



(10) **DE 10 2018 123 797 A1** 2020.03.26

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 123 797.9**

(22) Anmeldetag: **26.09.2018**

(43) Offenlegungstag: **26.03.2020**

(51) Int Cl.: **G01N 29/04 (2006.01)**

G01N 29/12 (2006.01)

G01N 29/07 (2006.01)

(71) Anmelder:

MeoWell GmbH, 98693 Ilmenau, DE

(74) Vertreter:

PATENTSCHUTZengel, 98527 Suhl, DE

(72) Erfinder:

Peyerl, Peter, Dr., 98693 Ilmenau, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

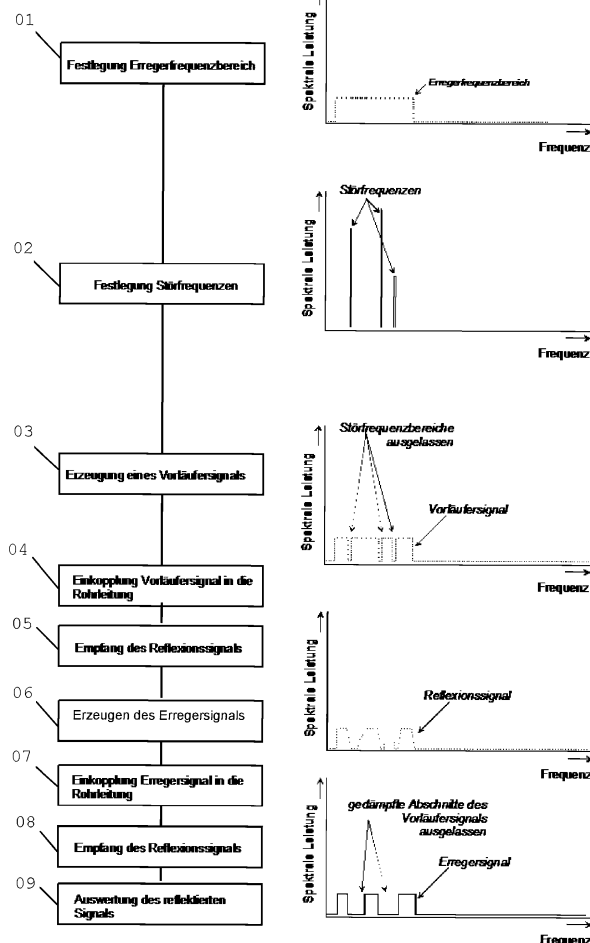
DE	10 2004 016 196	A1
DE	10 2012 101 667	A1
EP	2 169 179	B1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Erzeugung eines Erregersignals sowie zur akustischen Messung in technischen Hohlräumen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur akustischen Messung in technischen Hohlräumen, beispielsweise zur Messung von Reflexionsstellen entlang langer Rohrleitungen. Das Verfahren startet mit der Festlegung eines breitbandigen Erregerfrequenzbereichs. Es folgen die Festlegung von Störfrequenzen, welche im Erregersignal nicht enthalten sein sollen und das Erzeugen eines Vorläufersignals über den Erregerfrequenzbereich unter Auslassung der Störfrequenzen. Dann wird das Vorläufersignal in die Rohrleitung eingekoppelt und ein aus der Rohrleitung reflektiertes Vorläufer-Reflexionssignal empfangen. Das Vorläufersignal wird mit dem Vorläufer-Reflexionssignal verglichen und Dämpfungsfrequenzen, bei denen das Vorläufersignal auf dem Messweg entlang der Rohrleitung stärker gedämpft wird als die durchschnittliche Dämpfung des gesamten Vorläufersignals werden bestimmt. Dann wird ein Erregersignal über den Erregerfrequenzbereich unter Auslassung der Störfrequenzen und der Dämpfungsfrequenzen erzeugt. Es folgen das Einkoppeln des Erregersignals in die Rohrleitung und das Empfangen eines aus der Rohrleitung reflektierten Messsignals sowie die Auswertung des reflektierten Messsignals mithilfe geeigneter Auswerteverfahren. Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Erzeugung eines Erregersignals sowie eine Vorrichtung zur Ausführung dieser Verfahren.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur akustischen Messung in bzw. entlang technischer Hohlräume, beispielsweise langer Rohrleitungen. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Erzeugung eines Erregersignals für derartige Messungen. Insbesondere lassen sich solche Verfahren für die Optimierung der Schallübertragung und Messung von Reflexionen akustischer Signale in bzw. entlang von Rohrleitungen einsetzen. Aus derartigen Signalen können beispielsweise die Position von Leckagen oder Unstetigkeitsstellen in Rohrleitungen, Flüssigkeitsstände in vertikal verbauten Rohrsystemen usw. bestimmt werden.

[0002] Zum Themenbereich der Messung von Flüssigkeitsständen in vertikal verbauten Rohren existieren diverse Patentschriften.

[0003] Aus der EP 2 169 179 B1 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zur ausschließlichen Erkennung der Spiegelteufe in einem Bohrloch, welches einem vertikal verbauten Rohrsystem entspricht, bekannt. Zur Erkennung der Lage einer Spiegelteufe in einem Bohrloch einer Tiefbohrung wird an der Erdoberfläche ein akustisches Ereignis generiert, welches Druckwellen erzeugt. Die Druckwellen laufen in dem Bohrloch in die Tiefe und werden zumindest auch an der Spiegelteufe reflektiert. Die zur Erdoberfläche zurücklaufenden Druckwellen werden aufgefangen und die Laufzeit seit dem akustischen Ereignis wird gemessen. Die aufgefangenen und gemessenen Druckwellen werden zusammen mit der zugehörigen Laufzeit ausgewertet, woraus auf die Lage der Spiegelteufe geschlossen werden kann. Das akustische Ereignis wird als ein Signalmuster mit einem vorgegebenen, zeitlich veränderlichen Frequenzspektrum erzeugt. Das Signalmuster wird als Schwingungsereignis in das Bohrloch abgestrahlt. Aus den aufgefangenen, reflektierten Signalen werden bei der Analyse Schwingungsereignisse herausgefiltert, die zu dem abgestrahlten Signalmuster korrelieren. Aus den zu dem abgestrahlten Signalmuster korrelierenden Schwingungsereignissen und der Laufzeit seit der Ausstrahlung des Signalmusters wird auf die Lage der Spiegelteufe geschlossen. Die in dieser Druckschrift ebenfalls beschriebene Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens besitzt an der Erdoberfläche eine schwingungsabgebende Einrichtung, die Signalmuster mit einem vorgegebenen, zeitlich veränderlichen Frequenzspektrum erzeugt und in das Bohrloch abstrahlt. Weiterhin sind eine Messeinrichtung zum Empfangen von aus dem Bohrloch stammenden Signalen und eine elektronische Analyseeinheit vorgesehen, die die von der Messeinrichtung aufgefangenen Signale analysiert. Die Analyseeinheit ermittelt die zu den abgestrahlten Signalmustern korrelierenden Schwingungsereignisse und bestimmt die Lage der Spiegelteufe.

[0004] Es ist verständlich, dass derartige akustische Messungen nicht nur in Tiefenbohrungen sondern auch in anderen Anwendungsbereichen ausgeführt werden könnten, beispielsweise wenn mit Luft, anderen Gasen oder auch flüssigen Medien gefüllte Hohlkörper, wie z. B. Rohrleitungen, Parallelrohrwärmetauscher usw. untersucht werden sollen. Im Sinne der vorliegenden Erfindung sind Rohrleitungen grundsätzlich als lang gestreckte weitgehend gleichförmige Hohlräume zu verstehen, in denen sich ein Medium befindet, in welchem sich Schallwellen bzw. akustische Signale ausbreiten können, wobei die Gesamtdämpfung der Signale klein genug sein muss, damit sich die akustischen Signale über die gewünschte Messlänge ausbreiten und zum Sendort zurückreflektiert werden und dann noch messbar sind.

[0005] Gerade bei sehr langen Rohren (einige Hundert Meter bis einige Kilometer), bei Rohren mit einer komplizierten, teils sehr unterschiedlichen Geometrie, in Rohren mit vielen möglichen Reflexionsstellen für die Schallwellen, bei Komponenten mit im Raum zwischen einem äußeren und einem inneren Rohr eingekoppelten Signalen und bei starken Störgeräuschen im Rohr oder dessen Umgebung versagen die bisher bekannten Messverfahren jedoch regelmäßig.

[0006] Neben Störeinflüssen aufgrund der konstruktiven Besonderheiten (z. B. sprunghaften Durchmesseränderungen) der zu vermessenden Rohrleitungen kommen bei elektrischen Messverfahren weitere Störgrößen hinzu, die auf elektromagnetische Einstrahlungen in die verwendete Sensorik oder in elektrische Leitungen beruhen und die eine empfindliche Messung stark stören oder auch unmöglich machen können.

[0007] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht ausgehend vom genannten Stand der Technik darin, ein verbessertes Verfahren zur akustischen Messung entlang langer Rohrleitungen bereitzustellen, welches auch unter schwierigen Bedingungen zuverlässige Messwerte liefert. Insbesondere soll das Verfahren das Lokalisieren von unbekannten Reflexionsstellen in technischen Hohlkörpern und vorrangig entlang langer Rohrleitungen gestatten, wie beispielsweise fehlerhafte Schweißnähte, Spiegelteufen, Flüssigkeitsstände, Leckagen usw. während bekannte Reflexionsstellen, wie z. B. periodisch wiederkehrende Stöße an Rohrabschnitten, unbewegliche Einbauten in den Hohlkörpern usw. das Messergebnis nicht verfälschen sollen. Dazu wird ein Messverfahren benötigt, welches sich optimal und möglichst einfach an unterschiedliche Bedingungen anpassen lässt.

