

1 Hintergrund der Spektrumanalyse

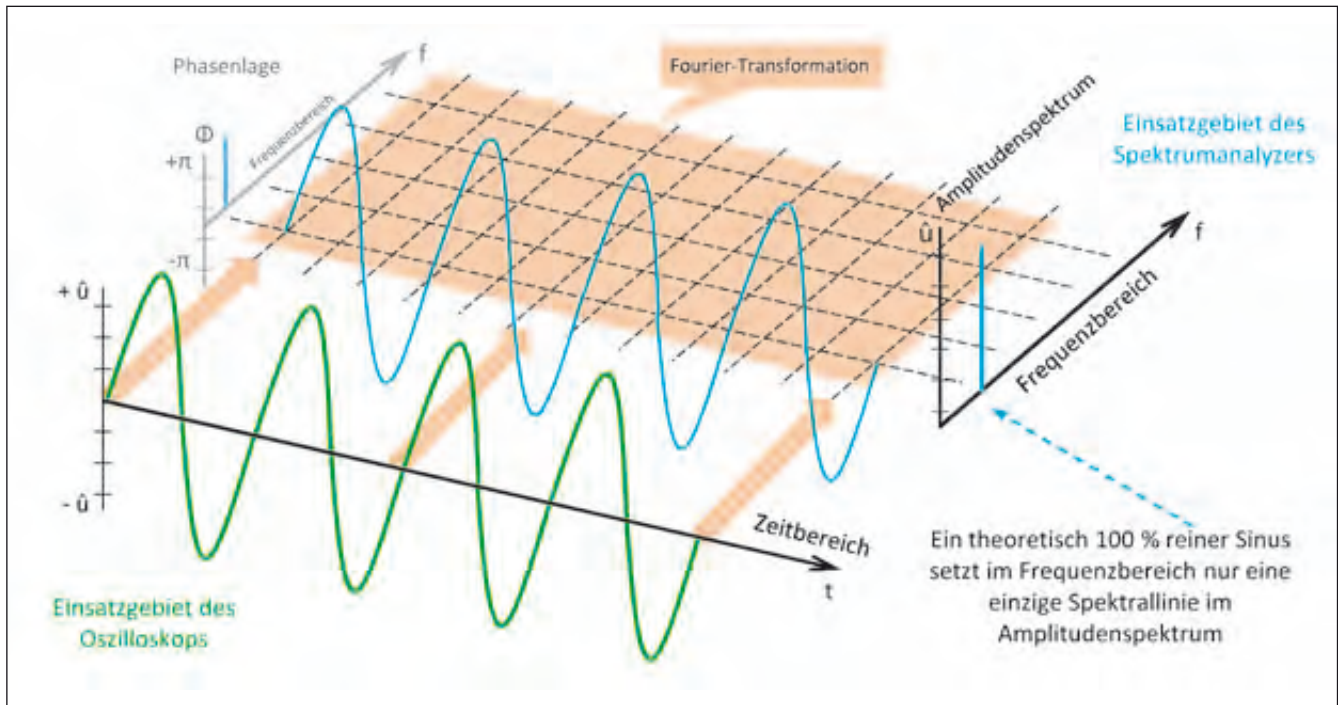


Bild 1.1 Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzbereich einer Sinus-Schwingung

Jede periodische Schwingung in der Natur kann von zwei Seiten betrachtet werden: Im Zeitbereich oder im Frequenzbereich.

Der Elektroniker bedient sich dazu (noch) zwei unterschiedlicher Messgeräte, dem Oszilloskop für den Zeitbereich und dem Spektrumanalyzer für den Frequenzbereich.

Die Erscheinungsform eines Signales im Zeit- und Frequenzbereich ist durch ein Naturgesetz untrennbar miteinander verknüpft. Wird an einem Signal eine Veränderung im Zeitbereich vorgenommen, wirkt diese unmittelbar auf deren „Form“ im Frequenzbereich und umgekehrt. Dieser Zusammenhang wurde von dem Begründer der mathematischen Physik, Jean Baptiste Fourier, bereits im Jahr 1822 vorgestellt, eine Zeit in der man noch weit von Spektrumanalysatoren und Oszilloskopen entfernt war. Er lieferte die Mathematik zur Signaltheorie, wobei wir ausschließlich deren Zusammenhänge und Auswirkungen auf die praktische Messtechnik und den daraus resultierenden Umgang mit dem Analysator betrachten wollen.

In der einschlägigen Fachliteratur findet man oft ein in dieser Darstellungsform (Bild 1.1) recht verbreitetes Diagramm über den Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzbereich.

