

Ergänzung zum Beitrag in FA 4/23, S. 292 „Impulsformermodul zur Erzeugung sehr steiflankiger Signale“

■ Impulsreflektometriemessungen an Koaxialkabeln

Versuchsaufbau

Ansteuerung des Impulsgeneratormoduls mit Rechtecksignal $U_{SS} = 6,3 \text{ V}$, Einstellung auf 4 ns Impulslänge. Am Ausgang des Moduls ist ein BNC-T-Stück. An dessen einem Ende wird die Spannung rückwirkungsarm mithilfe eines 10:1-Tastkopfs (10 M Ω /15 pF) abgegriffen und zu einem 300-MHz-Oszilloskop *Owon SDS 8302* geführt. Am anderen Ende ist ein 2 m langes Koaxialkabel RG-58 (50 Ω Wellenwiderstand) angeschlossen, gefolgt von dem BNC-T-Stück (nachfolgend A genannt) und einem weiteren, 5 m langen, Kabel RG-58. Dessen Ende ist mit B bezeichnet.

Ergebnisse

Bild A1: Die insgesamt 7 m Kabel, am Ende mit 50 Ω abgeschlossen, bilden eine HF-technisch einwandfreie Last für den Ausgang des Impulsformermoduls mit seinem Quellwiderstand von ebenfalls etwa 50 Ω . Die Leerlaufimpulsspan-

Stückliste

Bauteil	Wert/Bezeichnung/Gehäuse	Artikel-Nr.	Quelle
IC1, IC2	Schnitt-Trigger 74LVC1G17, SOT-753	SN_74LVC1G17DBV	(1)
C2	220 μF /10 V, Tantal, 6,0 \times 3,2 \times 2,6 mm ³ , TAJ-C	TAJ6032_220/10	(1)
C1, C3	100 nF/50 V, SMD 1206	X7R-G1206_100N	(1)
JP1...JP4	Stiftleiste, zweireihig, 2 \times 4 Pins	MPE_087-2-008	(1)
Jumper	Pinabstand 2,5 mm	Jumper 2,54 GL-SW	(1)
C4	33 pF/50 V, Pinabstand 2,5 mm	KERKO_33P	(1)
C5	330 pF/50 V, Pinabstand 2,5 mm	KERKO_330P	(1)
C6	3,3 nF/50 V, Pinabstand 2,5 mm	KERKO_3,3N	(1)
C7	33 nF/50 V, Pinabstand 2,5 mm	X7R-2,5_33N	(1)
VD1	Schottkydiode BAT46, DO-35	BAT_46	(1)
VD2	Zenerdiode 6,2 V/1,3 W	ZD_6.2	(1)
R1	Widerstand 100 k Ω , SMD 1206	SMD_1/4W_100K	(1)
R2	Widerstand 1 k Ω , SMD 1206	SMD_1/4W_1.0K	(1)
R3	Widerstand 3,3 k Ω , SMD 1206	SMD_1/4W_3.3K	(1)
R4	Widerstand 100 Ω , SMD 1206	SMD_1/4W_100	(1)
R5	Potenzimeter 100 k Ω , linear, zum Einlöten	RK09K113-LIN100K	(1)
R6	Widerstand 33 Ω , SMD 1206	SMD_1/4W_33	(1)
2 \times BNC	BNC-Einbaubuchse 50 Ω	UG_1094U	(1)
	Weißblechgehäuse 74 mm \times 20 mm \times 20 mm	FG3B	(2)

(1) www.reichelt.de

(2) www.box73.de

sprung reflektiert und gelangt nach insgesamt

$$t = \frac{s}{v} = \frac{14 \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 70 \text{ ns}$$

zurück zum Ursprung, mit etwas verringerter Amplitude infolge von Dämpfung und Dispersion in der Leitung.

