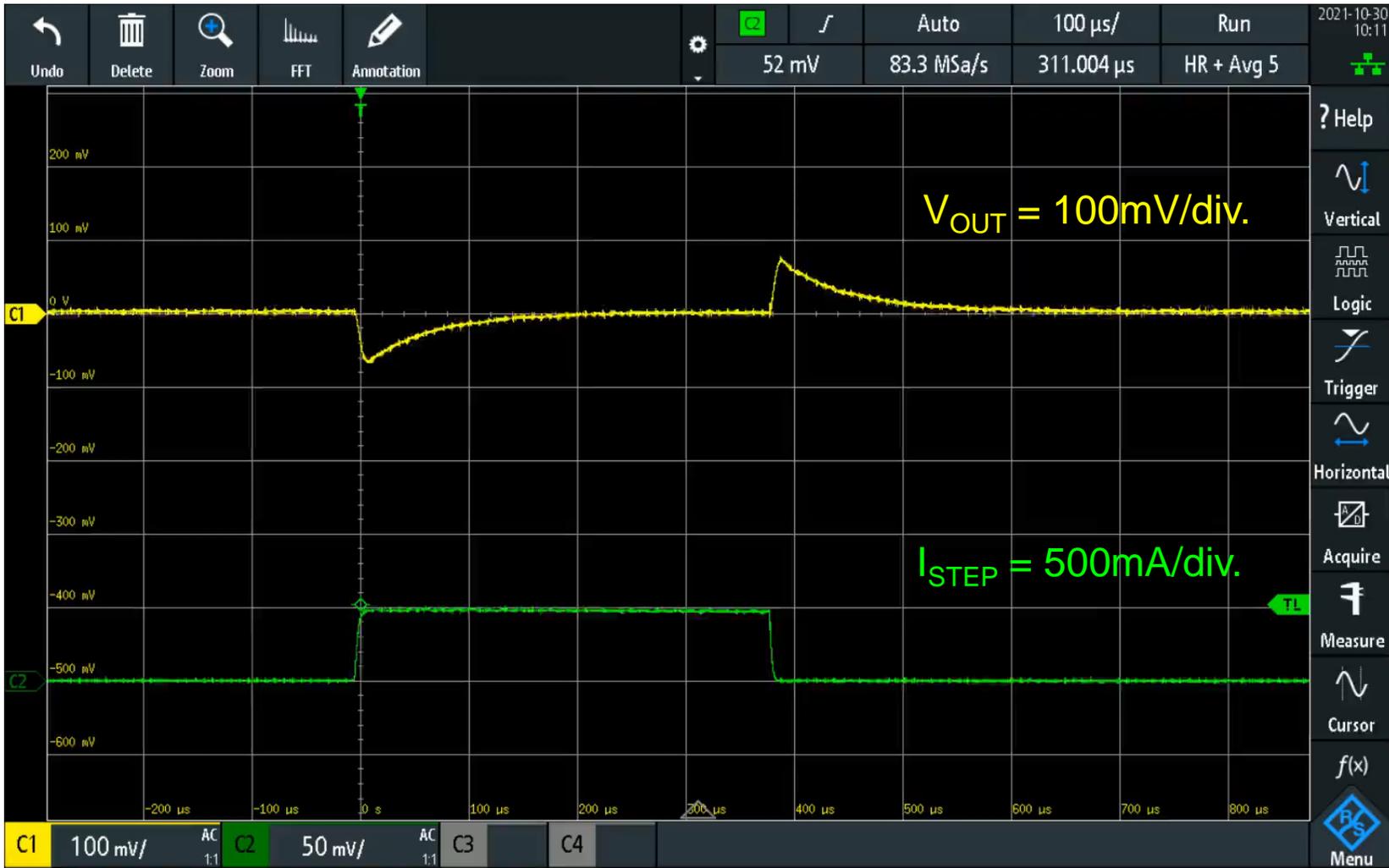
計測が散漫ですが、平均値でフィルタすることができます。



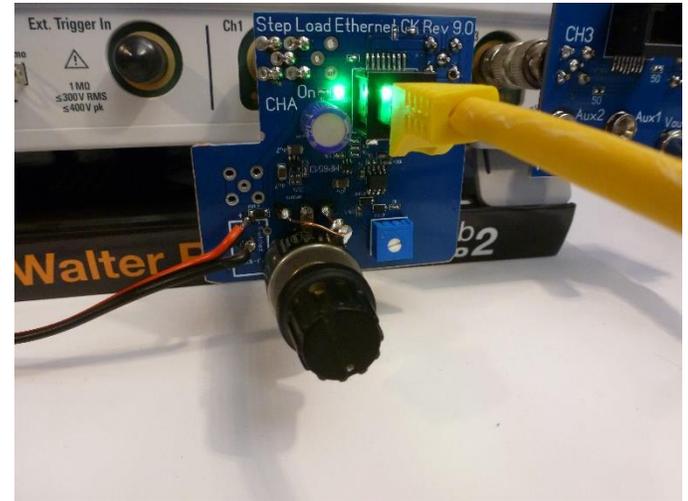
平均値の適切な数値を使用します



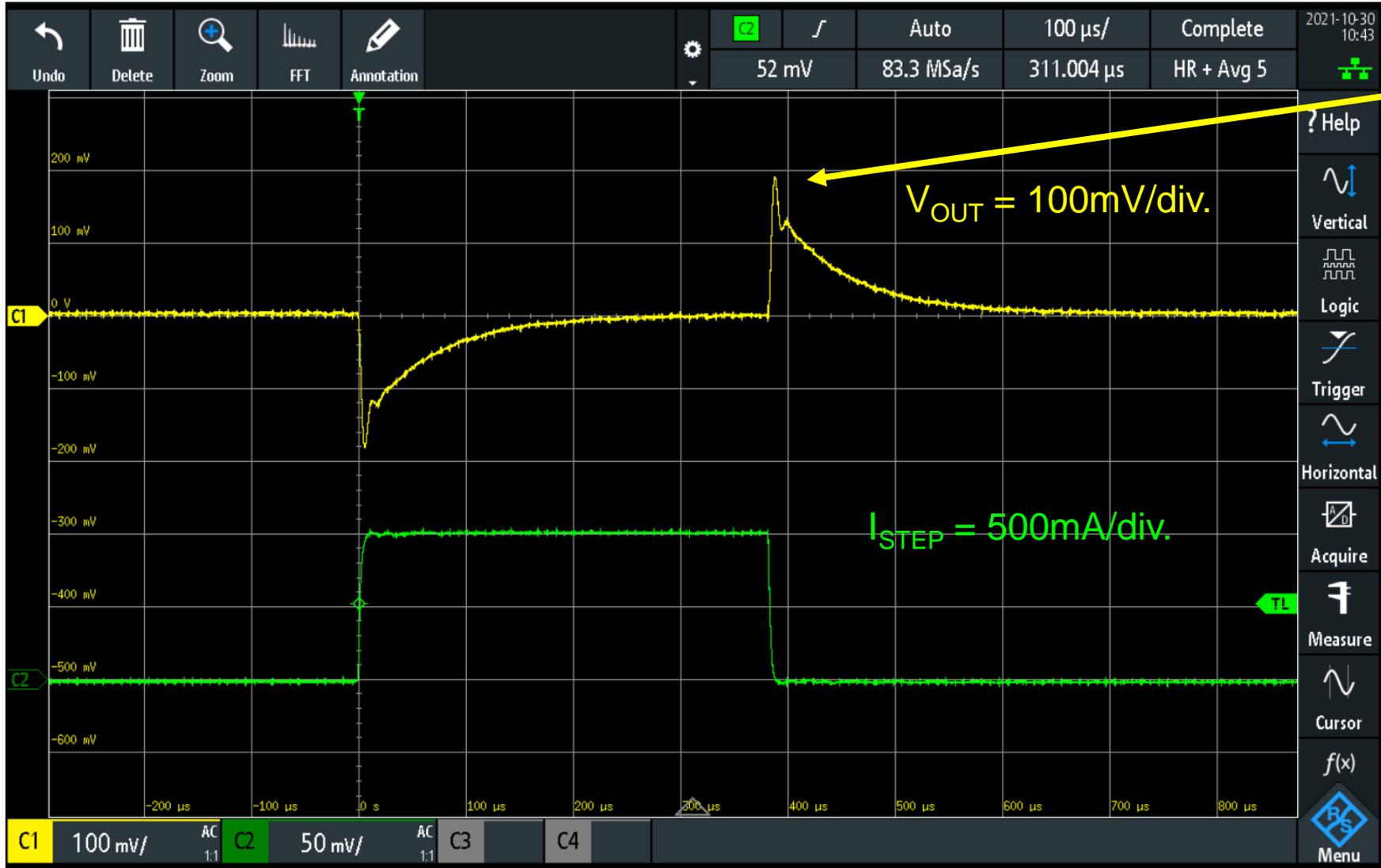
ビデオ: 負荷ステップ MPQ4323



V_{OUT} のステップ負荷応答は
ステップの大きさに比例します。

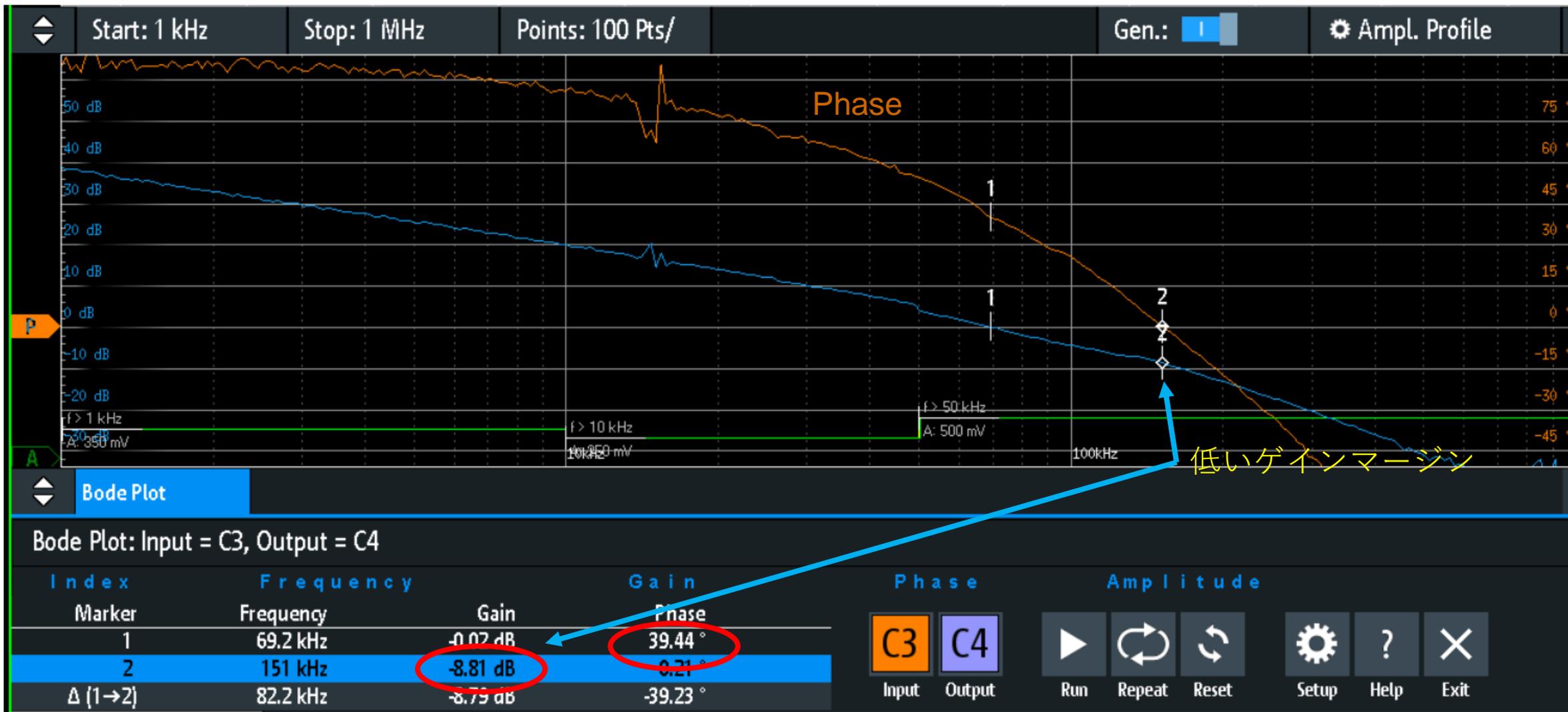