[0008] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zur akustischen Messung in technischen Hohlräumen,

insbesondere entlang langer Rohrleitungen gemäß dem beigefügten Anspruch 1 sowie durch ein Verfahren zur Erzeugung eines Erregersignals für derartige akustische Messungen gemäß dem nebengeordneten Anspruch 7 gelöst.

[0009] Das erfindungsgemäße Verfahren zur akustischen Messung in technischen Hohlräumen startet zunächst mit der Festlegung eines breitbandigen Erregerfrequenzbereichs, in welchem ein Erregersignal erzeugt werden soll. Beispielsweise kann sich der Erregerfrequenzbereich von einer unteren Grenzfrequenz $f_u = 5$ Hz bis zu einer oberen Grenzfrequenz $f_o = 300$ Hz erstrecken. Es sind aber auch andere Erregerfrequenzbereiche bis hin zum Ultraschall denkbar. Der konkret geeignete Frequenzbereich hängt von den Eigenschaften des zu untersuchenden Rohres ab.

[0010] In einem weiteren Schritt werden Störfrequenzen festgelegt, welche im Erregersignal nicht enthalten sein sollen. Solche Störfrequenzen können sich aufgrund des Aufbaus des zu messenden Hohlraums und/oder aus den Umgebungsbedingungen ergeben und bekannt sein oder ermittelt werden. Beispielsweise werden regelmäßig die Netzfrequenzen (50 Hz, 60 Hz und Oberwellen dazu) und Umrichterfrequenzen (typisch 20...40 Hz und Oberwellen dazu) betrachtet. Diese bekannten Störfrequenzen können als Vorgabewerte berücksichtigt werden. Weiterhin können Störfrequenzen aufgrund gezielt eingebauter oder periodisch angeordneter Reflektoren im Hohlraum (z. B. Rohr-Verbindungsstellen) entstehen oder sonstige zyklischen Signale im betrachteten Frequenzbereich auftreten, die als Störfrequenzen festgelegt werden.

[0011] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird zum Festlegen der Störfrequenzen eine Messung akustischer Störsignale, die z. B. an einer Rohrleitung ohne Einkopplung des Vorläufer- oder Erregersignals als ein Grundgeräusch auftreten, ausgeführt. Die Frequenzen der gemessenen Störsignale oberhalb einer vorbestimmten Störsignalschwelle werden daraufhin als Störfrequenzen festgelegt. In dem gemessenen Störsignal sind sowohl mögliche störende Geräusche als auch störende elektromagnetische Einstreuungen enthalten. Das Festlegen der in diesem Grundgeräusch auftretenden Störfrequenzen kann anhand vorbestimmter Schwellwerte der Amplitude einzelner Frequenzlinien automatisch erfolgen oder/und auch manuell durch Begutachtung des grafisch dargestellten Signals erfolgen.

[0012] Gemäß einer abgewandelten Ausführungsform können beim Festlegen bzw. Bestimmen der Störfrequenzen auch die Eigenschaften der Signalübertragungskette berücksichtigt werden. Insbesondere können z. B. Resonanzfrequenzen eines Lautsprechers, der zum Einkoppeln der akustischen Si-

gnale in z. B. die Rohrleitung benutzt wird, als Störfrequenzen behandelt und aus dem zu erzeugenden Vorläufersignal bzw. dem Erregersignal ausgeschlossen werden. Ebenso kann der Frequenzgang der Sensoren, welche die reflektierten Signale aufnehmen, bei der Festlegung der Störfrequenzen berücksichtigt werden, indem das Vorläufersignal und später das Erregersignal entsprechend optimal angepasst werden.

[0013] Es ist verständlich, dass die nachfolgenden Messungen deutlich empfindlicher und genauer ausgeführt werden können, wenn man diese Störfrequenzen ausblendet. Die Erfindung geht über ein solches Ausblenden aber hinaus, indem für die eigentliche Messung ein Erregersignal generiert wird, welches die Störfrequenzen gar nicht erst enthält. Dazu wird in einem weiteren Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens ein Vorläufersignal erzeugt, über den festgelegten Erregerfrequenzbereich aber unter Ausklammerung der Störfrequenzen. Damit lässt sich die gesamte Signalenergie in die Frequenzbereiche lenken, die im Rahmen der Messung ausgewertet werden können. Das Vorläufersignal ist somit ein breitbandiges Sendesignal (z. B. 5 Hz ... 300 Hz) ohne die Störfrequenzen. Bei abgewandelten Ausführungen wird das Vorläufersignal (und später auch das Erregersignal) schmalbandiger gewählt, beispielsweise im Bereich 5 Hz bis 50 Hz, um mehr Sendeleistung im für spezifische Anwendungen interessierenden Frequenzbereich konzentrieren zu können.

[0014] Die Erzeugung der für die Messung erforderlichen akustischen Signale, d. h. des Vorläufersignals und des Erregersignals (siehe dazu weiter unten) erfolgt bevorzugt auf digitalem Weg, indem die Signale durch eine entsprechende Software in einem Rechner (Mikrocontroller, digitaler Signalprozessor, FPGA usw.) berechnet werden.

[0015] Im nächsten Schritt des Verfahrens erfolgt das Einkoppeln des derart erzeugten Vorläufersignals in den Hohlraum (z. B. die Rohrleitung) und das Empfangen eines aus der Rohrleitung reflektierten Vorläufer-Reflexionssignals. Vorzugsweise wird das Vorläufersignal (ebenso später das Erregersignal) über einen Digital-Analog-Umsetzer in ein analoges Signal umgewandelt und in die Rohrleitung, insbesondere in den Rohrrinnenraum eingekoppelt. Das Einkoppeln erfolgt beispielsweise mit Hilfe eines oder mehrerer Lautsprecher. Über geeignete akustische Sensoren (z. B. Mikrofone), die sich an unterschiedlichen Stellen des Rohres befinden können, wird das reflektierte und dabei vom Rohr beeinflusste Vorläufer-Reflexionssignal erfasst.

[0016] Im nachfolgenden Schritt wird zum Bestimmen von Dämpfungsfrequenzen, bei denen das Vorläufersignal auf dem Messweg entlang der Rohrleitung stärker gedämpft wird als die durchschnittliche

Dämpfung des gesamten Vorläufersignals, das Vorläufersignal mit dem Vorläufer-Reflexionssignal verglichen. Bevorzugt wird das Vorläufer-Reflexionssignal dazu mit Hilfe eines AD-Wandlers in ein Digitalsignal umgewandelt und der Vergleich mit dem Vorläufersignal erfolgt wieder durch entsprechende Software/Algorithmen in einem geeigneten Rechner (Mikrocontroller, digitaler Signalprozessor, FPGA).

Durch das Einkoppeln des Vorläufersignals und die Auswertung des Vorläufer-Reflexionssignals kann ermittelt werden, welche Signalanteile entlang des Hohlraums (z. B. der Rohrleitung) gut übertragen werden und welche Signalanteile stark gedämpft oder sogar ausgelöscht werden.

[0017] Im sich anschließenden Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein Erregersignal über den Erregerfrequenzbereich erzeugt, unter Ausklammerung der zuvor bestimmten bzw. festgelegten Störfrequenzen und der ebenfalls bestimmten Dämpfungsfrequenzen. Das derart erzeugte endgültige Erregersignal ist somit breitbandig im Erregerfrequenzbereich und verzichtet gleichzeitig auf mindestens eine gezielt ausgesparte Frequenz, im Regelfall mehrere Frequenzen, die als Störfrequenzen oder als Dämpfungsfrequenzen zuvor bestimmt wurden. Dadurch kann die Energie des Erregersignals auf genau die Frequenzbereiche konzentriert werden, in denen weder Störfrequenzen noch Dämpfungsfrequenzen liegen.

[0018] Im folgenden Verfahrensschritt wird das so erzeugte Erregersignal in den technischen Hohlraum (z. B. die Rohrleitung) eingekoppelt und ein aus der Rohrleitung reflektiertes Messsignal empfangen. Einkoppeln und Empfangen erfolgt wieder mit Hilfe der oben bereits erwähnten Lautsprecher bzw. Sensoren. In einer bevorzugten Ausführungsform kann der Lautsprecher im Umkehrmodus auch als Mikrofon betrieben werden, sodass keine eigenständigen Sensoren benötigt werden.

[0019] In einem letzten Schritt erfolgt die Auswertung des reflektierten Messsignals mithilfe geeigneter Auswerteverfahren. In an sich bekannter Weise - aber mit erfindungsgemäß gesteigerter Genauigkeit - lassen sich unterschiedliche Parameter/Eigenschaften des Hohlraums, der Rohrleitung bzw. des zugehörigen Leitungssystem bestimmen. Solche Parameter können beispielsweise sein:

- spezielle akustische Übertragungsverhältnisse im Rohr,
- Stoßstellen,
- sonstige Reflexionen im Rohr oder am Rohrende,
- akustische Eigenschaften von im Rohr befindlichen Medien, wie Dämpfung/Absorption, Schallgeschwindigkeit, Laufzeiten usw.

