

Überprüfung der technischen Daten von Oszilloskopen

Reinhard Noll, DF1RN

Vor gut einem halben Jahr habe ich ein neues Vierkanal-Oszilloskop der Firma Siglent erstanden: SDS 2204X [1]. Mir bot sich nun die Gelegenheit, einige Messungen mit einem geliehenem Rohde & Schwarz Sweep Generator 0.1 ... 2500 MHz durchzuführen [2]. Mein erstes Ziel galt der Bestimmung der Bandbreite des Digitaloszilloskops.

Der Ausgang des Messsenders wird über einen N-BNC-Adapter und ein 50 cm langes RG 58 MIL Koaxialkabel mit dem Kanal 1 des SDS 2204X verbunden. Der Messender wird in den Betriebsmode SYNC (Synchronisierung der Frequenz) und auf einen Ausgangspegel von 0 dBm eingestellt. Die Frequenzen können per Tastatur gewählt werden. Der Eingang des SDS 2204X wird auf 50Ω gestellt und mit Hilfe der Cursorfunktionen wird der jeweilige Spitze-Spitze Wert u_{ss} des angezeigten Sinussignals gemessen. Bild 1 zeigt das Ergebnis für einen Frequenzbereich von 10 bis 500 MHz. Ab 500 MHz triggert das Oszilloskop nicht mehr. Als horizontale Linien ist der gewählte Ausgangspegel des Messsenders von 0 dBm sowie in Bezug dazu der -3 dB Pegel eingezeichnet. Von Siglent wird eine -3 dB Bandbreite von 200 MHz spezifiziert, die Welligkeit der Bandbreite (engl. *bandwidth flatness*) wird im Bereich DC bis 20 MHz mit ± 1 dB und zwischen 50 % und 100 % der Bandbreite mit +2 dB/-3 dB angegeben. Zur Orientierung sind in Bild 1 für Frequenzen unterhalb von 100 MHz die Bezugsniveaus ± 1 dB relativ zum 0 dBm Pegel eingetragen.

Das gemessene Übertragungsverhalten ist deutlich besser als die Spezifikationsangaben von Siglent erwarten lassen. Die Messkurve schneidet die -3 dB Linie bei einer Frequenz von 310 MHz. Bis zu Frequenzen von ca. 270 MHz weicht die Messkurve um weniger als ± 1 dB vom 0 dBm Pegel ab.

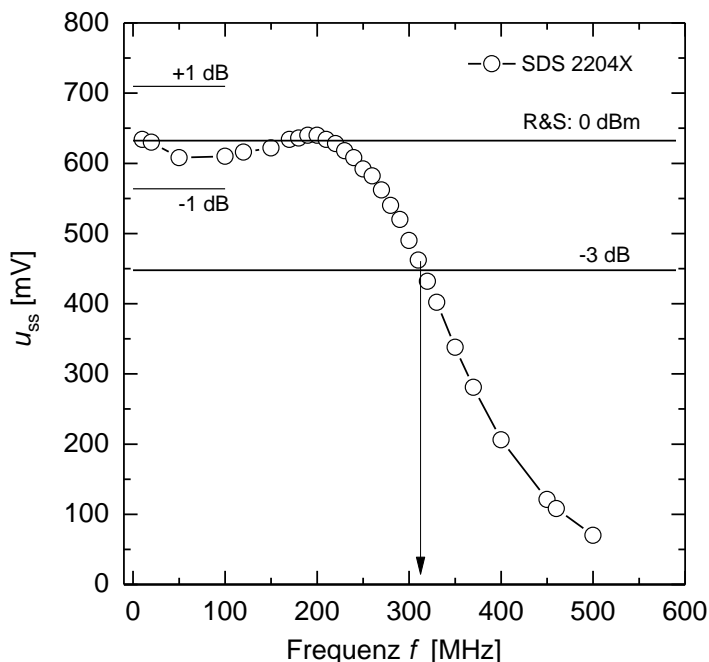


Bild 1: Mit dem Oszilloskop Siglent SDS 2204X gemessene Spitze-Spitze Spannung u_{ss} im Einkanalbetrieb als Funktion der Frequenz von 10 bis 500 MHz und einem Pegel des Rohde & Schwarz Sweep Generators von 0 dBm

Sofort stellte sich mir die Frage, welche Bandbreite mein altes analoges Tektronix 7844 Oszilloskop hat, das nunmehr mehr als 30 Jahre alt ist [3, 4]! Der gleiche Messaufbau wie oben zeigt nun, dass das Oszilloskop sich bis zu Eingangsfrequenzen von 750 MHz triggern lässt. In Bild 2 sind die gemessenen Daten beider Oszilloskope in doppel-logarithmischer Auftragung dargestellt. Das Tektronix Oszilloskop 7844 hat mit dem Vertikaleinschub 7A24 eine -3 dB Bandbreite im Bereich von 310 MHz bis 400 MHz (in [3] wird für das mainframe 7844 eine Bandbreite von 400 MHz angegeben und für den Einschub 7A24 350 MHz; in [4] findet sich für den Einschub 7A24 die Bandbreitenangabe 300 MHz (78xx)).

