Rudolf Rasch

Muziekinstrumenten

Hoofdstuk Twee: Geluid

Verwijzingen naar deze tekst graag op de volgende manier:
Rudolf Rasch, Muziekinstrumenten: Hoofdstuk Twee: Geluid
https://muziekinstrumenten.sites.uu.nl/
Voor opmerkingen, suggesties, aanvullingen en correcties: r.a.rasch@uu.nl

23 juli 2018

2.1 Geluid

Geluid is — informeel gedefinieerd — een snelle opeenvolging van luchtdrukvariaties. De afwijking die de momentane luchtdruk laat zien van de gemiddelde luchtdruk noemt men *geluiddruk*.[1] In het geval van geluid is er sprake van een voortdurende beweging van luchtdeeltjes, maar de gemiddelde positie van de luchtdeeltjes verandert niet. Er is dan sprake van een *trilling*. Deze trilling verplaatst zich door het medium lucht en deze zich verplaatsende trilling noemt men de *geluidgolf*. Geluid verwijdert zich dus voortdurend verder van de geluidbron. We noemen zo'n golf een *lopende golf*. Om geluid te blijven horen, moet de geluidbron geluid blijven maken.

De oscillatoren van muziekinstrumenten zijn ook in trilling, wanneer het instrument geluid maakt. Maar er is een belangrijk verschil met het geluid in de omringende lucht. De trilling van de oscillator verplaatst zich niet. Althans, deze *lijkt* zich niet te verplaatsen. De trilling van een muzikale oscillator (snaar of vel, of de luchtkolom in een blaasinstrument) is in feite het resultaat ofwel de som van trillingen die binnen de oscillator heen en weer lopen, van het ene uiteinde van de oscillator naar het andere. De trilling van zo'n oscillator wordt, hoewel deze zich niet voortplant buiten de oscillator, toch een golf genoemd, en wel een *staande golf*.

Muzikaal geluid heeft dus zijn oorsprong in de trilling van een oscillator die deel uitmaakt van een muziekinstrument. De trilling wordt overgebracht naar de lucht die het muziekinstrument omringt, een proces wat men *afstraling* noemt. De oscillator brengt niet altijd rechtstreeks de trilling over op de omringende lucht, er kan ook een resonantieblad tussen zitten (zoals bij een viool en een piano), dat in trilling wordt gebracht door de oscillator. Wanneer trillingen eenmaal in lucht voorkomen, kunnen ze zich voortplanten naar andere media, zoals het trommelvlies in het menselijk oor of de wanden van een ruimte, en deze op hun beurt weer in trilling brengen. Op de grens tussen verschillende media treedt naast geluidoverdracht dikwijls ook terugkaatsing (reflectie) op.

Als (a) een snaar in een vacuüm zou trillen, (b) de trillingen bij de uiteinden van de snaar perfect zouden worden teruggekaatst en (c) deze snaar bovendien bij zijn trilling geen enkele interne wrijving zou ondervinden, dan zou deze snaar eindeloos doortrillen. Normaal gesproken worden trillingen echter minder krachtig als de tijd voortgaat, een proces dat men *demping* noemt. Deze demping kan twee oorzaken hebben. In de eerste plaats kan demping veroorzaakt worden door inwendige wrijving of weerstand van de oscillator. We zullen deze vorm van demping de *inwendige demping* noemen. En in de tweede plaats kan demping optreden doordat de energie van de trilling overgebracht wordt op de omgeving van de oscillator (afstraling, voortplanting), wat we *uitwendige demping* zullen noemen. Bij een muziekinstrument is het noodzakelijk dat een gedeelte van de trillingsenergie op de omgeving wordt overgebracht; anders zouden we het muziekinstrument niet horen! Uitwendige demping is dus essentieel. Maar als de overdracht te snel gebeurt, is de toon te snel uitgeklonken (bij eenmalige excitatie), dan wel moeilijk op te bouwen (bij continue excitatie).

Geluid kan men (normaal gesproken) niet zien, maar wel visueel voorstellen. Dit gebeurt meestal met behulp van een grafiek met als horizontale as de tijd en als verticale as de geluiddruk op een bepaalde plaats. Horizontaal loopt dan midden door de grafiek de nullijn van de geluiddruk. De vorm van de curve van de geluiddruk noemt men de *golfvorm*. De grafiek kan men geluiddrukgrafiek als functie van de tijd noemen.