Aus diesen akustischen Parametern lässt sich wiederum je nach Einsatzgebiet, auf Stoffeigenschaften, Ausbreitungsbedingungen, Verschmutzungsgrad, Leckagen usw. schließen.

[0020] Ein wesentlicher Unterschied zwischen Messverfahren nach dem Stand der Technik und dem erfindungsgemäßen Verfahren besteht demnach darin, dass Störsignale nicht nur im Empfangszweig ausgeblendet bzw. ausgefiltert werden, sondern dass die Störfrequenzen und ggf. Dämpfungsfrequenzen auch im Erregersignal gar nicht erst enthalten sind. Die zur Messung verfügbare Energie, welche mit dem Erregersignal in das zu messende System eingekoppelt werden muss, kann dadurch auf die Frequenzbereiche verteilt, die im System (Rohrleitung) gut übertragen und ausgewertet werden können.

[0021] Gemäß einer zweckmäßigen Ausführungsform wird das Verfahren fortlaufend durchgeführt, um Rohrleitungen laufend zu überwachen. Dabei können die einmal festgelegten Störfrequenzen und Dämpfungsfrequenzen in mehreren Messzyklen konstant gehalten werden, da kurzfristige Änderungen dieser Störgrößen nicht zu erwarten sind. In einer abgewandelten Ausführungsform kann es aber auch sinnvoll sein, dass die Bestimmung der Stör- und Dämpfungsfrequenzen in vorbestimmten Abständen neu erfolgt, um beispielsweise die Drehzahlregelung von Motoren, geänderte Frequenzen eines Frequenzumrichters und dergleichen berücksichtigen zu können.

[0022] Gemäß einer abgewandelten Ausführungsform kann aus dem Erregersignal ein Testsignal erzeugt werden. Dazu wird eine Testfrequenz ausgewählt, welche innerhalb des Erregerfrequenzbereichs liegt und ungleich der festgestellten Störfrequenzen ist. Die Testfrequenz korreliert mit periodischen Reflexionsstellen in der Rohrleitung und kann aus dem Messsignal bestimmt werden. Der Abstand zwischen periodisch wiederkehrenden Reflexionsstellen, z. B. Nahtstellen zwischen gleich langen Rohrabschnitten, ist bekannt, sodass durch Einkoppeln des schmalbandigen Testsignals eine hohe Leistungsdichte erreicht werden kann. Aus den auftretenden Reflexionen lässt sich dann unter Berücksichtigung des Abstands z. B. die Ausbreitungsgeschwindigkeit ermitteln.

[0023] Das erfindungsgemäße Verfahren zur Erzeugung eines Erregersignals für eine akustische Messung entlang von Rohrleitungen startet mit der Festlegung eines breitbandigen Erregerfrequenzbereichs, in welchem ein Erregersignal erzeugt werden soll. Im nächsten Schritt werden Störfrequenzen festgelegt, welche im Erregersignal nicht enthalten sein sollen. Schließlich wird das Erregersignal über den Erregerfrequenzbereich und unter Auslassung der Störfrequenzen erzeugt.

[0024] Gemäß einer bevorzugten Ausführung wird nach der Festlegung der Störfrequenzen ein Vorläufersignal über den Erregerfrequenzbereich unter Auslassung der Störfrequenzen erzeugt. Es folgt das Einkoppeln des Vorläufersignals in eine zu messende Rohrleitung und das Empfangen eines aus der Rohrleitung reflektierten Vorläufer-Reflexionssignals. Durch Vergleichen des Vorläufersignals mit dem Vorläufer-Reflexionssignal werden Dämpfungsfrequenzen bestimmt, bei denen das Vorläufersignal auf dem Messweg entlang der Rohrleitung stärker gedämpft wird als die durchschnittliche Dämpfung des gesamten Vorläufersignals. Beim abschließenden Erzeugen des Erregersignals werden sowohl die Störfrequenzen als auch die Dämpfungsfrequenzen ausgelassen. Einzelheiten zur Erzeugung des Erregersignals ergeben sich aus der oben angeführten Beschreibung des Verfahrens zur akustischen Messung entlang langer Rohrleitungen sowie den zugehörigen Ausführungsformen, die auch hier entsprechend anwendbar sind.

[0025] Das erfindungsgemäß erzeugte Erregersignal unterscheidet sich deutlich von den für gleiche Anwendungen häufig genutzten Impulsverfahren, bei denen eine breitbandige Anregung erfolgt unter Inkaufnahme des Verlustes eines großen Teils der zur Messung verfügbaren Energie aufgrund der erforderlichen Filterung beim Empfang des reflektierten Signals. Ebenso besteht ein deutlicher Unterschied zu Verfahren, wie sie z. B. im oben genannten Patent EP 2 169 179 B1 angewendet werden, denn dort wird ein durchlaufender Chirp mit unterer und oberer Frequenz verwendet, ohne dass mehrere Frequenzbereiche unter Ausklammern zuvor bestimmter Störfrequenzen berücksichtigt werden können.

[0026] Als besonders vorteilhaft für die Erzeugung des Erregersignals aber vorzugsweise auch des Vorläufersignals hat es sich erwiesen, einen sogenannten Multisinus-Burst zu verwenden. Bei einem Multisinus-Burst können mit bekannten Algorithmen der Signalverarbeitung sowohl die Dauer als auch die Signalform in der gewünschten Weise angepasst werden, um einzelne Frequenzen - nämlich die Störfrequenzen und die Dämpfungsfrequenzen - aus einem breitbandigen Signal auszulassen.

[0027] Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung einer bevorzugten Ausführungsform, unter Bezugnahme auf die Zeichnung. Es zeigen:

Fig. 1 Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens als Ablaufplan und zugehörige Signalverläufe;

Fig. 2 ein Spektrum eines Multisinus-Signals mit beliebigen Spektralkomponenten;

Fig. 3 Zeitverlauf eines aus drei Sinuskomponenten bestehenden Multisinus-Signals;

Fig. 4 Zeitverlauf und Spektrum eines Sinus-Burst;

Fig. 5 Zeitverlauf und Spektrum eines Multisinus-Burst;

Fig. 6 Zeitverlauf und Spektrum eines Multisinus-Bursts bei dem die Sinuskomponente f_2 um 180° verschoben wurde;

Fig. 7 Ablaufplan zur Optimierung eines Multisinus-Burst;

Fig. 8 beispielhafte Signalverläufe, wie sie in den Schritten gemäß **Fig. 6** auftreten;

Fig. 9 Zeitverlauf und Spektrum des optimierten Multisinus-Burst;

Fig. 10 A-C Vergleich klassisches Impulsverfahren, Verfahren mit sich ändernder Frequenz (Chirp) und Multisinus-Burst mit mehreren Frequenzbändern.

[0028] Die nachfolgend beispielhaft beschriebene bevorzugte Ausführungsform basiert auf der Verwendung eines breitbandigen Multisinus-Burst als Erregersignal, wobei der Multisinus-Burst ein erfindungsgemäß optimiertes Spektrum besitzt, um die Störfrequenzen und ggf. die Dämpfungsfrequenzen gezielt auszuschließen.

[0029] Ein Multisinus ist ein breitbandiges periodisches Signal, bei welchem die spektrale Leistung der einzelnen Frequenzkomponenten einfach vorgeben werden können.

[0030] **Fig. 1** zeigt wesentliche Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens als Ablaufplan und die zugehörigen Signalverläufe in vereinfachter Form. Das Verfahren zur akustischen Messung, insbesondere von Reflexionsstellen, in bzw. entlang von Hohlräumen (z. B. lange Rohrleitungen) startet im Schritt **01** mit der Festlegung eines breitbandigen Erregerfrequenzbereichs, in welchem ein gewünschtes Erregersignal gebildet werden soll. Im Schritt **02** werden Störfrequenzen festgelegt bzw. definiert, welche im Erregersignal nicht enthalten sein sollen. Im Schritt **03** folgt das Erzeugen eines Vorläufersignals über den Erregerfrequenzbereich unter Auslassung der zuvor festgelegten Störfrequenzen. Im Schritt **04** erfolgt ein Einkoppeln des erzeugten Vorläufersignals in den zu untersuchenden technischen Hohlraum, hier beispielhaft eine Rohrleitung. Im Schritt **05** wird ein aus der Rohrleitung reflektiertes Vorläufer-Reflexionssignal empfangen. Im Schritt **06** wird das eigentlich gewünschte Erregersignal erzeugt, wofür ein Vergleichen des Vorläufersignals mit dem Vorläufer-Reflexionssignal und ein Bestimmen von Dämpfungsfrequenzen, bei denen das Vorläufersignal auf dem Messweg entlang der Rohrleitung stärker gedämpft wird als die durchschnittliche Dämpfung des gesamten Vorläufersignals erfolgt und wobei das

Erzeugen des Erregersignals über den Erregerfrequenzbereich erfolgt, unter Auslassung der Störfrequenzen und der Dämpfungsfrequenzen. Die Einzelheiten zur Erzeugung des Erregersignals werden unten mit Bezugnahme auf **Fig. 7** näher beschrieben. Im Schritt **07** wird das erzeugte Erregersignal in die Rohrleitung eingekoppelt. Im Schritt **08** folgt das Empfangen eines aus der Rohrleitung reflektierten Messsignals. Und schließlich folgt im Schritt **09** eine Auswertung des reflektierten Messsignals mithilfe geeigneter Auswerteverfahren.