Eine im Zeitbereich dargestellte Sinusschwingung (grün) ist definiert durch ihre Amplitude (Y-Achse, \hat{u}) und all der Zwischenwerte, die entlang der Zeitachse auftreten werden. Die Zeitachse kann sowohl in Sekunden als auch in Pha-

senwinkel eingeteilt werden. Dies ist die klassische Darstellung, wie sie von einem Oszilloskop her bekannt ist. Fourier hat nun herausgefunden, dass die Eigenschaften des Signals genauso im Frequenzbereich dargestellt werden können. Das Feld der notwendigen Mathematik ist in Bild 1.1 als Spielwiese (orange) dargestellt, in welcher die Berechnung abläuft. Wir führen also unsere grüne Zeitkurve dieser „Spielwiese“ zu, die Pfeile (orange) deuten dies an, und unterziehen sie der höheren Mathematik von Fourier. Als Ergebnis erhalten wir eine einzelne Spektrallinie im Frequenzbereich. Das erscheint nun im ersten Moment nicht sehr spektakulär. Der Grund dafür: Wir gehen von einem reinen Sinus aus. Dessen Eigenschaft ist, dass er nur eine einzige Spektrallinie aufweist. Sobald weitere Spektrallinien vorhanden sind, handelt es sich nicht mehr um einen reinen Sinus. Viele Messungen in der Praxis erfordern einen reinen Sinus, um die Qualität eines Messobjektes beurteilen zu können. Natürlich werden wir in der Praxis keinen 100% reinen Sinus erzeugen können, die Auskunft, wie nahe wir diesem Ziel sind, zeigt uns das Amplitudenspektrum im Frequenzbereich. Die erste Spektrallinie (Grundwelle bzw. 1. Harmonische) ist entscheidend für die Amplitude des Signals, alle weiteren Spektrallinien formen das Signal.

Am linken Rand der Fourier-Spielwiese ist eine weitere Achse mit der Beschriftung „Phasenlage“ aufgetragen. Bei der Berechnung der Parameter vom Zeitbereich in den Fre-

Hintergrund der Spektrumanalyse

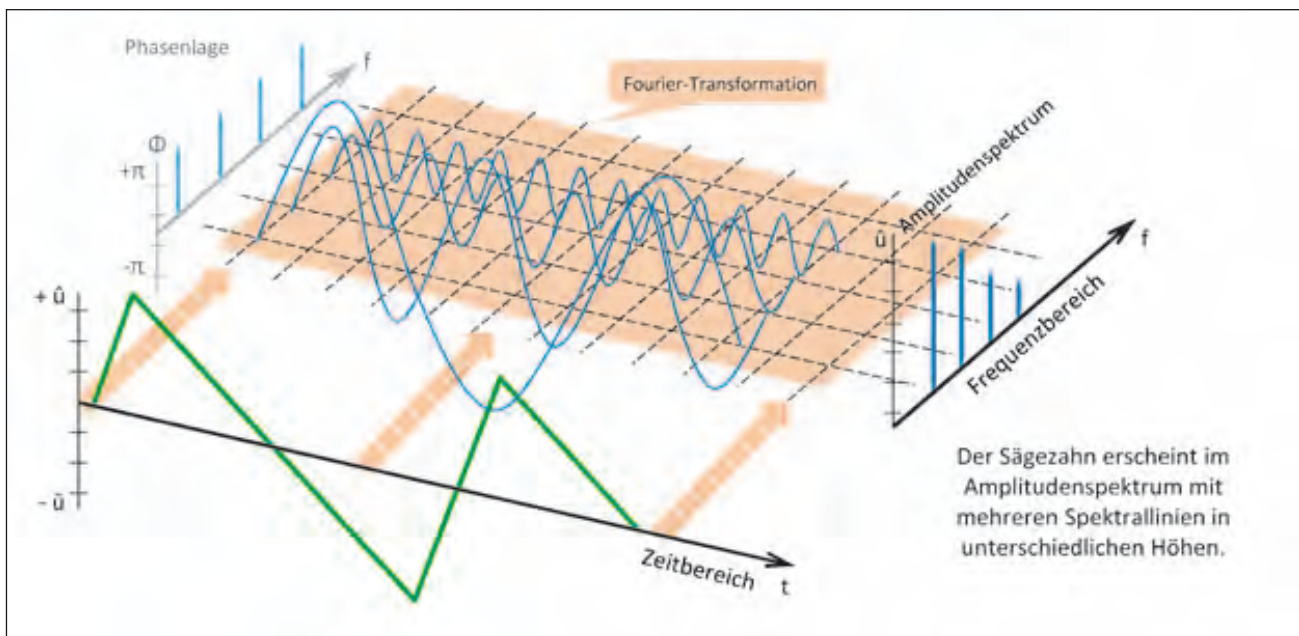


Bild 1.2 Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzbereich einer Sägezahn-Schwingung

quenzbereich spielt natürlich auch die Phasenlage eine entscheidende Rolle, um das Signal im Frequenzbereich vollständig beschreiben zu können. In der klassischen Spektrumanalyse wird nur das Amplitudenspektrum ausgewertet, die Phaseninformation geht verloren. Daher wurde das Phasenspektrum nur grau angedeutet. Das stellt nicht etwa einen gravierenden Nachteil dar, denn in der Regel ist die Phasenlage der einzelnen Spektrallinien in der klassischen Spektrumanalyse nicht von essentieller Bedeutung. Moderne Analyserkonzepte werden in Zukunft zunehmend auch die Auswertung der Phase ermöglichen.

Betrachten wir nun das Amplitudenspektrum einer Sägezahn-Schwingung, Bild 1.2. Auf der Fourier-Spielwiese ist deutlich mehr zu sehen. Das aus dem Zeitbereich angelegte Sägezahn-Signal (grün) wird in einzelne sinusförmige Anteile (blau) zerlegt. Dabei sind deren Amplituden

und Frequenzen im Amplitudenspektrum auf der Frequenzachse abgebildet. Jede beliebige Kurvenform des Zeitbereichs lässt sich so in ein Amplitudenspektrum im Frequenzbereich umwandeln bzw. umrechnen.

