

Het meten van de impulsresponsie van microfoons middels ruis: een haalbaarheidsstudie

Dr. Hans R.E. van Maanen (Temporal Coherence B.V., Nederland)

Datum van uitgifte: 14 Februari 2021

Samenvatting

Het meten van de impulsresponsie van microfoons is cruciaal om hun temporele eigenschappen te begrijpen. Hierover wordt door de fabrikanten weinig informatie verstrekt, met als argumenten dat dit moeilijk te meten is en dat de microfoon gemakkelijk overstuurd wordt. Beide bezwaren zouden omzeild kunnen worden door het gebruik van witte ruis met een Gaussische kansverdeling en de kruiscorrelatietechniek. Omdat dan een luidspreker gebruikt moet worden, is een majeur struikelblok de deconvolutie van de verkregen impulsresponsie. Deze studie laat zien dat deconvolutie haalbaar is bij gebruik van een gemeten impulsresponsie van de luidspreker en de impulsresponsie van een gemodelleerde (en dus in detail bekende) microfoon, zelfs als de impulsresponsie van de luidspreker significant breder is dan van de microfoon.

Samenvatting van deel 2

Het tweede gedeelte van de haalbaarheidsstudie omvat een Monte Carlo simulatie van de eigenlijke meetprocedure, inclusief de witte ruis met een Gaussische kansverdeling. Het uitsturingssignaal is geverifieerd om te controleren of dit voldoet aan de vereisten voor deze toepassing. De belangrijkste conclusie is dat deze techniek haalbaar is voor het bepalen van de impulsresponsie van microfoons, maar de resultaten tonen enige kleine imperfecties, welke verminderd kunnen worden door hetzelfde ruissignaal te gebruiken voor het bepalen van de impulsresponsie van de luidspreker.

De voornaamste conclusie van beide delen is dat het meten van de microfoon impulsresponsie haalbaar is zonder speciale apparatuur en dat er geen reden voor fabrikanten is om deze informatie weg te houden van gebruikers.

1. Inleiding

Geluid, waaronder muziek, wordt opgenomen middels microfoons, dus dit is een essentiële schakel in de keten. Maar dan is de vraag hoe goed deze *gehoormatig* presteren. Uiteraard moet de frequentieresponsie het bereik van 20 Hz tot 20 kHz omvatten, maar is dit de enige parameter die de gehoormatige kwaliteit bepaalt? Voor lange tijd is de frequentieresponsie in het audiobereik als een majeure parameter beschouwd, een andere de harmonische vervorming. Ervaringen met de hoge resolutie digitale formaten hebben echter onthuld dat de gehoormatige kwaliteit ook afhangt

van de eigenschappen van de anti-alias en reconstructiefilters: de responsie *boven* 20 kHz is belangrijk voor de gehoormatige kwaliteit (ref. 1).

Omdat een microfoon ook als een (laagdoorlaat) filter werkt, is duidelijk dat andere eigenschappen ook van belang zijn, inclusief de responsie boven 20 kHz. Hoewel het meten van de responsie boven de 20 kHz mogelijk is, wordt dit gewoonlijk beperkt tot de modulus van de responsie; de faseresponsie wordt ofwel niet gemeten of niet gerapporteerd in de openbare literatuur. De gecombineerde amplitude- en faseresponsie van de microfoon bepaalt de responsie in *tijddomein* en er zijn duidelijke aanwijzingen dat de temporele responsie van belang is voor de gehoormatige kwaliteit (ref. 2). Het is echter niet gebruikelijk om de impulsresponsie van microfoons te publiceren in de informatie, verstrekt door de fabrikanten, ondanks dat de impulsresponsie zowel de amplitude- als de faseresponsie van het apparaat omvat. Dergelijke informatie zou zeer bruikbaar zijn bij de selectie en vergelijkingen van microfoons.

Of nu moeilijkheden van het meten van de impulsresponsie of het onthullen van niet-ideale eigenschappen van de microfoon aan de basis van deze terughoudendheid liggen blijft onduidelijk, ondanks dat sommige fabrikanten wel impulsresponsies publiceren. (ref. 3). In dit artikel zullen we een alternatieve manier om de impulsresponsie te meten middels ruis analyseren, om op die manier de struikelblokken te omzeilen, die optreden met de meer gebruikelijke techniek middels vonken. In par. 2 wordt de basis van de techniek, inclusief de wiskunde, beschreven, in par. 3 wordt een simulatie met de resultaten ervan gepresenteerd, gevolgd door een discussie over de haalbaarheid van deze techniek voor gebruik in praktische toepassingen. In par. 4 zullen conclusies en voorstellen voor verder werk worden opgesomd.

2. The basistechniek en de gerelateerde wiskunde

2.1 De problemen met de vonk techniek

Het ligt voor de hand om een impulsresponsie met een impuls te meten. Maar het is niet eenvoudig om een geluid op te wekken dat voldoende goed op een impuls lijkt, geschikt voor deze toepassing. De beste optie, op dit moment, is het geluid, opgewekt door een vonk-ontlading. Een nauwkeurige beschouwing van de eigenschappen leert dat het niet perfect is in frequentiedomein (ref. 4) en dus ook niet in tijddomein. Ook zijn geen twee vonken geheel identiek.

Maar er is een ander probleem: de vonk produceert een hoge geluidsdruk, dus hoe kan worden gegarandeerd dat de microfoon nog steeds in zijn lineaire gebied werkt? Dit probleem zou kunnen worden aangepakt door een kleinere, minder vermogende, vonk te gebruiken, maar dat zal de Signaal/Ruis verhouding (SRV) verlagen. De SRV kan worden verbeterd door ‘conditionele middeling’ (ref. 5), maar dat vereist een volledige afwezigheid van enige onbepaaldheid in het geluid, opgewekt door alle individuele vonken. Dit is, naar alle waarschijnlijkheid, teveel gevraagd, en daardoor aanleiding geeft tot een ‘tijdversmering’ van de gemiddelde impulsresponsie, precies het tegenovergestelde van wat bereikt dient te worden.

Het is dus duidelijk dat de ‘vonk’ techniek zijn beperkingen en struikelblokken heeft, die de toepassing in de weg zitten. Derhalve zou een andere techniek om de impulsresponsie te meten

zeer aantrekkelijk zijn, vooral als dit zou kunnen worden gerealiseerd zonder het gebruik van speciale apparatuur.

2.2 Het gebruik van witte ruis voor het meten van impulsresponsies

Het is bekend uit de stochastische signaal analyse dat er een één-op-één relatie is tussen de overdrachtsfunctie van een systeem en de responsie ervan op Gaussisch verdeelde witte ruis (ref. 5). Zonder de theorie te herhalen zullen een aantal stellingen ervan zonder bewijs worden geponeerd. Die we nodig hebben voor dit artikel zijn:

- De autocorrelatiefunctie van witte ruis is een deltafunctie op $\tau = 0$ (zij het met een amplitude van 1 (één)).
- De kruiscorrelatiefunctie tussen het witte ruis ingangssignaal en de responsie van het systeem is gelijk aan de impulsresponsie van het systeem (inclusief de tijdvertraging).

Uit de Fourier theorie is bekend dat de vermenigvuldiging van de (complexe) frequentieresponsies van systemen gelijk is aan het convolueren van de impulsresponsies in tijddomein (refs. 6 en 7).

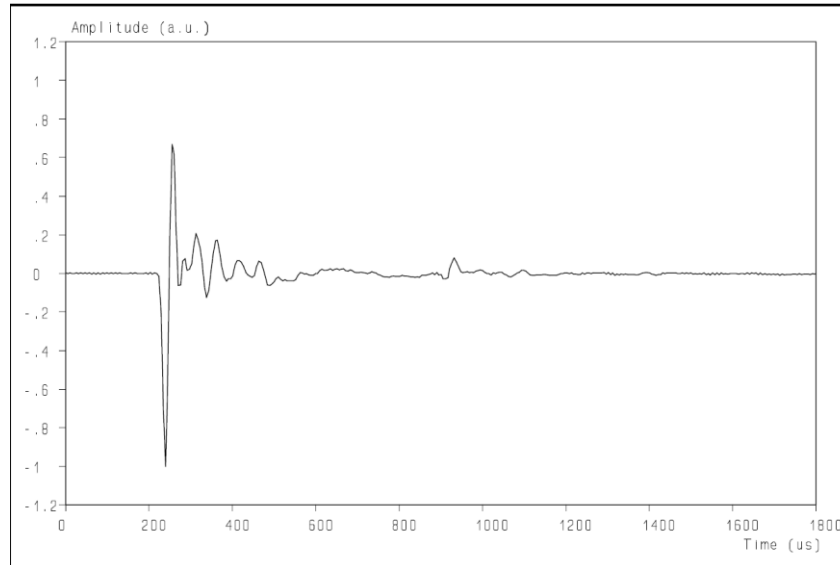
Dit opent in principe de deur naar het meten van de impulsresponsie van een systeem door gebruik te maken van witte ruis. Dit heeft het voordeel dat verzekerd kan worden dat het systeem nooit tot in een niet-lineair gebied wordt gestuurd en dat de middelingstijd kan net zo lang worden genomen als gewenst is om ieder niveau van nauwkeurigheid / onzekerheid te bereiken.