---

[1] In dit overzicht worden, in overeenstemming met het in de akoestische wereld gangbare gebruik, alle samenstellingen met het woord 'geluid' zonder verbindings-s geschreven. Hierbij wordt soms, maar bewust, afgeweken van de officiële spellingvoorschriften.

Een tweede voorstelling is mogelijk door de tijd te fixeren en de geluiddruk te bepalen volgens een bepaalde as in de ruimte waar het geluid klinkt. Wat men ziet is wederom de golfvorm, maar nu is het een geluiddrukgrafiek als functie van de plaats. Soms is de voorstellingen van geluid als functie van tijd het handigst, soms die als functie van plaats.

Ruwweg verdeelt men geluiden in een categorie geluiden met een periodieke golfvorm (dat wil zeggen, een golfvorm die bestaat uit een bepaald, steeds terugkerend fragment) en een categorie zonder periodieke golfvorm. Geluiden met een periodieke golfvorm noemt men *tonen*. Geluiden zonder periodiciteit in de golfvorm noemt men *ruis*.

2.2 De enkelvoudige toon

Geluiden met een periodieke golfvorm, de zogenaamde tonen, laten zich in twee categorieën onderverdelen. Een toon die in de geluiddruk/tijd-grafiek kan worden weergegeven door een sinusfunctie, wordt een *enkelvoudige toon* genoemd. (Variante benamingen zijn ‘sinustoon’ en ‘zuivere toon’, maar wij zullen deze termen vermijden.) Een toon die in de geluiddruk/tijd-grafiek door een niet-sinusvormige functie wordt weergegeven, kan altijd worden beschouwd als een som van een (klein of groot) aantal enkelvoudige tonen en wordt een *samengestelde toon* genoemd. (We zullen de variante benaming ‘complexe toon’ vermijden.)

De golfvorm van een enkelvoudige toon wordt in formule als volgt beschreven:

$$p(t) = a \sin 2\pi ft,$$

waarin: $p(t)$ — geluiddruk p als functie van tijd t (s),
a — amplitude, en
f — frequentie (Hz).

In deze formule liggen twee zeer belangrijke eigenschappen van enkelvoudige tonen besloten, namelijk de amplitude en de frequentie. De *frequentie f* vindt men achter de sinus-aanduiding en wordt daar altijd begeleid door 2π en door t. De frequentie geeft het aantal perioden per tijdseenheid (meestal de seconde) weer, dat wil zeggen, het aantal trillingen per seconde, en is een fysische eigenschap van geluid. In onze waarneming wordt het vertaald in toonhoogte: lage tonen hebben een lage frequentie, hoge tonen een hoge frequentie. De maat voor frequenties van tonen die per seconde worden weergegeven is de *hertz* (afgekort: Hz). (in Amerikaans Engels soms: cps = cycles per second.) De laagste hoorbare geluiden hebben een frequentie van ongeveer 20 Hz, de hoogste van ongeveer 20000 Hz. Om hogere frequenties aan te geven wordt vaak de kilohertz (kHz; 1000 Hz = 1 kHz) gebruikt, om al te grote getallen te vermijden.

De omvang van 20 Hz tot 20 kHz wordt wel de *hoorbare omvang* (*audible range*) genoemd. Geluid met hogere frequenties wordt *ultrasoon geluid* (*ultrasonic sound*) genoemd, geluid met lagere frequenties *infrasoon geluid* (*infrasonic sound*). In de muziek spelen ultra- en infrageluid geen rol.

De frequentie is in de geluiddrukgrafiek niet direct af te lezen. Wel direct af te lezen is de *periodeduur*, dat wil zeggen, de tijdsduur van het zich herhalende fragment. Aangezien frequentie het aantal perioden per seconde is, geldt het volgende eenvoudige verband tussen frequentie en periode:

$$f = \frac{1}{T}, \text{ en}$$

$$T = \frac{1}{f},$$

waarin: T — periodeduur (s).

In de akoestiek werkt men dikwijls met milliseconden (ms; 1000 ms = 1 s), om al te veel cijfers achter de komma te vermijden.