Und natürlich kann diese Funktion auch in umgekehrter Richtung erfolgen. Fourier hat festgestellt, dass jedes Signal quasi aus unendlich vielen einzelnen Sinusschwingungen zusammengesetzt ist bzw. in diese zerlegt werden kann.

Bild 1.3 illustriert im Zeitbereich die Zusammensetzung des Sägezahns aus den einzelnen Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenzen. Mit einem Oszilloskop wird man nur den grünen Kurvenzug sehen können, die blauen Sinuskurven bleiben ihm verborgen, die Amplituden der Sinusschwingungen addieren sich und formen so den grünen Kurvenverlauf (rechter Teil in Bild 1.3). Um ihre Exi-

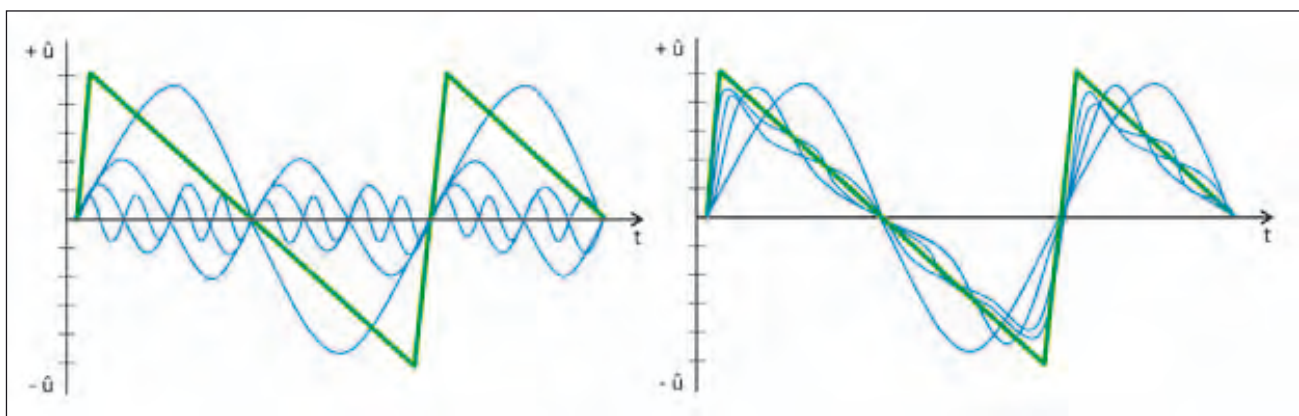


Bild 1.3 Der Sägezahn besteht aus „unendlich“ vielen Sinusschwingungen

Hintergrund der Spektrumanalyse

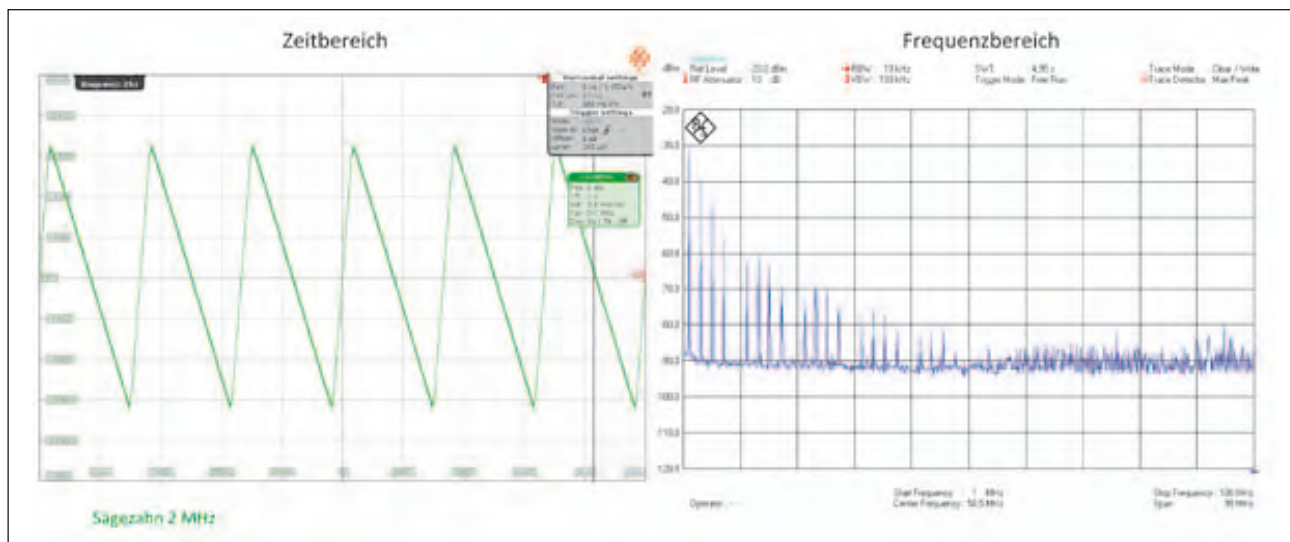


Bild 1.4 Sägezahn, Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich

stanz nachzuweisen, wird die Spektrumanalyse benötigt. Es folgen nun einige Praxisbeispiele, die mit einem Oszilloskop, Spektrumanalyzer und Funktionsgenerator leicht selbst nachvollzogen werden können.