2.3 Basale meetopstelling voor het meten van de impulsresponsie middels witte ruis

Het probleem met het toepassen van deze aanpak op microfoons is, natuurlijk, het opwekken van de witte ruis als geluid. Het is geen groot probleem om Gaussisch verdeelde witte ruis van voldoende bandbreedte met de computer op te wekken (ref. 8). Versterkers, die in staat zijn om met voldoende vermogen over een breed frequentiebereik deze ruis aan een luidspreker af te geven, evenmin. Maar om het gerelateerde geluidsveld te creëren, is een luidspreker vereist die zowel een breed frequentiebereik als zelf een uitstekende impulsresponsie moet hebben. Dit is niet mogelijk met de huidige stand van de techniek. Er is echter een manier om dit probleem te omzeilen.

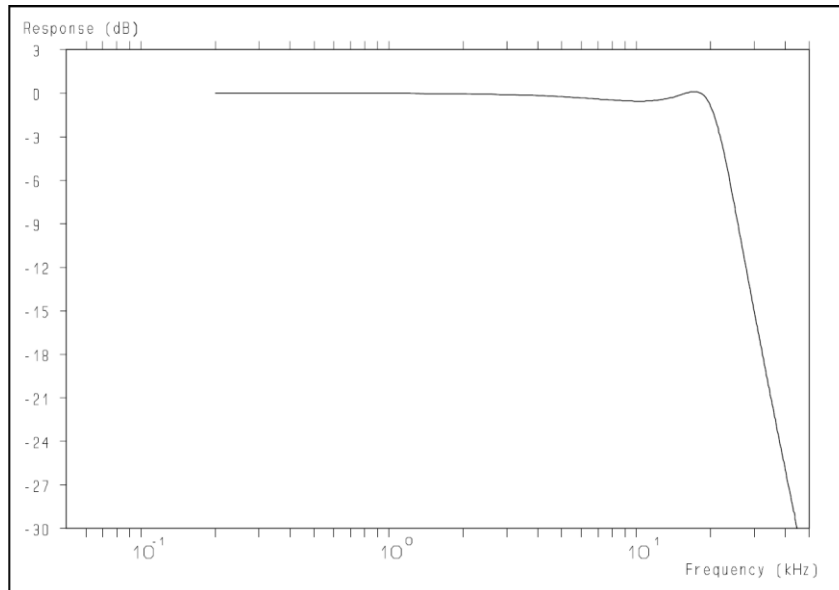
De luidspreker kan worden opgevat als een banddoorlaatfilter en de eigenschappen worden geheel bepaald door zijn impulsresponsie. Door gebruik te maken van een uitstekende meetmicrofoon (die beschikbaar zijn, zie bijv. ref. 9) kan de impulsresponsie van de luidspreker, die het geluidsveld moet opwekken, worden gemeten. Deze zal worden aangeduid als $f_{ls}(t)$. De complexe overdrachtsfunctie van de luidspreker kan worden bepaald door Fourier Transformatie van de impulsresponsie. Deze zal worden aangeduid als $F_{ls}(\omega)$. De microfoon onder test (MoT) is eveneens een banddoorlaatfilter en zijn complexe overdrachtsfunctie zal worden aangeduid als $G_{mp}(\omega)$ en zijn impulsresponsie als $g_{mp}(t)$. De gezamenlijke responsie van de luidspreker en de microfoon, aangeduid als $H_{lm}(\omega)$, is, uiteraard het product van $F_{ls}(\omega)$ en $G_{mp}(\omega)$. In tijddomein is dit gelijk aan de convolutie van $f_{ls}(t)$ en $g_{mp}(t)$ en zal worden aangeduid als $h_{lm}(t)$. Als de meetmicrofoon vervangen wordt door de MoT, wordt de gemeten impulsresponsie is gelijk aan $h_{lm}(t)$ omdat de ruis door zowel de luidspreker als de MoT wordt gefilterd. Door gebruik te maken van de apart gemeten $f_{ls}(t)$, kan $g_{mp}(t)$ worden bepaald door deconvolutie van $h_{lm}(t)$ en $f_{ls}(t)$.

Deconvolutie is, in het algemeen, een beetje riskant en daarom is in deze studie gezien of het bepalen van de impulsresponsie van een gesimuleerde microfoon haalbaar is door gebruik te maken van de gemeten impulsresponsie van een tweeter. De impulsresponsie van de tweeter is gemeten door Geoff Hill (Hill Acoustics) in het VK en wordt in fig. 1 getoond.

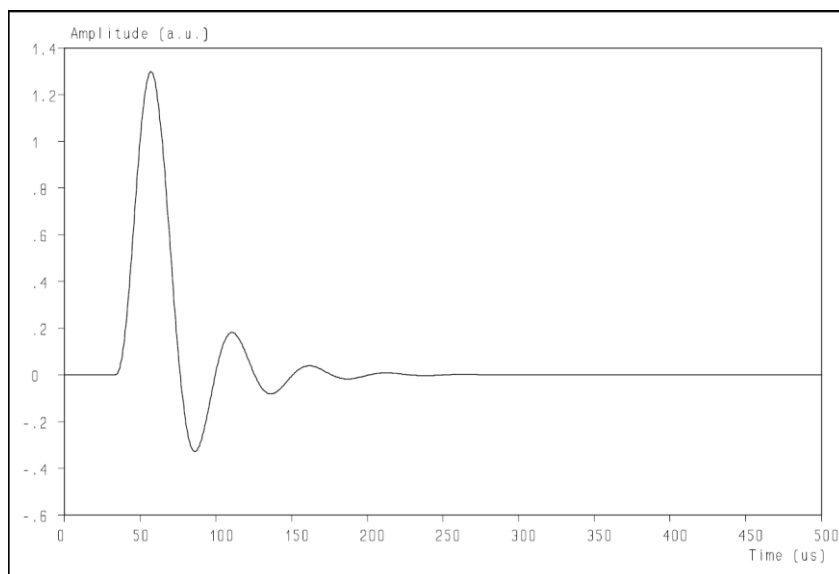


Figuur 1: *De gemeten impulsresponsie van de tweeter, gebruikt in deze studie (met dank aan Hill Acoustics). De kleine piek op ca. 950 μ s is waarschijnlijk veroorzaakt door een gedempte reflectie in de tetrahedrische dode kamer.*

De eigenschappen van de microfoon zijn gebaseerd op een algemene benadering: de frequentieresponsie heeft de neiging bij hogere frequenties in de audioband af te vallen en om de responsie op te krikken, is een zwakke resonantie aangebracht in de bovenste regionen van de audioband. Deze resonantie kan in de frequentieresponsie worden ontwaard (zie fig. 2), maar is veel duidelijker zichtbaar in de impulsresponsie (fig. 3).

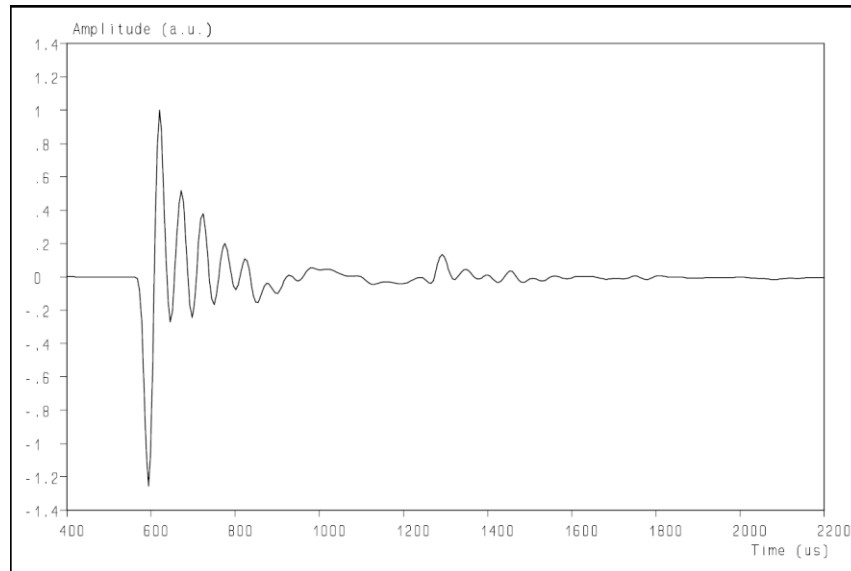


Figuur 2: De frequentieresponsie van de gesimuleerde microfoon.



Figuur 3: De impulsresponsie van de gesimuleerde microfoon, zoals verkregen door Fourier Transformatie van de (complexe) frequentieresponsie.

De berekening van de convolutie van de impulsresponsies van de luidspreker en de microfoon is rechttoe-rechtaan en het resultaat is getoond in fig. 4: het signaal in tijddomein zoals het uit de MoT zou komen als de impuls direct aan de luidspreker zou worden aangeboden (en niet-lineariteiten worden verwaarloosd). In dit geval kan het worden verkregen door de ruis aan de ingang van de luidspreker te kruiscorreleren met het uitgangssignaal van de MoT. De vraag is nu of het mogelijk is om de eigenschappen van de MoT te bepalen uit de impulsresponsies van de luidspreker en het signaal van fig. 4.