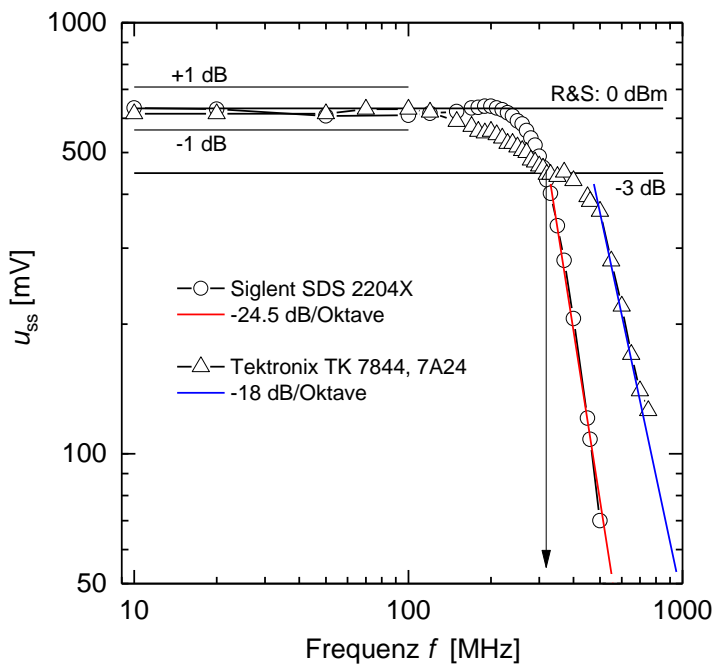


Bild 2: Spitze-Spitze Spannung u_{ss} gemessen mit den Oszilloskopen Siglent SDS 2204X (Kreise) und Tektronix 7844, Einschub 7A24 (Dreiecke) als Funktion der Frequenz in doppellogarithmischer Auftragung. Oberhalb der Grenzfrequenz fällt das Signal des SDS 2204X mit -24,5 dB/Oktave ab (rote Gerade), das des Tektronix 7844 mit -8 dB/Oktave (blaue Gerade)

Die Amplitudenfrequenzgänge zeigen deutliche Unterschiede. Oberhalb von 310 MHz fallen die Kurven unterschiedlich schnell ab. Der Verlauf lässt sich in diesem Bereich im doppellogarithmischen Diagramm durch eine Gerade negativer Steigung annähern, wie es für ein Potenzgesetz zu erwarten ist. Für das Siglent Oszilloskop beträgt die Steigung dieser Geraden (rot in Bild 2) -24,5 dB/Oktave und für das Tektronix-Modell -18 dB/Oktave. In Bild 2 ist außerdem deutlich zu erkennen, dass die Übertragungskurve des Tektronix Oszilloskops oberhalb der 310 MHz deutlich zu höheren Frequenzen "hinausragt".

Wie können die beobachteten Verläufe gedeutet werden? Dazu habe ich Amplitudenfrequenzgänge verschiedener Tiefpassfilter berechnet, deren Grenzfrequenz 310 MHz beträgt [5]. Bild 3 zeigt das Ergebnis. Das Verhalten des Siglent Oszilloskops lässt sich gut durch ein Butterworth-Tiefpassfilter 4. Ordnung beschreiben.

