

Der Einfluß von Wind bei Maximalfolgenmessungen

M. KOB, M. VORLÄNDER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

1 Einleitung

Die Maximalfolgenmeßtechnik ist eine spezielle Form der Korrelationsmeßtechnik. Sie beruht auf der Eigenschaft von Maximalfolgen (MLS), eine fast ideal Diracstoß-förmige Autokorrelationsfunktion zu besitzen. Weiterhin gibt es mit der Fast-Hadamard-Transformation einen sehr effizienten Algorithmus zur Korrelationsberechnung. Über Grundlagen und Anwendungen der Maximalfolgen wurde bereits eingehend berichtet [1]. Die Maximalfolgenmeßtechnik bietet - wie ähnliche Meßverfahren mit deterministischen Signalen - die Möglichkeit zur Mittelung über mehrere Perioden. Dadurch ist eine erhebliche Störgeräuschbefreiung zu erzielen. Die Störgeräuschbefreiung beruht auf der Addition kohärenter Signalamplituden der periodisch wiederholten Sequenzen (mit 6 dB/Verdoppelung), wobei die nicht korrelierten Störanteile sich nur energetisch (mit 3 dB/Verdoppelung) akkumulieren. Da sich die Messung je nach Abtastrate, MLS-Länge und Anzahl der Mittelungen jedoch über längere Zeit hinzieht, hat eine Veränderung der Übertragungstrecke während der Messung Einfluß auf das Meßergebnis. Ursache für diese Veränderungen kann ein veränderliches Klima sein [2]. Während sich Luftdruck, -feuchte und -temperatur eher langsam ändern, kann Wind auch eine schnell wechselnde Geschwindigkeit und Richtung haben, was besonders bei Messungen im Freien zu beachten ist.

2 Theoretische Betrachtungen

Im allgemeinen werden mit Hilfe der MLS-Technik (oder ähnlicher Verfahren) bandpaßgefilterte Schalldruckpegel oder Nachhallkurven ermittelt. Im Zeitbereich können überlagerte Bandpaßsignale innerhalb von kurzen Zeitfenstern fast wie harmonische Signale beschrieben werden, jedenfalls sofern Oktav- oder noch schmalbandigere Filter verwendet werden. Für Phasenfehler und daraus folgende Dekorrelationen sollen daher im folgenden anhand des Modells der Überlagerung zweier harmonischer Wellen eine Abschätzung des Windeinflusses auf Messungen des Freifeld-Übertragungsmaßes mit gemittelten Maximalfolgen vorgenommen werden.

2.1 Grundlegendes

Gemäß der Definition der Phasengeschwindigkeit ergibt sich für eine harmonische Welle der Frequenz f mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c bei einer festen Länge d der Übertragungstrecke am Empfangsort ein Phasenverlauf φ von

$$\varphi = -2\pi f \frac{d}{c} \quad (1)$$

Die Ableitung von (1) nach c ergibt für kleine Schwankungen die Phasenänderung Φ bei Änderung der Schallgeschwindigkeit um v ($c=c_0+v$)

$$\sigma_{\Phi} = 2\pi f \frac{d}{c^2} \sigma_v \quad (2)$$

Eine kleine Änderung der Schallgeschwindigkeit um v hat also eine proportionale Änderung der Phase

um Φ zur Folge. Entsprechend gilt auch für die Standardabweichungen

$$\sigma_{\Phi} = 2\pi f \frac{d}{c^2} \sigma_v \quad (3)$$

Ändert sich beispielsweise zwischen zwei Perioden einer MLS-Messung die Windgeschwindigkeit in Richtung der Übertragungsstrecke, so ändert sich die Schallgeschwindigkeit entsprechend. Dies hat zur Folge, daß sich mit fortschreitender Ausbreitung der Schallwelle die Phase der zweiten Periode gegenüber der ersten immer mehr verschiebt. Werden zwei harmonische Wellen gleicher Frequenz $\omega = 2\pi f$ mit dem Phasenversatz Φ gemittelt, so resultiert eine harmonische Welle gleicher Frequenz, multipliziert mit dem Amplitudenminderungsfaktor $\cos(\Phi/2)$:

$$\frac{1}{2} \left[\sin\left(\omega t + \frac{\Phi}{2}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{\Phi}{2}\right) \right] = \sin(\omega t) \cos \frac{\Phi}{2} \quad (4)$$