$$r = \frac{R_{\text{Last}} - Z_L}{R_{\text{Last}} + Z_L}$$

ergibt sich hierbei $r = -1/3$. Z_L ist der Wellenwiderstand, der 50 Ω beträgt. Diese erste Reflexion am Impedanzsprung von 50 Ω auf 25 Ω erreicht nach weiteren 10 ns, also insgesamt 20 ns nach dem

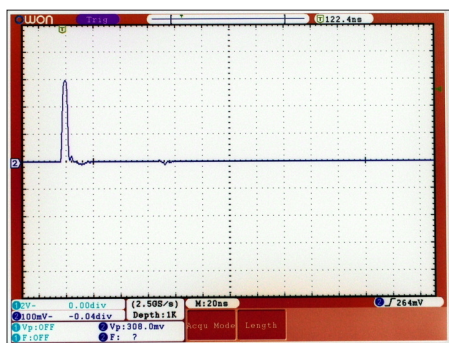


Bild A1: A offen, B mit 50 Ω abgeschlossen

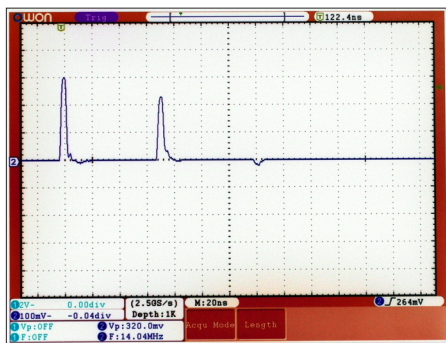


Bild A2: A offen, B offen



Bild A3: A offen, B kurzgeschlossen

nung von etwa 6 V erfährt eine Teilung auf die Hälfte. Der Oszilloskoptastkopf teilt weiter auf 10 %, sodass der ausgesandte kurze Impuls mit 0,3 V angezeigt wird. Es treten keine nennenswerten Reflexionen auf, vielmehr wird die ausgesandte Impulsenergie fast vollständig im 50- Ω -Abschlusswiderstand absorbiert. Bild A2: Im Kabel mit seinem geometrisch bedingten Verkürzungsfaktor von $VF = 0,66$ beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit etwa $2/3$ der Lichtgeschwindigkeit. Am offenen Ende B wird der ausgesandte Impuls ohne Phasen-

Bild A3: Ein Kurzschluss am Leitungsende B führt ebenfalls zu vollständiger Reflexion, aber mit 180° Phasendrehung. Der nach 70 ns zurückkehrende Impuls hat nun negative Polarität.

Bild A4: Der Impuls erreicht nach 10 ns den Ort A. Im ersten Moment erscheint das 25-cm-Kabelstück, obwohl am Ende leerlaufend, mit einer Impedanz von 50 Ω und wirkt zusammen mit dem korrekt abgeschlossenen 5-m-Kabel als Gesamtlastwiderstand von 25 Ω .

Mit der Gleichung für den Reflexionsfaktor

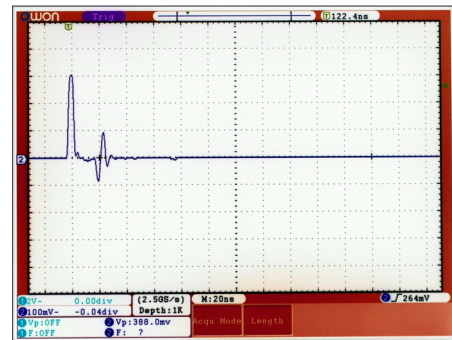


Bild A4: An A ist ein 25 cm langes Stück RG-58 mit offenem Ende angeklemt. B ist mit 50 Ω abgeschlossen.

Startimpuls, wieder den Generatorausgang und sollte dort mit einem Skalenteil nach unten auf dem Oszilloskop angezeigt werden. Das ist näherungsweise der Fall.

