Funktechnik – Basiswissen:

Gunthard Kraus, DG 8 GB

Signal-Plaudereien

1. Einführung

Selbst viele Laien wissen sofort eine Antwort auf die Frage: „Wie sieht die Spannung aus, die in jedem Haus aus der Steckdose kommt?“ Sie lautet immer: „Na klar, ein Sinus mit 230 Volt (Effektivwert) und einer Frequenz von 50 Hz“.

Aber bei der nächsten Frage:
„Welche verschiedenen Frequenzen enthält eigentlich dieses Steckdosensignal?“ bekommt man selbst von Fachleuten oft die falsche Antwort. Das liegt daran, dass man erstens genau die „Mess- und Beobachtungsbedingungen“ beachten muss, denn damit ändert sich direkt die Lösung. Zweitens muss man sozusagen die große Lupe nehmen und damit das Signal absuchen und genau auf jede Kleinigkeit oder Unregelmäßigkeit achten. Die korrekte Formulierung lautet:

Nur eine rein sinusförmige Spannung, die vor sehr langer Zeit eingeschaltet wurde

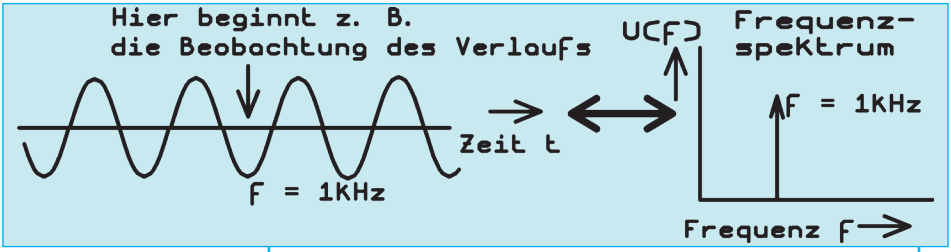

Bild 1: Nur eine einzelne Spektrallinie gehört zu einem Signal, bei dem weder Anfang noch Ende zu erkennen ist

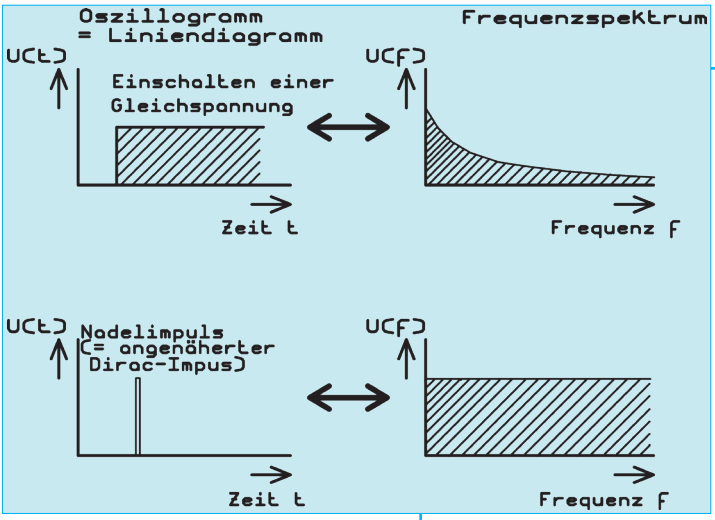

Bild 2:
Einmalige Schaltvorgänge belegen stets den kompletten Frequenzbereich mit Energie; je schneller und kürzer, desto intensiver (siehe Text)

und die in absehbarer Zeit nicht aufhört, besteht nur aus einer einzigen Frequenz (siehe **Bild 1** hier z.B.: f = 1 kHz).

Da diese Formulierung so gar nicht zu dem passt, was man kennt und täglich sieht, folgt hier die Lösung des Rätsels: Man muss nämlich sehr sorgfältig zwischen „Schaltvorgängen" und „Verzerrungen der Kurvenform bei periodischen Signalen" unterscheiden.

1.1. Schaltvorgänge

Jede einmalige Änderung (= Einschalten, Ausschalten, Aufdrehen, Verkleinern, kurz Unterbrechen...) erzeugt ein einmaliges „Störsignal" oder „Störspektrum", das vom Entstehungsort wegwandert. Das kennt man als Knacken im Radio, wenn man z.B. das Licht im Raum einschaltet. Man hat das bloß noch nie bewusst so gesehen oder beachtet!

Entscheidend in diesem Störsignal ist die Tatsache, dass der komplette Frequenzbereich, einschließlich der sehr hohen Frequenzen, während dieser kurzen Zeit lückenlos mit Signalen belegt ist. Die tiefen Frequenzanteile breiten sich natürlich über Kabelverbindungen aus. Die hohen Anteile werden dagegen schon von den als Antennen wirkenden Verbindungsdrähten der Schaltung als elektromagnetische Wellen abgestrahlt. Und das ist das erwähnte Knacken im Radio, das selbst mit einem batteriebetriebenen Kofferradio in einiger Entfernung noch zu hören ist! Glücklicherweise sinken die Amplituden der hohen Frequenzanteile bei den üblichen Schaltvorgängen sehr schnell ab, sonst wäre es überhaupt nicht möglich drahtlos zu kommunizieren.

Die Geschwindigkeit der Änderung des Schaltvorgangs bestimmt wesentlich diese Amplitudenverteilung und bestätigt anschaulich das wichtigste „Schwäbische Prinzip" des „ruhigen Herangehens an eine Sache" (= „No net hudla").

Wenn sich etwas sehr langsam ändert oder die Änderung schon lange vorbei ist, kann man diese Effekte fast nicht nachweisen. Aber es gibt ein Signal, in dem alle Frequenzen enthalten sind und vor dem man sich auch in abgeschwächter Form hüten sollte: es ist der „Dirac-Impuls" mit unendlich kurzer Impulsdauer und unendlich großer Amplitude, dieser kann geradezu sagenhaft stören!

Zwei Beispiele dazu zeigt **Bild 2**:
Links oben das Oszillogramm („Liniendiagramm") vom Einschalten einer Gleichspannung und darunter vom Nadelimpuls, der den Dirac-Impuls annähern soll.

Rechts oben und unten die beiden dazugehörigen Frequenzspektren, wobei für den Nadelimpuls eine sehr kleine Impulsdauer angenommen wurde (genauere Details folgen später).

Man erkennt gut, dass es kein Entkommen vor diesen Störfrequenzen gibt, denn es existieren bei beiden Signalen keine Lücken im Spektrum!

1.2. Verzerrungen bei periodischen Signalen

Auch die allerkleinste, aber sich regelmäßig wiederholende Abweichung von der idealen Sinusform führt zum zusätzlichen Auftreten neuer Signalanteile im Frequenzspektrum! Diesen Schlüsselsatz sollte man sich merken!

Diese neuen Frequenzen tragen den Fachausdruck „Oberwellen" oder „Harmonische" und sind stets ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Im Klartext heißt das: man findet plötzlich auch die doppelte, dreifache, vierfache, fünffache, usw. Grundfrequenz im Spektrum.

Dabei gilt noch eine weitere wichtige Regel wobei **Bild 3** zeigt, was damit gemeint ist:

Ist nur eine Halbwelle von der Verzerrung betroffen ODER die positive und die negative Halbwelle sind unterschiedlich verformt, spricht man von unsymmetrischer Verzerrung. Man findet dann alle Oberwellen im Spektrum.

