

**WAHRNEHMBARKEIT DER PERIODISCHEN WIEDERHOLUNG VON RAUSCHSIGNALEN**

E. Terhardt und W. Aures

Lehrstuhl für Elektroakustik der Technischen Universität München

**1. Einleitung**

Wird ein Rauschsignal der Dauer  $T$  zyklisch und ohne Pause wiederholt, dann entsteht ein periodisches Dauerrauschen. Ein Signalempfänger, welcher das Signal über ein kürzeres Zeitintervall als die Periode beobachtet, kann die Periodizität nicht feststellen, gleichgültig, ob das Beobachtungsintervall die Schnittstelle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Perioden enthält, oder nicht. Für das Erkennen der Periodizität ist es notwendig, das Signal über ein Zeitintervall zu beobachten, welches länger als die Periode ist. Man kann demnach Aufschlüsse über die Dauer des "Gedächtnisses" eines Signalempfängers gewinnen, indem man dessen Fähigkeit zur Erkennung der Periodizität von Rauschsignalen untersucht. Stellt man dabei fest, daß für eine bestimmte Periodenlänge Erkennung stattfindet, so kann man daraus schließen, daß das Gedächtnis mindestens so lang ist wie jene Periode. Im Falle des Versagens der Erkennung kann jedoch nicht das Gegenteil geschlossen werden (das heißt, daß das Gedächtnis kürzer sei als die Periode), weil auch eine unvollständige Auswertung der Signalmerkmale daran Schuld sein kann. Durch Untersuchung der auditorischen Wahrnehmung der Periodizität von Rauschen kann man demnach Hinweise gewinnen, die sich zum einen auf die Dauer des sensorischen Gedächtnisses, zum anderen auf die Existenz bzw. Auswertung von Strukturmerkmalen der Rauschsignale beziehen.

Unter diesen bzw. ähnlichen Gesichtspunkten haben Guttman und Julesz /1/ die Wahrnehmung periodisierten Rauschens untersucht. Sie fanden, daß die Periodizität für Perioden bis zu einer Sekunde deutlich, für längere Perioden bis zu 2 s dagegen nur noch mit Anstrengung wahrnehmbar sei. Diese Experimente hatten offensichtlich orientierenden Charakter und die Versuchsbedingungen wurden nur grob beschrieben. Sonstige Untersuchungen dieser Art sind uns nicht bekannt geworden, so daß es uns angebracht erschien, weitere Experimente durchzuführen. Diese werden im folgenden geschildert.

**2. Versuchsmethode**

Sämtliche verwendete Rauschsignale wurden mit einem Digitalrechner erzeugt (D/A-Wandler 12 bit). Zwei verschiedene Methoden der Rauschsignalerzeugung wurden verwirklicht und in Vorversuchen miteinander verglichen: Erstens diejenige der Wiedergabe eines zuvor über A/D-Wandler eingegebenen "echten" Rauschens; und zweitens diejenige der Erzeugung von Zufallszahlen in Echtzeit. Falls man im letzteren Falle nicht einen besonders ungeeigneten Algorithmus zur Erzeugung von Zufallszahlen benützt, ist das derart erzeugte "Pseudorauschen" hinsicht-

lich seiner Wirkung auf das Gehör in keiner uns bekannten Hinsicht von einem "echten" Rauschen verschieden, abgesehen davon, daß das "Pseudorauschen" eine Periode aufweist, welche sich aus der Binärstellenzahl des Rechners bzw. Algorithmus ergibt.