Der Energieanteil des in das 25-cm-Kabelstück hineinlaufenden Impulses erfährt an dessen offenem Ende eine Reflexion ohne Phasensprung und erscheint nach einer zusätzlichen Laufzeit von

$$t = \frac{s}{v} = \frac{50 \text{ cm}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 2,5 \text{ ns}$$

wieder am Ort A, als positiver Impuls. Das kurze Kabelstück hat also anfangs etwas Impulsenergie aufgenommen und gibt sie nach 2,5 ns wieder zurück. Der nochmals jeweils 2,5 ns später erkennbare kleine negative Impuls und der folgende winzige positive Impuls zeigen, wie ein immer kleinerer Energieanteil zwischen dem offenen Ende der 25-cm-Stichleitung und dem Ort A mit seiner Impedanz von 25 Ω hin- und her reflektiert wird.

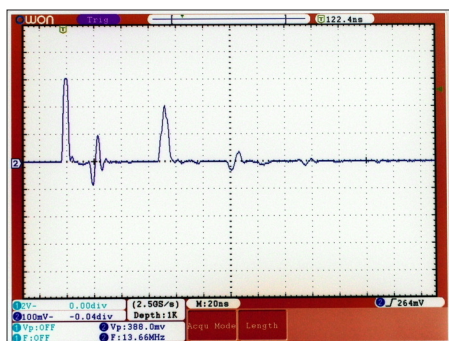


Bild A5: An A ist ein 25 cm langes Stück RG-58 mit offenem Ende angeklemt. B ist offen.

Weil das Ende B mit 50 Ω abgeschlossen ist, wird der hier hineinlaufende Energieanteil absorbiert, und es tritt keine Reflexion und somit keine weitere Spitze nach 70 ns auf. Die zurück zum Impulsgenerator reflektierte Energie wird in dessen Quellwiderstand absorbiert und daher nicht erneut losgeschickt. Die Linie auf dem Bildschirm ist nach den beiden kleinen Reflexionen also weitgehend ruhig.

Bild A5: Das jetzt offene Ende B bewirkt dort zusätzlich eine Reflexion des Ausgangsimpulses, der nach insgesamt 70 ns wieder am Startpunkt eintrifft (positive Spitze mit zwei Skalenteilen Höhe). Ein Teil der vom Ende B zurücklaufenden Energie interagiert erneut mit der an A angekoppelten leerlaufenden Stichleitung. Wie oben erwähnt, erscheint diese im ersten Moment als 50- Ω -Last, die nun aus Sicht des zurücklaufenden Impulses parallel zum vorderen 2-m-Kabel geschaltet ist und wieder eine 25- Ω -Last darstellt.

Am Ort A erfolgt also abermals eine teilweise Reflexion in Richtung des leerlaufenden Endes B und von dort zurück in Richtung Generator. Das Hin- und Herlaufen auf dem 5-m-Kabelstück dauert zusätzliche 50 ns. Um diese Zeit verzögert erscheint, auf dem Oszilloskop in Bildmitte zu sehen, eine kleinere Doppelreflexion nach der zwei Skalenteile hohen positiven Spitze.

Dass diese, im Vergleich zu ihrem Pendant in Bild A2, merklich verformt ist, liegt am Einfluss der Stichleitung auf den ursprünglichen in Richtung B laufenden Impuls: Zunächst wurde ihm beim Passieren der Stelle A ein bißchen Energie entzogen und nach 2,5 ns wieder zugeführt. Daher ist seine Anstiegsflanke etwas weniger steil, aber nach seinem Maximum trägt er die zeitlich nach hinten verschobene Energie in Form einer kleinen Ausbuchtung.