MPQ4323 22 μ F C_{OUT}



次ページのボード線図は
39° の位相マージンを示し
ています。
ステップ応答がいくらかリ
ンギングを始めています。

MPQ4323 22 μ F C_{OUT}



- イーサネットパッチケーブルはボードおよびステップ負荷計測に多用途に使用可能
- PSUアダプタは小型で、低寄生インダクタンスでDUTの C_{OUT} に接続
- DUTアダプタ上の負荷MOSFETは手早く低寄生インダクタンスでステップ負荷試験を可能にする
- ボード計測は従来のスコーププローブ接続よりもノイズが小さい
- ボード計測はより少ない数の計測地点によりより速く実施可能
- シンプルなシングルポイント接続は温度チャンバにおいて簡単な接続を実現
- ボードとステップ負荷の素早い変更: たった一つのスイッチと一つのRJ45の変更で可能に
- 最大3メートルのパッチケーブルが使用可能

付録: シンプルなDUTシングル + デュアルアダプタPCB 2層 60 x 35mm

上層のボード

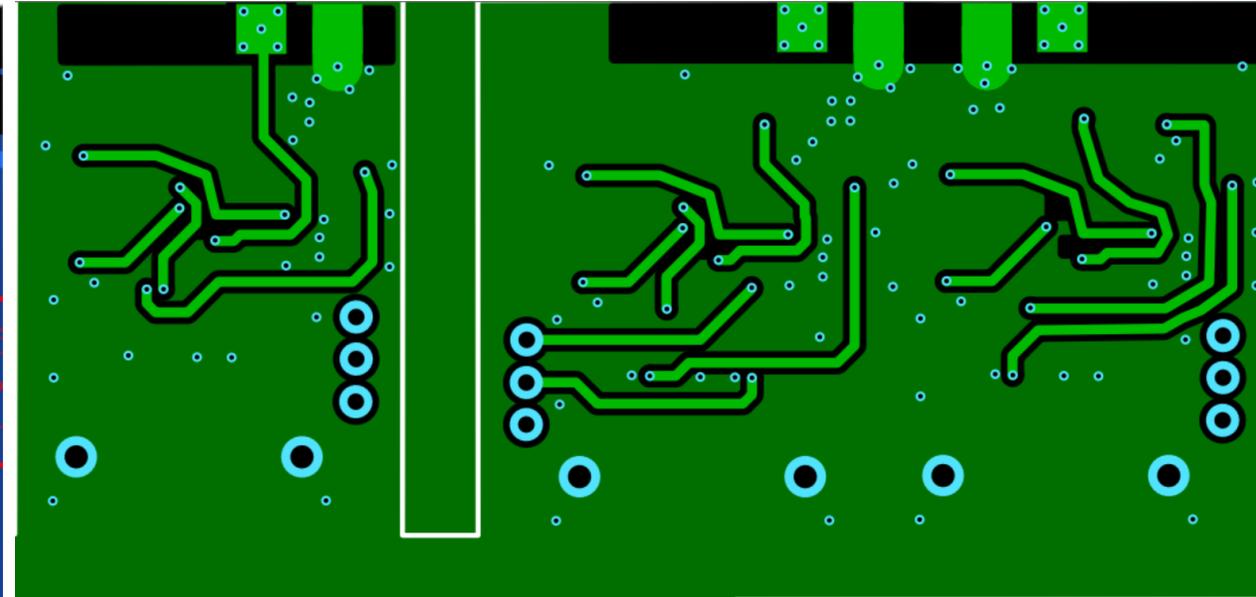
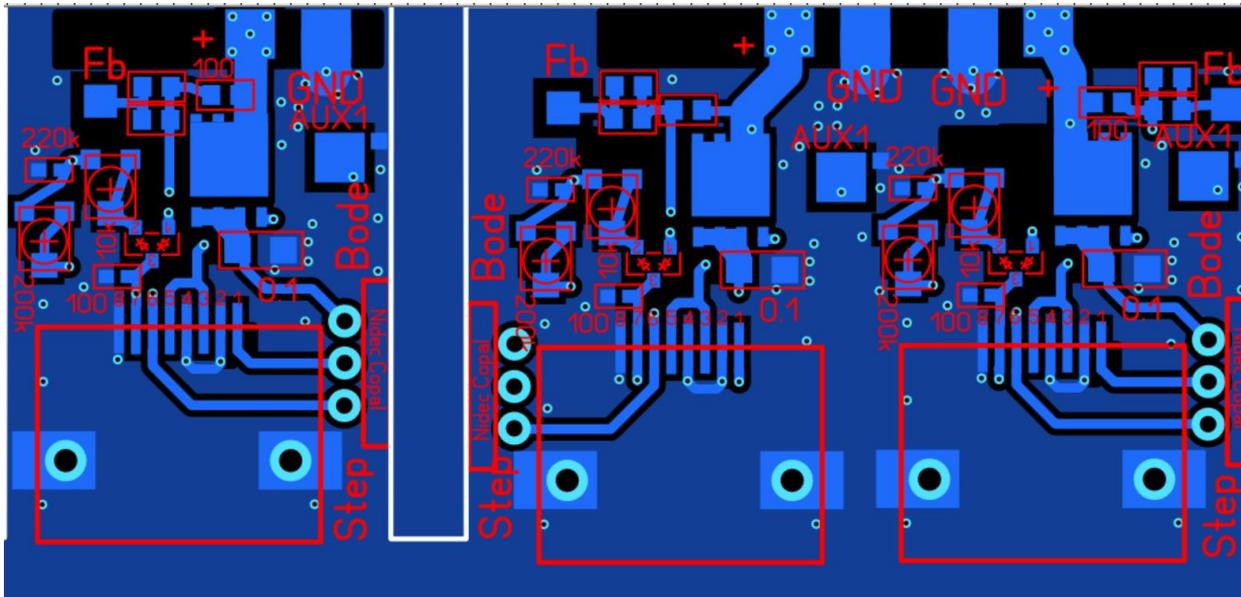
シングルアダプタ