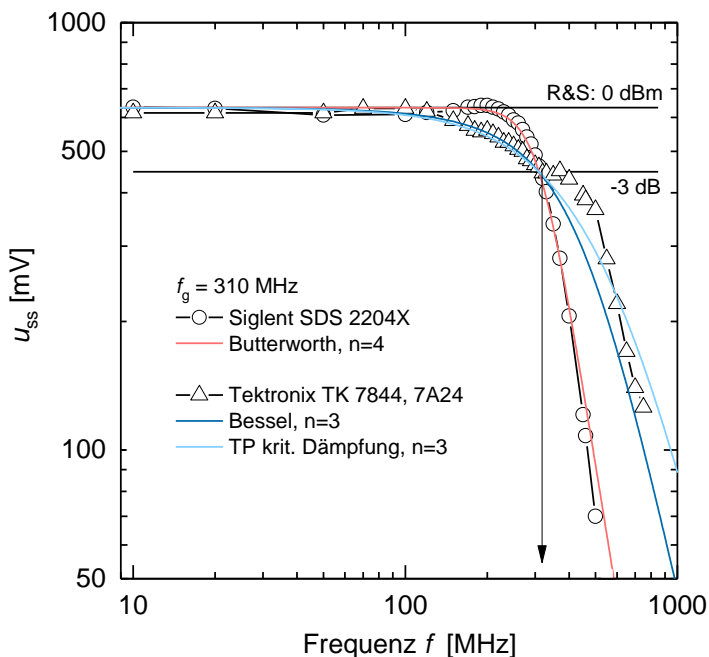


Bild 3: Gleiche Messdaten wie in Bild 2. Zum Vergleich sind berechnete Amplitudenfrequenzgänge für einen Butterworth-Tiefpassfilter vierter Ordnung ($n=4$) als rote Kurve, einen Bessel-Tiefpassfilter dritter Ordnung in dunkelblau und einen Tiefpass (TP) mit kritischer Dämpfung in hellblau eingezeichnet

Der Amplitudenfrequenzgang des Tektronix Oszilloskops kann durch gängige Tiefpassmodelle nur gröber angenähert werden, am ehesten kommt dafür ein Bessel-Tiefpassfilter oder ein Tiefpassfilter mit kritischer Dämpfung in Frage, beide von 3. Ordnung, siehe dunkel- und hellblaue Kurve in Bild 3.

Das unterschiedliche Verhalten beider Oszilloskope kann in der Pulsanstiegszeit beobachtet werden. Dazu habe ich das Rechteck-Ausgangssignal des Generators DDS 20 G [6] bei einer Wiederholfrequenz von 10 MHz auf den Eingang des SDS 2204X gegeben und die 10 % - 90 % Anstiegszeit bestimmt, siehe Bild 4. Sie beträgt 1,6 ns.

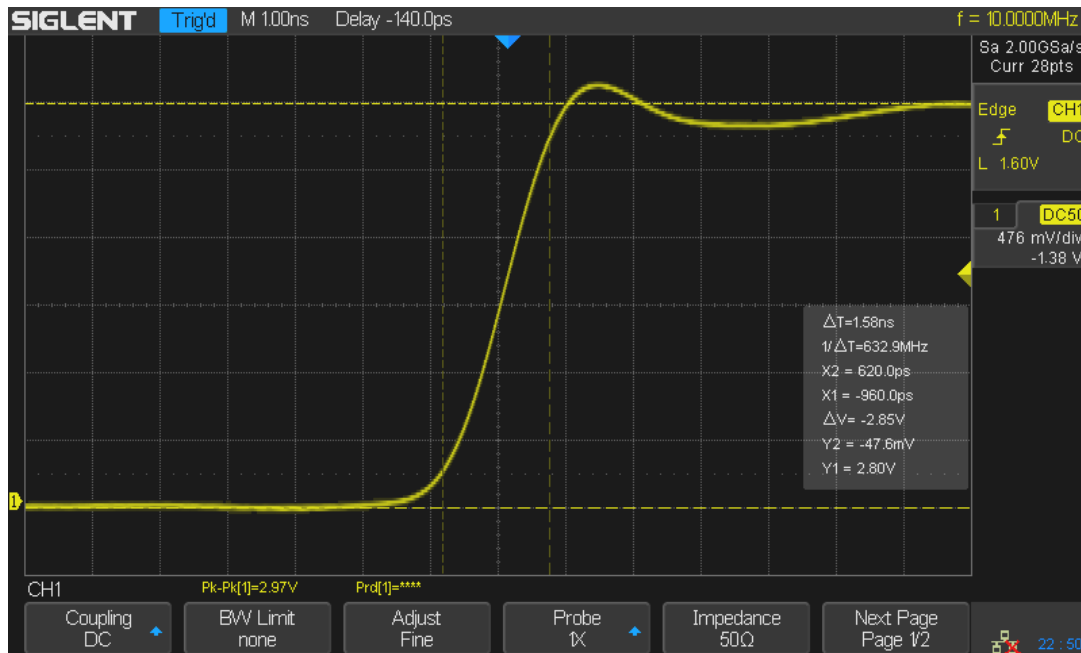


Bild 4: Anstiegsflanke eines 10 MHz Rechtecksignals des Generators DDS 20 G gemessen mit dem Siglent SDS 2204X bei 2 GSa/s

Die entsprechende Messung für das Tektronix Oszilloskop zeigt Bild 5. Das Ergebnis ist hier: 1,2 ns. Das stimmt mit einer Angabe von Tektronix überein [7]. Ein Vergleich von Bild 4 und 5 zeigt auch die Unterschiede im Überschwingerverhalten. Beim Siglent hat es den charakteristischen Verlauf, der für ein Butterworth-Tiefpass erwartet wird [5].