Der Zeitbereich wird mit dem Oszilloskop dargestellt, seine Entwicklung erfolgte im Zeitraum des zweiten Weltkrieges in Zusammenhang mit der Radartechnik.

Aufbauend auf der Oszilloskopentechnik wurde zeitgleich für den Frequenzbereich der Spektrumanalysator entwickelt. Ende der 1960er kamen erste Geräte in Einschubtechnik auf den Markt, sie basierten auf einem portablen Oszilloskop.

Die heutige Messtechnik vermag die vor etwa 200 Jahren von Fourier mathematisch aufgestellten Zusammen-

hänge komfortabel zu präsentieren:

Im linken Teil von Bild 1.4 sehen wir den Kurvenverlauf des Sägezahns (grün), aufgenommen mit dem Oszilloskop. Im rechten Teil das gleiche Signal, wie es sich im Frequenzbereich darstellt, aufgenommen mit dem Spektrumanalyzer. Unter Zuhilfenahme von Fouriers Mathematik ist es möglich, anhand der angezeigten Spektrallinien (blau), nämlich ihrer Frequenz bzw. deren Abstände zueinander und ihrer Amplitude, auf den Kurvenverlauf in den Zeitbereich zu rechnen. Am auffälligsten ist, dass mit zunehmender Frequenz die Amplituden der Spektrallinien immer kürzer werden, ab 50 MHz auf der Frequenzachse verschwinden sie gar völlig unter die Nachweisgrenze. Auch wenn die Messtechnik hier an Grenzen stößt, könnten wir the-