デュアルアダプタ

下層のステップ負荷

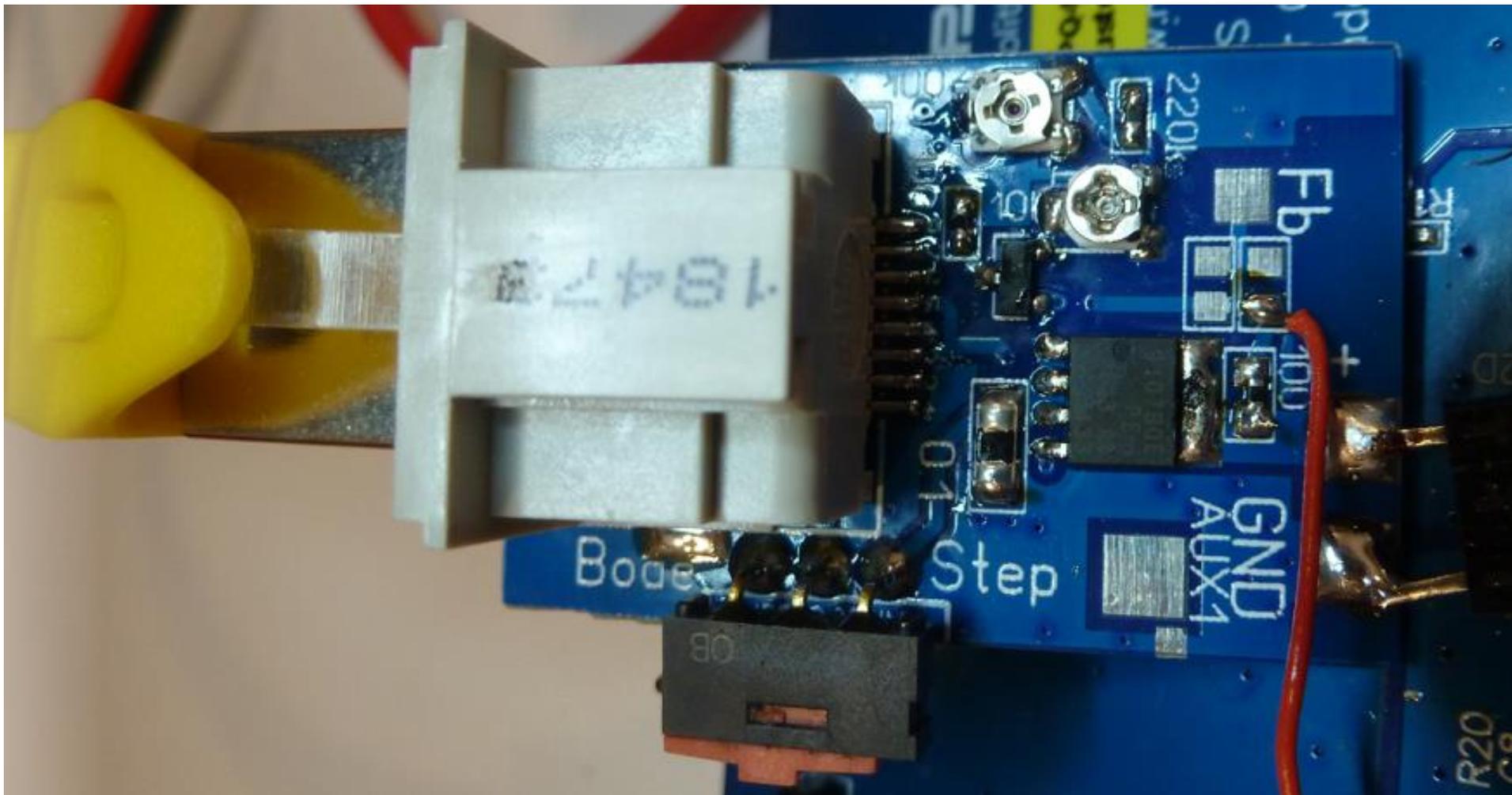
シングルアダプタ

デュアルアダプタ