[0031] **Fig. 2** zeigt die Vorgehensweise anhand des Spektrums eines Multisinussignals mit beliebigen Spektralkomponenten. Geht man von einer Periodendauer des Multisinussignals von T_0 aus, so kann man mehrere Sinussignale innerhalb dieser Zeitdauer unterbringen sofern das ganzzahlige Vielfache der Periodendauer T_s der Sinussignale der Periodendauer T_0 des Multisinussignals entspricht. Es muss also gelten:

$$kT_s = T_0 \text{ oder } T_0 f_s = k$$

f_s ist hierbei die Frequenz der entsprechenden Sinuskomponente. Man kann demzufolge beliebig viele Sinuskomponenten im Gesamtsignal unterbringen, solange deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfache von $\Delta f = 1/T_0$ ist. In **Fig. 1** sind die erlaubten Frequenzen durch kleine kreisrunde Flächen gekennzeichnet. In dem gezeigten Beispiel werden aber nur 3 der möglichen Frequenzen auch tatsächlich genutzt. Die Stärke der einzelnen Sinuskomponenten ist durch die Höhe der Spektrallinien vorgebar. Im Beispiel sind zwei Sinussignale gleichstark, eine dritte ist etwas schwächer gewählt worden.

[0032] **Fig. 3** zeigt das Zeitsignal, welches sich aus der Überlagerung der drei in **Fig. 1** gewählten Sinuskomponenten ergibt. Es ist über drei Perioden dargestellt. In dem gezeigten Fall sind die einzelnen Spektrallinien unabhängig voneinander, so dass man sich sehr flexibel ein beliebiges Leistungsspektrum vorgeben kann. Durch inverse Fourier-Transformation kann daraus das Zeitsignal berechnet werden, welches über einen DA-Wandler schließlich in ein Spannungssignal mit dem vorgegebenen Spektrum gewandelt wird.

[0033] **Fig. 4** zeigt den Zeitverlauf und das Spektrum eines Sinus-Burst. Im Falle eines Burst-Signals ist die zuvor genannte Unabhängigkeit der Spektrallinien nicht mehr gegeben. Ein Sinussignal der Frequenz f_B wird nur während des Zeitintervalls T_B ausgesendet. Das Spektrum dieses Signals besteht nun nicht nur aus der einzelnen Spektrallinie der Frequenz f_B (gestrichelte Linie) sondern streut über einen bestimmten Bereich um diese Frequenz. Je kleiner man T_B wählt, umso stärker ist diese Streuung.

[0034] **Fig. 5** zeigt den Zeitverlauf und das Spektrum eines Multisinus-Burst, wobei das Burst-Signal aus den gleichen Sinuskomponenten wie in **Fig. 1** gezeigt besteht. Die gewollten Sinuskomponenten sind durch gestrichelte Linien markiert. Es entsteht eine Reihe von Spektralkomponenten, die ursprünglich nicht beabsichtigt waren. Diese entstehen aus der Überlagerung der Einzelspektren (siehe untere Abbildung in **Fig. 3**) der Sinusbursts mit unterschiedlichen Frequenzen. Das resultierende Gesamtspektrum ist daher schlecht vorhersagbar.

[0035] Verändert man die Phasenlage der drei Sinuskomponenten zueinander, kann sich ein anderes Gesamtspektrum ergeben, da sich Spektralkomponenten konstruktiv oder destruktiv überlagern können.

[0036] **Fig. 6** zeigt den Zeitverlauf und das Spektrum eines Multisinus-Burst, bei dem die Sinuskomponente f_2 um 180° verschoben wurde. Beim dargestellten Beispiel ist man von den gleichen Sinuskomponenten wie in **Fig. 4** ausgegangen. Es wurde lediglich die Phase der Frequenzkomponente f_2 um 180° gedreht. Wie ersichtlich, hat die Veränderung der Phasenlage zu einer erheblichen Modifikation des Gesamtspektrums geführt. Daraus lässt sich ableiten, dass sich durch eine geeignete Wahl der Phasen der Sinuskomponenten auch für Burst-Signale eine vorgegebene Frequenzmaske zumindest näherungsweise einhalten lässt. Infolge der Überlagerung sehr vieler Spektrallinien ist die Bestimmung geeigneter Phasenwerte ein komplexes Optimierungsproblem. Eine Möglichkeit zur näherungsweisen Lösung dieses Optimierungsproblems besteht in einem iterativen Verfahren, wie es im Folgenden beschrieben ist.

[0037] **Fig. 7** zeigt einen Ablaufplan zur näherungsweisen Lösung des zuvor genannten Optimierungsproblems mit Illustration typischer Signalverläufe und Spektren. Der Ablauf umfasst die folgenden Schritte:

11. Festlegen der Burst-Dauer T_B .
12. Festlegen der Frequenzmaske des Multisinus-Testsignals. Im Beispiel soll das Signal nur Spektralkomponenten innerhalb der Bereiche **B1** und **B2** haben.
13. Bestimmung des Zeitsignals mittels inverser Fourier-Transformation. Die Phasen der einzelnen Spektralkomponenten können dabei zufällig gewählt werden.
14. Anfügen von Nullen bis auf die gewünschte Signallänge T_0 , um ein Burst-Signal zu bekommen.
15. Berechnung des komplexen Amplitudenspektrums des Bursts mittels Fourier-Transformation.

16. Da das Spektrum von der beabsichtigten Form abweicht, sind die Amplituden der Spektralkomponenten wieder so zu setzen wie unter Schritt **12** festgelegt. Als Phasenwinkel sind aber jene Werte beizubehalten, wie sie sich im Spektrum nach Schritt **15** ergeben haben.

17. Bestimmung des Zeitsignals mittels inverser Fourier-Transformation.

18. Durch die Änderungen im Amplitudenspektrum besitzt das Signal nun keine ausgeprägte Impulspause mehr. Um diese wiederherzustellen, werden alle dazugehörigen Signalkomponenten zu Null gesetzt.

19. Mit diesem Signal springt man zurück zu Schritt **15** und wiederholt den Vorgang solange bis die spektrale Maske und die Impulspause mit einer vorzugebenden Genauigkeit eingehalten werden.

[0038] Fig. 8 zeigt beispielhafte Signalverläufe, wie sie in den zuvor beschriebenen Schritten auftreten.

[0039] Fig. 9 zeigt den Zeitverlauf und das Spektrum des optimierten Multisinus-Burst, somit also das Ergebnis der Optimierung gemäß Fig. 6. Bis auf geringe Abweichungen hält das Testsignal sowohl die spektrale wie auch die zeitliche Maske ein.

[0040] Fig. 10 zeigt zur abschließenden Verdeutlichung der Unterscheide zwischen der vorliegenden Erfindung und den vorbekannten Verfahren jeweils den Signalverlauf im Vergleich zum klassischen Impulsverfahren (**Fig. 10A**), Verfahren mit sich ändernder Frequenz (Chirp von f_u bis f_o) (**Fig. 10B**) und das erfindungsgemäße Verfahren Multisinus-Burst mit mehreren Frequenzbändern (**Fig. 10C**).

[0041] Da der Fachmann beispielsweise aus der oben zitierten EP 2 169 179 B1 detaillierte Anweisungen zum Aufbau einzelner Einheiten einer geeigneten Vorrichtung sowie zu mathematischen und messtechnischen Verfahrensweisen bei der Signalanalyse entnehmen kann, wird hier auf die Wiederholung dieser vorbekannten Aspekte weitgehend verzichtet.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 2169179 B1 [0003, 0025, 0041]

Patentansprüche

1. Verfahren zur akustischen Messung in technischen Hohlräumen, insbesondere zur Messung von Reflexionsstellen entlang langer Rohrleitungen, folgende Schritte umfassend:

- Festlegung eines breitbandigen Erregerfrequenzbereichs, in welchem ein Erregersignal erzeugt werden soll;
- Festlegung von Störfrequenzen, welche im Erregersignal nicht enthalten sein sollen;
- Erzeugen eines Vorläufersignals über den Erregerfrequenzbereich unter Auslassung der Störfrequenzen;
- Einkoppeln des Vorläufersignals in den Hohlraum und Empfangen eines aus dem Hohlraum reflektierten Vorläufer-Reflexionssignals;
- Vergleichen des Vorläufersignals mit dem Vorläufer-Reflexionssignal und Bestimmen von Dämpfungsfrequenzen, bei denen das Vorläufersignal auf dem Messweg entlang des Hohlraums stärker gedämpft wird als die durchschnittliche Dämpfung des gesamten Vorläufersignals;
- Erzeugen eines Erregersignals über den Erregerfrequenzbereich unter Auslassung der Störfrequenzen und der Dämpfungsfrequenzen;
- Einkoppeln des Erregersignals in den Hohlraum und Empfangen eines aus dem Hohlraum reflektierten Messsignals;
- Auswertung des reflektierten Messsignals mithilfe geeigneter Auswerteverfahren.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Erregersignal und vorzugsweise auch das Vorläufersignal als Multisinus-Burst erzeugt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Erregerfrequenzbereich im Bereich zwischen 1 Hz bis 1 kHz festgelegt wird, vorzugsweise sich von einer unteren Grenzfrequenz $f_u = 5$ Hz bis zu einer oberen Grenzfrequenz $f_o = 300$ Hz erstreckt.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass zum Festlegen von Störfrequenzen eine Messung akustischer Störsignale, die an dem Hohlraum ohne Einkopplung des Vorläufer- oder Erregersignals auftreten, erfolgt, wobei die Frequenzen der gemessenen Störsignale oberhalb einer vorbestimmten Störsignalschwelle als Störfrequenzen festgelegt werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Dämpfungsfrequenzen diejenigen Frequenzen bestimmt werden, bei welchen die Dämpfung mindestens um den Faktor 2 größer ist als die durchschnittliche Dämpfung des Vorläufersignals.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Testsignal erzeugt wird, welches eine innerhalb des Erregerfrequenzbereichs liegende Frequenz aufweist, die mit periodischen Reflexionsstellen in dem Hohlraum korreliert, und dass das Testsignal in den Hohlraum eingekoppelt wird, um unter Berücksichtigung eines bekannten Abstands zwischen den periodischen Reflexionsstellen die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu bestimmen.