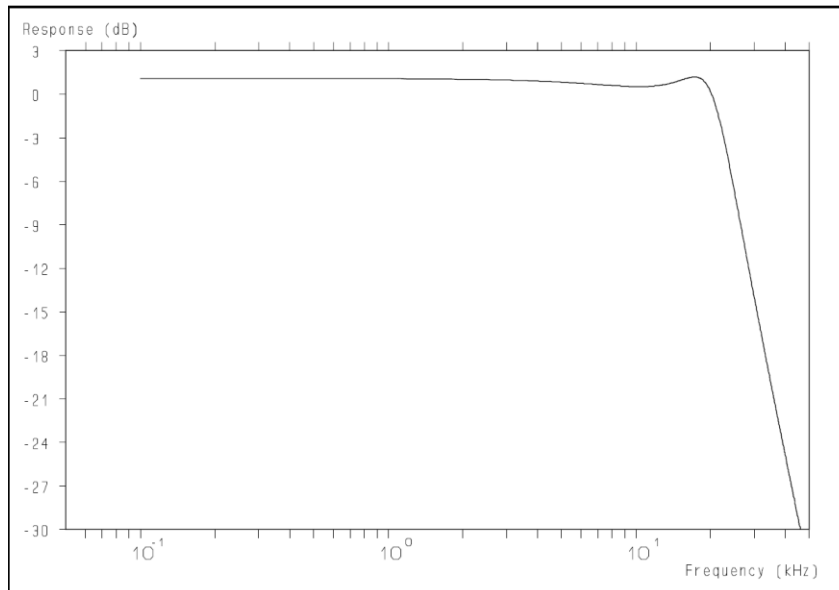
Figuur 4: De convolutie van de impulsresponsies van de (gemeten) tweeter en van de gesimuleerde microfoon.

3. Resultaten en discussie

Het deconvolutieproces omvat de volgende stappen:

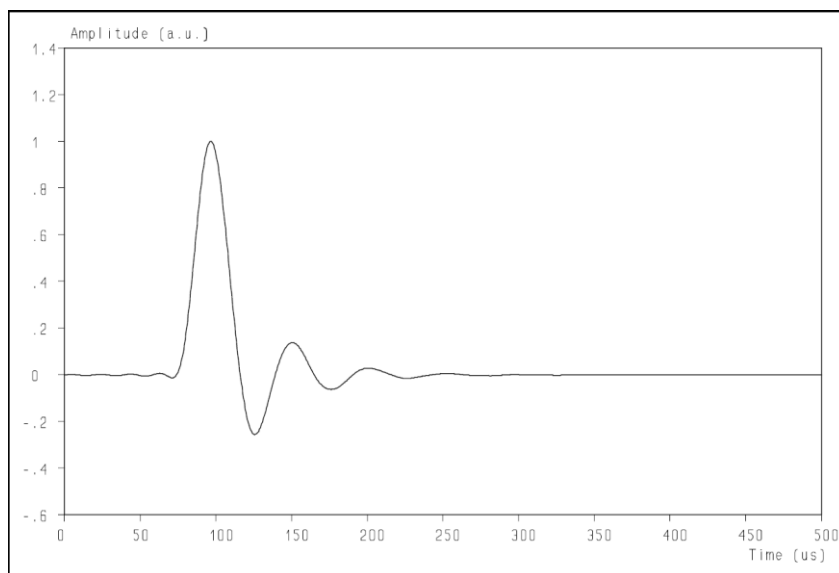
- Fourier transformatie van $f_{ls}(t)$ om $F_{ls}(\omega)$ te verkrijgen.
- Fourier transformatie van $h_{lm}(t)$, wat $H_{lm}(\omega)$ oplevert, het product van $F_{ls}(\omega)$ en $G_{mp}(\omega)$.
- Delen van $H_{lm}(\omega)$ door $F_{ls}(\omega)$, wat $G_{mp}(\omega)$ oplevert.
- Gebruik $G_{mp}(\omega)$ om de frequentieresponsie van de gesimuleerde microfoon te verkrijgen.
- Inverse Fourier Transformatie van $G_{mp}(\omega)$ om de impulsresponsie van de gesimuleerde microfoon te bepalen.

Het resultaat voor de frequentieresponsie is getoond in fig. 5. De frequentieresponsie, zoals gebruikt voor de gemodelleerde microfoon staat in fig. 2 en een vergelijk toont een zeer goede overeenkomst.



Figuur 5: De frequentieresponsie van de gesimuleerde microfoon zoals bepaald door deconvolutie van de impulsresponsie van fig. 4. Vergelijk met fig. 2.

De impulsresponsie van de microfoon, berekend middels het deconvolutie-algoritme, is getoond in fig. 6. Vergeleken met het de impulsresponsie, direct afgeleid uit de gegevens van de gesimuleerde microfoon, getoond in fig. 3, laat deze slechts kleine verschillen zien, voornamelijk voor het starten van de impuls.



Figuur 6: De impulsresponsie van de gesimuleerde microfoon zoals bepaald door deconvolutie van de impulsresponsie van fig. 4. Vergelijk met fig. 3.

De lichte oscillatie voor de start van de impuls kan zijn veroorzaakt door alias effecten en / of afbreekfouten, maar het is niet onwaarschijnlijk dat een verdere ontwikkeling van het algoritme de resultaten verder kan verbeteren. Dit is een interessant onderwerp voor verder werk.

De deconvolutie heeft de frequentieresponsie zeer nauwkeurig gereproduceerd. Ook de impulsresponsie is erg dicht bij de eigenlijke responsie uitgekomen. Omdat de impulsresponsie van een echte tweeter is gebruik, kan worden geconcludeerd dat deze majeure horde genomen is. Hoewel de impulsresponsie van de tweeter breder is dan de impulsresponsie van de gesimuleerde microfoon, heeft het algoritme deze goed gereproduceerd. Maar het is voor de hand liggend dat hoe korter de impulsresponsie van de luidspreker is, des te beter de impulsresponsie van de MoT kan worden bepaald. Dat is de reden dat het aanbevelenswaardig is om een tweeter te gebruiken met uitstekende temporele eigenschappen (ref. 2), maar deze zal desondanks nog steeds inferieur zijn in vergelijking met het witte ruis signaal dat gebruikt wordt.

Een vraag is hoe goed de impulsresponsie van de luidspreker blijft reproduceren in de loop van de tijd: hoeveel zou deze veranderd zijn tussen twee opeenvolgende metingen? In dit onderzoek is dezelfde luidsprekerimpulsresponsie gebruikt voor de berekening van de convolutie met de microfoonimpulsresponsie als voor het deconvolutie proces. In werkelijkheid wordt de impulsresponsie van de luidspreker ten tijde van de meting gebruikt en is deze verschillend van de opgeslagen impulsresponsie die eerder bepaald is? Deze vraag dient in verder werk te worden beantwoord.

Als de impulsresponsie van de luidspreker noemenswaardig verandert in de tijd, hoe gevoelig is de berekende impulsresponsie van de microfoon voor dergelijke veranderingen? Een dergelijke gevoeligheidsanalyse is ook een interessant onderwerp voor toekomstig werk.

Een derde punt is de vraag of het mogelijk is om de impulsresponsie van de luidspreker tegelijk te meten met het testen van de MoT door de meetmicrofoon gedurende dezelfde tijd te gebruiken. Beïnvloeden de behuizingen van de microfoons de responsies van de twee apparaten? Stemmen de geluidsvelden op beider posities voldoende overeen om dit een valide optie maken? Dit dient ook te worden onderzocht, waarschijnlijk middels experimenten.

4. Conclusies en toekomstig werk

Deze haalbaarheidsstudie toont aan dat het mogelijk is om de impulsresponsie van een microfoon te bepalen middels Gaussisch verdeelde witte ruis en een echte luidspreker, in dit geval een tweeter. De gegevensverwerking is voldoende nauwkeurig, zelfs als de impulsresponsie van de luidspreker breder is dan de impulsresponsie van de microfoon. Het aantrekkelijke van het gebruik van Gaussisch verdeelde witte ruis is dat er geen specialistische en / of dure apparatuur nodig is en dat kan worden gegarandeerd dat de microfoon nooit voorbij zijn lineaire bereik wordt gestuurd.

Toekomstig werk dient experimenten te omvatten i) betreffende de stabiliteit / reproduceerbaarheid van de impulsresponsie van de luidspreker, ii) een gevoeligheidsanalyse voor (kleine) veranderingen van de impulsresponsie van de luidspreker en iii) de mogelijkheid om de impulsresponsie van de luidspreker tegelijkertijd te meten tijdens het testen van de MoT.

De techniek om Gaussisch verdeelde witte ruis te gebruiken lijkt een zeer aantrekkelijke werkwijze, die verder ontwikkeld dient te worden. Het zou de mogelijkheid bieden om de impulsresponsie van microfoons te bepalen met relatief eenvoudige apparatuur en tegen lage kosten. Daar de impulsresponsie belangrijk is voor de gehoormatige kwaliteit van het opgenomen geluid, zou dit een belangrijke toevoeging zijn van de gebruikersinformatie over microfoons.