Mit (2) folgt aus (4), daß eine Mittelung zweier Wellen mit um v unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten eine entsprechende Amplitudenänderung hervorrufen würde.

2.2 Zeitverlauf und Verteilungsdichte von Wind

Für unterschiedliche Windarten lassen sich entsprechende Zeitverläufe der Windgeschwindigkeit zugrundelegen (siehe folgende Tabelle). Aus den Zeitverläufen lassen sich Verteilungsdichtefunktionen ermitteln, die eine Aussage über die Häufigkeit bestimmter Windgeschwindigkeiten ermöglichen. Windgeschwindigkeiten, die um eine mittlere Windstärke schwanken, lassen sich mit einer Normal-Verteilungsdichte annähernd beschreiben. Kontinuierlich steigende oder fallende Windstärke läßt sich durch eine Rechteck-Verteilungsdichte annähern. Für böigen Wind ist die Verteilung der Windgeschwindigkeiten im allgemeinen nicht funktional zu beschreiben.

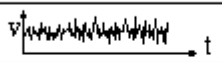
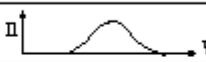
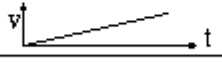
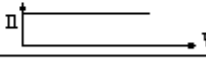

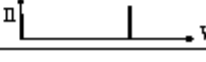
Windverteilung	Zeitverlauf $v(t)$	Verteilungsdichte $f(v)$
a) normal		
b) ansteigend		
c) böig		

Tabelle 1. Zeitverläufe und Verteilungsdichten von Windgeschwindigkeiten

2.3 Erwartungswerte

Der Effektivwert des gemittelten Signals, bei dem die einzelne Wellenzüge einen Phasenversatz entsprechend der Verteilungsdichte $f(x)$ besitzen, kann durch Bildung des Erwartungswertes ausgedrückt werden. Hierzu wird das Integral über alle Produkte aus Amplitudenminderungsfaktor und Verteilungsdichte gebildet [3]:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} \cos \frac{\Phi}{2} f(\Phi) d\Phi \quad (5)$$

Wird nun der Phasenversatz mit (2) und (3) in eine Windgeschwindigkeit umgedeutet, lassen sich folgende Effektivwerte bilden:

Fall a)

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} \cos \frac{\Phi}{2} \frac{1}{\sigma_{\Phi} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Phi^2}{2\sigma_{\Phi}^2}} d\Phi = e^{-\frac{\omega^2 d^2}{8c^4} \sigma_v^2} \quad (6)$$

Fall b)

$$E = si \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_{\Phi} \right) = si \left(\sqrt{3} \frac{d}{c^2} \pi f \sigma_v \right) \quad (7)$$

Fall c)

$$E = p_{max} \cos \left(\pi f d \frac{v_{max}}{c^2} \right) + p_{min} \cos \left(\pi f d \frac{v_{min}}{c^2} \right) \quad (8)$$

Hierbei sind p_{max} und p_{min} Wahrscheinlichkeiten, mit denen die Häufigkeit der Extremwerte v_{max} und v_{min} gekennzeichnet sind. Mit Hilfe der Gleichungen (6) bis (8) lassen sich nun die Erwartungswerte der Amplitudenminderung bei Messungen des Schalldruckpegels berechnen.