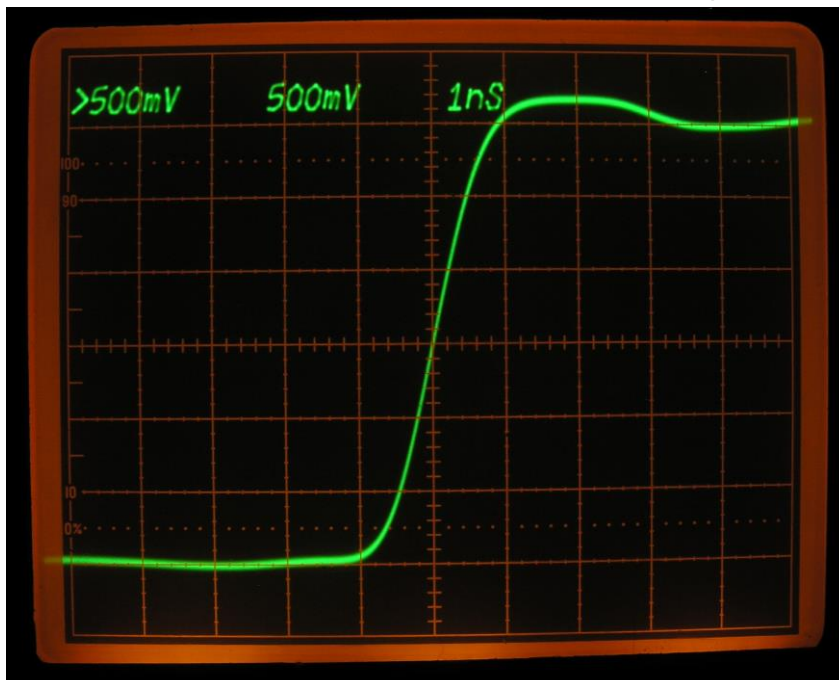


Bild 5: Anstiegsflanke eines 10 MHz Rechtecksignals des Generators DDS 20 G gemessen mit dem Tektronix 7844, Einschub 7A24

Bild 6 zeigt zur Verdeutlichung des Unterschieds eine Überlagerung der Oszilloskopbilder von Bild 4 und Bild 5. Die Bilder 4 und 5 sind dabei jeweils so skaliert, dass die horizontalen und vertikalen Skalen übereinstimmen. Deutlich ist zu erkennen, dass das Tektronix Oszilloskop - wenn auch nur geringfügig, die Nase vorn hat!