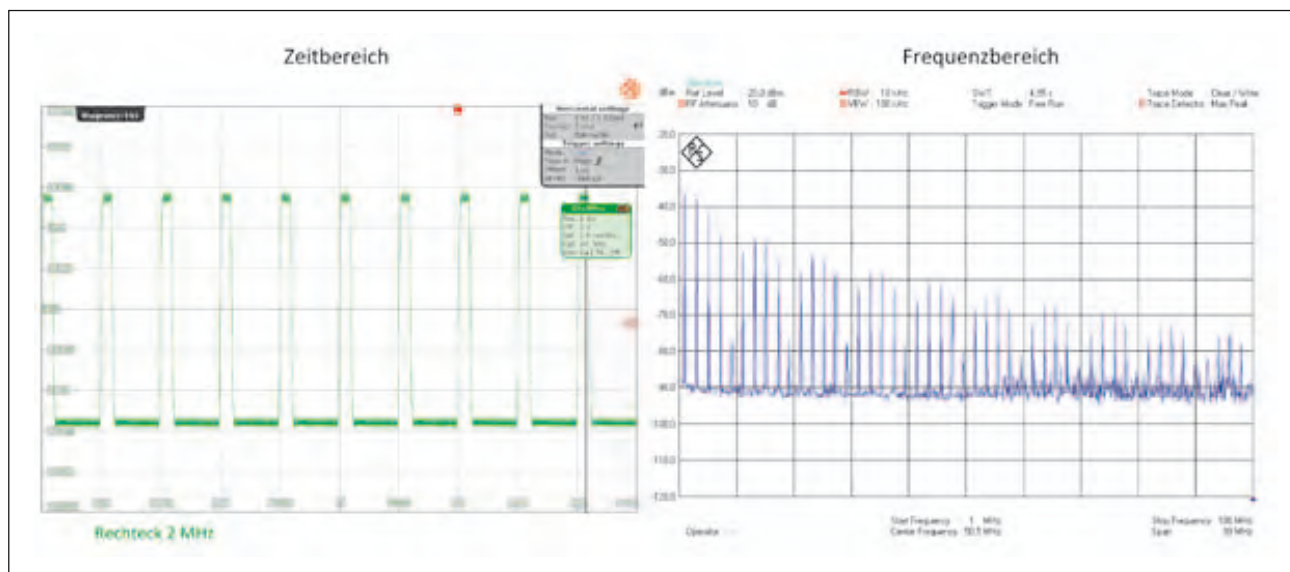


Bild 1.5 Rechteckimpuls, Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich

Hintergrund der Spektrumanalyse

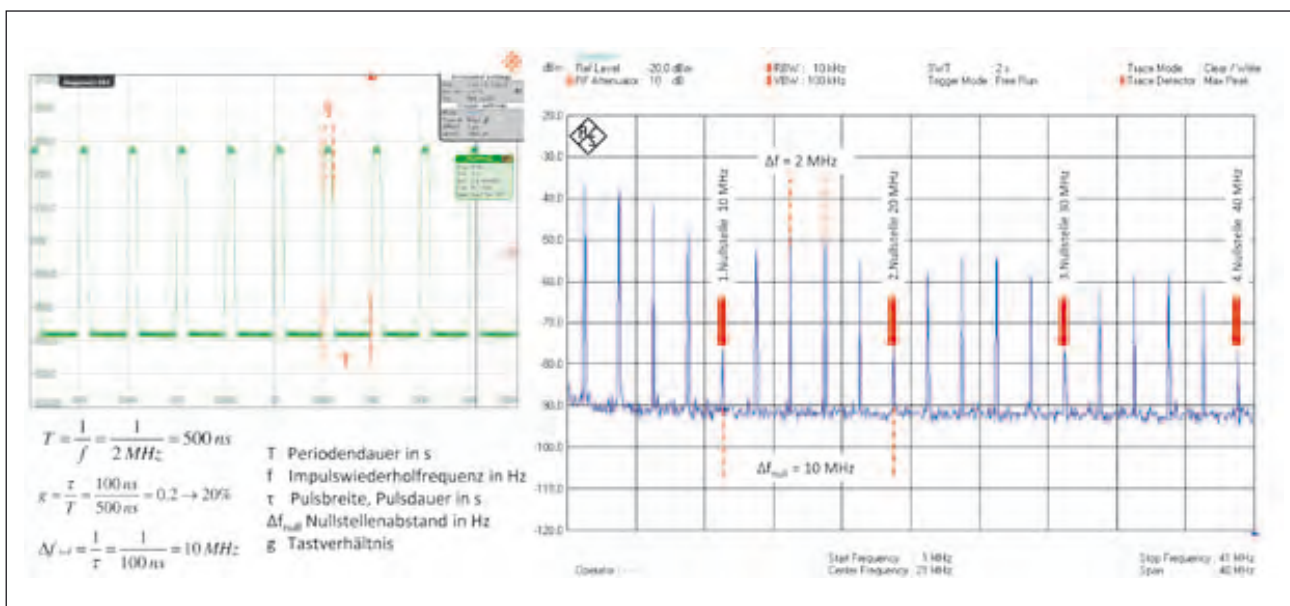


Bild 1.6 Rechteckimpuls, die Nullstellen im Amplitudenspektrum beim Tastverhältnis 0.2

oretisch eine unendliche Zahl an Frequenzen feststellen.

Mit einer Veränderung der Kurvenform im Zeitbereich erhält man unmittelbar die Veränderung im Frequenzbereich. In Bild 1.5 wurde, zugegeben, eine sehr starke Veränderung vorgenommen. Der Generator wurde einfach von Sägezahn- auf Rechteckimpulse umgestellt. Dabei ist es wichtig zu wissen: Die Frequenz und das Tastverhältnis bzw. die Symmetrie wurden beibehalten! Das kann leicht im Zeitbereich nachvollzogen werden, eine komplette Periode dauert in beiden Fällen 500 ns. Im Frequenzbereich fällt sofort auf, es sind wesentlich mehr Spektrallinien vorhanden. Der Rechteckimpuls belegt den Frequenzbereich weit über den Darstellungsbereich der Frequenzachse von 100 MHz hinaus.

Vergleicht man die Amplitudenspektren im Frequenzbereich miteinander, so wird man gewisse Ähnlichkeiten finden, z.B. sind die Abstände zwischen den Linien gleich. Auch die Verteilung von etwas höheren und niedrigeren Linien entlang der Frequenzachse ergibt ein ähnliches Muster. Der gravierende Unterschied ist jedoch in der breiteren Belegung der Frequenzachse zu finden. Durch den Vergleich der beiden Spektren wird ersichtlich, auch wenn die mathematischen Hintergründe nicht beleuchtet werden, dass hier feste Zusammenhänge (Naturgesetze) vorhanden sind.

Außerdem bestätigt die Praxis diese Beobachtung, es ist z.B. bekannt, dass schmale Impulse ein breites (Stör)spektrum aufweisen. Dessen Breite könnte mit Kenntnis der Zusammenhänge bereits aus der Anstiegsflanke im Zeitbereich berechnet werden.

Schaut man etwas genauer auf das Amplitudenspektrum, dann fallen die Lücken zwischen den Spektrallinien auf, sogenannte Nullstellen.

Um diese Nullstellen besser darstellen zu können, wurde

der Sweep-Bereich des Analyzers von 100 MHz auf 40 MHz reduziert, Bild 1.6. Im Zeitbereich wird das Signal durch seine Frequenz bzw. Periodendauer T definiert. Die Frequenz, der Kehrwert der Periodendauer, wird bei Impulsen auch gerne als Pulswiederholungsrate bezeichnet. Der zweite Parameter besteht aus der Pulsdauer τ oder Pulsbreite. Diese beiden Größen müssen sich aufgrund der gesetzmäßigen Zusammenhänge in einer anderen Form im Amplitudenspektrum des Frequenzbereichs wiederfinden. Die Pulswiederholungsrate, im Beispiel 2 MHz, zeigt sich im Abstand der Spektrallinien (blau), in Bild 1.6 wurde eine Stelle willkürlich gewählt und entsprechend markiert. Durch Vermessen der Abstände kann somit auf die Pulswiederholungsrate bzw. Periodendauer des Signals geschlossen werden. Das Tastverhältnis τ bzw. sein Kehrwert als Frequenz erscheint als Nullstellenabstand im Frequenzbereich. Im Beispiel beträgt die Impulsbreite τ 100 ns, was zu einer berechneten Frequenz von 10 MHz führt. Dieser Wert ergibt den Nullstellenabstand Δf_{null} , im Bild 1.6 durch rote Pfeile markiert. An den markierten Stellen sind noch, wenn auch niedrige, Spektrallinien zu sehen, die Amplitude wird nicht zu „Null“. In der Praxis wird man die Signale kaum so präzise vorfinden, nicht immer werden sich exakte Nullstellen ausbilden können.