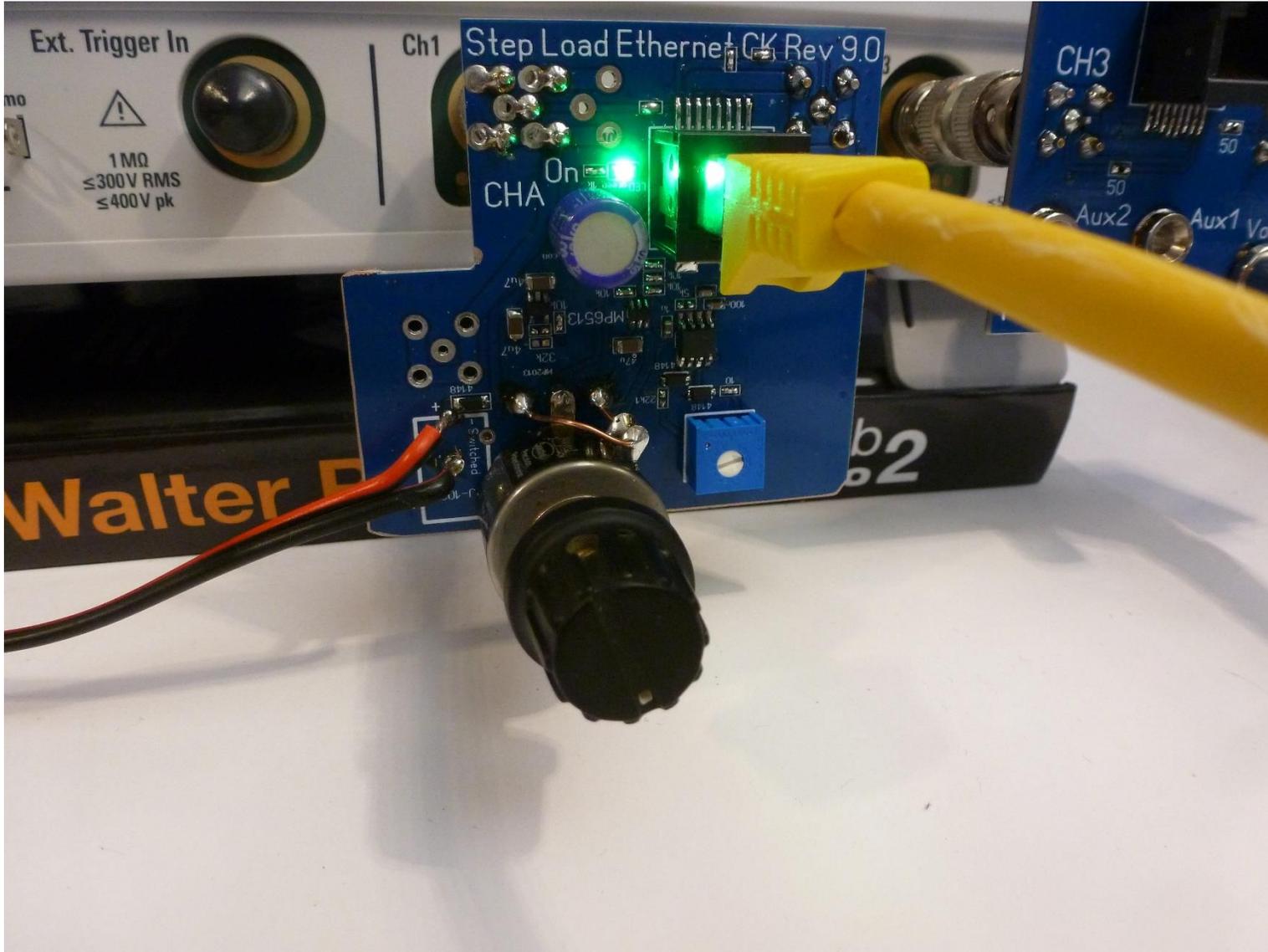


付録: DUTシングルPCB 2層 35 x 27mm