Ist das ursprünglich ideale Sinussignal aber symmetrisch verzerrt (= positive und negative Halbwelle sind exakt in derselben Weise verändert), gibt es keine geraden, sondern nur ungerade Oberwellen (= außer der Grundfrequenz beobachtet man nur

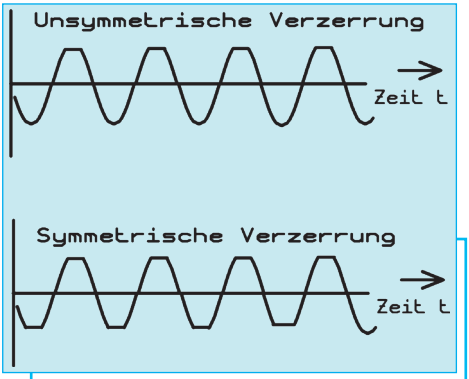

Bild 3: Das versteht man unter unsymmetrischer und symmetrischer Verzerrung. Nur bei strenger Symmetrie fehlen die geradzahligen Oberwellen

die dreifache, die fünffache, die siebenfache, die neunfache Grundfrequenz usw.).

Damit gelangt man auf die Spielwiese der Fourier-Transformation und Fast Fourier Transformation (FFT), mit deren Hilfe aus einem zeitlichen Verlauf das Spektrum berechnet werden kann. Im INTERNET gibt es zu diesem Thema sehr viele Einführungsartikel, Tutorials und Übersichtstabellen über die Oberwellenverteilung in Abhängigkeit von der Signalform, Programme, Animationen usw. Einfach mal in der Suchmaschine „fourier" oder „fourier transform" oder „fourier tutorial" eingeben und sehen, was kommt!

Abschließender Hinweis:
Sobald man beim idealen Sinus irgendetwas im Rhythmus eines anderen Signals verändert (= Amplitude, Phase oder Frequenz), gelangt man zu den entsprechenden Modulationsarten. Auch hier müssen folglich neue Signale entstehen.

2. Simulation eines einmaligen Vorganges mit SPICE

Vorstehende Behauptungen sollen genau nachgeprüft werden, wozu das kostenlose und völlig unbegrenzte Simulationsprogramm „LTspice" von Linear Technologies verwendet wird. Es kann von [1] ohne Registrierung herunter geladen werden und wurde an dieser Stelle schon öfters eingesetzt [2].

Dieser Artikel macht intensiven Gebrauch von dieser Software und die einzelnen Beispiele sind so gewählt, dass der geneigte Leser am heimischen Rechner diese selber nachvollziehen kann - los geht´s.

2.1. Der Dirac-Impuls und sein Ersatz

Er spielt eine sehr große Rolle in der Analyse von Regelkreisen und Übertragungssystemen und ist ein fantastisches Werkzeug.

Trotzdem ist es irgendwie eine Schnapsidee: es handelt sich theoretisch um einen einzelnen Impuls mit unendlich großer Amplitude und einer Impulsdauer, die gegen Null geht. Der einzige Lichtblick: die Fläche dieses Impulses ist genau festgelegt, denn sie beträgt 1 Volt x 1 Sekunde. Glücklicherweise gibt es da einige Möglichkeiten, um zu „mogeln". Er lässt sich nämlich meist durch ein Impulssignal ersetzen, dessen Impulslänge nur ein hunderstel oder tausendstel der Zeitkonstante des Systems ist, das damit untersucht werden soll.

Das reicht aus, um dieselben Ergebnisse wie mit einem perfekten Dirac-Impuls zu erhalten. Wenn es sich dabei um ein lineares System handelt, darf man sogar die Amplitude soweit verkleinern, bis es für diese Anordnung ungefährlich ist. Die prinzipielle Reaktion des Systems auf diesen Stoss ändert sich dadurch nicht, sondern geht nur entsprechend in der Amplitude zurück.

Beispiel: 1 V · 1 s
Eine Fläche ergäbe bei einer Impulslänge von 1 µs eine Amplitude von 1 Megavolt... und das wäre doch recht ungemütlich für die Halbleiter in einer Schaltung! Man arbeitet lieber mit einer Amplitude von 10 V und der dadurch auf 1 µs · 10 V verkleinerten Fläche. Hinterher multipliziert man die „Impulsantwort" mit dem Faktor

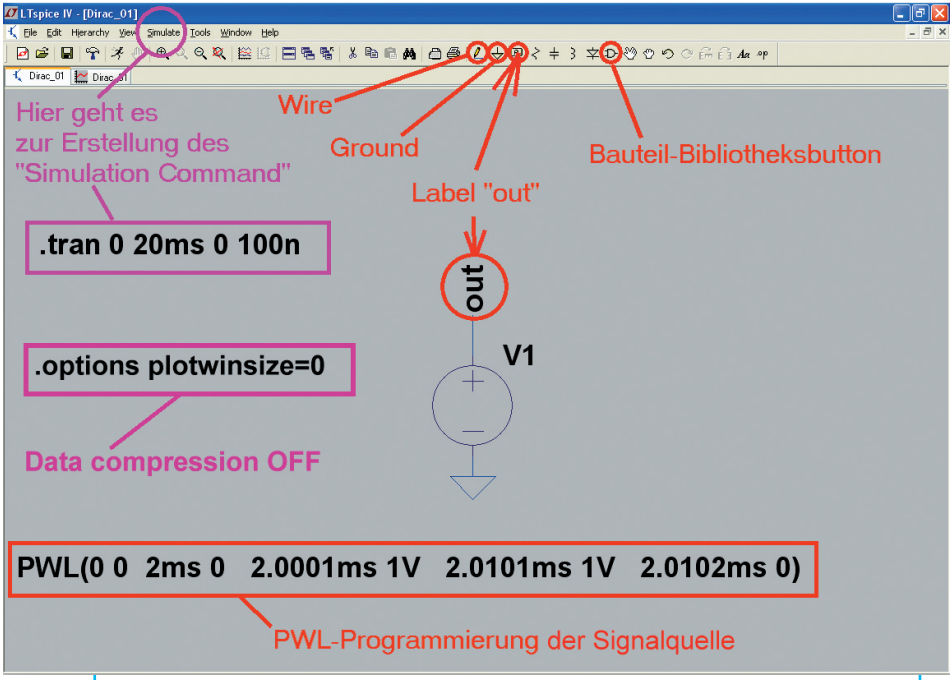

Bild 4: Aller Anfang ist schwer; hat man aber alle diese Vorgaben korrekt umgesetzt (siehe Text), wird es richtig interessant

100 000, damit es wieder mit der Theorie übereinstimmt.

Das Ganze ist ein hochinteressantes Gebiet mit ungeahnten Möglichkeiten. Deshalb soll als Beispiel folgende Aufgabe bearbeitet werden:
„Ein lineares System soll mit einem Dirac-Impuls untersucht werden, es weist eine Zeitkonstante von etwa 10 ms auf. Der „Ersatzimpuls" arbeitet deshalb mit einer Impulslänge von 10 ms / 1000 = 10 µs und einer Amplitude von 1 Volt. Die Anstiegs- und Abfallzeit wählt man zu 1 % der Impulsdauer, also zu 0,01 x 10 µs = 100 ns. Der Impuls soll 2 ms nach dem Start beginnen.

Der zeitliche Verlauf und das Spektrum dieses Signals sollen in einem Zeitraum von 0 bis 20 ms simuliert werden.

Nach dem Start von LTspice erstellt man zuerst ein Simulationsschaltbild entsprechend **Bild 4**. Das Schaltzeichen für die Spannungsquelle findet man hinter dem Bibliotheksbutton als „Voltage", das Massezeichen und das Fähnchen „Out" links neben dem Bibliotheksbutton im Hauptmenü. Ist alles platziert, kann mit „Wire" (= Button mit dem Bleistift) verdrahtet werden.