2.4 Pegelminderung

Für mit der Standardabweichung σ_{v} normalverteilten Wind ergibt sich mit (6) und $c=340$ m/s eine Pegelminderung von

$$\Delta L = 20 \lg \left[e^{-\frac{\omega^2 d^2 \sigma_v^2}{8c^4}} \right] = -3,2 \cdot 10^{-9} (\sigma_v f d)^2 \quad (9)$$

Entsprechend ergibt sich bei böigem Wind mit (8)

$$\Delta L = 20 \lg \left[p_{max} \cos \left(\frac{\omega d}{2c^2} v_{max} \right) + p_{min} \cos \left(\frac{\omega d}{2c^2} v_{min} \right) \right] \quad (10)$$

3 Experimentelle Überprüfung

Wind hat eine zeit- und ortsabhängige Änderung der Schallgeschwindigkeit zur Folge. Um die Vielzahl der Parameter einzuschränken, wird das Modell eines Windkanals für Messungen herangezogen. Innerhalb eines modifizierten Kundtschen Rohres wird eine ebene Welle erzeugt (siehe Bild 1).

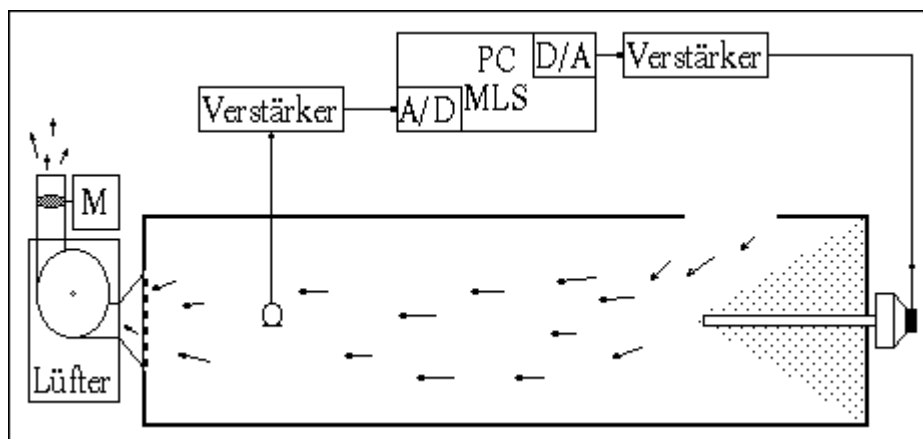


Bild 1. Meßaufbau

Ein Hochton-Lautsprecher speist die Maximalfolge über ein dünnes Rohr am absorbierenden Ende ein. Ein 1/4-Zoll-Mikrofon nimmt das Signal auf; verstärkt wird es wieder dem Programm zur Analyse zugeführt. Als Störgröße wird ein wechselnder Luftstrom von einem Lüfter erzeugt, dem eine motorgetriebene drehende Scheibe als periodisch arbeitendes Ventil nachgeschaltet ist. Bild 2 zeigt die im Rohr erzeugte Windgeschwindigkeit über der Zeit (a) sowie die entsprechende Verteilungsdichte (b), die dem Modell des böigen Windes nahekommt.