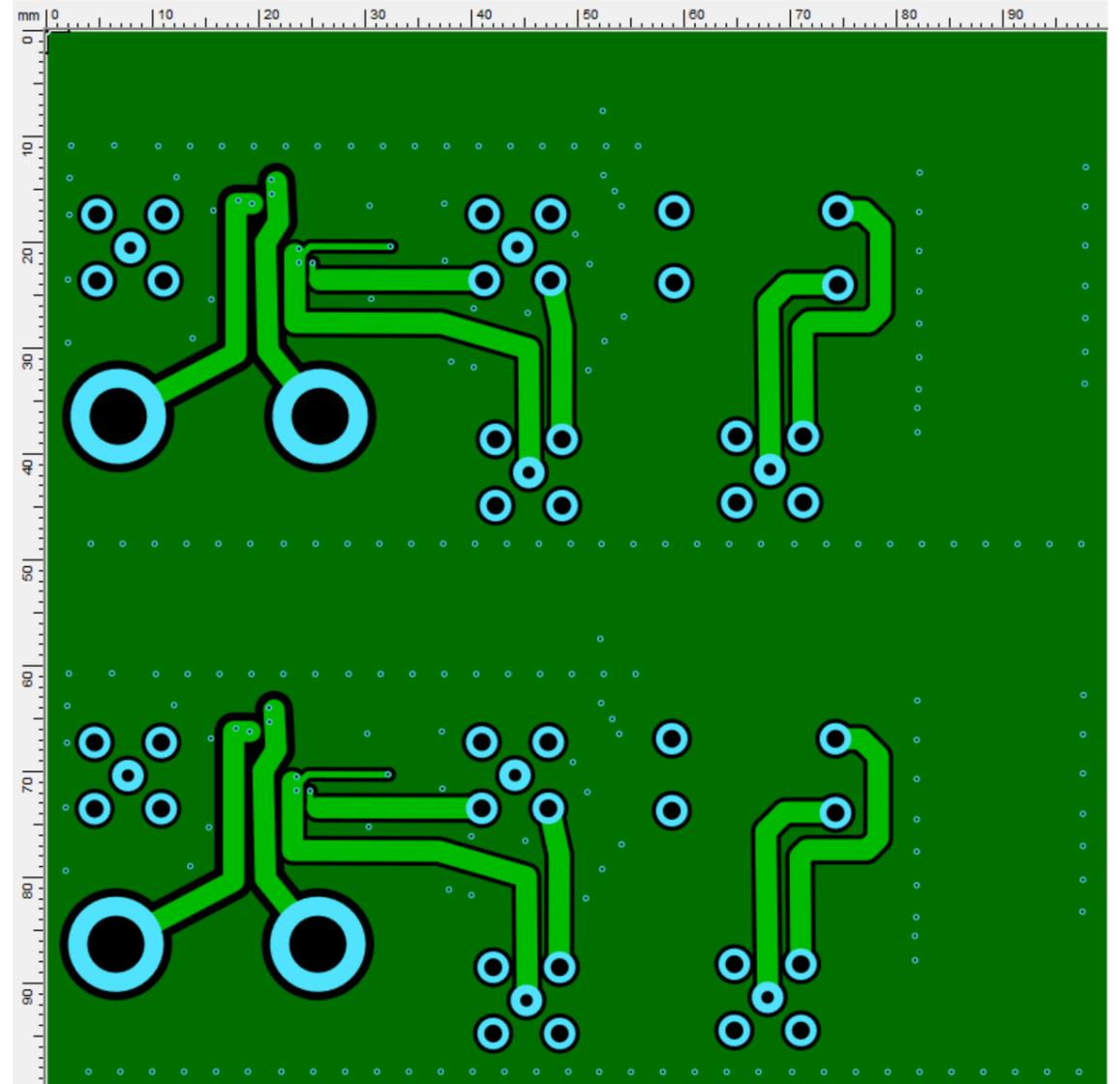
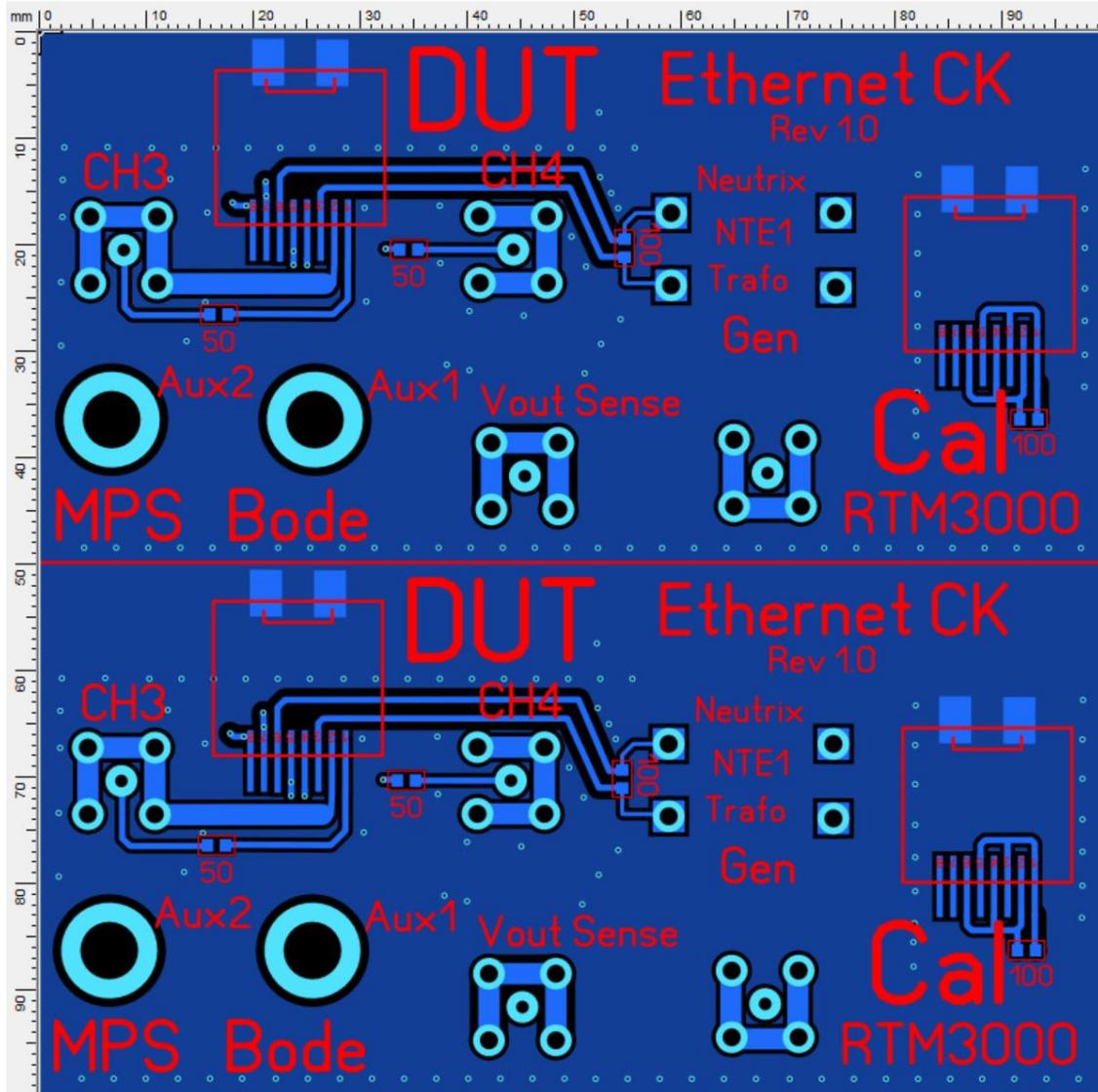
ボード上部 シングルアダプタ