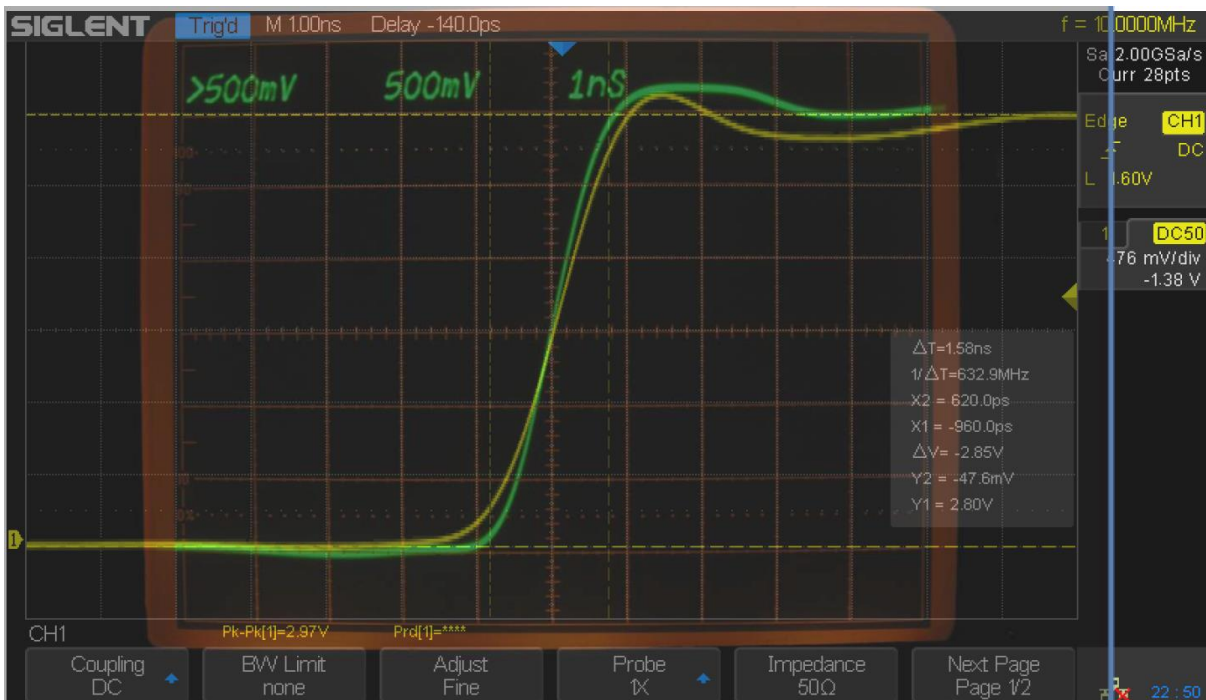


Bild 6: Überlagerung der Bilder 4 und 5 bei gleicher Zeitablenkung und gleichem Ausgangs- und Endniveau des Signalpegels des Rechtecksignals

Aber welche Anstiegszeit hat der Rechteckgenerator DDS 20 G eigentlich? Spezifiziert wird eine Anstiegszeit < 4 ns [6]. Dazu zeigt Bild 7 das Ergebnis einer Messung mit einem 1 GHz Oszilloskop der Fa. LeCroy, Modell Waverunner 104 MXi-A [8]. Die Anstiegszeit beträgt 1,08 ns, das sind 120 ps weniger als beim Tektronix Oszilloskop.

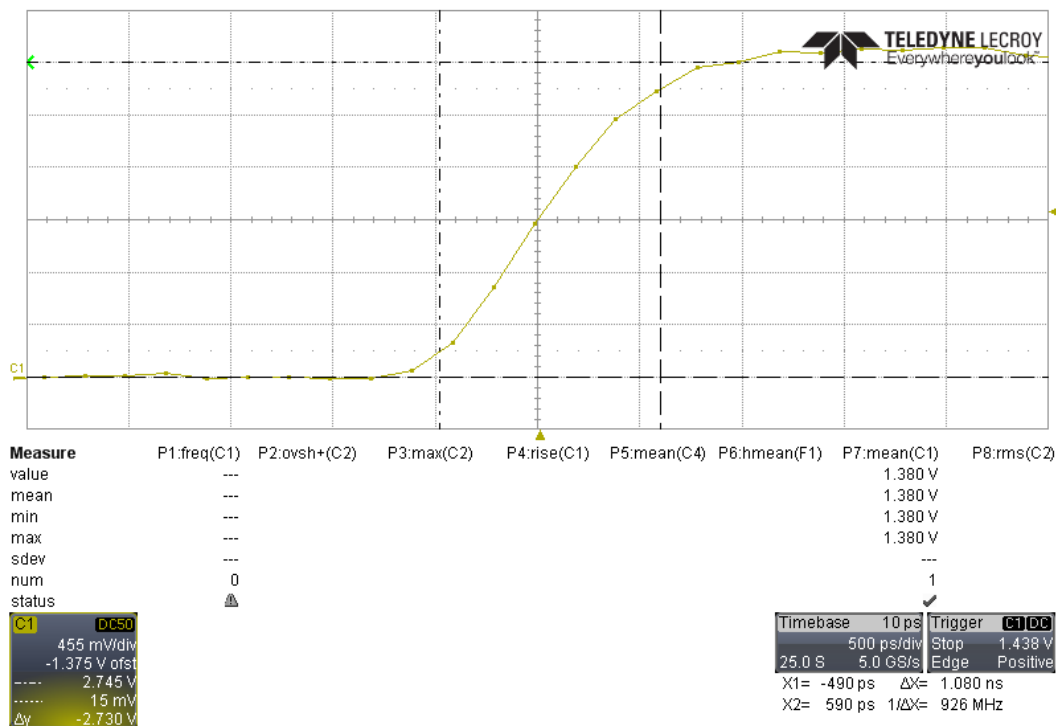


Bild 7: Anstiegsflanke des Rechtecksignals des Generators DDS 20G gemessen mit dem LeCroy Waverunner 104 MXi-A

In Tab. 1 sind die Spezifikationen der drei Oszilloskope und die Messergebnisse in den ersten beiden Tabellenzeilen zusammengefasst.