Referenties

1. Helen M. Jackson, Michael D. Capp, and J. Robert Stuart, “The audibility of typical digital audio filters in a high-fidelity playback system”, Audio Engineering Society, 137th Convention, Los Angeles, (2014), Paper 9174
2. “Perception of Temporal Response and Resolution in Time Domain”, Workshop #3, AES convention Berlin (Germany), 2017
3. <https://earthworksaudio.com/products/microphones/measurement-series/m50/>
4. Alex Khenkin, “How Earthworks Measures Microphones”, <http://recordinghacks.com/pdf/earthworks/how-earthworks-measures-mics.pdf>
5. J.S. Bendat and A.G. Piersol, “Random Data, Analysis and Measurement Procedures”, John Wiley & Sons, New York (1986)
6. A. Papoulis, “The Fourier Integral and its Applications”, McGraw-Hill Book Company, New York (1962)
7. A. Papoulis, “Signal Analysis, McGraw-Hill Book Company, New York (1984)
8. H.R.E. van Maanen, “Retrieval of Turbulence and Turbulence Properties from randomly sampled Laser-Doppler Anemometry data with noise”, (chapter 2), Ph.D. Thesis, Delft University of Technology (Delft, Netherlands), 1999
9. <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4939>

Het meten van de impulsresponsie van microfoons middels ruis: een haalbaarheidsstudie, deel 2

Dr. Hans R.E. van Maanen (Temporal Coherence B.V., Nederland)

Datum van uitgifte: 27 February 2021

1. Inleiding

In het eerste deel van deze studie (ref. 1) is onderzocht of het meten van de impulsresponsie van een microfoon middels een echte luidspreker haalbaar is. De conclusie was dat dit, onder de gegeven omstandigheden zoals erin beschreven, haalbaar is. De kern was om de essentiële stap te bezien: de deconvolutie van de convolutie van de impulsresponsies van luidspreker en microfoon door gebruik te maken van de gemeten impulsresponsie van de luidspreker. Omdat deconvolutie tot onnauwkeurige resultaten kan leiden als bijv. de impulsresponsie van de luidspreker veel breder is dan die van de microfoon, is deze stap niet triviaal. De bovenstaande bevinding was hoopgevend omdat de resultaten, zowel voor de frequentieresponsie als de impulsresponsie, erg goed bleken te zijn. Maar een belangrijke stap van de hele meetprocedure ontbrak nog in de studie, zoals gerapporteerd in ref. 1: de ruis zelf.

In dit tweede deel van de studie maakt de meetprocedure met Gaussisch verdeelde witte ruis deel uit van de simulatie. In par. 2 wordt de Monte Carlo procedure toegelicht, in par. 3 worden de resultaten beschreven en bediscussieerd. In par. 4 worden de conclusies en toekomstig werk gepresenteerd.

2. De uitbreiding van de simulatie met Gaussisch verdeelde witte ruis

De techniek die bestudeerd wordt is het uitsturen van de luidspreker met Gaussisch verdeelde witte ruis en het opnemen van het geluid van de luidspreker met de microfoon onder test (MoT). Het signaal van de MoT wordt opgeslagen om te worden gekruiscorreleerd met het uitsturende ruissignaal. Voor de limiet van de meettijd naar oneindig is de kruiscorrelatiefunctie identiek aan de convolutie van de impulsresponsies van de luidspreker en de MoT. De basis van deze theorie is (zonder bewijs) gegeven in deel 1 en de theorie zelf kan in de literatuur worden gevonden (bijv. ref. 2).

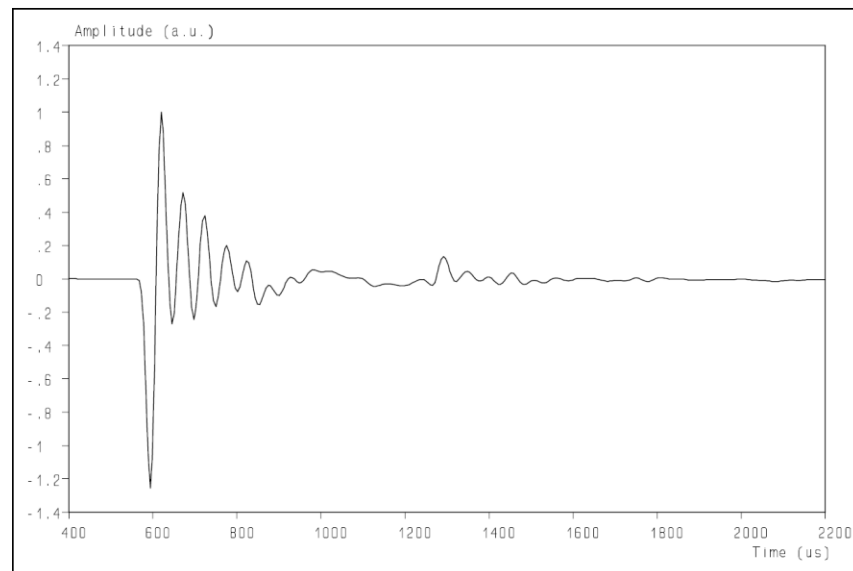
In dit deel van de studie is de procedure uitgebreid met een Monte Carlo simulatie van de eigenlijke meetprocedure. Allereerst is een computerbestand, bestaande uit 5,2 seconde van Gaussisch verdeelde witte ruis gegenereerd met een bemonsteringsfrequentie van 192 kHz. Hiervoor is dezelfde bemonsteringsfrequentie gekozen als waarmee de impulsresponsie van de tweeter is gemeten; dit bestand omvat derhalve 1 miljoen waarden. De procedure voor het genereren van dit bestand kan worden gevonden in ref. 3, de basisbeginselen ervan in Appendix 1.

N.B. Opgemerkt dient te worden dat het signaal, opgewekt met dit bestand, witte ruis is tot 96 kHz als het rechtstreeks wordt gebruikt als invoer voor een D/A omzetter. Deze kan een verdere beperking veroorzaken t.g.v. het reconstructiefilter. Het bestand, zoals opgeslagen in de computer, is geanalyseerd om te verifiëren of het voldoet aan alle eisen voor deze simulatie. Deze analyse is gerapporteerd in Appendix 2.

Dit ruissignaal is vervolgens geconvolueerd (in tijddomein) met de gemeten impulsresponsie van de tweeter (zie fig. 1 van deel 1), hetwelk resulteert in de temporele responsie van de tweeter op een dergelijk signaal. We zullen het geluid dat van de luidspreker afkomt, benoemen als de ‘luidspreker gefilterde ruis’.

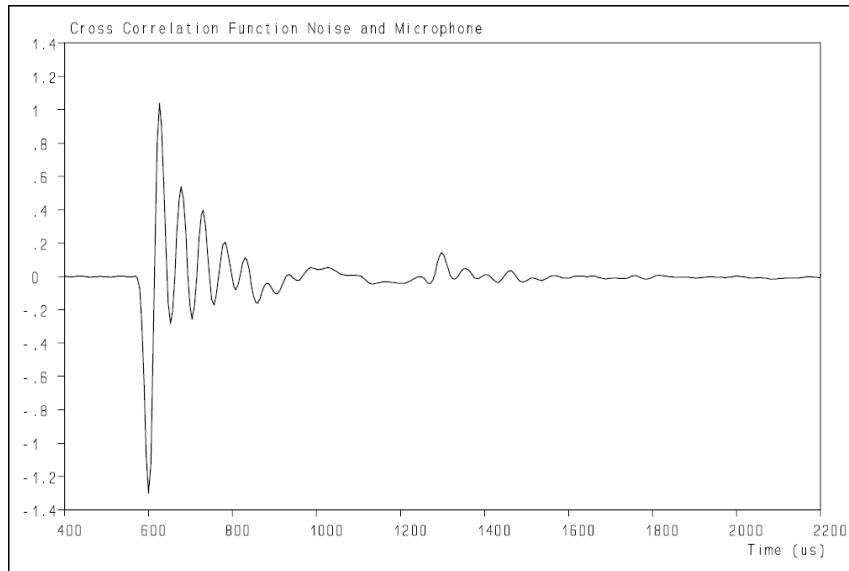
De luidspreker gefilterde ruis kan vervolgens worden geconvolueerd (in tijddomein) met de impulsresponsie van de microfoon. Dit resulteert in het temporele uitgangssignaal van de microfoon, zoals dat geregistreerd zou worden als het geluid, dat de microfoon bereikt, de luidspreker gefilterde ruis zou zijn. We zullen dit signaal benoemen als het “microfoon uitgangssignaal”.

Het microfoon uitgangssignaal kan nu worden gekruiscorreleerd met de Gaussisch verdeelde witte ruis, dat de luidspreker uitgestuurd heeft. In het ideale geval met een oneindig lange middelingstijd, zou de kruiscorrelatiefunctie identiek zijn aan de convolutie van de impulsresponsies van de luidspreker en de microfoon. Dit is gerapporteerd in deel 1 en om de vergelijking te vergemakkelijken is het resultaat van de rechtstreekse convolutie nogmaals in fig. 1, hieronder, getoond.



Figuur 1: De impulsresponsie van de luidspreker + gesimuleerde microfoon, verkregen door directe convolutie van de gemeten luidspreker impulsresponsie en de impulsresponsie van de microfoon. Voor details: zie figuren 1 en 3 van deel 1.