Man erkennt, dass die Aufspaltung eines HF-Kabels in mehrere Zweige Probleme

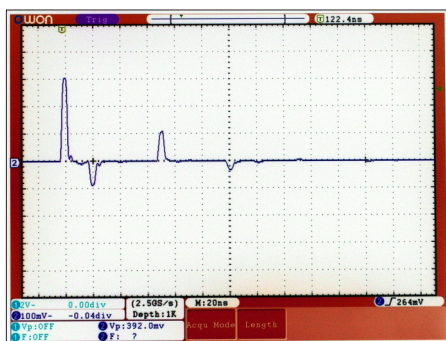


Bild A6: Das Ende des 25 cm langen Kabelstücks an A ist mit 50 Ω abgeschlossen. B ist offen.

mit Signalechos verursacht, falls man nicht auf exakte Impedanzanpassung an allen Punkten achtet. Diese kann durch transformatorische Kopplung erfolgen oder einfacher durch Widerstands-Anpassnetzwerke, die jedoch prinzipbedingt Energieverluste verursachen.

Bild A6: Weil das Ende der bei A angeschlossenen kurzen Stichleitung mit 50 Ω abgeschlossen ist, gibt es dort keine Reflexion, sondern 10 ns nach dem Ursprungsimpuls tritt aufgrund des Impedanzsprungs auf 25 Ω am Ort A eine Reflexion auf, die nach weiteren 10 ns wieder am Startpunkt eintrifft, wie bei Bild A4 erwähnt. Ein Teil der Impulsenergie ist nun im 50- Ω -Abschluss am Ende der 25 cm langen Stichleitung absorbiert worden, sodass entsprechend weniger zum Kabelende B weiterlaufen kann.

Dieser geringere Anteil erfährt dort eine vollständige Reflexion ohne Phasensprung und kommt nach 70 ns als nur noch halb so hoher positiver Impuls (im

Vergleich zu Bild A2) am Startpunkt an. Wie bei Bild A5 wird jedoch ein Teil davon erneut am Ort A eine Impedanz von 25 Ω vorfinden und in Richtung B reflektiert werden, um von dort ohne Phasensprung zurück zum Ursprung zu laufen und die kleine negative Spitze in Bildmitte zu verursachen. Wie ersichtlich, genügt es zur Echovermeidung nicht, nur eine von zwei Kabelverzweigungen korrekt abzuschließen.

Bild A7: Ein 50- Ω -Abschluss an beiden Kabelenden lässt die Echos verschwinden. Nur noch die Reflexion des Startimpulses durch den Impedanzsprung auf 25 Ω am Ort A gelangt nach 20 ns zurück zum Generatorausgang. Die Impulsanteile, die in die kurze Stichleitung und in das 5 m lange Kabel hineinlaufen, werden an deren Enden vollständig absorbiert.

Es ist lehrreich, während solcher Versuche die Impulsdauer, von 4 ns beginnend, kontinuierlich zu erhöhen. So wird deut-

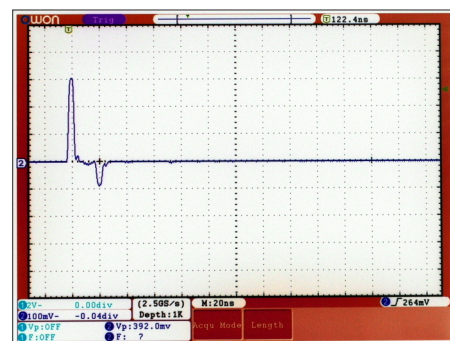


Bild A7: Das Ende des 25 cm langen Kabelstücks an A und auch das Ende B sind mit jeweils 50 Ω abgeschlossen.

lich, dass nicht allein sehr kurze Impulse, sondern bereits die Steilflankigkeit langer Impulse Anlass zu Reflexionen an Impedanzsprungstellen geben und Signalverzerrungen in Form von Stufen auf den Anstiegs- und Abfallflanken erzeugen. Bei der Übertragung solcher Signale ist also stets auf wellenwiderstandsrichtige Kabel und Abschlusswiderstände zu achten.