Tab. 1: Spezifikationen der Oszilloskope, Messergebnisse und Berechnungen],

Oszilloskop	Siglent SDS 2204X	TK 7844, 7A24	LeCroy Waverunner 104MXi-A
<i>Spezifikationen</i>			
Bandbreite [MHz]	200	300; 350	1000
Anstiegszeit [ns]	<1,7	1,2; 1	0,35
<i>Messung</i>			
Bandbreite [MHz]	310	310 - 400	./.
Anstiegszeit ¹ [ns]	1,6	1,2	1,08
berechnete, wahre Anstiegszeit des Rechtecksignals [ns], (2)	./.	./.	1,02
berechnete Anstiegszeit für das Rechtecksignal ² [ns]	1,52	1,35	1,08
Impulsbreite ³ [ns]	3,9	3,9	3,9

¹gemessen mit Rechtecksignal des DDS 20 G [6]; ²berechnet mit den gemessenen Bandbreiten von 310 MHz für SDS 2204X und 400 MHz für das TK 7844/7A24, ³gemessen mit Impulsgenerator nach [10]

Für den Zusammenhang zwischen Anstiegszeit und Bandbreite bzw. Grenzfrequenz wird häufig folgende Beziehung herangezogen [5, 9]:

$$t_a \approx \frac{0,35}{f_g} \quad (1)$$

mit t_a der Anstiegszeit von 10 % auf 90 % einer Einheitssprungantwortfunktion und f_g der -3 dB Grenzfrequenz eines Tiefpasses. Die Spezifikationen des Tektronix und LeCroy-Oszilloskops entsprechen offensichtlich den mit (1) berechneten Werten.

Das LeCroy Oszilloskop hat mit 1 GHz eine um den Faktor 3 bis 4 höhere Bandbreite als die beiden anderen Oszilloskope. Die gemessene Anstiegszeit wird daher der wahren Anstiegszeit des Rechtecksignals des verwendeten Generators recht nahe kommen. Beschreiben wir die mit dem LeCroy Oszilloskop gemessene Anstiegszeit als den Effekt zweier kaskadierter Tiefpässe, und zwar einmal den des Generators DDS 20 G mit dem angeschlossenen Koaxialkabel sowie den des Eingangskanals des Oszilloskops, so gilt näherungsweise für die resultierende Anstiegszeit die Beziehung [9]:

$$t_{a \text{ ges}} \approx \sqrt{t_{a \text{ DDS}}^2 + t_{a i}^2}, \quad (2)$$

mit $t_{a i}$ der spezifizierten Anstiegszeit des Oszilloskops i . Für das LeCroy Oszilloskop ist $t_{a i} = 350$ ps und gemessen habe ich für das Rechtecksignal $t_{a \text{ ges}} = 1,08$ ns, vgl. Tab. 1. Aus (2) kann damit die wahre Anstiegszeit des Rechtecksignals des DDS 20G abgeschätzt werden: $t_{a \text{ DDS}} \approx 1,02$ ns. Die Oszilloskope mit einer wesentlich geringeren Bandbreite vergrößern diese Anstiegszeit auf 1,2 bis 1,6 ns.

Als nächstes berechnen wir mit den gemessenen Bandbreiten des SDS 2204X von 310 MHz und für das TK 7844/A24 von 400 MHz mit (1) die Anstiegszeit der Einheitssprungantwortfunktion. Da aber kein Einheitssprung mit verschwindender Anstiegszeit verwendet wird, sondern ein Rechteckimpuls mit einer geschätzten wahren Anstiegszeit von 1,02 ns, müssen wir die kombinierte Verlängerung der Anstiegszeit nach (2) berücksichtigen. Die vorletzte Zeile in Tab. 1 zeigt das Ergebnis der so berechneten Anstiegszeit, die das jeweilige Oszilloskop aufweisen sollte. Sie weicht von der tatsächlich gemessenen um maximal 150 ps ab.

Bisher haben wir das Sprungantwortverhalten der Oszilloskope betrachtet. Die Reaktion auf kurze Impulse kann mit einem Impulsgenerator untersucht werden. Diesen habe ich nach einem Vorschlag von H. Nussbaum aufgebaut [10]. Dieser Generator erzeugt kurze, näherungsweise rechteckige Impulse mit einer Wiederholfrequenz von 100 kHz und dient z.B. als Kammgenerator zur Erzeugung von S9 Pegeln bis ins 2 m Band. Die Bilder 8 bis 10 zeigen die Messergebnisse für diese Impulse mit den drei untersuchten Oszilloskopen.