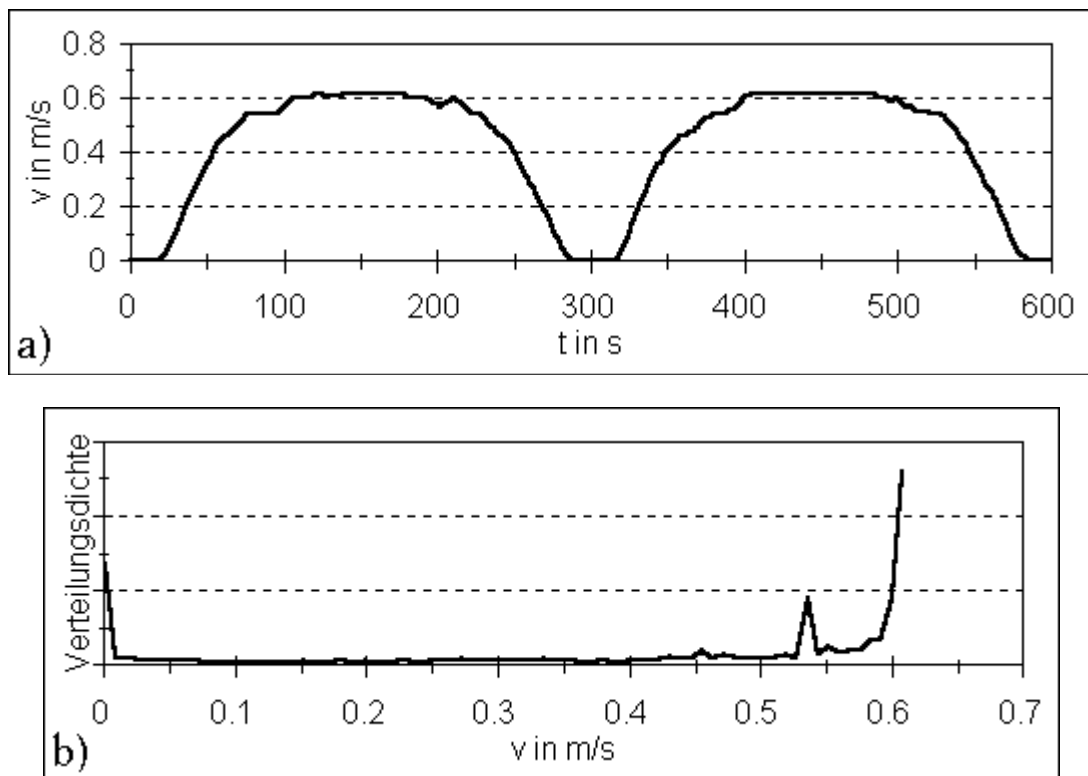


Bild 2. a) Zeitverlauf und b) Verteilungsdichte der Windgeschwindigkeit

Bild 3 zeigt eine Kurvenschar der gemessenen Pegelminderungen bezogen auf eine Messung bei konstantem Wind. Die nach (9) und (10) mit den Parametern des Versuchsaufbaus berechneten Abweichungen für normalverteilten bzw. böigen Wind sind (dick) mit eingezeichnet. Die Kurvenschar zeigt Ergebnisse von Messungen mit Maximalfolgen verschiedener Länge. Sowohl der Einfluß von Zeitvarianzen innerhalb einer Periodendauer als auch von Periode zu Periode sollte nachgewiesen werden.