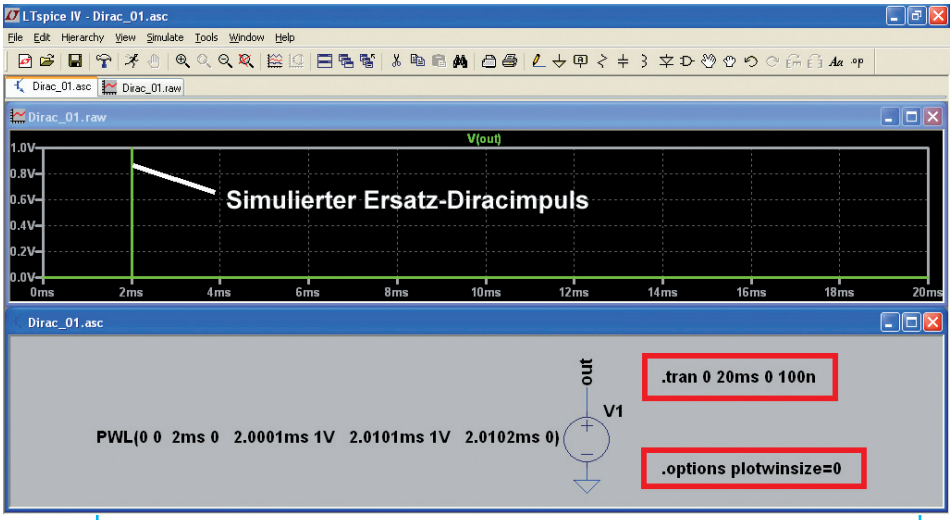

Bild 5: Man muss schon etwas herumklicken, bis man diesen Bildschirm mit der Schaltung samt Ergebnis vor sich hat (siehe Text)

ÜBRIGENS:
Will man etwas aus der Schaltung löschen, drückt man F5. Der Cursor wird zur Schere und ein Klick auf das betreffende Bauteil lässt es verschwinden; mit ESC kommt man aus dieser Funktion wieder heraus.

Will man dagegen etwas verschieben, wählt man F7, pickt das Teil mit dem Cursor und zieht es an seinen neuen Ort; heraus wieder mit ESC.

Nun wird die Spannungsquelle zur Erzeugung eines PWL-Signals (PWL = piecewise linear) programmiert. Dabei gibt man eine Serie von Wertepaaren ein (= jeweils einen Zeitpunkt und den dort herrschenden Spannungswert) und das Programm verbindet diese Punkte mit einer durchgehenden Linie. So entsteht der gewünschte einmalige Signalverlauf aus einzelnen, linearen Stücken.

Also fährt man den Cursor auf das Schaltzeichen der Quelle und klickt mit der rechten Maustaste darauf. Über „advanced“ kann man „PWL“ auswählen und folgende Wertetabelle eingeben:

Zeitpunkt Null:	Null Volt
Zeitpunkt 2 ms	Null Volt
Zeitpunkt 2.0001 ms	1 Volt
Zeitpunkt 2.0101 ms	1 Volt
Zeitpunkt 2.0102 ms	Null Volt

Nun schreibt man noch das Kommando zur Simulation der zeitlichen Vorgänge. Dazu dient „Edit Simulation Command“ hinter dem Button „Simulate“ in der Menüleiste und ein passendes auftauchendes Menü. Die „Stop Time“ (= Simulationsdauer) sei 20 ms und der größte Zeitschritt, den das Programm beim Simulieren machen darf (= Maximum time Step), sei 100 ns. Dazu gehört das Kommando:

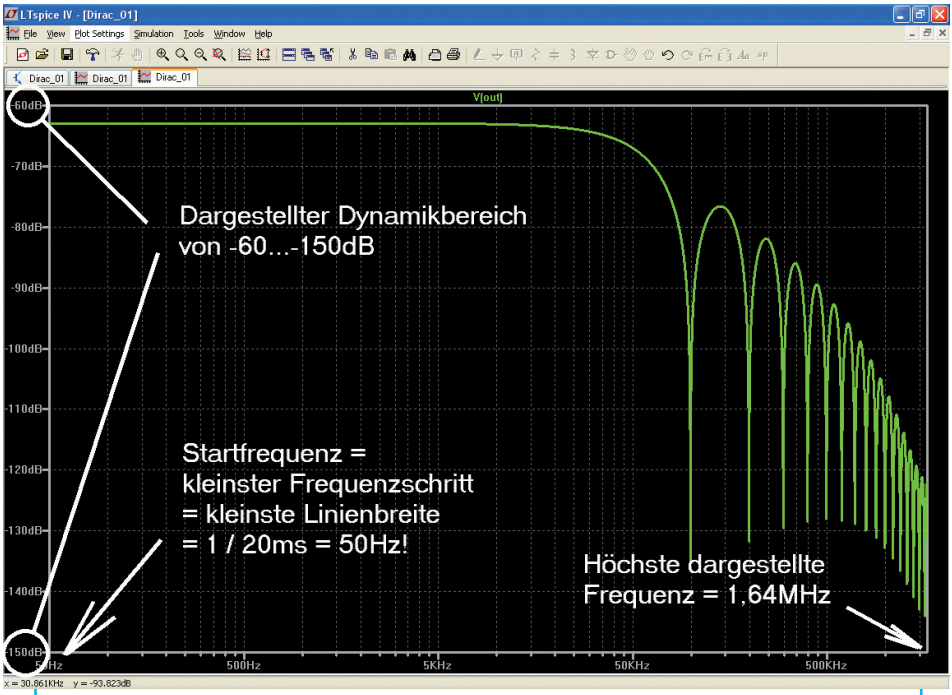

Bild 6: Die doppelt-logarithmische Darstellung des simulierten Spektrums hat auch ihren Reiz: man kann Informationen in großen Bereichen (hier: von 50 Hz bis 1,6 MHz mit 90 dB Dynamik) darstellen

.tran 0 20 ms 0 100 ns

Ganz wichtig ist für die anschließende Bestimmung des Spektrums die zusätzliche „SPICE-Direktive“:

.options plotwinsize = 0

Mit ihr wird die Kompression der Ergebnisdaten, die das Programm sonst automatisch vornimmt, verhindert. Diese würde bei der Bestimmung des Spektrums durch die FFT Ärger bereiten. Das erforderliche Vorgehen ist sehr einfach: erst „Edit“ öffnen, dann „Spice Directive“ und schon ist man beim zuständigen Editor und schreibt die Zeile.

Was dabei nach einem Klick auf den Simulationsbutton (…mit dem rennenden Männchen drauf…) herauskommt, zeigt **Bild 5** zusammen mit dem eingegebenen Schaltbild und allen Anweisungen bzw. Kommandos. Dabei muss man erst auf den Schaltbildteil klicken und ihn so aktivieren. Dann stellt man den Cursor auf das Fähnchen „Out“. Sofort ändert der Cursor seine Form und wird zu einer Prüfspitze. Ein weiterer Klick reicht zur Darstellung des simulierten Spannungsverlaufs.

Jetzt geht es an die Spektralanalyse. Dazu ist ein rechter Mausklick auf das Ergeb-

nisdiagramm nötig, hier findet man unter „View“ die FFT. Man startet mit 65536 Samples, klickt auf OK und erhält **Bild 6**. Man sollte sich drei Dinge merken:

a. Die Simulationszeit in der Time Domain (hier: 20 ms) ergibt nach der FFT die Startfrequenz von 1/20 ms = 50 Hz. Das ist gleichzeitig die beste Frequenzauflösung UND deshalb die kleinste mögliche Linienbreite im Spektrum!

b. Die höchste darstellbare Frequenz im Spektrum steigt mit der Abtastfrequenz (…festgelegt durch den „Maximum time step“ von 100 ns) und durch die Zahl der für die FFT-Berechnung verwendeten Samples (hier: 65536). Ein weiterer angenehmer Nebeneffekt der größeren FFT-Sample-Zahl ist ein erhöhter Dynamikbereich. Um aber mehr „Samples“ für die Berechnung auswählen zu können, müssen jedoch vorher genügend Daten erfasst werden. Bei vorliegendem Beispiel zeigt eine kurze Überlegung: mit einem „Maximum time step“ von 100 ns und einer Simulationszeit von 20 ms erreicht man mindestens einen Vorrat von:
20 ms / 100 ns = 200 000 Messpunkten
was für die Vorgabe von 131 072 echten „Samples“ bei der FFT reicht.

c. Die durch den „Maximum Timestep“ von 100 ns festgelegte minimale Abtastfrequenz beträgt 1/100 ns = 10 MHz. Diese Abtastfrequenz muss stets mindestens um den Faktor 2 höher sein als der höchste im betrachteten Signal enthaltene Frequenzanteil (= Shannon-Nyquist-Bedingung). Sonst gibt es Dreckeffekte („Aliasing-Effekte“), die sehr stören, das Ergebnis verfälschen und nicht mehr beseitigt werden können.