Wir verändern nun im nächsten Schritt einen der Parameter im Zeitbereich, und zwar die Impulsbreite, und untersuchen die direkten Auswirkungen im Amplitudenspektrum des Frequenzbereichs, Bild 1.7.

Mit der Erhöhung der Pulsbreite von 100 ns zu 150 ns geht auch eine Veränderung des Tastverhältnisses einher, denn die Periodendauer bleibt konstant bei 500 ns bestehen. Das Tastverhältnis beträgt jetzt 0.3, womit der Nullstellenabstand auf 6.7 MHz berechnet werden kann. Im

Hintergrund der Spektrumanalyse

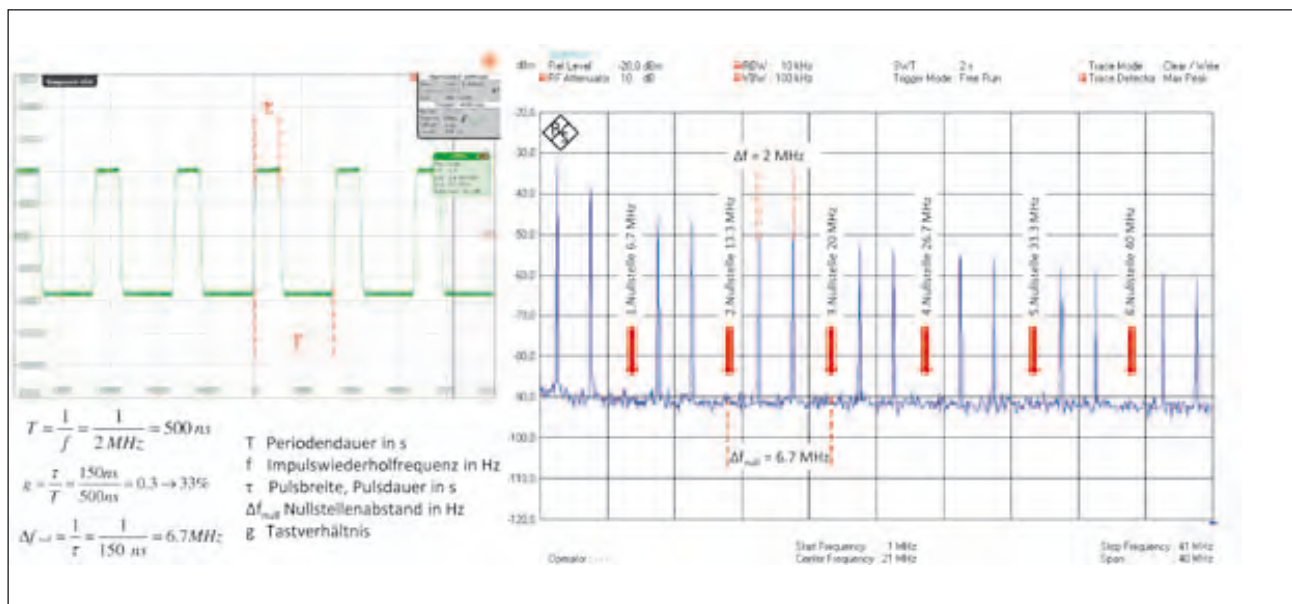


Bild 1.7 Rechteckimpuls, die Nullstellen im Amplitudenspektrum beim Tastverhältnis 0.3

Amplitudenspektrum ist die Veränderung deutlich sichtbar, bei dieser Einstellung sind die Spektrallinien tatsächlich im Rauschen der Grundlinie verschwunden. Der Abstand der Spektrallinien untereinander ist gleich geblieben, was auch korrekt ist, denn die Pulswiederholungs- bzw. Periodendauer wurde nicht verändert. Auch hier könnte

durch Vermessen des Amplitudenspektrums leicht auf die Werte der Parameter im Zeitbereich geschlossen werden. Nicht immer gestaltet sich das Erkennen der Nullstellen so deutlich. Mit den bewusst so gewählten Einstellungen des Tastverhältnisses fällt die Nullstelle tatsächlich direkt auf eine Spektrallinie und löscht diese komplett aus. In weit-