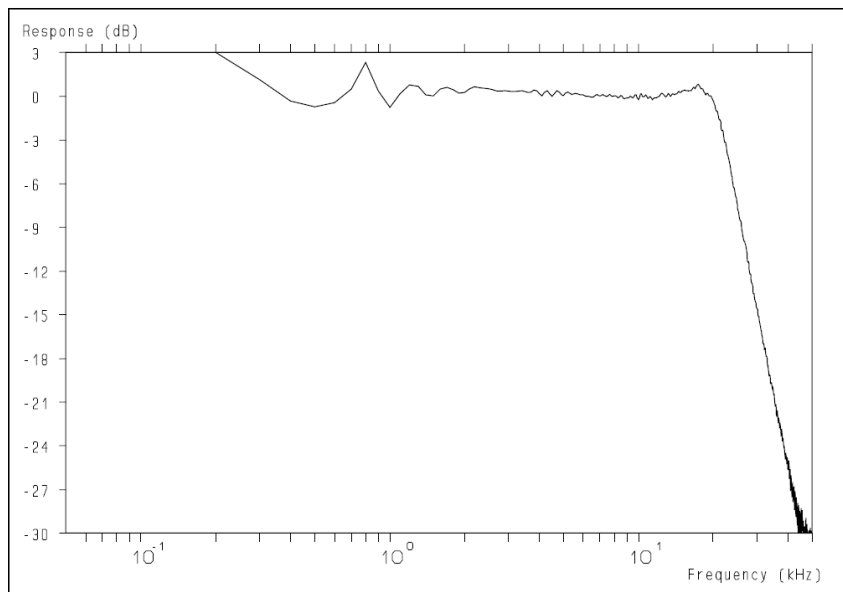
De kruiscorrelatiefunctie wordt getoond in fig. 2 en, zoals te zien is, zijn de verschillen tussen fig. 1 en 2 op het blote oog onzichtbaar. Maar dit betekent nog niet dat de resultaten, hiervan afgeleid voor de eigenschappen van de microfoon (vrijwel) identiek zijn als de kruiscorrelatie-functie in het deconvolutieproces gebruikt wordt. Dit is een essentiële voorwaarde voor het toepassen van deze techniek. Desondanks mag als, voorlopige conclusie, gesteld worden dat de middelingstijd van 5 seconden en 1 miljoen waarden, voldoende is om het theoretische resultaat met een hoge gelijkens te benaderen.



Figuur 2: De kruiscorrelatiefunctie tussen de uitsturende Gaussisch verdeelde witte ruis en het uitgangssignaal van de microfoon, convergerend naar de impulsresponsie van de luidspreker + gesimuleerde microfoon. Vergelijk met fig. 1.

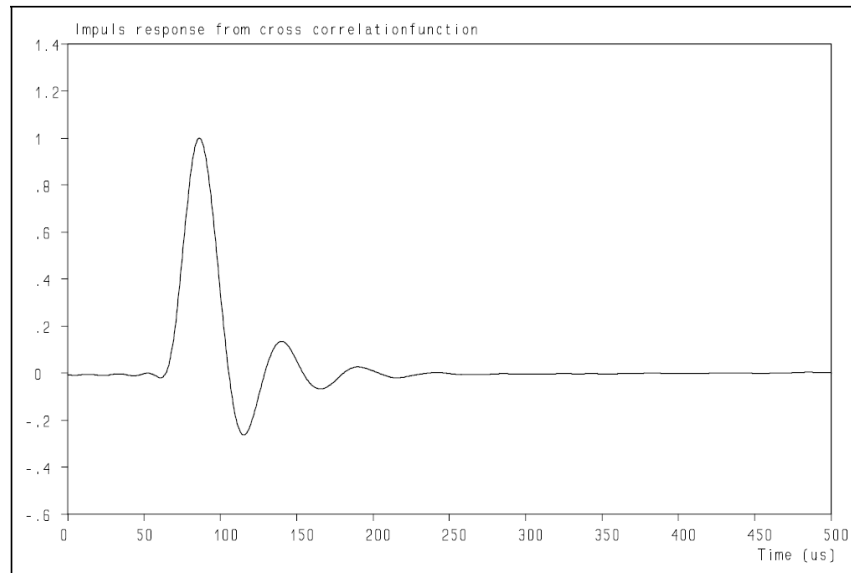
3. Resultaten en discussie

De kruiscorrelatiefunctie van fig. 2 kan gebruikt worden als invoer voor het deconvolutiealgoritme in plaats van de impulsresponsie van fig. 1. De uitvoer van het algoritme bestaat uit de frequentieresponsie en de impulsresponsie. Deze worden in fig. 3 en 4 getoond.



Figuur 3: De modulus van de frequentieresponsie van de gesimuleerde microfoon zoals verkregen door deconvolutie van de kruiscorrelatiefunctie van fig. 2, gebruik makend van de impulsresponsie van de luidspreker, zoals getoond in fig. 1 van deel 1, Vergelijk met figuren 2 en 5 van deel 1.

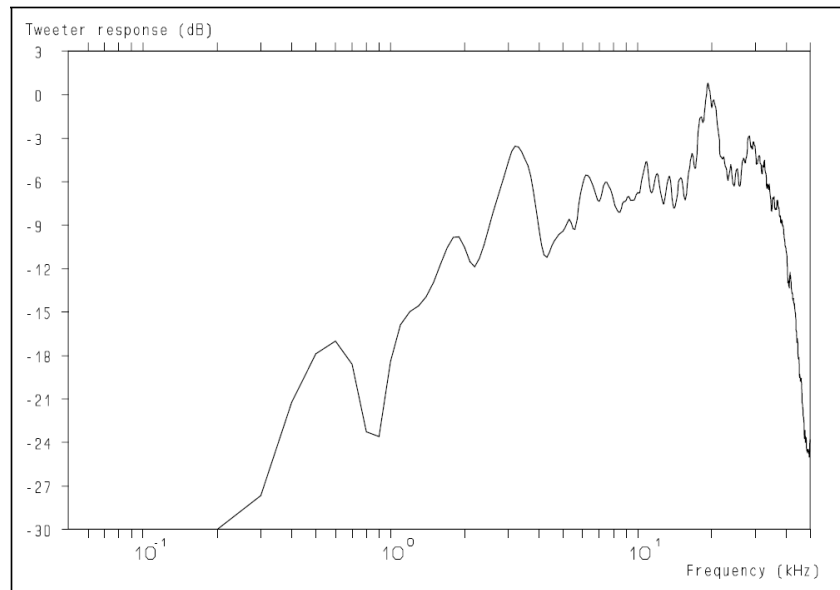
De frequentieresponsiecurve vertoont duidelijk meer variatie dan de invoercurve, die getoond is in fig. 2 van deel 1 en de terugberekende frequentieresponsiecurve als gebruik gemaakt wordt van de gemeten impulsresponsie van de tweeter, zoals getoond in fig. 5 van deel 1. Desondanks zijn de grootschalige eigenschappen nog steeds duidelijk zichtbaar.



Figuur 4: De impulsresponsie van de gesimuleerde microfoon, zoals afgeleid door deconvolutie van de kruiscorrelatiefunctie van fig. 2, gebruik makend van de gemeten impulsresponsie van de luidspreker, zoals getoond in fig. 1 van deel 1. Vergelijk met figuren. 3 en 6 van deel 1.

De impulsresponsie is echter amper onderscheidbaar van de impulsresponsies, zoals getoond in de figuren 3 en 6 van deel 1. Een zeer gedetailleerde vergelijking laat zien dat de impulsresponsie, zoals verkregen middels de kruiscorrelatiefunctie, een kleine verschuiving heeft, net voor het begin van de impuls en dat de staart een kleine variatie heeft. Deze imperfecties zijn afwezig in fig. 6 van deel 1. Globaal gesproken is het terugberekenen van de impulsresponsies uitstekend en is de achteruitgang, vergeleken met de responsie zoals getoond in fig. 6 van deel 1, verwaarloosbaar voor vrijwel alle toepassingen.

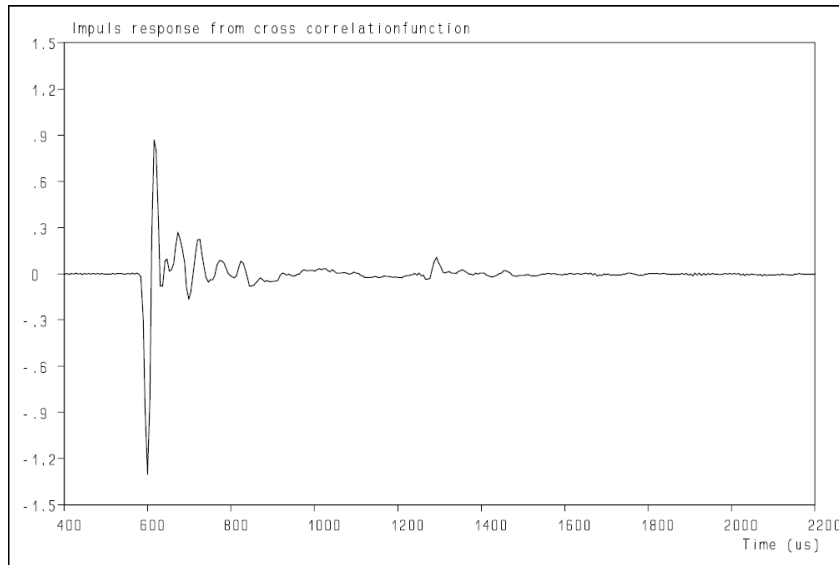
Zoals te zien is in fig. 4 neemt de variatie toe bij lagere frequenties. Dit kan, kwalitatief, begrepen worden door de slechter wordende statistiek voor lagere frequenties: het aantal perioden in het signaal van 5 sec. is lager voor lagere frequenties. Daarenboven neemt de signaalsterkte af bij lagere frequenties t.g.v. de eigenschappen van de tweeter, zoals te zien is in fig. 5 hieronder.