Etwas bitter: mehr „Samples“ für die FFT erhöhen zwar die obere Grenzfrequenz UND den dargestellten Dynamikbereich, aber leider auch die Rechenzeit und die anfallende Datenmenge.
Das soll gleich überprüft werden, indem man die Simulation mit 2 x 65536 = 131 072 Samples wiederholt. Die Berechnung dauert doppelt so lange, aber das Ergebnis gemäß **Bild 7** ist schon interessant:

Die höchste angezeigte Frequenz erhöht sich von 1,6 MHz auf 2 x 1,6 MHz = ca. 3,2 MHz bei einem Anzeigebereich von -60 dB bis -160 dB.

Um Rechenzeit zu sparen, versucht man die „Samplezahl“ für die FFT-Berechnung in der Praxis soweit zu reduzieren, dass die obere Frequenzgrenze UND der Dynamikbereich noch bequem für eine korrekte Darstellung ausreichen. Spart man aber zu sehr, tauchen plötzlich ebenfalls Fehler auf (z.B. stark angestiegenes „Grundrauschen“ oder unerklärliche Anzeigen von neuen Linien oder sogar das Fehlen wichtiger, vorher vorhandener Linien. Ist aber im Vergleich mit den höheren „Samplezahlen“ gut zu erkennen).

Jetzt soll noch eine lineare Darstellung für den Frequenzbereich von 0 bis 1 MHz mit einem „Tick“ von 100 kHz auf den Bildschirm geholt werden. Die Umbenennung der Achsen ist sehr einfach: mit der Maus auf die Zahlenteilung der Achse fahren, bis ein kleines Lineal eingeblendet wird. Darauf links klicken und anschließend die gewünschten neuen Verläufe eintragen. In **Bild 8** sieht man nun, dass:

a. der gesamte Frequenzbereich mit Energie belegt ist und es keine einzelnen Spektrallinien gibt. Deshalb erhält man bei solchen einmaligen Vorgängen

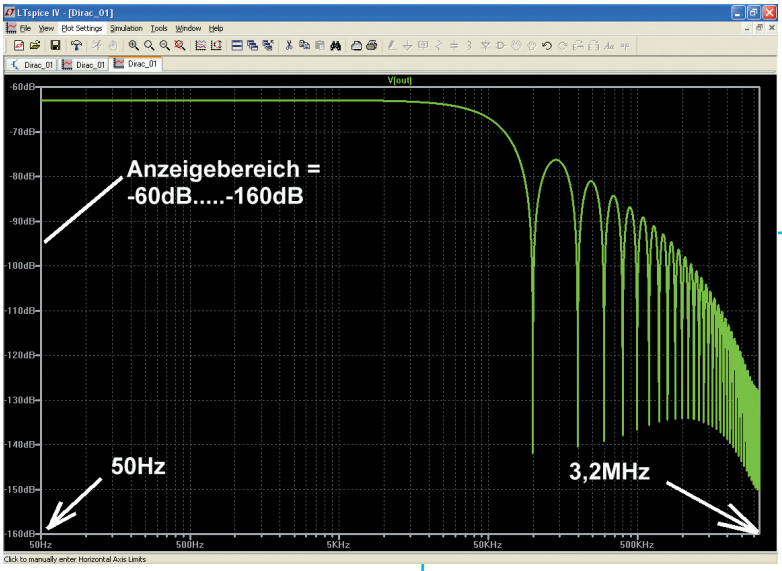

Bild 7:
Die Erhöhung der Samplezahl um den Faktor 2 erweitert zwar den Umfang der Anzeige beträchtlich…

stets nur die „Spektrale Leistungsdichte“ (= Energie pro Hz an Bandbreite) und nicht die Spannung. Die bekommt man nämlich erst mit einer bestimmten Bandbreite, in der die Leistung „gesammelt wird“ und einem Abschlusswiderstand zur Erzeugung der zu dieser Leistung gehörenden Spannung.

b. Die Hüllkurve dieser Spektralen Leistungsdichte bildet einen

$$\frac{Sinx}{x}$$ – Verlauf.

c. Alle 100 kHz findet man eine Nullstelle in diesem Leistungsdichte-Verlauf. Die Lage dieser Nullstellen wird durch die Impulslänge im Zeitbereich festgelegt (es gilt hier: Nullstellen-Grundfrequenz = 1 / Impulslänge = 1/10 µs = 100 kHz).

Und zum Abschluss dieser Sache folgt noch eine Erläuterung zum Verhältnis der System-Zeitkonstante zur Impulslänge (empfohlen: 100 bis 1000, siehe oben). Wenn es sich beim System mit einer Zeitkonstante von 10 ms um einen einfachen RC-Tiefpass handelt, so gilt:

$$Grenzfrequenz = \frac{1}{2\pi \cdot RC} = \frac{1}{2\pi \cdot Zeitkonstante}$$

Beim vorliegenden Beispiel wurde eine Zeitkonstante von 10 ms gewählt, was eine Grenzfrequenz von

$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot 10ms} = 15{,}9Hz$$ ergibt.

Betrachtet man nochmals die logarithmische Darstellung des Dirac-Impuls-Spek-

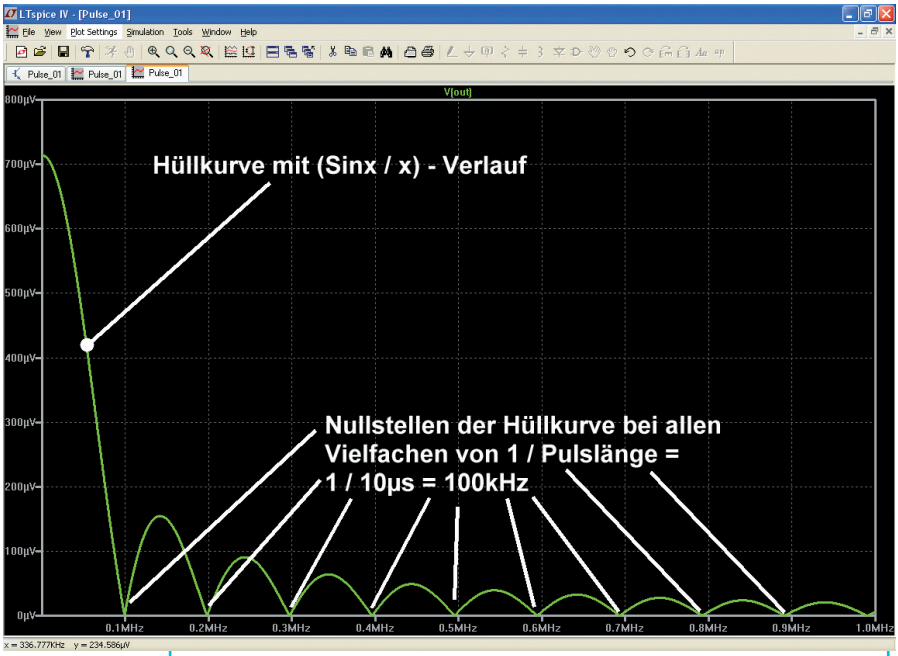

Bild 8: …aber erst die lineare Darstellung enthüllt die interessanten und feinen Details (= Hüllkurve und Nullstellen)

trums von Bild 6 oder Bild 7, werden die gestellten Forderungen an die Impulslänge plötzlich sinnvoll:

Auf diese Weise speist man das System mit einem Signal, bei dem die Spektrale Leistungsdichte im interessierenden Frequenzbereich konstant ist. So geht man aber auch beim „AC-Sweep" in der Simulation ODER beim Durchmessen in der Praxis mit einem Messsender zur Bestimmung des Frequenzganges vor!