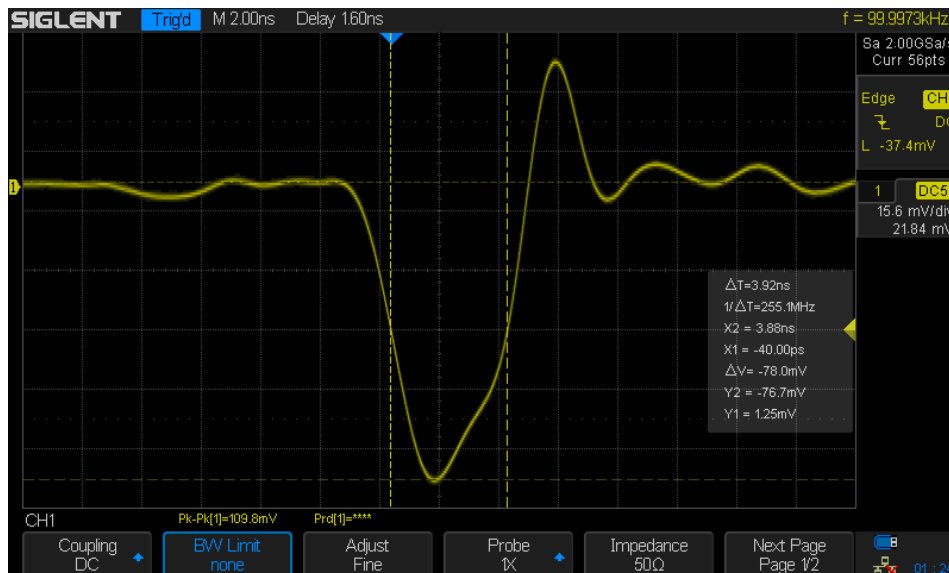


Bild 8: Oszillogramm des Impulses gemessen mit dem SDS 2204X

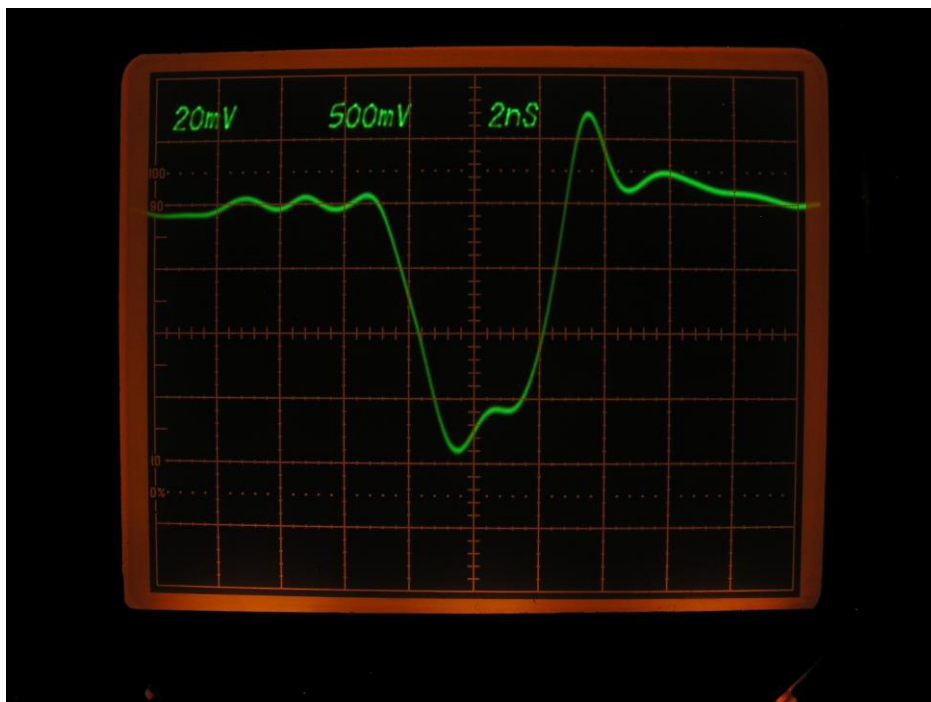


Bild 9: Oszillogramm des Impulses gemessen mit dem TK 7844, 7A24

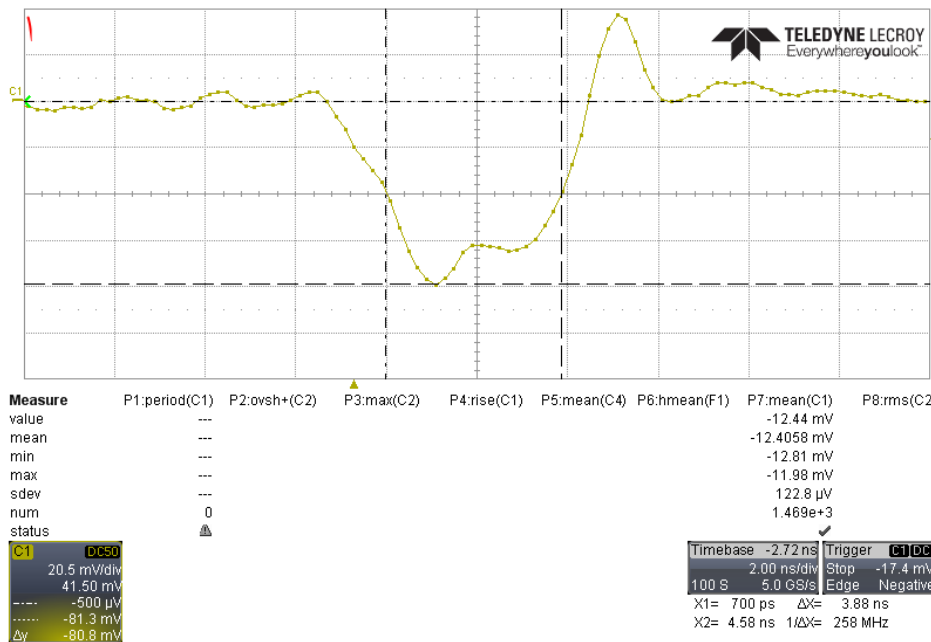


Bild 10: Oszillogramm des Impulses gemessen mit dem LeCroy 104MXi-A

Die Halbwertsbreite des Impulses beträgt bei allen drei Oszilloskopen $\approx 3,9$ ns. Die Stufe, die kurz hinter dem Pulsmaximum auftritt, ist in Bild 9 und 10 deutlich zu sehen. Beim Siglent-Oszilloskop wird diese etwas verschliffen. Das Überschwingverhalten in Richtung positiver Pegel ist beim Siglent am stärksten ausgeprägt, bei den beiden anderen Oszilloskopen ist es geringer und zeigt für diese beiden einen recht ähnlichen Verlauf. Das stärkere positive Überschwingen des Siglent ist eine Folge des Verlaufs der Übertragungsfunktion, siehe Bild 2.

Die bestimmte Impulsbreite – gemessen bei halber Höhe – hängt im Bereich der untersuchten Oszilloskope offensichtlich nicht wesentlich von der Bandbreite ab. Anschaulich deuten lässt sich dieses Ergebnis mit dem Verhalten eines Tiefpasses, der bei geringerer Grenzfrequenz sowohl eine vergrößerte Anstiegszeit, als auch eine vergrößerte Abfallzeit für einen Rechteckimpuls aufweist, so dass sich im Resultat eine näherungsweise konstante Halbwertsbreite des "verschliffenen" Impulses ergibt (solange die Amplitude nicht wesentlich reduziert wird).