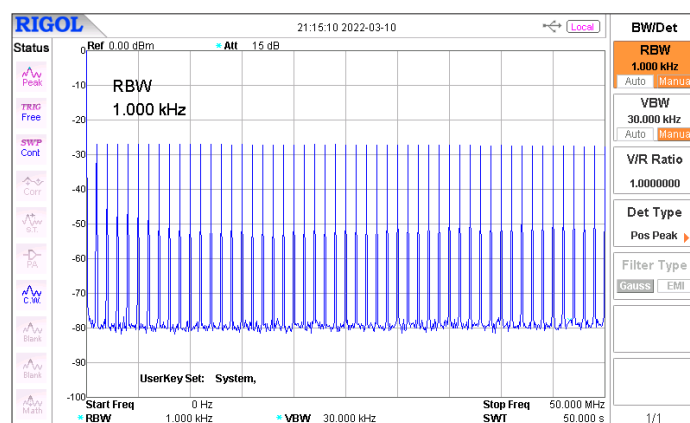
Wird für solche Messungen ein digitales Speicheroszilloskop eingesetzt, so genügt eine geringe Impulsfolgefrequenz. Auf der Röhre eines analogen Oszilloskops werden die kurzen und seltenen Impulse aber nur eine unzureichende Bildhelligkeit erzeugen. In diesem Fall kann durch Steigerung der Rechteckfrequenz am zur Ansteuerung verwendeten Funktionsgenerator die Folgefrequenz der Impulse und damit die Bildhelligkeit nach Bedarf erhöht werden.

Will man sehr lange Leitungen untersuchen, mit entsprechend großen Verzöge-

rungszeiten, so lässt sich die Folgefrequenz bequem so anpassen, dass einerseits alle Reflexionen und Echos eingetroffen sind, bevor der nächste Anregungsimpuls startet, und andererseits die Darstellung auf dem Schirm eines Analogoszilloskops hell genug ist. Diesbezüglich ist das im Beitrag vorgestellte Impulsformermodule flexibler als die in [2] und [3] des Beitrags beschriebenen Vorrichtungen.

■ Einsatz einer Impulsfolge als Frequenzkamm

Wie im Beitrag erwähnt, weist eine Folge kurzer Impulse im Frequenzbereich ein weitreichendes Spektrum äquidistanter Linien auf, die u. a. zur Kalibrierung funkt technischer Geräte genutzt werden können.



Zur Illustration wurde das auf 4 ns eingestellte Impulsformermodule mit 1-MHz-Rechteckspannung angesteuert. Ein Spektrumanalysator *Rigol DSA815* erfasste die vom Modul erzeugte Impulsfolge. Bild A8 zeigt, dass bei Frequenzen, die weit genug unterhalb des Reziprokwerts der Impulsdauer (hier: $f = 250$ MHz) liegen, der Amplitudenabfall der Linien nur gering ist, was sie neben der Frequenzkalibrierung auch zur Verstärkungs- oder Empfindlichkeitskalibrierung brauchbar macht. Dieselbe Impulsfolge ist auf Bild A9 in einem 20-fach weiteren Frequenzbereich dargestellt. Die einzelnen Linien verschmelzen, bedingt durch den Spektrumanalysator und die gewählten Einstellungen, zu einer Hüllkurve. Deren erstes Mi-

nimum liegt bei 250 MHz, in Übereinstimmung mit dem Erwarteten.

■ Sinusgenerators zur Ansteuerung des Moduls

Nicht in jedem Shack eines Funkamateurs ist ein Funktionsgenerator vorhanden, wie er für die Signalansteuerung und Stromversorgung des im Beitrag beschriebenen Moduls vorgesehen ist. Ersatzweise kann auch ein Sinusgenerator diese Aufgabe übernehmen, sofern sich sein Ausgangspegel bis zu mindestens 20 dBm einstellen lässt. Um das zu testen, habe ich den Trackinggenerator-Ausgang eines Spektrumanalysators *Rigol DSA815* auf seinen Maximalpegel von 0 dBm eingestellt und zur Anhebung auf ungefähr