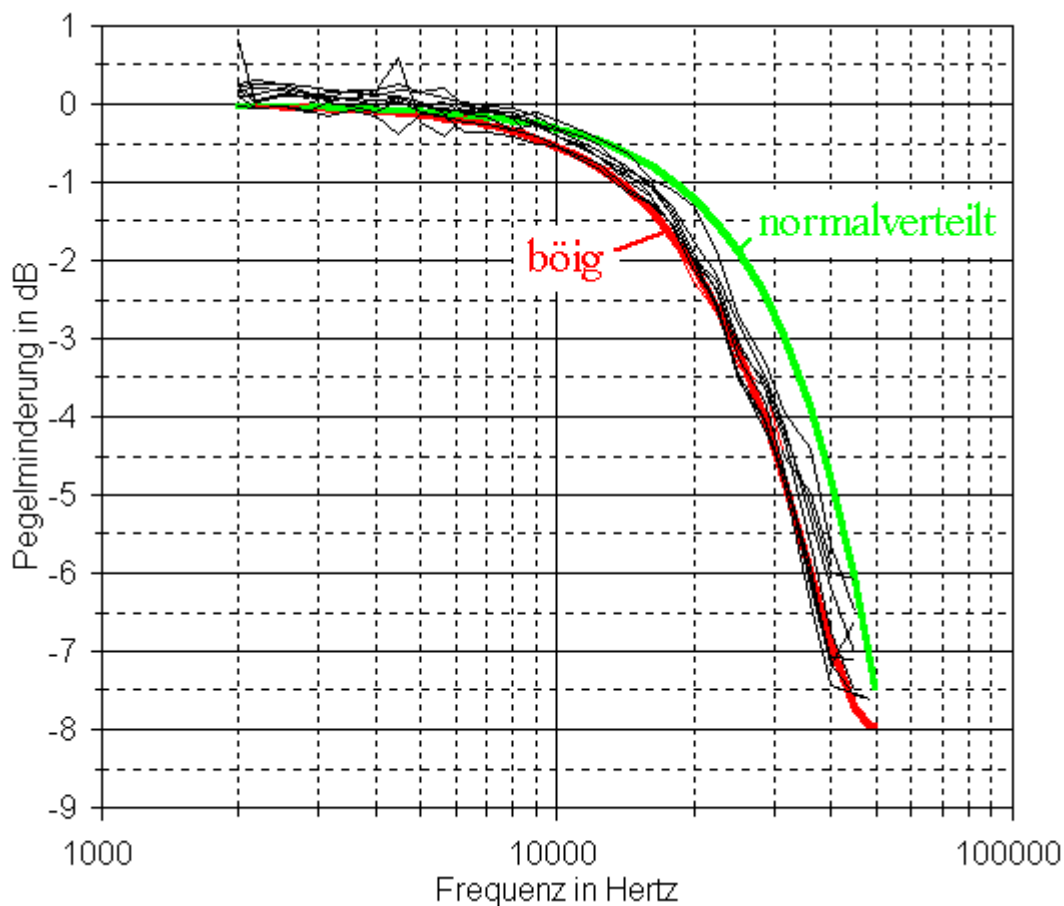


Bild 3. Pegelabweichungen bei Windeinfluß

Die gemessene Pegelminderung ist fast unabhängig von der Wahl der Folgenlänge und der Zahl der Mittelungen und entspricht somit der Erwartung nach (9) und (10). Lediglich die Frequenz, die Länge der Strecke der Schallausbreitung und die Schwankung des Windes spielen eine Rolle. Die Verteilung des böigen Windes nähert die Meßwerte recht gut an und ist für diesen Fall angemessen (siehe auch Bild 2).

4 Schlußfolgerungen

Zunächst fällt auf, daß sich größere Abweichungen erst bei höheren Frequenzen (oberhalb von 5000 Hz) ergeben. Beispielsweise für den Bereich der Bauakustik kann gesagt werden, daß bei Außenmessungen unter realistischen Bedingungen die Zeitvarianz keine großen Auswirkung auf gemittelte MLS-Messungen hat. Das gilt insbesondere bei zweikanaligen Messungen der Schalldämmung von Fassaden. Für die Zukunft scheint es sinnvoll zu sein, die Auswirkung von Änderungen zu untersuchen, die sich innerhalb einer Periode des Meßsignals abspielen. Hierzu wurden bisher keine Untersuchungen vorgenommen. Es müßte untersucht werden, inwieweit die Bildung der Autokorrelationsfunktion durch die Phasenschwankungen, die während einer Periode der MLS-Folge auftreten, beeinträchtigt wird und wie sich diese Beeinträchtigung auf die Pegel- oder Nachhallzeitmessung auswirkt.

5 Literatur

1. Vorländer, M.: Anwendungen der Maximalfolgentechnik in der Akustik. *Fortschritte der Akustik - DAGA 94*, S. 83-102.
2. Vorländer, M., Bietz, H.: Der Einfluß von Zeitvarianzen bei Maximalfolgenmessungen. *Fortschritte der Akustik - DAGA 95*, S. 675-678.
3. Bjor, O.-H.: Mündliche Mitteilung