7. Verfahren zur Erzeugung eines Erregersignals für eine akustische Messung in einem technischen Hohlraum, insbesondere entlang langer Rohrleitungen, folgende Schritte umfassend:

- Festlegung eines breitbandigen Erregerfrequenzbereichs, in welchem ein Erregersignal erzeugt werden soll;
- Festlegung von Störfrequenzen, welche im Erregersignal nicht enthalten sein sollen;
- Erzeugen des Erregersignals über den Erregerfrequenzbereich unter Auslassung der Störfrequenzen.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass nach der Festlegung der Störfrequenzen folgende zusätzliche Schritte ausgeführt werden:

- Erzeugen eines Vorläufersignals über den Erregerfrequenzbereich unter Ausklammerung der Störfrequenzen;
- Einkoppeln des Vorläufersignals in einen zu messenden Hohlraum und Empfangen eines aus dem Hohlraum reflektierten Vorläufer-Reflexionssignals;
- Vergleichen des Vorläufersignals mit dem Vorläufer-Reflexionssignal und Bestimmen von Dämpfungsfrequenzen, bei denen das Vorläufersignal auf dem Messweg entlang des Hohlraums stärker gedämpft wird als die durchschnittliche Dämpfung des gesamten Vorläufersignals; und dass beim Erzeugen des Erregersignals sowohl die Störfrequenzen als auch die Dämpfungsfrequenzen ausgelassen werden.

9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Erregersignal und das Vorläufersignal jeweils als ein Multisinus-Burst erzeugt werden.

10. Vorrichtung zur akustischen Messung in bzw. entlang technischer Hohlräume, umfassend:

- eine Einheit zur Erzeugung eines Erregungssignals;
- einen Schallerzeuger zur Einkopplung des erzeugten Erregungssignals in den Hohlraum;
- einen Sensor zur Erfassung eines aus dem Hohlraum reflektierten Messsignals;
- eine Analyseeinheit zur Auswertung des Messsignals; **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einheit zur Erzeugung des Erregungssignals konfiguriert ist, um ein Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9 auszuführen.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