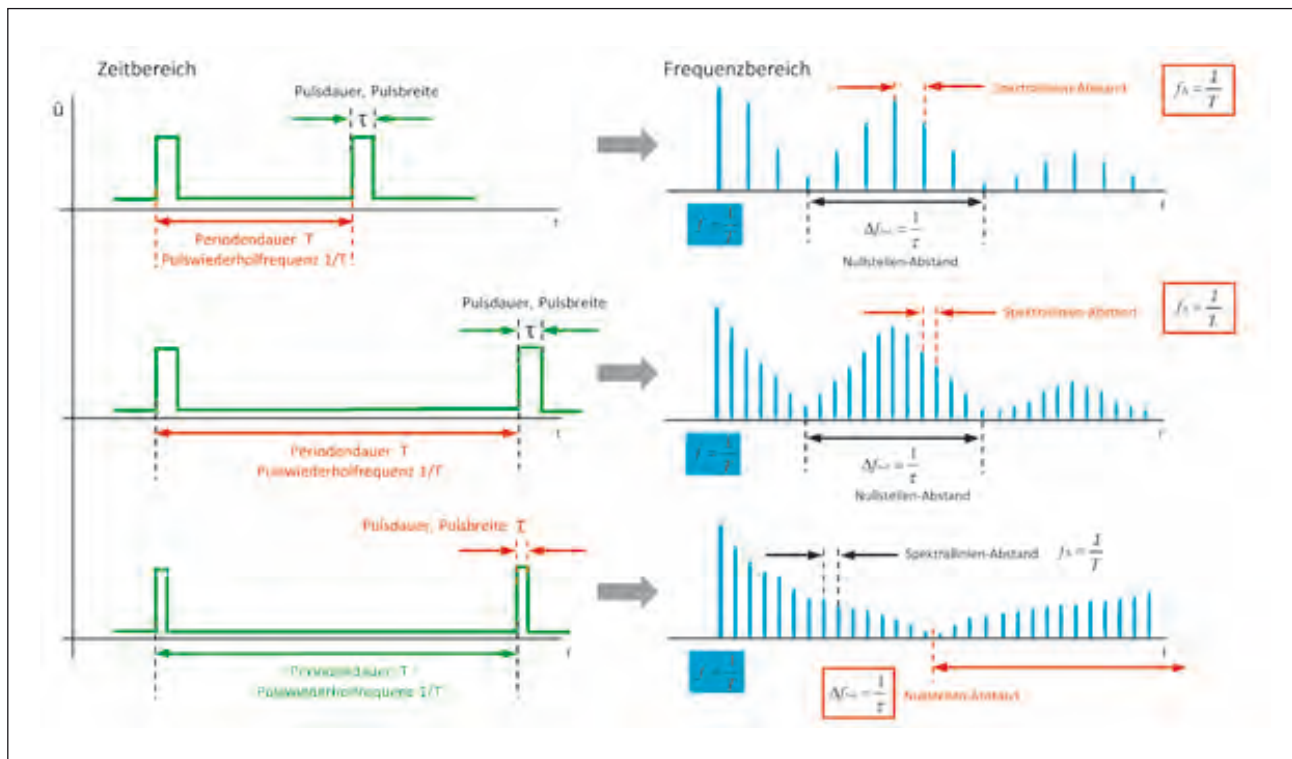


Bild 1.8 Schematische Darstellung der Zusammenhänge für Impulsspektren

Hintergrund der Spektrumanalyse

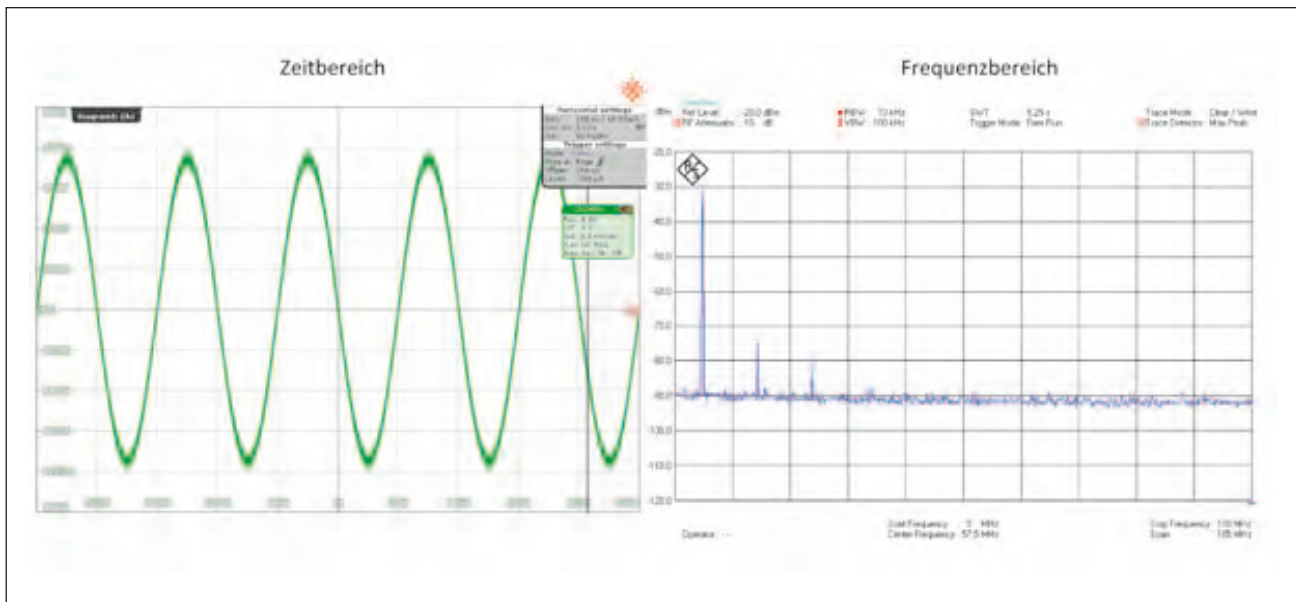


Bild 1.9 Ausgangssignal eines HF-Generators im Zeit- und Frequenzbereich

aus mehr Situationen gestalten sich die Verhältnisse nicht so passgenau, Bild 1.6 vermittelte bereits einen kleinen Eindruck darüber, dass bei einer Nullstelle die Amplitude nicht ganz präzise zu „Null“ werden kann. Für die Nullstellen sind, je nach Impulsbreite, auch Abstände möglich, die zwischen den Spektrallinien liegen werden. Dies wird jedoch trotzdem daran zu erkennen sein, wenn die benachbarten Spektrallinien in ihrer Amplitude abgesenkt auftreten. Für den zu ermittelnden Nullstellenabstand kann die Differenz zwischen den fast zu „Null“ abgesenkten Spektrallinien herangezogen werden. Deren Wiederholung entlang der Frequenzachse ist konstant, deshalb ist der absolute Ort der Nullstelle für die Ermittlung der Differenz nicht entscheidend.