Bild A8: Spektrum einer Impulsfolge mit 1 MHz und 4 ns im Frequenzbereich von 0 Hz bis 50 MHz

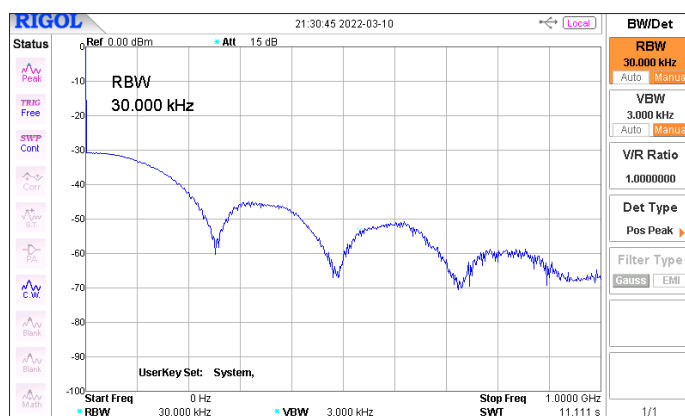


Bild A9: Spektrum einer Impulsfolge mit 1 MHz und 4 ns im Frequenzbereich von 0 Hz bis 1 GHz

25 dBm einen Breitbandverstärker [4] nachgeschaltet. Der Aufbau ist in Bild A10 zu sehen. Der Trackinggenerator gibt hier konstant 20 MHz ab, das kleine Impulsformermodule ist auf etwa 22 ns Impulslänge eingestellt und liefert das auf dem 300-MHz-Oszilloskop dargestellte Rechtecksignal, in Bild A11 deutlicher sichtbar. Dank des hohen HF-Eingangspiegels ist hier eine Spitzenspannung von 5 V erreichbar, die Anstiegszeit ist ebenso kurz wie auf Bild

6 des Beitrags, für das die Rechteckspannung eines einfachen Funktionsgenerators zur Modulansteuerung verwendet wurde.

Für Bild A12 war die Frequenz des Trackinggenerators auf 35 MHz erhöht und am Impulsformermodule mit rund 4 ns kleinstmögliche Einstellung gewählt. Man erhält kurze Impulse mit 35 MHz Folgefrequenz, wie sie ansonsten nur durch teure Arbitrary-Signalgeneratoren erzeugbar sind. Es soll freilich nicht verschwiegen werden, dass bei diesen hohen Frequenzen der zur Stromversorgung der beiden CMOS-Gatter des Moduls dienende Einweggleichrichter zunehmend ineffizienter wird und Rückwirkungen auf das ansteuernde Sinussignal ausübt. Man sollte also stets das erzeugte steiflankige Rechteck- oder Impulssignal oszilloskopisch auf Pegel und Signalqualität kontrollieren und die Einstellungen an Generator und Modul entsprechend wählen.

Der Versuch, mit einem noch leistungsfähigeren HF-Verstärker, nach dem Motto „viel hilft viel“, auch im höheren zweistelligen Megahertzbereich noch hochpegelige Signale am Ausgang des Moduls zu erzwingen, wird irgendwann dessen Gleichrichter und in Folge die Gatter zerstören – bei einem Materialpreis von etwa 8 € hält sich der Schaden immerhin in Grenzen.

Auf Bild A13 ist das Spektrum einer Folge von 10 ns langen Impulsen mit 10 MHz Wiederholfrequenz dargestellt. Anders als für Bild A9 erfolgt die Spektrumsdarstellung hier durch die FFT-Funktion des Oszilloskops, während der Trackinggenerator dem Modul das Sinus-Ansteuersignal mit $f = 10$ MHz zuführt. Ähnlich wie in Bild A9 treten auch hier die Intensitätsminima bei ganzzahligen Vielfachen auf, also bei 100 MHz, 200 MHz usw. Zusätzlich ist erkennbar, dass das Signal aus diversen Oberwellen der Grundfrequenz 10 MHz besteht.