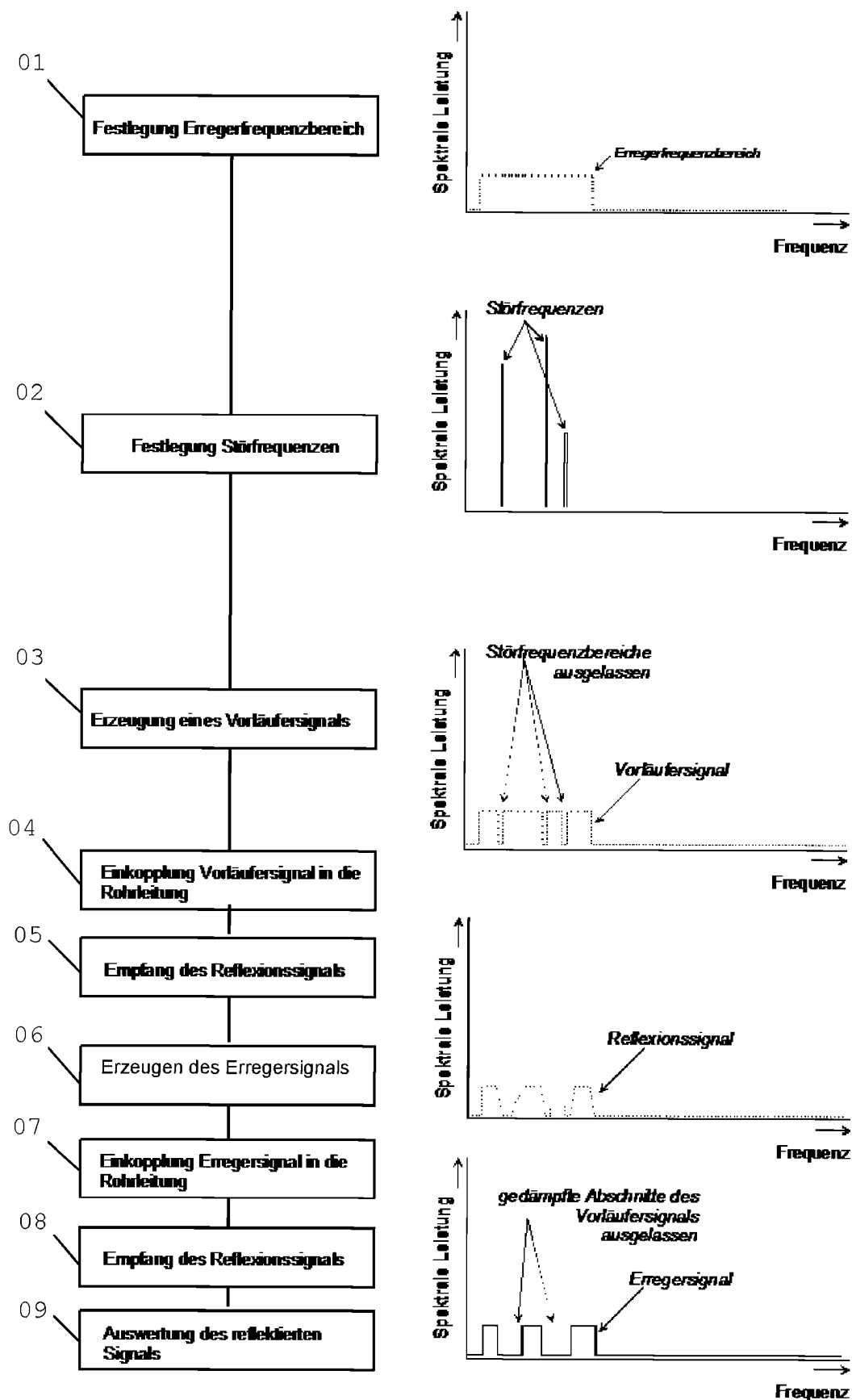


Fig. 2

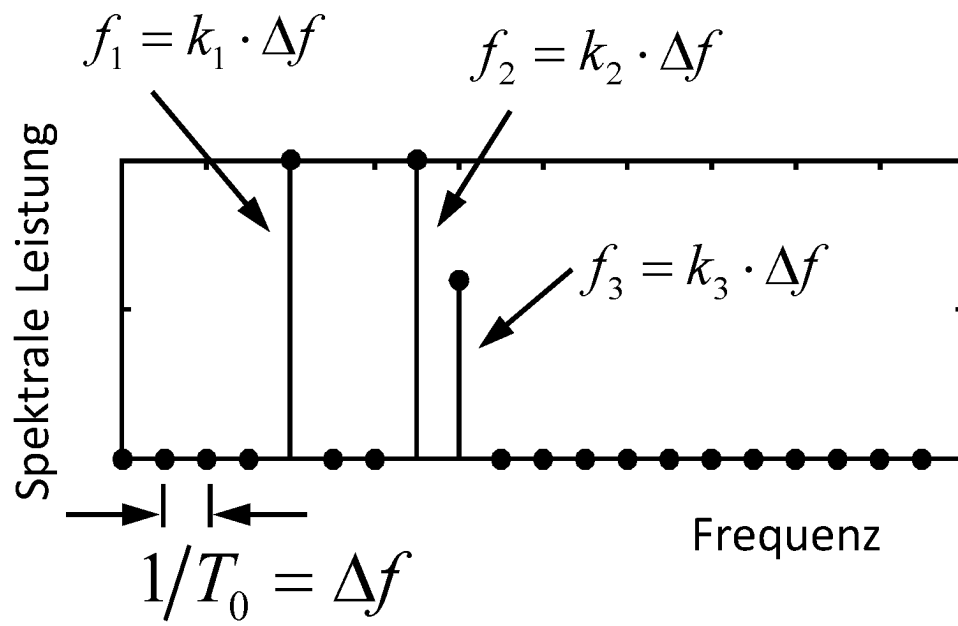


Fig. 3

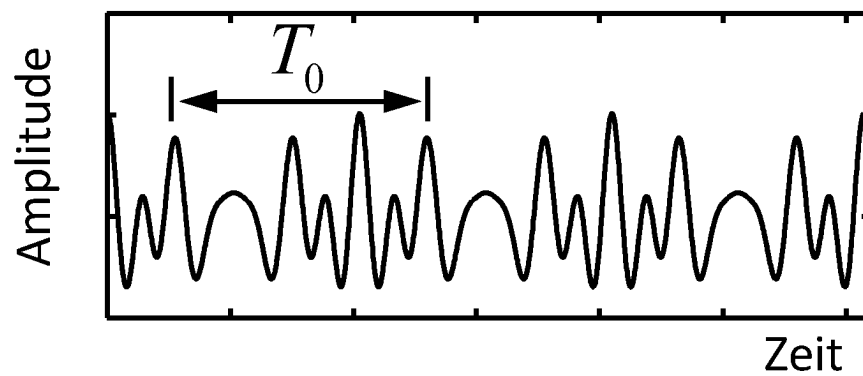


Fig. 4

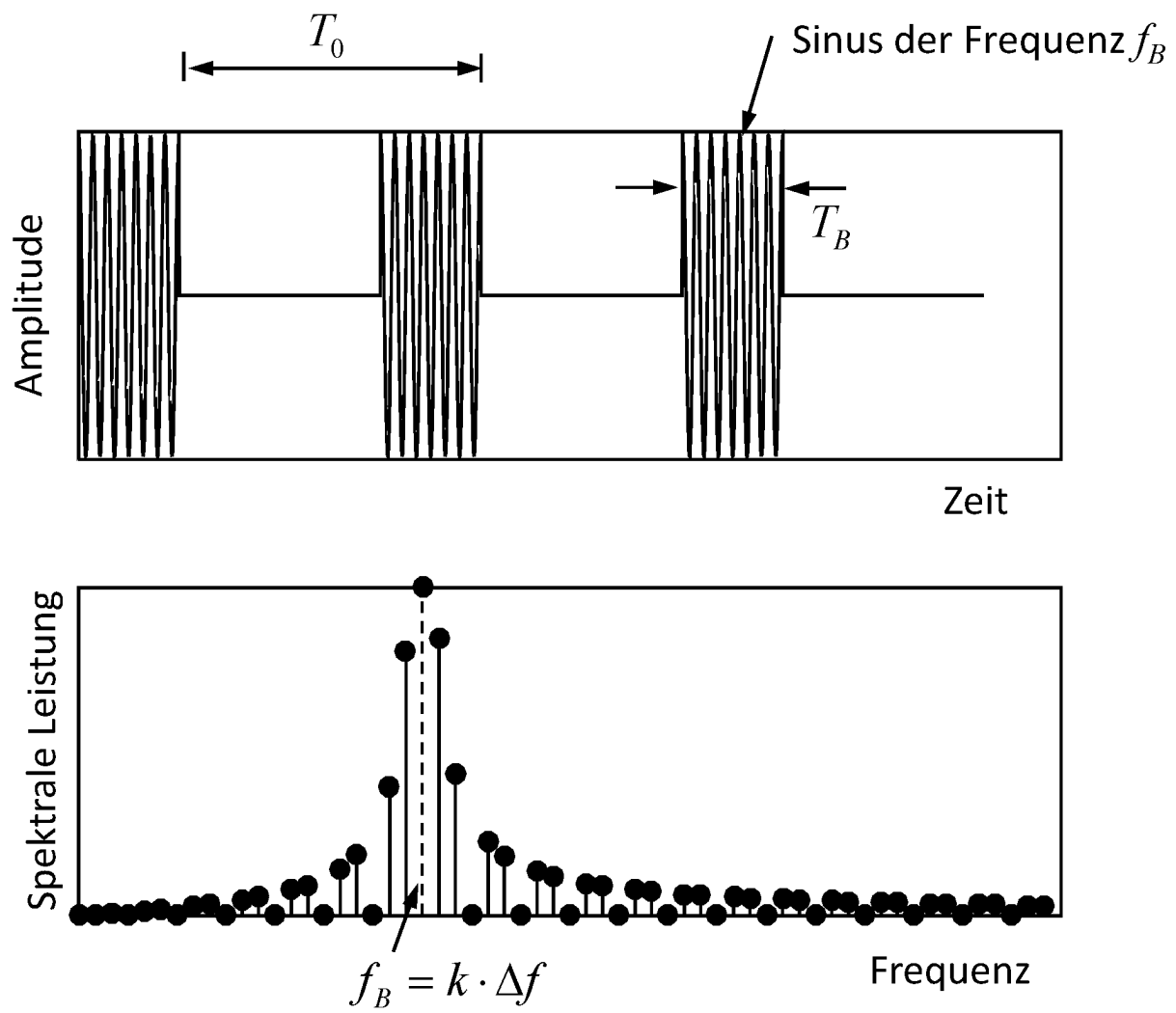


Fig. 5