Die Messung von Impulsspektren stellt eine besondere Herausforderung für den Spektrumanalyzer dar. Die Details werden in den nachfolgenden Kapiteln erarbeitet. Das Wesentliche liegt hier in der Erkenntnis, je schmaler die Impulsbreite wird, umso dichter wird das Amplitudenspektrum. Dieser Zusammenhang ist in Bild 1.8 nochmals herausgestellt. Durch die Dichte der Spektrallinien findet eine Unterbewertung der angezeigten Amplitude statt, denn die Auflösfilter der Analyzer sind für den Pegel „einer“ Spektrallinie definiert, Näheres dazu in Kapitel 3. Weiterhin birgt die hohe Anzahl der Spektrallinien, verursacht durch schmale Impulse im Zeitbereich, eine Übersteuerung der Eingangsstufen, denn jede Spektrallinie besitzt einen gewissen Energieinhalt. Die Impulsspektren treten besonders in der EMV-Messtechnik auf.

Wir haben nun drei Parameter, die Amplitude, den Linienabstand und den Nullstellenabstand im Frequenzbereich kennengelernt, zu denen ein direkter Bezug in den Zeitbereich hergestellt werden kann. Damit sind natürlich

nicht alle Parameter erfasst, es fehlt z.B. die Phasenlage. Sie wird vom üblichen Spektrumanalyzer nicht erfasst. Das beschert der Spektrumanalyse in der Praxis jedoch keinen Abbruch, denn vielfältig sind die Messaufgaben, die mit dem Analyzer bewerkstelligt werden können, die folgenden Kapitel mit dem Titel „Messpraxis“ werden das aufzeigen.

Worin liegt der Vorteil ein Signal, gezielt im Zeit- oder Frequenzbereich zu betrachten? Ein Beispiel: Sie beabsichtigen die Anschaffung eines gebrauchten HF-Generators. Mit welchem Messgerät wird man eine Aussage zur Qualität des Ausgangssignals bzgl. spektraler Reinheit bzw. Oberwellenfreiheit erhalten?

Nach den mathematischen Erkenntnissen von Fourier müsste es unerheblich sein, ob das Ausgangssignal im Zeitbereich oder Frequenzbereich untersucht wird. Theoretisch ist das korrekt, aber schauen wir uns die Praxis an.

Der HF-Generator wird zunächst an ein Oszilloskop angeschlossen, wobei wir unterstellen, dass das verwendete Gerät den benötigten Frequenzbereich verarbeiten kann. Auf dem Display wird ein „sauberer“ Sinus zu sehen sein, womit der Generator als „in Ordnung“ eingestuft werden könnte. Ist das tatsächlich korrekt? Betrachtet man Bild 1.9, würde man diese Vorgehensweise tatsächlich so absegnen wollen, denn der angeschlossene Spektrumanalyzer bestätigt, dass Oberwellen nur sehr begrenzt vorhanden sind.

Würden die Amplituden der Oberwellen um 20 dB höher liegen, hätte das nach unserem optischen Empfinden noch keine sichtbare Auswirkung auf den Kurvenverlauf des Sinus. Das bedeutet nicht, dass diese Oberwellen auf den Zeitbereich keinen Einfluss hätten (Fourier), sie liegen einfach unterhalb der Erkennungsgrenze unseres gewählten Messverfahrens. Für einen guten HF-Generator wären aber Oberwellen in diesem Ausmaß kaum mehr akzeptabel.

Hintergrund der Spektrumanalyse

Würde unser Auge eine direkt sichtbare Abweichung vom idealen Sinus wahrnehmen, z.B. eine „Delle“ im oberen Kurvenbereich, dann beruhen sie auf einem Oberwellenanteil, der weit ab von den gestellten Anforderungen an einen HF-Generator liegen. Für die Untersuchung des HF-Generators wird man also mit dem Spektrumanalyzer auf den Frequenzbereich der Signale schauen.

Szenenwechsel: Sie wollen einen Funktionsgenerator erwerben. Hier hilft der Blick auf den Frequenzbereich durch den Spektrumanalyzer nicht weiter. Für die Arbeit mit Rechteck-, Dreieck- und Sägezahnimpulsen ist der Verlauf derer Flanken und den dabei benötigten Anstiegszeiten von Interesse. All diese Parameter liegen auch im Frequenzbereich begründet (Fourier), sind in ihren Details jedoch besser im Zeitbereich mit dem Oszilloskop abgebildet.

Dieses kleine Beispiel zeigt, dass der Einsatz der Messverfahren direkt durch die Anwendung bestimmt wird.