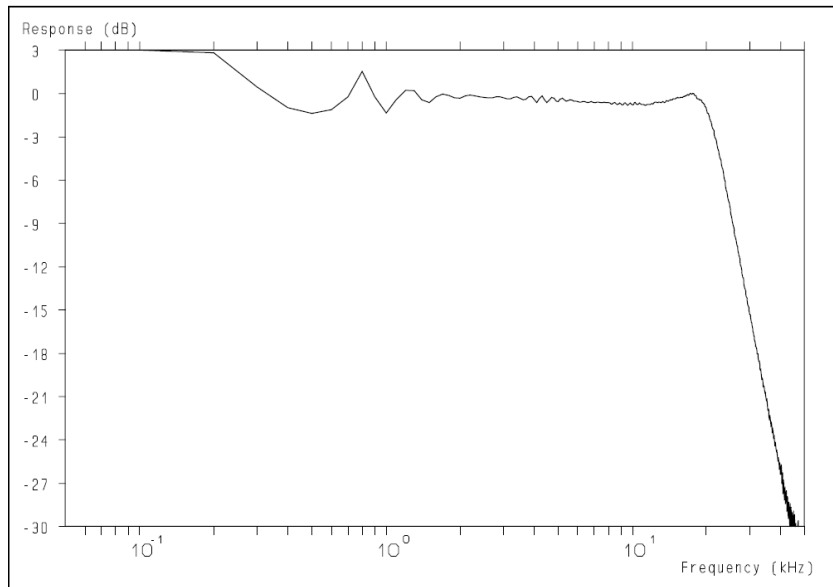
Figuur 5: *De modulus van de tweeterresponsie als functie van de frequentie, zoals berekend uit de gemeten impulsresponsie d.m.v. Fourier Transformatie. Let op de afname beneden 300 Hz.*

Fig. 5 toont de modulus van de tweeterresponsie als functie van de frequentie, zoals berekend uit de gemeten luidsprekerimpulsresponsie. Merk op dat de techniek, onderwerp van deze studie, gericht is op het bepalen van de impulsresponsie en niet op het optimaal vaststellen van de frequentieresponsie. Andere technieken zijn daar veel beter voor geschikt.

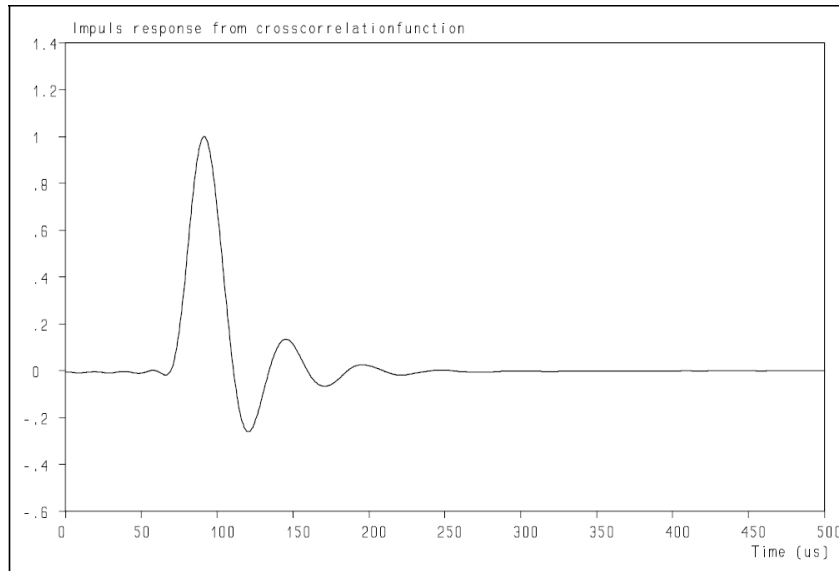
Een deel van de kleine imperfecties zou wellicht toe te schrijven zijn aan de statistische benadering, die inherent is aan het gebruik van Gaussisch verdeelde witte ruis voor het bepalen van de impulsresponsie. Het is mogelijk om de impulsresponsie van de luidspreker te bepalen door kruiscorreleren van de luidspreker gefilterde ruis en de uitsturende Gaussisch verdeelde witte ruis. Als dit wordt gedaan is het niet onlogisch om te veronderstellen dat de statistische variabiliteit hetzelfde patroon volgt als dat in het microfoon uitgangssignaal. Door deze luidspreker impulsresponsie te gebruiken i.p.v. de onafhankelijk gemeten impulsresponsie, zou een afname van de imperfecties in de resultaten voor de microfoon bereikt kunnen worden. Om deze veronderstelling te verifiëren is de luidspreker gefilterde ruis gekruiscorreleerd met het Gaussisch verdeelde witte ruissignaal, zoals getoond in fig. 6. Dit resultaat is vervolgens gebruikt als invoer voor het deconvolutiealgoritme en de resultaten daarvan staan in de figuren 7 en 8.



Figuur 6: De kruiscorrelatiefunctie tussen de uitsturende Gaussisch verdeelde witte ruis en de luidspreker gefilterde ruis, convergerend naar de impulsresponsie van de luidspreker. Vergelijk met fig. 1 van deel 1.

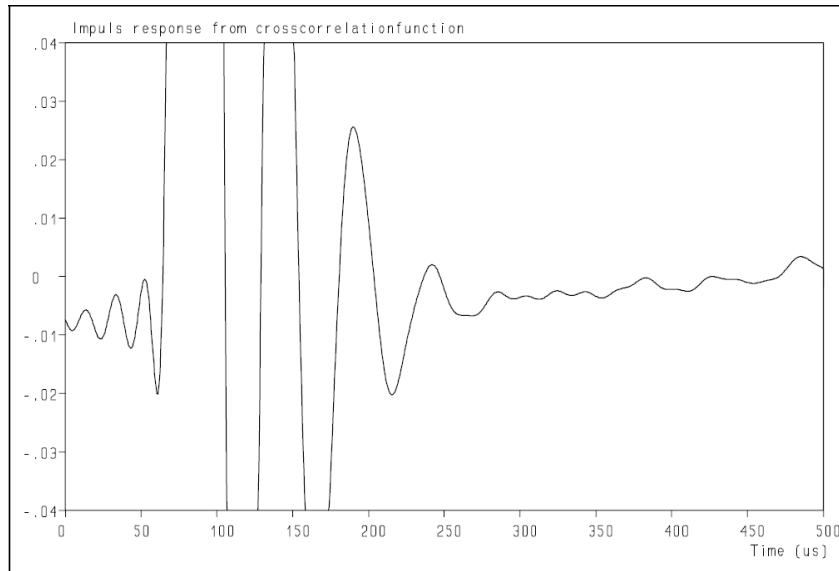


Figuur 7: De modulus van de frequentieresponsie van de gesimuleerde microfoon zoals berekend door deconvolutie van de kruiscorrelatiefunctie van de luidspreker + microfoon (zie fig. 2). I.p.v. de apart gemeten impulsresponsie (zie fig. 1 van deel 1), de kruiscorrelatie van de luidspreker gefilterde ruis en de Gaussisch verdeelde witte ruis (zie fig. 6) is gebruikt. Vergelijk met fig. 3.

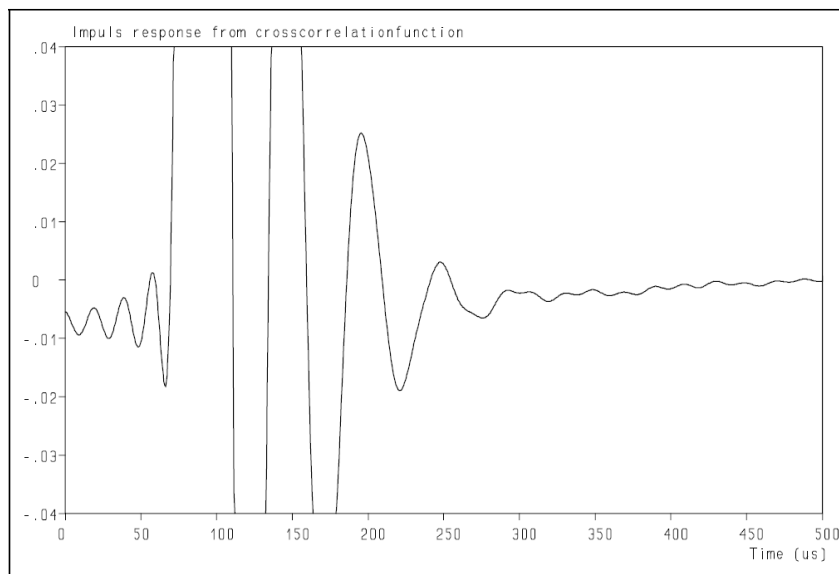


Figuur 8: *De impulsresponsie van de gesimuleerde microfoon zoals berekend door deconvolutie van de kruiscorrelatiefunctie van de luidspreker + microfoon (zie fig. 2). I.p.v. de apart gemeten impulsresponsie (zie fig. 1 van deel 1), is de kruiscorrelatie van de luidspreker gefilterde ruis en de Gaussisch verdeelde witte ruis (zie fig. 6) gebruikt. Vergelijk met fig. 4.*

Deze resultaten, getoond in figuren 7 en 8, laten inderdaad een vermindering van de variatie zien als deze worden vergeleken met die van figuren 3 en 4. Door de verticale schaal met een factor 25 te vergroten, worden de verschillen een stuk duidelijker, zoals blijkt uit de figuren 9 en 10. Dus een gedeelte van de variabiliteit kan in ieder geval worden toegeschreven aan de statistische eigenschappen van de meettechniek. Een ander voordeel is, natuurlijk, dat de impulsresponsie van de luidspreker meteen wordt bepaald. Dus er is geen noodzaak om te verifiëren of de eigenschappen van de luidspreker veranderd zijn sinds de oorspronkelijke meting en de meting van de MoT.