Hinweis für Spezialisten:

Der Unterschied zwischen dem „AC-Sweep" mit einem Wobbelgenerator und dem Test mit dem Dirac-Impuls liegt darin, dass beim Wobbeln und beim „AC-Sweep" die Informationen für die einzelnen Frequenzen nacheinander einlaufen, beim Dirac-Impuls dagegen auf einen Schlag und das zusätzlich als Spannungsverlauf im Zeitbereich. Deshalb ist anschließend eine aufwendige Aktion mit dem Namen „Convolution" nötig, um beim Dirac-Test an den Verlauf des „Frequenzganges" zu gelangen.

Allerdings müsste man bei vorliegendem Tiefpass mit einer Startfrequenz von 1 Hz beginnen und das bedeutet automatisch 1 Sekunde bei der Simulationszeit. Man kann sich vorstellen, was das an Rechenzeit und Speicherplatz kosten wird.

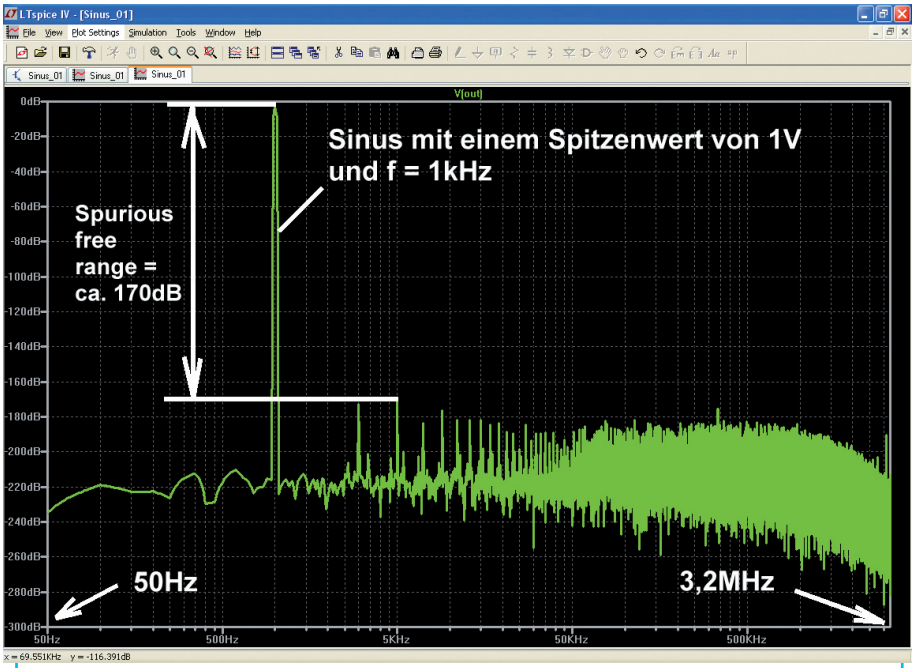

Bild 9: Der fast ideale Sinus - immerhin „spurious free" = ohne unerwünschte andere Signale über 170 dB. (Lockere Formulierung unter Fachleuten: „170 db ohne Fipse…")

3. Untersuchung periodischer Signale

Im Vorfeld ist eines bereits sicher: bei periodischen Signalen wird man IMMER ein Spektrum bekommen, das nur aus einzelnen Linien besteht. Ansonsten gelten dieselben Gesetzmäßigkeiten wie vorstehend, z.B. der Zusammenhang zwischen Simulationsdauer und Startfrequenz bzw. Linienbreite oder die Erhöhung der höchsten angezeigten Frequenz und die Verbesserung des Dynamikbereichs mit steigender (echter) „Samplezahl" bei der FFT-Berechnung.

3.1. Spielereien mit Sinussignalen

3.1.1. Der konstante Sinus

Damit fing es an und es ist interessant, die Behauptung aus der Einleitung: „Nur eine rein sinusförmige Spannung, die vor sehr langer Zeit eingeschaltet wurde und die in absehbarer Zeit nicht aufhört" per Simulation nachzuprüfen.

Dazu kann die Schaltung aus vorhergehen-

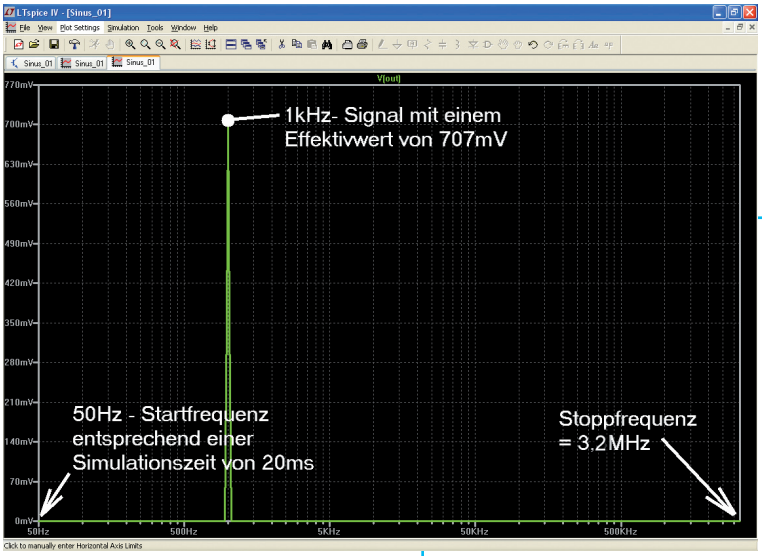

Bild 10: Genaue Amplitudenmessungen werden besser bei linearer Teilung der senkrechten Achse vorgenommen

dem Kapitel verwendet werden; die Spannungsquelle stellt man auf„Sine“ mit einem Spitzenwert von 1 V und f =1 kHz um.

Dazu klickt man mit der rechten Maustaste auf das Schaltzeichen der Quelle und ruft „Advanced“ auf. Dann wählt man „Sine“ und trägt diese Werte im Menü ein. Das Spektrum soll mit einer Frequenzauflösung von 50 Hz dargestellt werden und dazu gehört eine Simulationszeit von 1 / 50 Hz = 20 ms.

Man sollte wenigsten 200 000 echte„Samples“ zur Verfügung haben und braucht dazu einen „Maximum time step“ von 20 ms / 200 000 = 100 ns. Dann kann man beruhigt mit 131 072 Samples arbeiten, ohne Fehler befürchten zu müssen. Und die Datenkompression wird natürlich wieder abgeschaltet.

Nun wird simuliert und gleich hinterher die FFT mit 131072 Samples vorgenommen. Das errechnete Spektrum in logarithmischer Darstellung ist in **Bild 9** zu sehen. Der Bereich der Frequenzachse reicht von 50 Hz bis 3,2 MHz und der„spurious free signal range“ (= Dynamikbereich ohne Störsignale) umfasst 170 dB.