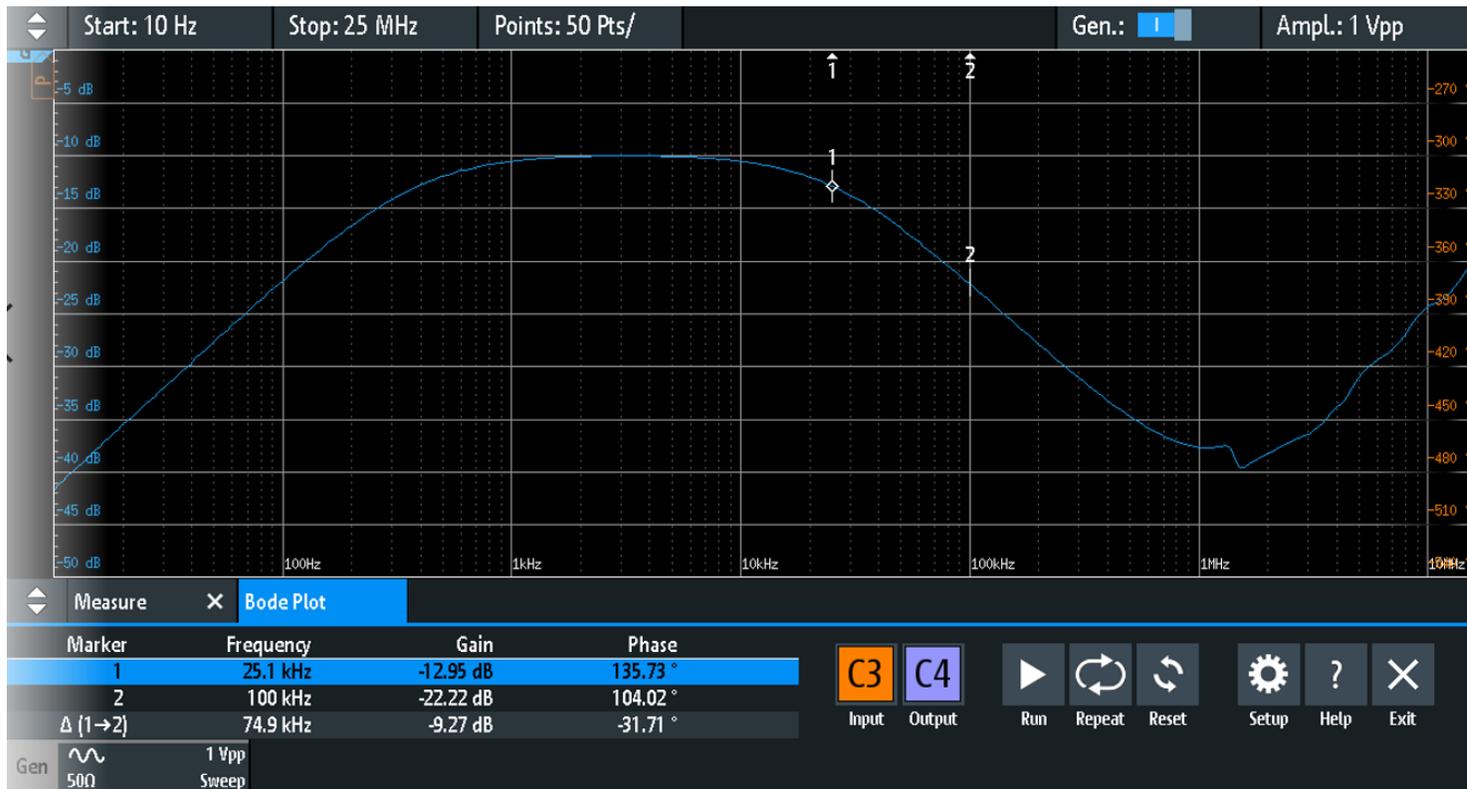
付録: ステップ負荷アダプタスコープ



RTM3000シリーズ ボードアダプタ



5Ω負荷時のNTE1トランスダンピング



2個の100Ω並列 = 50Ω負荷を考慮すると、トランスは1kHzから25kHzまでフラット (-3dB)な応答を示します。そして1MHzまで下降する三次ローパスダンピングが発生します。この周波数依存のダンピングは便利で、ほとんどのPSUの場合、形状レベルの機能のマイナー修正が必要なだけです。