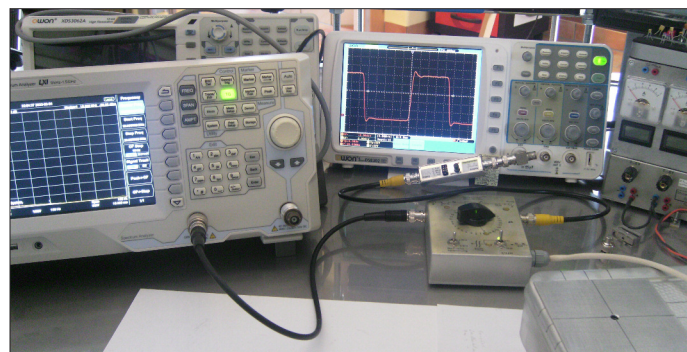


Bild A10: Versuchsaufbau mit Sinusgenerator, Nachverstärker, Impulsformermodule und schnellem Oszilloskop
Fotos, Screenshots: Franke

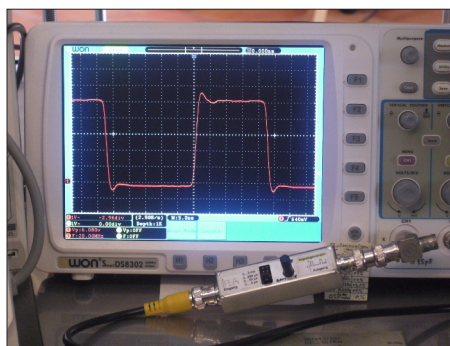


Bild A11: vom Modul geformtes Signal mit 22 ns Impulslänge und 20 MHz Wiederhol­frequenz

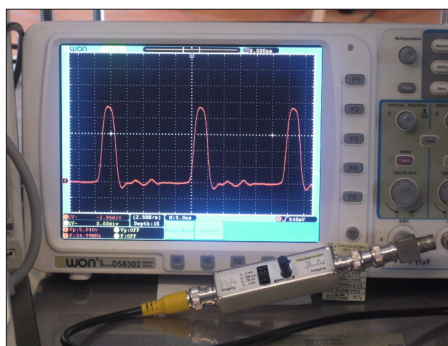


Bild A12: vom Modul geformtes Signal mit 4 ns Impulslänge und 35 MHz Wiederhol­frequenz

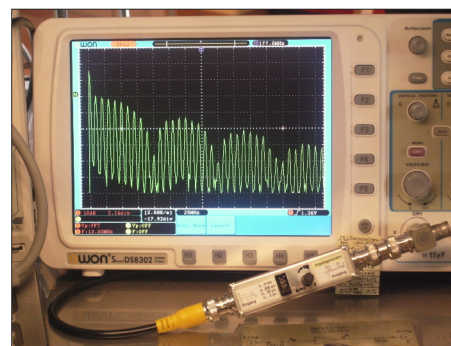


Bild A13: FFT-Spektrum einer Folge von 10 ns langen Impulsen mit 10 MHz Wiederhol­frequenz

Solche Spektren sind nicht immer leicht darstellbar, weder beim Einsatz eines Spektrumanalysators noch bei der Nutzung der FFT-Funktion des Oszilloskops. Manchmal verletzt man durch suboptimale Einstellungen am Gerät das Abtasttheorem, die Durchlauffrequenz (engl. sweep) oder die Auflösung am Analysator ist ungünstig gewählt, oder die Auswertesoftware stößt an ihre Grenzen. Die angezeigten Spektren sollten daher immer auf Plausibilität geprüft werden und die Geräteeinstellungen sind versuchsweise zu variieren. emmmf@posteo.de

Literatur

- [4] Franke, M.: Schaltbare Verstärker mit linearer Dezibel-Stufung. FUNKAMATEUR 62 (2012), H. 5, S. 492–494

emmmf@posteo.de