Stellt man dagegen die senkrechte Achse auf „linear“ um, kann man noch eine Sache überprüfen. Man hatte einen Spitzenwert des Sinussignals von 1 V programmiert, aber das Spektrum wird immer die Effektivwerte anzeigen. Das muss folglich in **Bild 10** zu sehen sein; bitte prüfen…

3.1.2. Der extrem unsymmetrisch verzerrte Sinus

Hierfür kann man ein Sinussignal nehmen, bei dem eine Halbwelle kom-

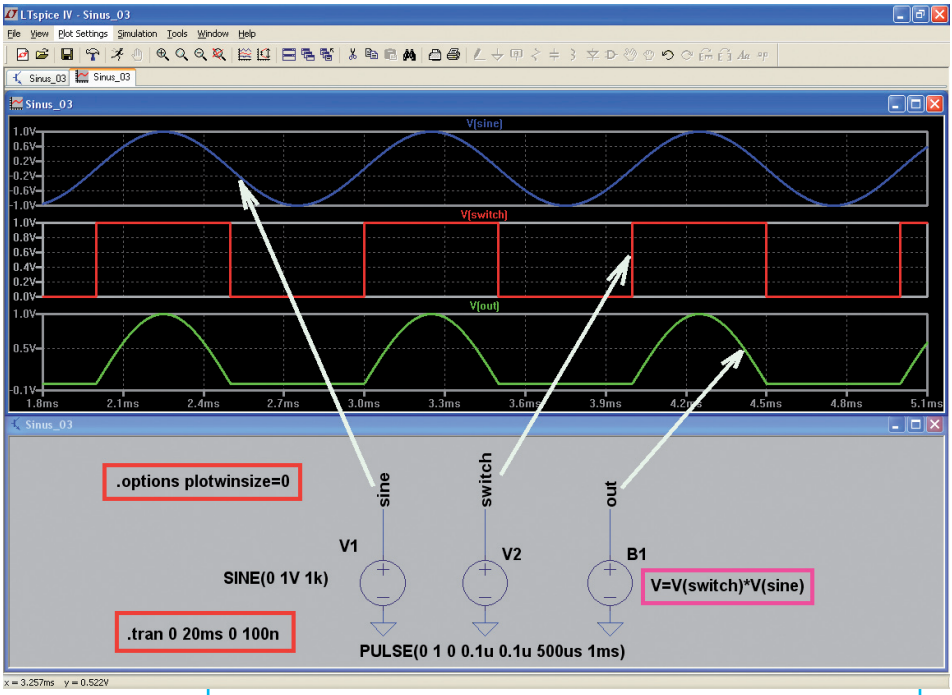

Bild 11: Der perfekte Einpuls-Gleichrichter! Diesmal aber durch eine speziell programmierbare Spannungsquelle realisiert

plett fehlt. Man könnte das in der Simulation durch eine Schottky-Diode in Reihe zu einem Lastwiderstand erledigen und eine sehr große Amplitude wählen, damit die Schwellenspannung der Diode nicht mehr auffällt.

Es geht auch eleganter, da im Bauteilevorrat eine Spannungsquelle mit dem Namen „bv" (bv = behavioural voltage) zur Verfügung steht, deren Signalverlauf durch Gleichungen oder Funktionen nach eigenem Ermessen festgelegt werden kann. Ein praktisches Bauteil!

Um eine Halbwelle des Sinus abzuschneiden, geht man folgendermaßen vor:

a. Man setzt die bisherige Sinusquelle ein und erzeugt einen Sinus mit f = 1 kHz und einem Spitzenwert von 1 V. Dieses Signal erhält das Fähnchen „Sine".

b. Dazu holt man eine weitere Spannungsquelle (= Voltage) auf den Bildschirm. Sie wird als „Pulse" programmiert und erzeugt ein symmetrisches Rechtecksignal mit 1 kHz, einem Höchstwert von +1 V sowie einem Minimalwert von 0 V. Als Anstiegs- und Abfallzeit wählt man je 100 ns. Das Fähnchen heißt hier „Switch" und das Rechteck ist gleichphasig mit dem Sinussignal von a).

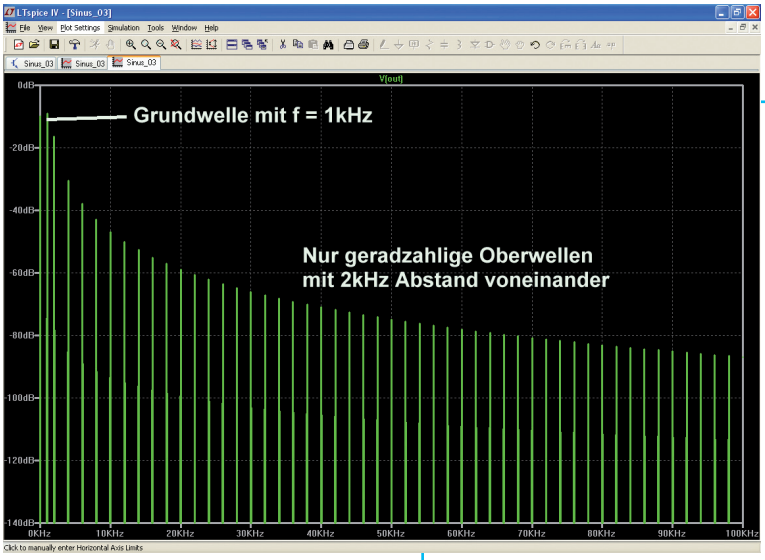

Bild 12:
Zur extremen Unsymmetrie eines periodischen Signals gehört ein Spektrum, das nur geradzahlige Oberwellen enthält. Und genau dazu gehört die Ausgangsspannung unseres „Gleichrichters“.

c. Und jetzt benötigt man noch die „bv“-Quelle. Wenn man für ihren Signalverlauf: V = V(switch)*V(sine) eintippt, erhält man exakt das, was man möchte: die beiden Signale werden miteinander multiplizert. Steht das Impulssignal auf „1“, liefert „bv“ die gewünschte Sinushalbwelle. Die andere Halbwelle wird automatisch fehlen, weil in dieser Zeit die Impulsspannung auf „0“ steht. Diese Quelle erhält das Fähnchen „Out“.

In **Bild 11** kann man sich außer der Schaltung auch das Simulationsergebnis sehr genau ansehen, da das Diagramm wegen der „groben“ Simulationseinstellung (Stop time = 20 ms, Maximum time step = 100 ns) stark vergrößert wurde, um die Details zu zeigen. Natürlich wurde vorher wieder die Datenkompression ausgeschaltet.

Bei einer „Stop time“ von 20 ms und einem „Maximum time step“ von 100 ns stehen wieder 200 000 simulierte Werte zur Verfügung. Also startet man die FFT mit den noch zulässigen 131 072 Samples und wirft einen Blick auf **Bild 12**.

Der gewählte Dynamikbereich der Anzeige beträgt 140 dB und wegen der linear geteilten Frequenzachse erkennt man sehr schön, dass durch die extreme Unsymmetrie des Ausgangssignals nur geradzahlige Oberwellen auftreten.