トランスの全般的な周波数と位相応答は、周波数依存の振幅以外、計測されている位相プロットに影響しません。その唯一の目的は、 $V(X) = CH1$ および $V(Y) = CH2$ の計測ノードからジェネレータ電圧を絶縁することです。

BOM情報

Christians Bode Step Load Adapter												
o.k.	QTY.	Ref.	Description	Package	Manufacturer	Manuf._PN	Source	Order #	Price ea. €	Price Total.	Website	
	2	NA	Vertical RJ45	RJ45	Amphenol	98435-311LF	Digikey	609-6038-1-ND	0.99	1.98	98435-311LF Amphenol ICC (FCI) Steckverbinder, Verbindungen DigiKey	
	2	NA	Horizontal RJ45	RJ45	TE	5406721-1	Digikey	A121540CT-ND	1.13	2.26	5406721-1 TE Connectivity AMP Connectors Steckverbinder, Verbindungen DigiKey	
	2	P1,P1	4mm jacket solder	THC	Keystone		Digikey	36-575-8-ND	0.682	1.364	https://www.digikey.de/product-detail/de/keystone-electronics/575-8/36-575-8-ND/318495	
	1	U	MP6513GJ-Z	SOT-23	MPS	MP6513GJ-Z	Digikey / MPS	1589-1709-1-ND	0.81	0.81	MP6513GJ-Z Monolithic Power Systems Inc. Integrierte Schaltungen (ICs) DigiKey	
	1	BNC Connector	BNC PCB Female	BNC	TE	5-1634503-1	Digikey	A97581-ND	1.92	1.92	5-1634503-1 TE Connectivity AMP Connectors Steckverbinder, Verbindungen DigiKey	
	1	U	Timer IC 3MHz	SO-8	Ti	LMC555CMX	Digikey	LMC555CMX/NOPBCT-ND	1.04	1.04	https://www.digikey.de/product-detail/de/texas-instruments/LMC555CMX-NOPB/LMC555CMX-NOPBCT-ND/1010550	
	1	T	N-MOS	LFPK56	Nexperia	BUK9Y107-80EX	Digikey	1727-1119-1-ND	0.43	0.43	BUK9Y107-80EX Nexperia USA Inc. Diskrete Halbleiterprodukte DigiKey	
	1	R	0.1 Ohm 1206 shunt	1206	Stackpole	CSR1206FTR100	Digikey	CSR1206FTR100CT-ND	0.3	0.3	CSR1206FTR100 Stackpole Electronics Inc Widerstände DigiKey	
	2	R1,R2	100mOhm Shunt	1206	Stackpole	CSR1206FTR100	Digikey	CSR1206FTR100CT-ND	0.103	0.206	https://www.digikey.de/product-detail/de/stackpole-electronics-inc/CSR1206FTR100/CSR1206FTR100CT-ND/3477073	
	1	U	MPQ2013AGJE	SOT-23	MPS	MPQ2013AGJE-AEC1C672	MPS			0		
	1	D4	BAT54S	SOT-23	Nexperia	BAT54S,235	Digikey	1727-1868-1-ND	0.047	0.047	https://www.digikey.de/product-detail/de/nexperia-usa-inc/BAT54S-235/1727-1868-1-ND/5015536	
	3	D5,D6,D7	1N4148	SOD123	Diodes	1N4148W-13-F	Digikey	1N4148W-13FDICT-ND	0.059	0.177	https://www.digikey.de/products/de?keywords=1N4148W-13FDICT-ND	
	1	Optional	Con. BNC Long	THC	Molex	731000133	Digikey	WM5278-ND	2.83	2.83	https://www.digikey.de/product-detail/de/molex/0731000133/WM5278-ND/2713558	
	1	R	Trimmer 10k	THC	Bourns	3386P-1-103LF	Digikey	3386P-103LF-ND	0.985	0.985	https://www.digikey.de/product-detail/de/bourns-inc/3386P-1-103LF/3386P-103LF-ND/1088523	
	1	Pot 220 Ohm	Potentiometer 220 Ohm	THC	Piher	PC16SH-10IP06221A2020MTA	Conrad	2050000749537	1.69	1.69	Piher PC16SH-10IP06221A2020MTA Dreh-Potentiometer Mono 0.2 W 220 Ω 1 St. kaufen (conrad.de)	
	1	Transformer	NTE1	THC	Neutrix	NTE1	Conrad	2050000159879	16.99	16.99	https://www.conrad.de/de/p/neutrix-nte1-audio-uebertrager-impedanz-200-primaerspannung-1-2-v-inhalt-1-st-515940.htm	
	1	Trimmer 10k	10k SMD Trimmer	SMD	TT-Electronics	35WR10KLFTR	Digikey	987-1694-1-ND	0.3	0.3	35WR10KLFTR TT Electronics/BI Potentiometer, Variable Widerstände DigiKey	
	2	BNC-BNC	BNC-BNC Adapter	BNC	Cal Test	CT2766	Digikey	CT2766-ND	2.31	4.62	CT2766 Cal Test Electronics Steckverbinder, Verbindungen DigiKey	

Q&A