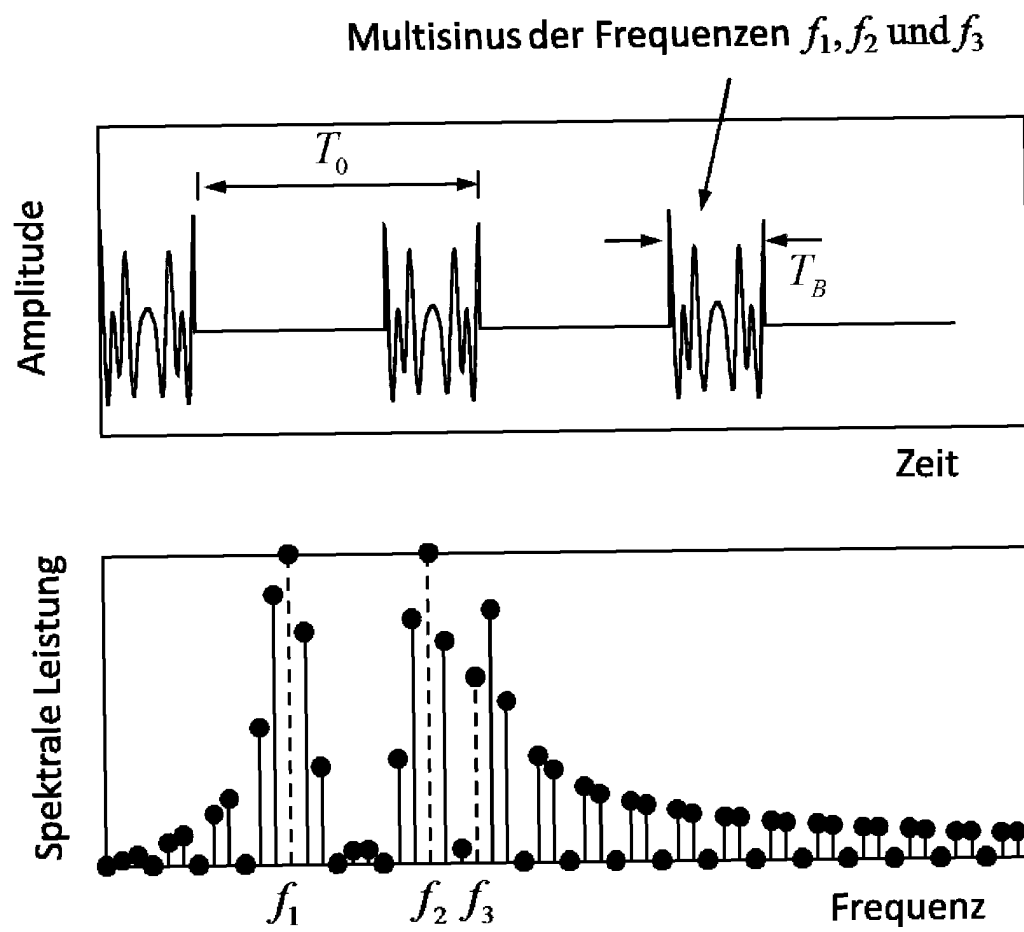


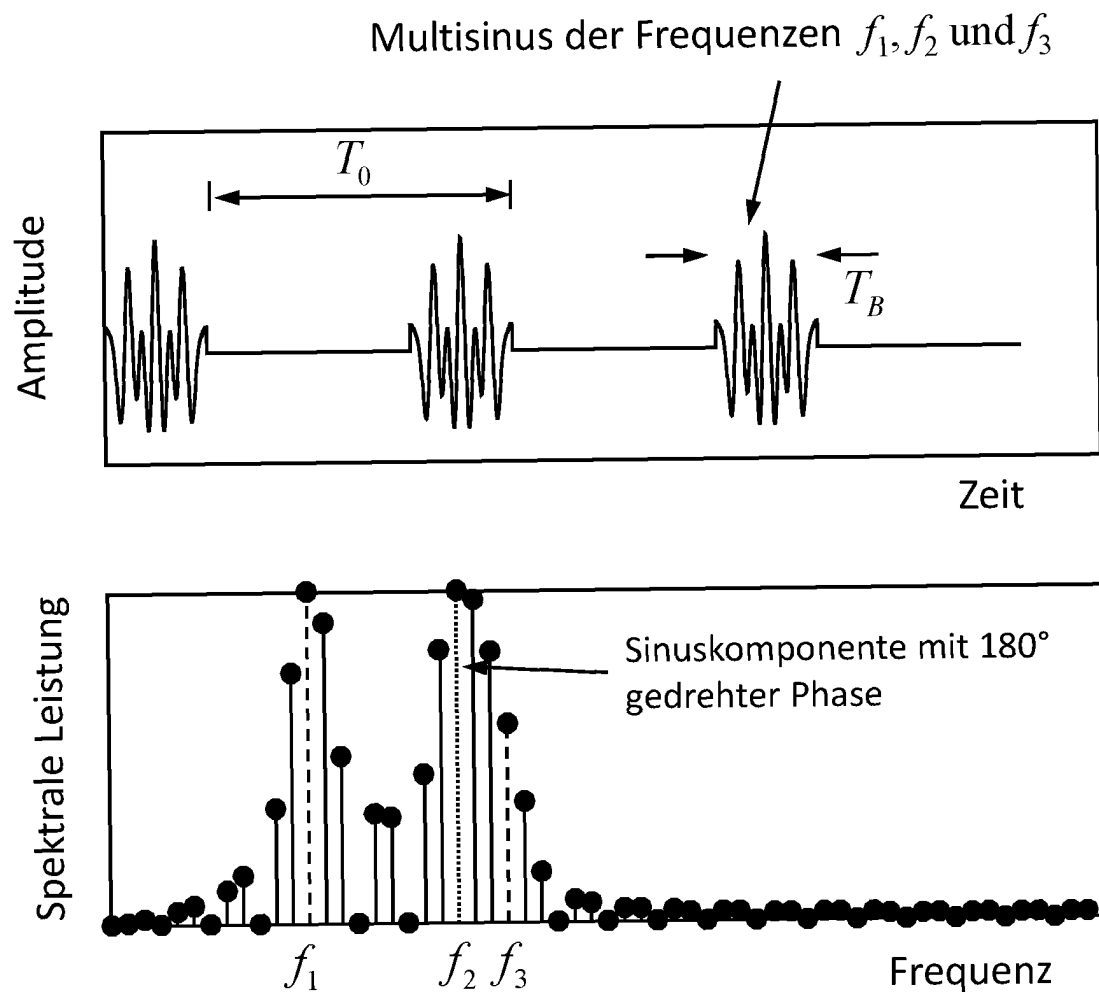
Fig. 6

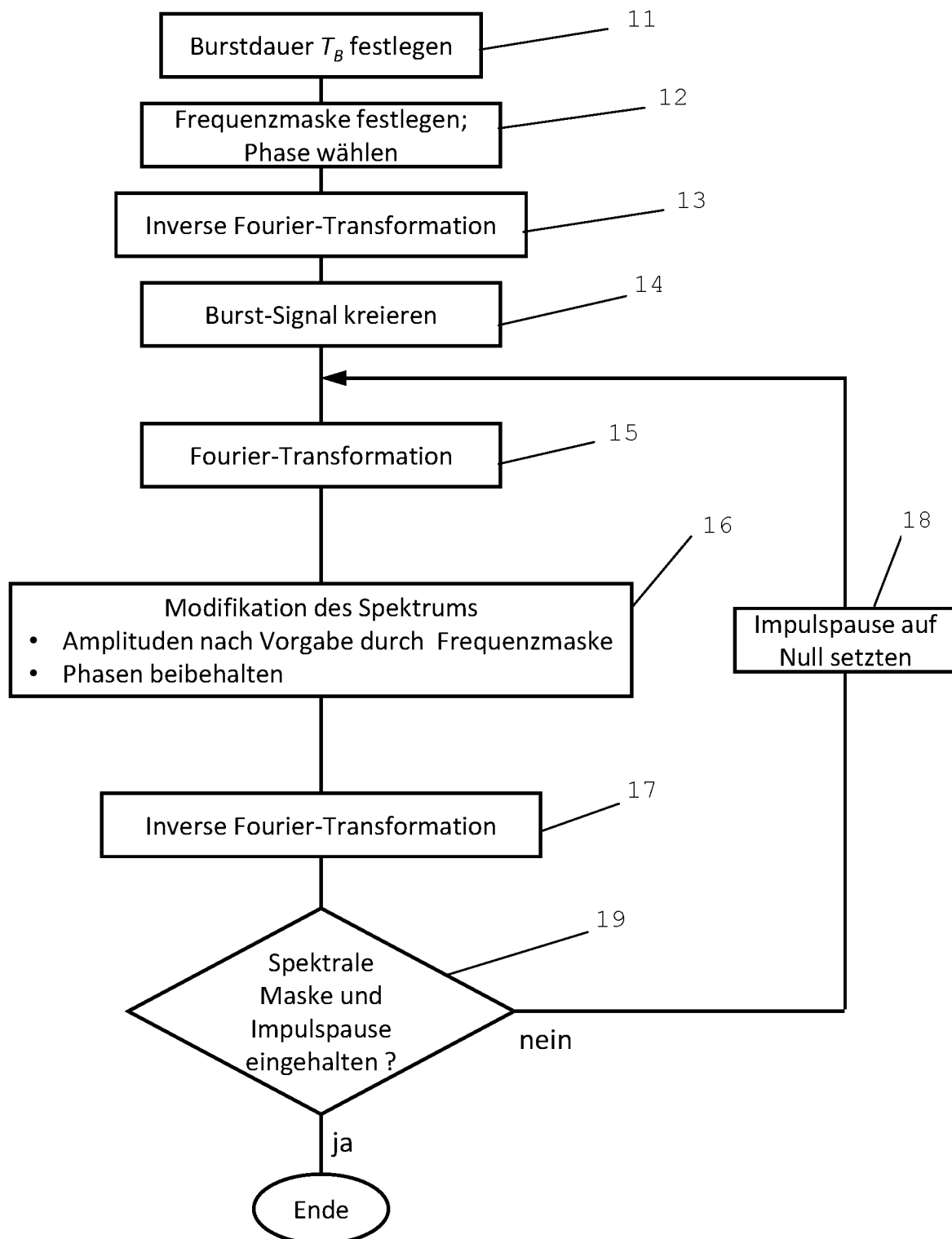
Fig. 7

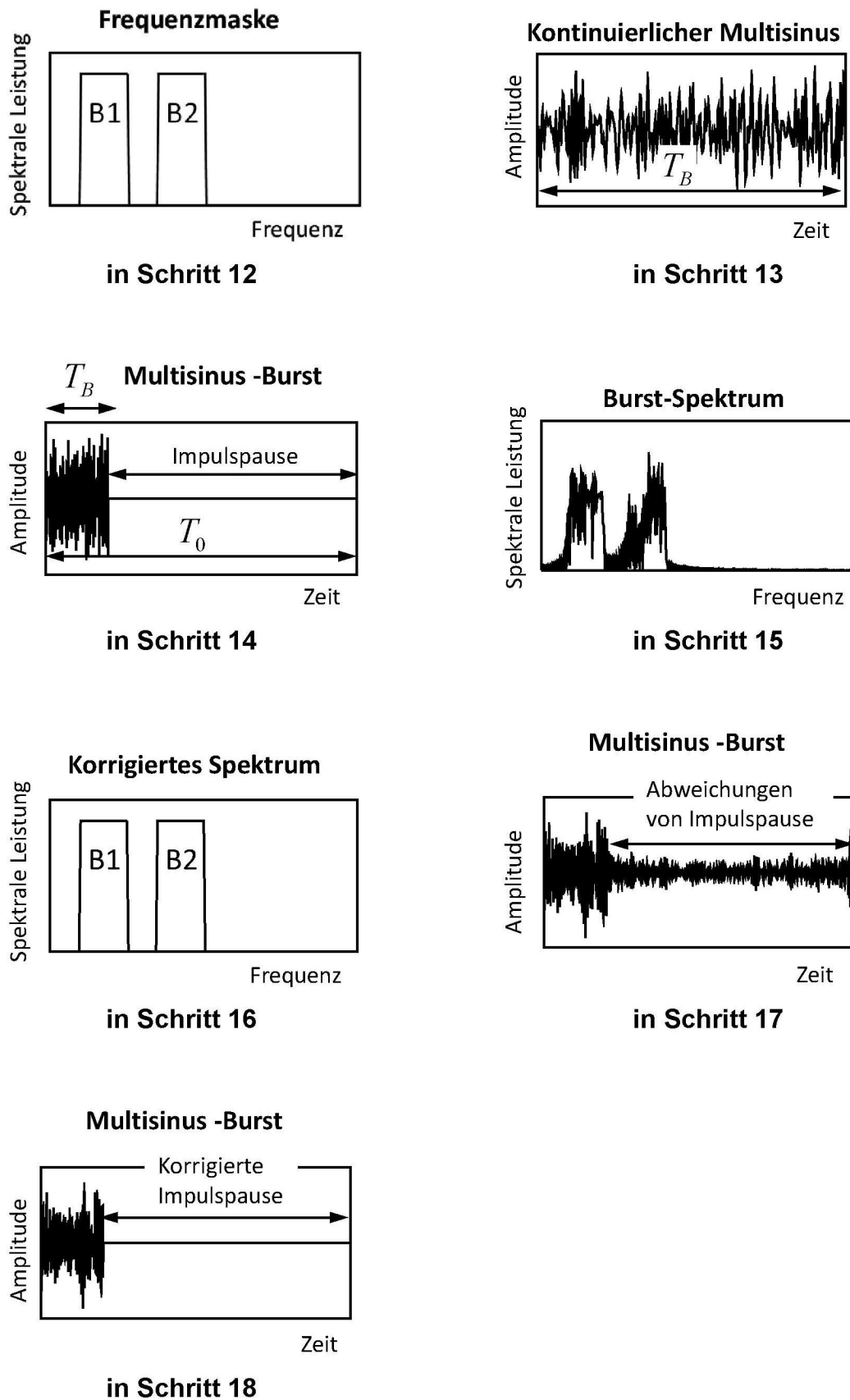
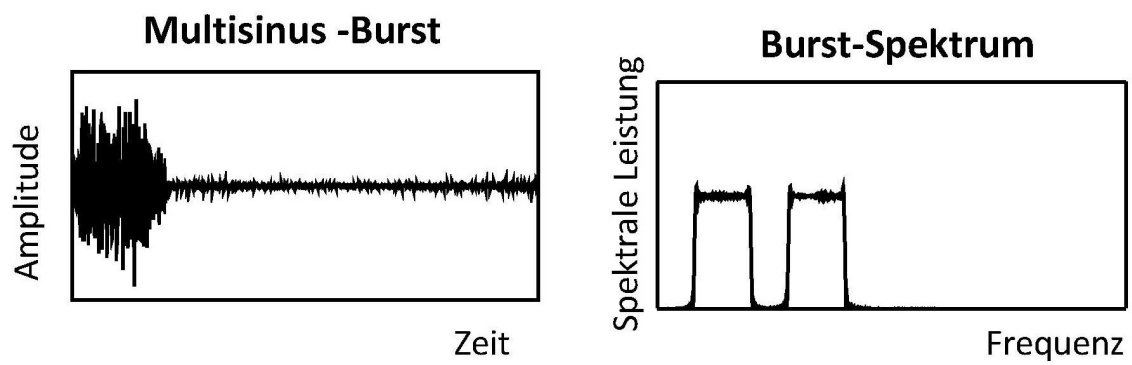
Fig. 8