3.1.3. Der einseitig verbeulte Sinus

Hier kann man sich das Leben leicht machen und begrenzt eine Halbwelle einfach mit einer Zenerdiode (…

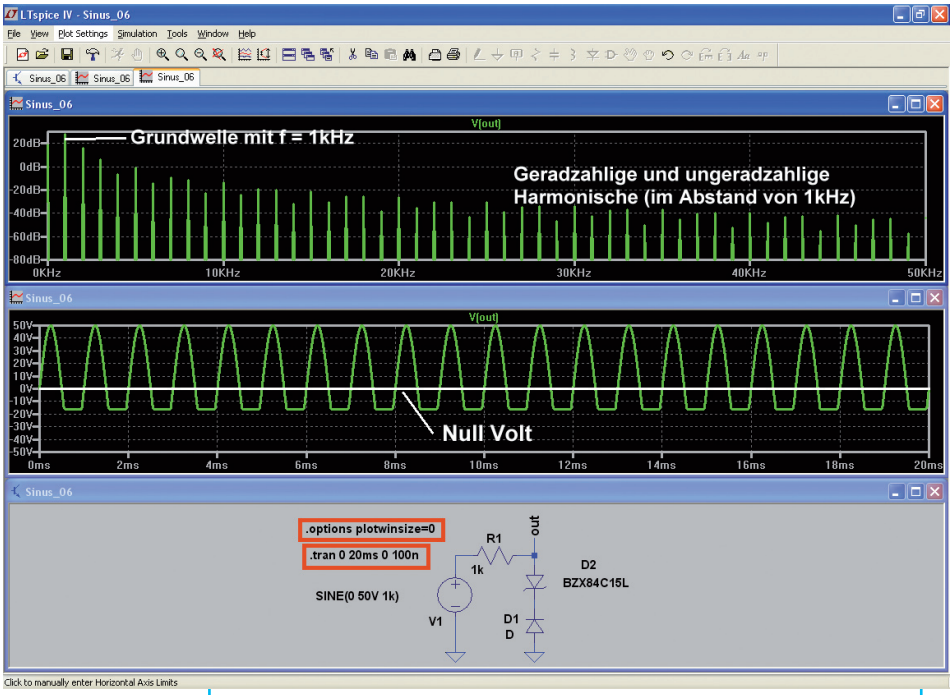

Bild 13: Der perfekte Einpuls-Gleichrichter! Diesmal aber durch eine speziell programmierbare Spannungsquelle realisiert

mit einer normalen Diode in Reihe geschaltet, um die andere Halbwelle nicht zu beschädigen). Bei 15 V-Zenerspannung muss man jedoch den Spitzenwert des Eingangssignals etwas erhöhen, um eine gut sichtbare einseitige Begrenzung zu erhalten. Deshalb arbeitet man am Eingang mit einem Spitzenwert von 50 V, die Frequenz beträgt weiterhin 1 kHz. Und die Datenkompression ist natürlich wieder ausgeschaltet.

Alle Informationen einschließlich der Simulation mit 131 072 Samples liefert **Bild 13**, wobei zur Darstellung des Spektrums ein Dynamikumfang von 110 dB (= +30 bis -80 dB) eingestellt wurde. Sehr schön ist zu sehen, dass nun sämtliche Oberwellen am Ausgang auftauchen.

Übrigens: An die 15 V-Zenerdiode kommt man sehr leicht heran; sobald man eine Z-Diode („zener") geholt und platziert hat, klickt man nochmals (rechts) auf das Schaltzeichen, sogleich erscheint ein kleines Menü „Pick new diode"….

...weiter auf Seite 58!

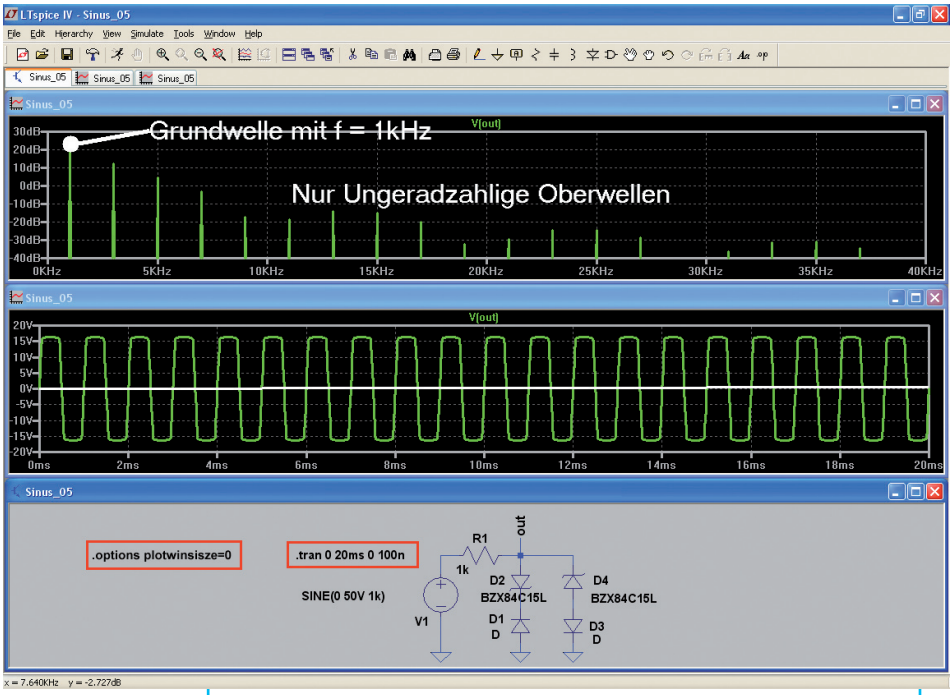

Bild 14: Die symmetrische Beschneidung des Sinussignals lässt natürlich wieder nur die ungeradzahigen Oberwellen am Leben

Fortsetzung von Seite 29

3.1.4. Der symmetrisch begrenzte Sinus

Dazu wird in die Schaltung nach Bild 13 nochmals zusätzlich dieselbe Diodenanordnung, diesmal aber umgekehrt gepolt eingesetzt. Alle anderen Einstellungen bleiben unverändert und am Ende erhält man **Bild 14** mit dem beidseitig begrenzten Sinus.

Wie erwartet, gibt es keine bösen Überraschungen und man findet tatsächlich nur die vorausgesagten ungeradzahligen Oberwellen.

3.2. Spielereien mit Rechtecksignalen

3.2.1. Das symmetrische Rechteck

Diese Signalform findet man direkt im Vorrat bei der Spannungsquelle „Voltage“ und man gibt für ein 1 kHz-Signal folgende Daten vor:

Signalform:	„pulse“
Minimalwert:	Null Volt

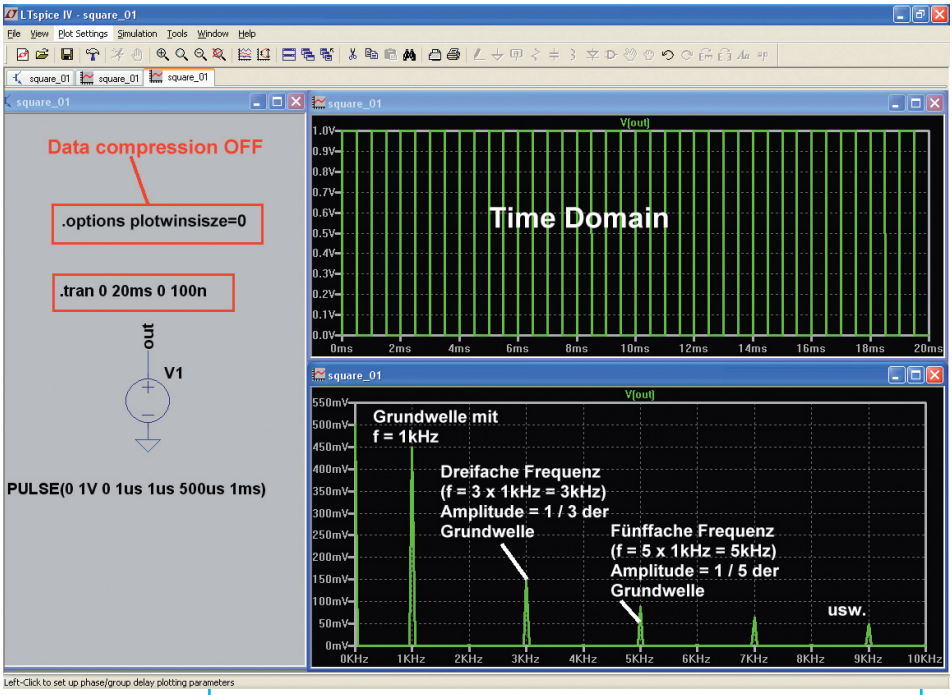

Bild 15: Das perfekte symmetrische Rechteck mit seinen ungeradzahligen Oberwellen - exakt der Theorie entsprechend!