Fazit

Das untersuchte Siglent SDS 2204X zeigt respektable Eigenschaften, die die Spezifikationen bezüglich der Bandbreite deutlich übertreffen. Dieses Oszilloskop ist für Amateurfunkzwecke im Kurzwellenbereich bis ins 2-m-Band gut geeignet. Kurze Impulse im Bereich weniger Nanosekunden gibt das Siglent Oszilloskop nahezu so wieder, wie das auch Oszilloskope einer ganz anderen Gerätekategorie tun.

18.12.2017, Reinhard Noll, DF1RN

Bezugsdokumente

- [1] <https://www.siglent.eu/sds2204x.html>
- [2] <http://www.helmut-singer.de/stock/1326344291.html>; Datei: rs.swp.data.sheet
- [3] <https://www.tek.com/Measurement/Support/scopes/faq/history.html#Amplifiers>
- [4] <http://w140.com/tekwiki/wiki/7A24>
- [5] U. Tietze, Ch. Schenk, Halbleiter-Schaltungstechnik, Springer-Verlag, 9. Aufl., 1990, S. 391-408
- [6] DDS 20 G, ELV Elektronik AG, Leer, Vers. 6.2, 2008, direct digital synthesis
- [7] Tektronix 7844/R7844 dual-beam oscilloscope with options, service, instruction manual, October 1981, p. 1-9
- [8] Teledyne LeCroy, WaveRunner Xi-A Series, 2009
- [9] G.-H. Schildt, Grundlagen der Impulstechnik, B.G. Teubner Stuttgart, 1987
- [10] Hans Nussbaum, HF-Messungen für den Funkamateur, Teil 2, Verlag für Technik und Handwerk, 2007, S. 84