Der verwendete Algorithmus zur Gewinnung zufälliger Amplitudenwerte beruht auf dem sogenannten multiplikativen Kongruenzverfahren zur Erzeugung gleichverteilter ganzer Zahlen /2/. Aus dem zuletzt vorliegenden Amplitudenwert  $A_n$  wird der nächste durch

$$A_{n+1} = a \cdot A_n \pmod{m} \quad (1)$$

gebildet. Dabei wird  $m = 2^s$  und  $a = 2^{1+s/2} + 3$  gewählt ( $s$  = Zahl der Binärstellen des Rechnerworts). Damit erhält man eine Periode der Länge  $2^{s-2}$ . Wenn man als Mindestwert der Taktfrequenz das Doppelte der gewünschten oberen Grenzfrequenz des Signals ( $f_{go}$ ) ansieht, dann ergibt sich als maximale Periodendauer

$$T_{\max} = 2^{(s-3)} / f_{go} \quad (2)$$

Beispielsweise erhält man mit  $s = 32$  und  $f_{go} = 5,6$  kHz eine maximale Periodendauer von rund 26 Stunden. Das tatsächlich verwendete Rauschen sollte eine gaußförmige Amplitudenverteilung haben. Dieselbe wurde mittels einer Tabelle aus den gleichverteilten Zufallszahlen gewonnen (vgl. /2/).

Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, zwei aufeinanderfolgende Rauschsignale

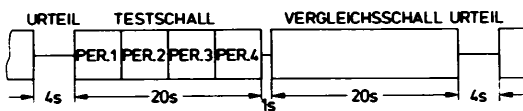


Fig. 1. Versuchsablauf (Beispiel mit einer Periode von 5 s). Test- und Vergleichsschall waren immer gleich lang (20 s), ihre Reihenfolge jedoch zufällig.

derselben Dauer zu vergleichen und das Urteil abzugeben, welches von beiden das periodische Rauschen sei.

Fig. 1 illustriert diesen Versuchsablauf schematisch.

Die Gesamtdauer von Test-

bzw. Vergleichsrauschen war stets 20 s. Das periodische Rauschen (d.h. das Testrauschen) enthielt 20, 10, 4, oder 2 volle Perioden, entsprechend Periodendauern von 1, 2, 5, oder 10 Sekunden. Ein Versuchsdurchgang bestand aus 16 Paaren von Test- und Vergleichsrauschen, so daß jede der obengenannten vier Periodendauern vier mal in zufälliger Reihenfolge auftrat. Davon war in zwei Fällen die Reihenfolge von Test- und Vergleichsrauschen umgekehrt, so daß die Vpn keine Möglichkeit hatten, sich irgendwie an der Reihenfolge von Test- und Vergleichsschall zu orientieren. In den jeweils vier verschiedenen Darbietungen mit ein- und derselben Periodendauer wurden unterschiedliche Signalausschnitte verwendet (Dies war durch entsprechende Änderungen des jeweiligen Anfangswerts im Algorithmus leicht zu erreichen). Auf diese Weise wurde zum einen vermieden,

daß die Versuchspersonen sich im Verlauf des Versuchs gewisse Strukturmerkmale einprägen und dieselben zur Identifikation nutzen konnten, zum anderen wurde damit ein gewisses Ausmitteln eines weiteren zufälligen Einflusses erreicht. Dieser besteht darin, daß die Erkennbarkeit der Periodizität davon abhängt, ob innerhalb der Periode zufällig mehr oder weniger deutlich wahrnehmbare Strukturmerkmale des Geräuschs vorhanden sind. Würde man also in allen Darbietungen ein- und denselben Signalausschnitt als Periode verwenden, so würde man Ergebnisse erhalten, die in weitem Maße davon abhängen, welcher Geräuschausschnitt verwendet wurde. Durch die Verwendung verschiedener, zufällig ausgewählter Ausschnitte in verschiedenen, jedoch zur selben Periodendauer gehörenden Darbietungen wurde dieser Einfluß weitgehend ausgemittelt.

Es wurden drei getrennte Versuche mit verschiedenen Bandbreiten der Geräusche durchgeführt. Die Bandbegrenzung erfolgte durch passive Filter. Die verwendeten Grenzfrequenzen waren 0 und 5,6 kHz; 1 und 5,6 kHz; sowie 2 und 5,6 kHz. Die Darbietungen erfolgten in einer schallgedämmten Messkabine diotisch über freifeldentzerrte Kopfhörer mit einem Schallpegel von 60 dB. Mit 9 Vpn wurden je zwei Durchgänge durchgeführt, so daß über jedes der vier verschiedenen periodischen Rauschsignale insgesamt 72 Urteile abgegeben wurden.