Fig. 9



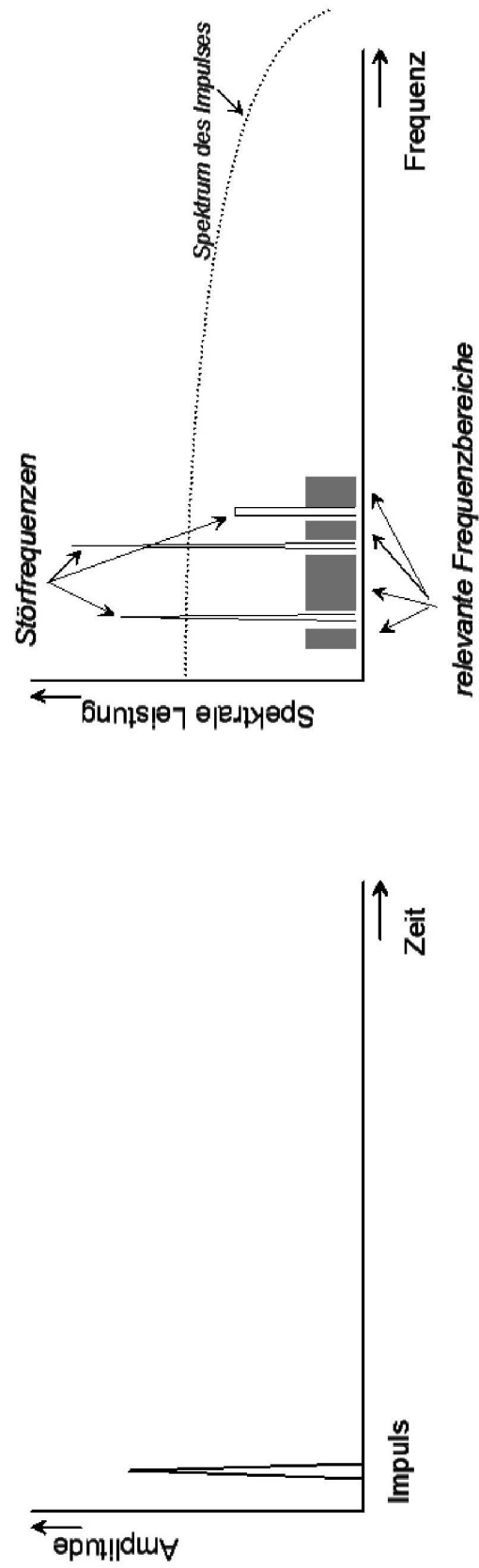


Fig. 10A

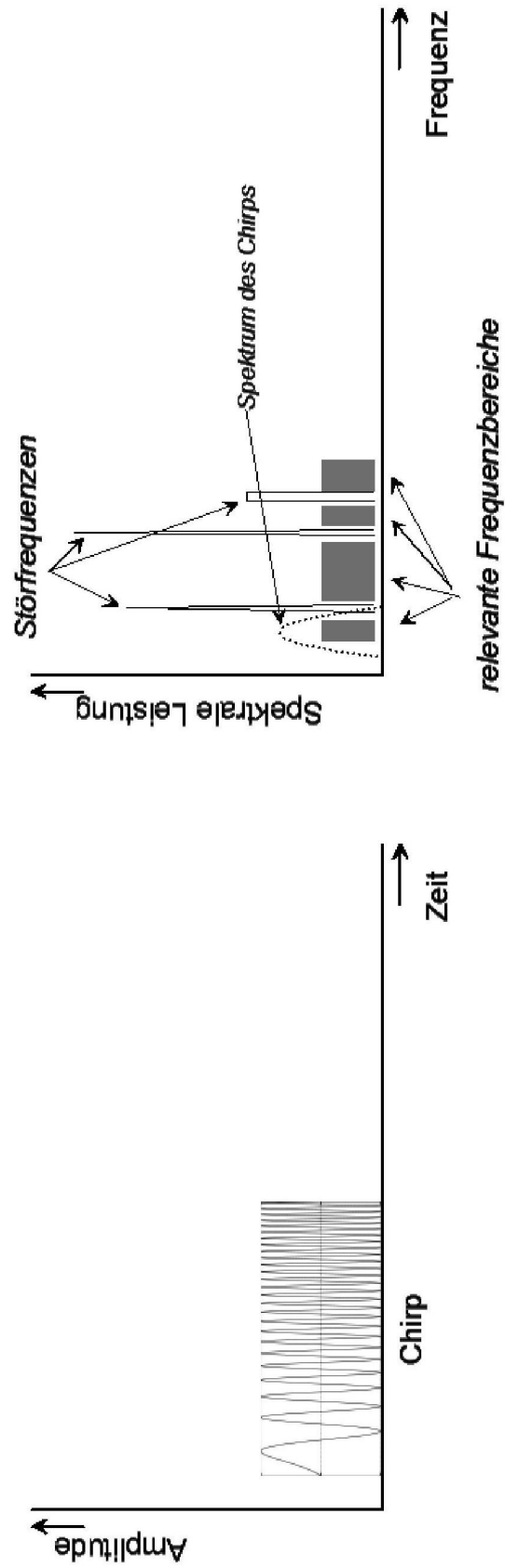


Fig. 10B

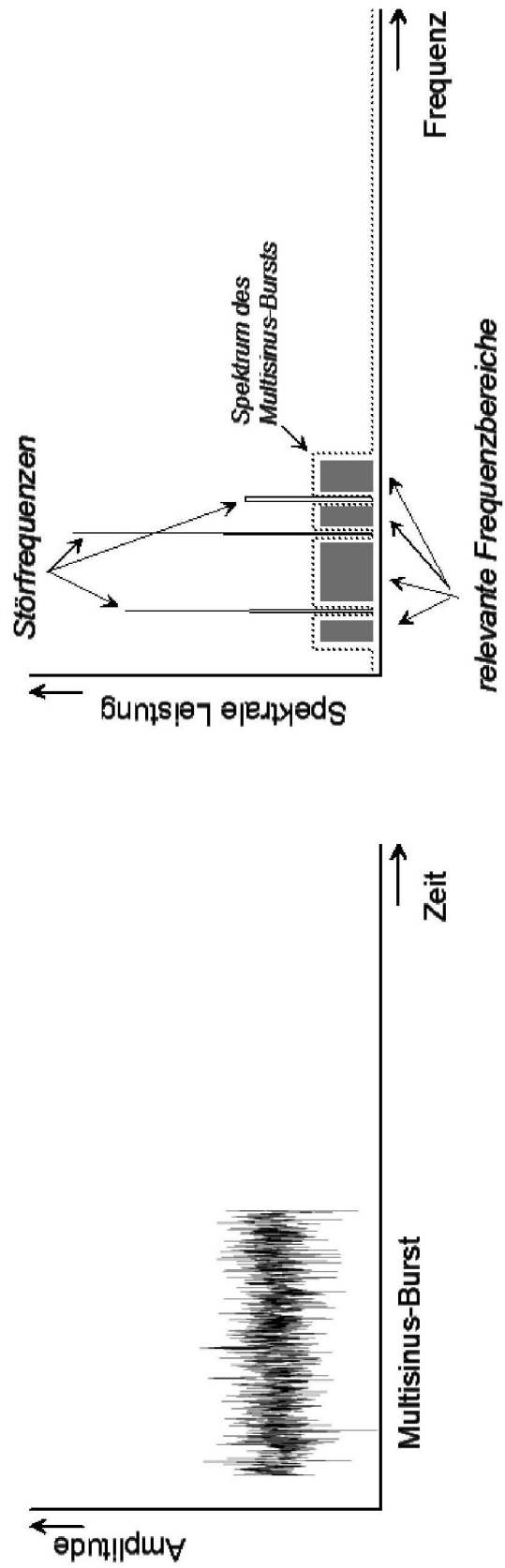


Fig. 10C