Figuur 9: De imperfecties van de impulsresponsie van fig. 4 zijn duidelijker te zien door de verticale schaal met een factor 25 te vergroten. Let op de verschuiving voor het begin van de impuls en de variabiliteit in de staart van de responsie.



Figuur 10: De imperfecties van de impulsresponsie van fig. 8 zijn duidelijker te zien door de verticale schaal met een factor 25 te vergroten. Merk op dat zowel de verschuiving voor het begin van de impuls als de variabiliteit in de staart van de responsie verminderd zijn, in vergelijking met fig. 9.

Een nadeel is echter dat de meetmicrofoon en de MoT in dezelfde ruimte zijn ondergebracht, dus de behuizingen van beide microfoons zouden elkaar kunnen beïnvloeden. Dit probleem kan op de volgende manier worden omzeild: daar de Gaussisch verdeelde witte ruis gegenereerd wordt middels een computerbestand, kan het worden herhaald zonder enige verandering. Dus het is mogelijk om de metingen aan de luidspreker + MoT en alleen de luidspreker kunnen kort na elkaar

worden uitgevoerd, waarbij toch geluidsvelden met identieke eigenschappen worden gebruikt. Dit voorkomt dat de microfoonbehuizingen elkaar kunnen beïnvloeden en de membranen van de MoT en de meetmicrofoon kunnen op dezelfde positie worden geplaatst. Tevens worden de actuele luidspreekereigenschappen bepaald, dus er hoeft niet te worden vertrouwd op meetresultaten van enige geleden.

4. Conclusies en toekomstig werk

De uitbreiding van de haalbaarheidsstudie heeft laten zien dat het gebruik van Gaussisch verdeelde witte ruis voor het bepalen van de impulsresponsie van microfoons een realistische mogelijkheid is, zelfs met korte signalen van 5 seconden.

De kruiscorrelatiefunctie, die op deze wijze is verkregen, komt dicht in de buurt van de directe convolutie van de impulsresponsies van de luidspreker en de microfoon.

De deconvolutie van de kruiscorrelatiefunctie, gebruik makend van een eerder gemeten impulsresponsie van de luidspreker, toont enige kleine onvolkomenheden, die samenhangen met de stochastische natuur van de meetmethode. Deze zijn het duidelijkst waarneembaar bij de lage frequenties van de frequentieresponsiecurve. Deze techniek is echter niet geoptimaliseerd voor het meten van de frequentieresponsiecurve, maar concentreert zich op het korte tijdinterval van de impulsresponsie.

De bepaling van de impulsresponsie van de microfoon, uitgaande van de kruiscorrelatiefunctie, gebruik makend van de eerder gemeten impulsresponsie van de luidspreker als invoer voor het deconvolutiealgoritme, is voldoende nauwkeurig voor de meeste praktische toepassingen.

De impulsresponsie van de luidspreker kan ook worden bepaald door het kruiscorreleren van de luidspreker gefilterde ruis met de Gaussisch verdeelde witte ruis. In dat geval wordt hetzelfde computerbestand gebruikt als voor de bepaling van de impulsresponsie van de microfoon. Het gebruik hiervan i.p.v. de eerder, apart gemeten, impulsresponsie van de luidspreker compenseert gedeeltelijk de statistische fluctuaties. Dit geeft een beter resultaat, zoals wordt aangetoond door een gedetailleerde analyse van de uitkomsten van de Monte Carlo simulatie.

Het gelijktijdige meten draagt echter het risico van wederzijdse beïnvloeding door de behuizingen van de meetmicrofoon en de MoT in zich. Door het uitvoeren van twee aparte metingen, die hetzelfde computerbestand van de Gaussisch verdeelde witte ruis gebruiken, kan dit probleem worden omzeild. Dit biedt ook de mogelijkheid om de membranen van de MoT en de meetmicrofoon op dezelfde positie te plaatsen. De kleine prijs, die betaald moet worden, is een extra meting. Een ander voordeel is dat de eigenschappen van de luidspreker onder vrijwel dezelfde omstandigheden worden vastgesteld. Deze kunnen niet noemenswaardig zijn veranderd tussen beide metingen.

Door langere ruissignalen te gebruiken kunnen, uiteraard, de statistische fluctuaties worden verminderd tot ieder gewenst niveau, ten koste van langere meettijd en hogere data verwerkingsvereisten. De statistische variaties verminderen met de vierkantswortel van de meettijd, derhalve de eisen voor de dataverwerking snel vergrotend.

Deze haalbaarheidsstudie heeft aangetoond dat het meten van de impulsresponsie van microfoons zeer goed gerealiseerd kan worden middels Gaussisch verdeelde witte ruis. Door het gebruik van deze techniek kan worden gegarandeerd dat de microfoon in het lineaire bereik wordt bedreven en er is geen specifieke apparatuur voor nodig. Er is derhalve geen enkele reden om deze informatie weg te houden van de eindgebruikers en (potentiële) gebruikers zouden moeten verlangen dat deze verstrekt wordt door de fabrikanten.

De volgende stappen omvatten een echte meting in een dode kamer, vergelijkbaar met degene die is gebruikt om de impulsresponsie van de luidspreker te meten. Het meest interessant is, natuurlijk, een microfoon te gebruiken met een bekende impulsresponsie om de resultaten te vergelijken. Een ander aspect is de ontwikkeling / optimalisatie van de software voor de gegevensverwerking. Hoewel de software, gebruikt in deze haalbaarheidsstudie, wiskundig gesproken, correct is, is deze niet geoptimaliseerd voor regelmatige toepassing.

Vanuit oogpunt van perceptie zou het zeer interessant zijn om te bestuderen of er een relatie is tussen de gehoormatige kwaliteit van microfoons en de impulsresponsie. Daar verschillende CD reconstructiefilters met verschillende impulsresponsies verschillende gehoormatige kwaliteitsbeoordelingen krijgen, zouden er ook verschillen tussen microfoons kunnen zijn, gerelateerd aan de temporele eigenschappen.

Dankbetuiging

De auteur wil vooral Ir. Menno van der Veen en Prof. Dr. Ir. Ronald van Zolingen bedanken voor hun kritische beoordeling van de concepten van zowel deel 1 als deel 2 en hun aanbevelingen voor verbeteringen, die zonder twijfel zeer geholpen hebben om de kwaliteit van deze artikelen te verhogen.

Referenties

1. Dr. Hans R.E. van Maanen, "Measuring the impulse response of microphones using noise: a feasibility study", <https://www.temporalcoherence.nl/cms/images/docs/MikeImpulse.pdf>
2. J.S. Bendat and A.G. Piersol, "Random Data, Analysis and Measurement Procedures", John Wiley & Sons, New York (1986)
3. H.R.E. van Maanen, "Retrieval of Turbulence and Turbulence Properties from randomly sampled Laser-Doppler Anemometry data with noise", (chapter 2), Ph.D. Thesis, Delft University of Technology (Delft, Netherlands), 1999

APPENDIX 1

Genereren van de gesimuleerde Gaussisch verdeelde witte ruis

Het bestand, dat 1 miljoen waarden van Gaussisch verdeelde witte ruis omvat, wordt gegenereerd door gebruik te maken van de willekeurige getallengenerator van de computer (RND). Deze levert echter getallen met een constante (rechthoekige) verdeling tussen 0 en 1. Deze verdeling dient te worden omgezet naar een Gaussische verdeling, hetwelk op de volgende wijze wordt gedaan:

- Roep de RND functie aan, deze geeft een waarde tussen 0 en 1 terug
- Trek 0.5 van deze waarde af, zodat het in het bereik van -0.5 tot +0.5 komt te liggen
- Roep wederom de RND functie aan, deze geeft een andere waarde tussen 0 en 1 terug
- Trek wederom 0.5 van deze waarde af, zodat ook deze in het bereik van -0.5 tot +0.5 komt te liggen en tel deze op bij de vorige waarde
- Herhaal bovenstaande procedure totdat 21 waarden in het bereik van -0.5 tot +0.5 zijn gesommeerd

De statistiek leert ons dat getallen, die op deze wijze zijn gegenereerd, een Gaussische verdeling hebben, zij het dat de variantie verschillend van 1 (één) is. Dit kan eenvoudig worden opgelost door normalisatie. De juiste waarde voor deze normalisatie is de vierkantswortel uit 1.75 vanwege het aantal sommaties (21) en de amplitude van de verdeling (0.5).