### 3. Ergebnisse

In Fig. 2 sind die von den 9 Vpn im Mittel erzielten relativen Häufigkeiten richtiger Urteile als Funktion der Periodendauer dargestellt. Aus der oben beschriebenen Versuchsmethode ergibt sich eine Rate-Wahrscheinlichkeit von 50 %, so daß man zweckmäßigerweise als Schwelle der Periodizitätserkennung eine Häufigkeit

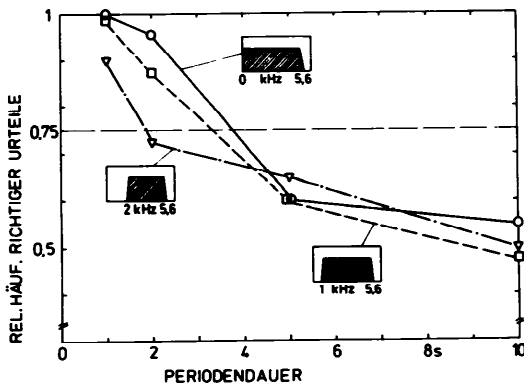


Fig. 2. Ergebnisse für gaußverteiltes Rauschen der angegebenen Bandbreiten. 9 Vpn; Schallpegel 60 dB.

richtiger Urteile von 75 % ansetzt. Damit ergibt sich aus Fig. 2 für die beiden zuerstgenannten Bandbreiten (Kreise, Quadrate) eine maximale, im Mittel gerade noch Periodizitätserkennung erlaubende Periodendauer von 3 bis 4 Sekunden; für das letztgenannte Rauschen mit einer unteren Grenzfrequenz von 2 kHz liegt die entsprechende Schwelle bei etwa 2 s. Ein weiterer, auf dieselbe Weise durchgeführter Versuch mit Tiefpaßrauschen der Grenzfrequenz 1 kHz zeitigte dasselbe

Ergebnis wie die beiden erstgenannten, das heißt, eine Grenzperiode von 3 bis 4 s. Es zeigt sich somit, daß die Periodizität vom Gehör im wesentlichen anhand von Strukturen erkannt wird, die im Spektralbereich unterhalb 2 kHz auftreten.

Hinsichtlich des Einflusses des Schallpegels auf die Periodizitätserkennung wurden orientierende Versuche mit nur einer Vpn durchgeführt. Dabei zeigten sich keine besonderen Effekte; es scheint demnach, daß die Erkennung der Periodizität bei allen "normalen" Schallpegeln ungefähr gleich gut möglich ist.

#### 4. Zusammenfassung

Die maximale Periodendauer, welche unter günstigen Bedingungen gerade noch eine auditive Erkennung der Periodizität von gaußverteiltem Rauschen erlaubt, liegt im Mittel bei 4 bis 5 Sekunden. Jedoch hängt im Einzelfall dieser Grenzwert deutlich davon ab, ob der periodisierte Signalabschnitt hörbare Strukturmerkmale enthält, oder nicht. Die Erkennung der Strukturmerkmale und damit der Periodizität erfolgt im wesentlichen im Spektralbereich unter 2 kHz. Der darüberliegende Bereich trägt nicht oder höchstens unwesentlich dazu bei. Der Schallpegel spielt bei der Erkennung eine untergeordnete Rolle.

#### Schrifttum

- /1/ Guttman, N. und Julesz, B.: Lower limits of auditory periodicity analysis. *J. Acoust. Soc. Am.* 35, 610 (1963).
- /2/ Ralston, A., Wilf, H.S., *Mathematische Methoden für Digitalrechner*. R. Oldenbourg Verlag München-Wien (1969).