Maximalwert:	1 Volt
Anstiegs- u. Abfallzeit:	je 1 µs
Impulslänge:	500 µs
Periodendauer:	1 ms

Die Schaltung, den simulierten Spannungsverlauf für 0 bis 20 ms und die FFT für 131 072 Samples zeigt **Bild 15**. Sehr schön sieht man die Theorie bestätigt, denn sie besagt:

Ein symmetrisches Rechteck enthält außer der Grundwelle nur ungeradzahlige Oberwellen, deren Amplituden exakt mit dem Grad der Oberwelle abnehmen.

Praktisch bedeutet das:
Die Linie mit der dreifachen Grundfrequenz weist 1/3 der Grundwellenamplitude auf. Die Linie mit der fünffachen Grundfrequenz weist 1/5 der Grundwellenamplitude auf ... mit der siebenfachen Grundfrequenz weist 1/7 ... usw.

3.2.2. Das unsymmetrische Rechteck

Dazu verkürzt man einfach die Impulslänge des Signals aus dem vorigen Beispiel auf 100 µs und lässt alles Andere

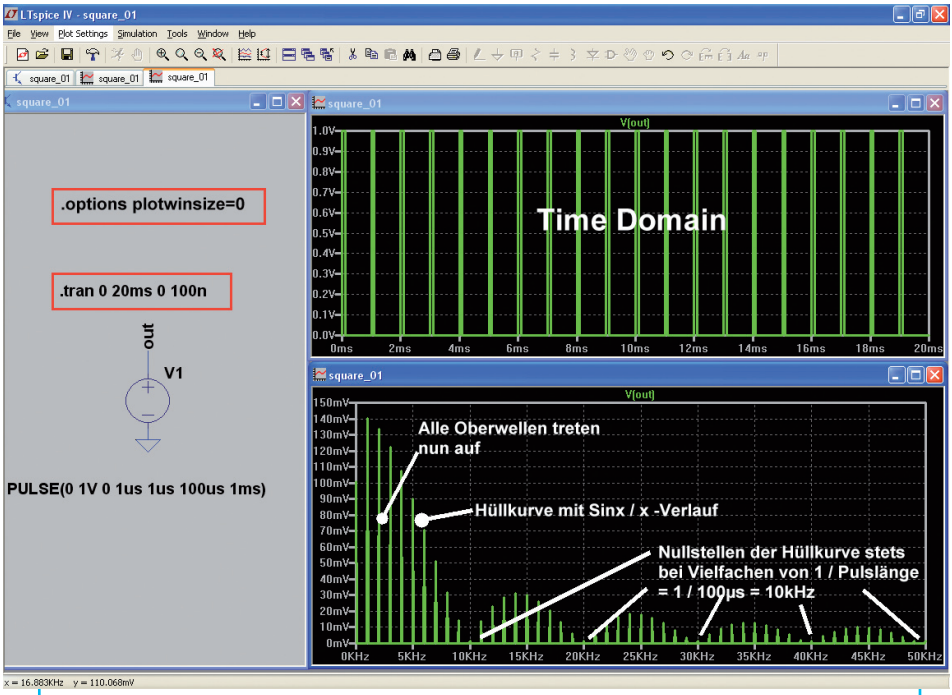

Bild 16: Das sollte bekannt vorkommen: ein periodisches unsymmetrisches Impulssignal besitzt zwar ein Linienspektrum mit allen Oberwellen, aber seine Herkunft vom Einzelimpuls beweist die Sinx / x - Hüllkurve

unberührt. **Bild 16** bestätigt wieder die Theorie, die behauptet:

a. es treten nun zusätzlich auch alle geradzahligen Oberwellen auf;

b. Die Hüllkurve des Spektrums besitzt einen $\frac{Sinx}{x}$-Verlauf;

c. Die Nullstellen der Hüllkurve finden sich stets bei Vielfachen von 1 / Impulslänge.

Die Punkte b) und c) sollten irgendwie bekannt vorkommen…

3.2.3. Ein Dreieck unter der Lupe

Das scheint nicht hierher zu gehören, aber es passt trotzdem: Man nehme ein symmetrisches Impulssignal, mache die Anstiegs- und Abfallflanke sehr lang und die Impulsdauer sehr kurz, und schon ist das Dreieck fertig!

Die Daten für die Programmierung der „pulse“-Quelle lauten:

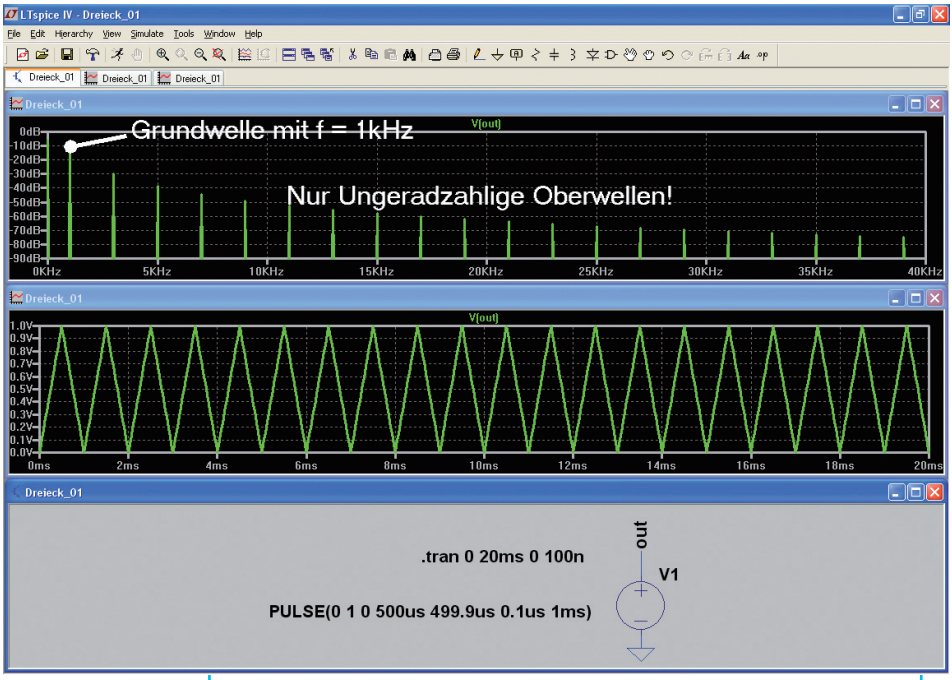

Bild 17: An Symmetrie ist dieses Dreiecksignal nicht zu überbieten, deshalb gibt es auch nur ungeradzahlige Oberwellen

Signalform:	= „pulse“
Minimalwert	= 0 Volt
Maximalwert	= 1 Volt
Anstiegszeit	= 500 µs
Abfallzeit	= 499,9 µs
Impulsdauer	= 100 ns
Periodendauer	= 1 ms

Alle übrigen Details können aus **Bild 17** entnommen werden. Wieder wird für 20 ms mit einem „Maximum time step“ von 100 ns simuliert und wieder dürfen 131 072 Samples in der FFT verwendet werden. Das Ergebnis zeigt nur ungeradzahlige Oberwellen, schließlich hat man hier ein nahezu perfekt symmetrisches Signal vor sich.

... wird fortgesetzt in Teil 2!

X. Literatur

[1] Homepage von LINEAR TECHNOLOGY mit der Möglichkeit „LTspice“ herunterzuladen: www.linear.com

[2] Gunthard Kraus: „ Simulation von HF-Schaltungen mit LTSpiceIV, Teil 1“. UKW-Berichte 4/ 2009, Seite 195