Iedere individuele waarde in het bestand wordt middels de onderstaande instructies verkregen:

Sigma0 = SQR(1.75)	Normalisatie constante
A = RND - 0.5	Roep de RND functie aan, trek 0.5 af van de waarde
FOR L = 1 TO 20	Herhaal dit 20 maal
A = A + RND - .5	Sommeer al deze waarden
NEXT L	
A = A / Sigma0	Normaliseer
STORE A	Sla het resultaat op in het bestand

Deze procedure wordt 1 miljoen maal herhaald en derhalve omvat het bestand 1 miljoen waarden van de Gaussisch verdeelde witte ruis met een variantie van 1 (één), welke kan worden gebruikt voor de Monte Carlo simulatie. De bemonsteringsfrequentie is gelijk aan de afspeelfrequentie van de D/A omzetter die gebruikt wordt. Een meer gedetailleerde beschrijving van de procedure van het genereren van een dergelijk bestand kan in ref. 3 worden gevonden.

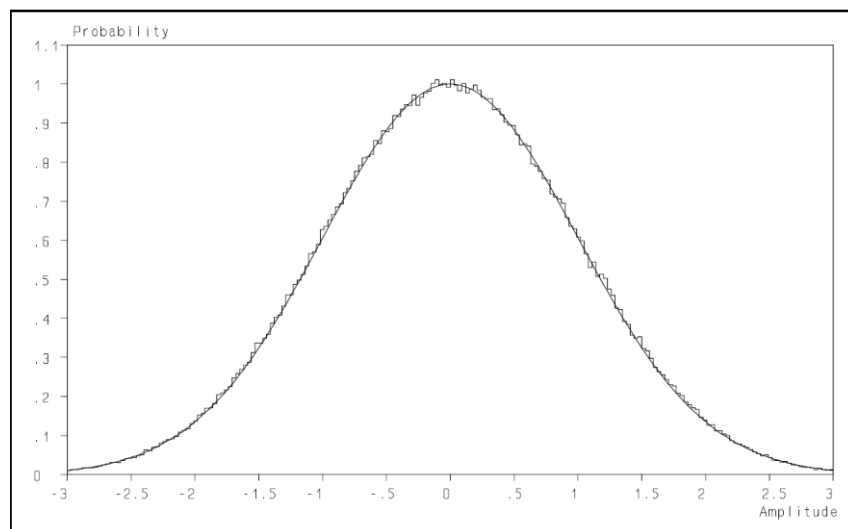
APPENDIX 2

Eigenschappen van de gesimuleerde Gaussisch verdeelde witte ruis

De resultaten en de geloofwaardigheid van de Monte Carlo simulatie zijn gebaseerd op de juistheid van de eigenschappen van het Gaussisch verdeelde witte ruis ingangssignaal, omdat de theorie gebaseerd is op de aanname dat het ruissignaal aan alle vereisten voldoet, die eraan gesteld zijn. De drie voornaamste eisen zijn:

- De kansverdeling van de ruis is Gaussisch.
- Het ruissignaal is volstrekt willekeurig, het dient geen ‘geheugen’ te hebben, met andere woorden: de correlatie tussen twee opeenvolgende waarden dient nul te zijn.
- De eis van volstrekte willekeurigheid betekent ook dat de correlatie tussen elk paar waarden nul dient te zijn.

Om na te gaan of de het ruisbestand, te gebruiken voor de invoer, voldoet aan de bovengestelde eisen, is het geverifieerd middels de gebruikelijke signaalanalysetechnieken. In fig. A-1 staat de niet-genormaliseerde kansverdeling (gekartelde lijn), samen met de theoretische Gaussische verdeling (getrokken lijn). (**N.B.** Niet genormaliseerd betekent dat de integraal van de verdeling niet gelijk is aan 1 (één), daarmee is het geen *kansdichtheidsverdeling*, maar, vanwege de eenvoud, is deze alleen geschaald op 1 (één) bij het maximum.)



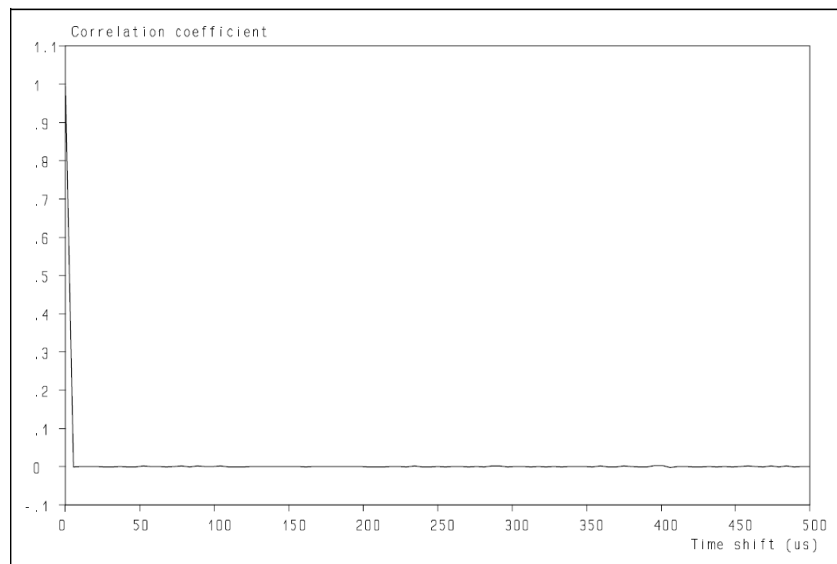
Figuur A-1: De niet-genormaliseerde kansverdeling van de ruis, zoals gebruikt in de Monte Carlo simulatie (gekartelde lijn) en de theoretische Gaussische kansverdeling (getrokken lijn).

N.B. De kansdichtheidsfunctie van de ruis is gekarteld omdat de berekening ervan ‘bins’ gebruikt (in dit geval 200) van een zekere breedte. Iedere waarde wordt, afhankelijk van deze waarde, toegevoegd als element aan een bin, Derhalve is het aantal elementen in iedere bin beperkt en dit leidt tot een zekere statistische fluctuatie, wat aanleiding geeft tot het gekartelde karakter.

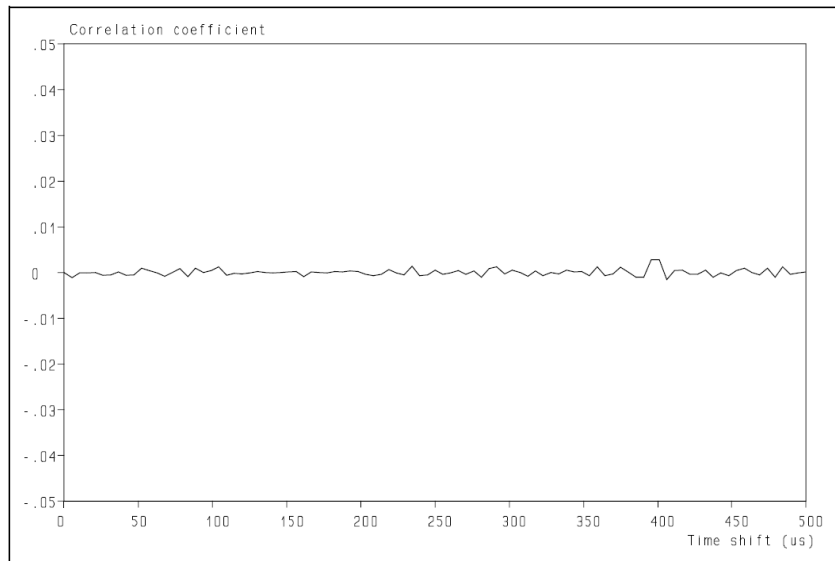
Het is duidelijk dat de kansdichtheidsfunctie de theoretische Gaussische verdeling zeer goed volgt, geheel in overeenstemming met de resultaten van ref. 3 en derhalve wordt voldaan aan de eerste vereiste.

De ruis moet volstrekt willekeurig zijn, dus ieder paar waarden van het ruisbestand dient volledig onafhankelijk te zijn. Met andere woorden: er dient geen relatie tussen de twee waarden te zijn, een waarde mag geen enkele relatie hebben tot *iedere* andere waarde. Dit kan worden geverifieerd door het berekenen van de autocorrelatiefunctie, welke 1 (één) moet zijn voor geen tijdsverschuiving (want iedere waarde moet volledig met zichzelf correleren) en 0 (nul) voor alle andere tijdsverschuivingen (in eenheden van de inverse bemonsteringsfrequentie).

De autocorrelatiefunctie wordt in fig. A-2 getoond en gedraagt zich hiermee in overeenstemming. Teneinde een meer gedetailleerd beeld van de correlatiecoëfficiënten te krijgen voor tijdsverschuivingen anders dan 0, is de waarde bij geen tijdsverschuiving op nul gesteld en is de verticale schaal met een factor 20 vergroot. Het resultaat staat in fig. A-3. Zoals te zien is, liggen de correlatiecoëfficiënten heel dicht in de buurt van nul, met enige resterende statistische fluctuaties, wat te verwachten is met een eindig aantal waarden (zelfs als dit aantal een miljoen is).



Figuur A-2: De autocorrelatiefunctie van de ruis, zoals gebruikt in de Monte Carlo simulatie.



Figuur A-3: *De autocorrelatiefunctie van de ruis, zoals gebruikt in de Monte Carlo simulatie, met een 20 maal vergrootte verticale schaal. Voor details: zie tekst.*

Derhalve kan worden geconcludeerd dat de ruis in het bestand, dat gebruikt wordt in de Monte Carlo simulatie, ook aan de tweede en derde vereisten voldoet. De ruis is daarom geschikt voor de simulatie en de conclusies van de simulatie kunnen worden gekwalificeerd als betrouwbaar.