De *amplitude* is een factor die in de gegeven formule vóór de sinusfunctie staat. De amplitude geeft de sterkte van de trilling aan en is daarom bepalend voor de luidheid van het waargenomen geluid. De amplitude is in de geluiddrukgrafiek af te lezen als de grootste verwijdering van de gemiddelde geluiddruk. (Als de golfvorm symmetrisch rond de nullijn is, is er één amplitude. Als de golfvorm asymmetrisch is [nooit bij enkelvoudige tonen, maar wel mogelijk - zelfs eerder regel dan uitzondering - bij samengestelde tonen], dan moet men de amplitude specificeren als positieve amplitude [de grootste afwijking naar boven] en/of negatieve amplitude [de grootste afwijking naar beneden].) De eenheid van amplitude hangt af van het medium waarin het geluid zich bevindt. Met betrekking tot luchtgeluid wordt de amplitude gemeten in termen van geluiddruk, dus in pascal (newton per m²). Als het gaat om de trilling van de snaar, dan is de amplitude de grootste afwijking van de rustpositie en wordt dus in meters (of centimeters of millimeters) gemeten. Als het gaat om ‘elektrogeluid’ wordt de amplitude in volts gemeten.

Waarom is het eenvoudigste geluid een sinus? Het eenvoudigste trillende object of kortweg de eenvoudigste *oscillator* is een denkbeeldige puntmassa, aan een veer opgehangen. (De hier volgende uitleg betreft dus eigenlijk niet het geluid in de lucht, maar is abstract en kan worden toegepast zowel op een “vaste” oscillator als op een hoeveelheid lucht die op dezelfde manier kan worden beschreven.) De massa van de oscillator is m (in kg). Als gevolg van de veer is er bij elke uitwijking uit de ruststand een tegenkracht die de ruststand wil herstellen. Als het een ideale veer is, dan is die tegenkracht evenredig aan de uitwijking, dus $F = -kx$, waarin F de kracht (in newtons), x de uitwijking (in meters) en k de veerconstante (in N/m) is. Het min-teken geeft aan dat de kracht in richting tegengesteld aan de uitwijking is. Deze kracht zal de massa van de oscillator een beweging of, nauwkeuriger, een versnelling geven, volgens de natuurkundige definitie $F = ma$, waarin m de massa, en a de versnelling is. Beide uitgangspunten combinerende vinden we:

$$F = -kx = ma.$$

Aangezien de versnelling (a) de tweede afgeleide is van de uitwijking (x''; de snelheid is de eerste afgeleide, x'), geldt:

$$F = -kx = mx''.$$

Deze vergelijking, de basisvergelijking voor een trilling, wordt wel de *golfvergelijking* genoemd. Erin zijn samengevat de drie randvoorwaarden voor het bestaan van een trilling, namelijk (1) een afwijking van de rustsituatie (excitatie); (2) een elastisch medium (de ‘veerkracht’); en (3) een oscillator met massa en dus traagheid. De veerkracht zet de massa in beweging in de richting van de rusttoestand. Maar omdat de veerkracht blijft werken totdat de plaats van de ruststand bereikt is, zal de snelheid steeds toenemen. Dat betekent dat de massa van de oscillator bij het bereiken van de rustpositie een aanzienlijke snelheid heeft en door de rustpositie heen schiet naar de andere zijde. Ook nu treedt er weer veerkracht op, maar deze zal nu de beweging afremmen. Op het moment dat de snelheid nul is geworden, bevindt de massa zich aan de andere zijde van de rustpositie en zal de aanwezige veerkracht de massa weer naar het midden terug trekken. Met andere woorden, er ontstaat een op-en-neergaande beweging rond de evenwichtspositie in het midden. Kortom: een trilling.

Welke vorm heeft deze trilling, als we die als een functie van de tijd willen beschrijven? We keren terug naar bovenstaande golfvergelijking en formuleren die nu als volgt:

$$x''(t) = -\frac{k}{m}\, x(t).$$

We moeten dus een functie zoeken, waarvan de tweede afgeleide dezelfde vorm heeft als de eigenlijke functie, alleen vermenigvuldigd met een constante factor en bovendien omgekeerd, dat wil zeggen, positief-negatief verwisseld. De enige functie die hieraan voldoet is een cosinusfunctie. Hiervoor geldt namelijk:

$$x(t) = \cos t$$

$$x'(t) = -\sin t$$

$$x''(t) = -\cos t.$$

We moeten tevens achter de cosinus voor de tijdsfactor een bepaalde constante factor invoegen, zodat uiteindelijk de volgende bewegingsvergelijking ontstaat:

$$x(t) = \cos \sqrt{\frac{k}{m}}\, t.$$

De tweede afgeleide van deze functie heeft de vorm:

$$x''(t) = -\frac{k}{m} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}\, t.$$

En daarmee is aan de eisen van de golfvergelijking voldaan.

Eerder in deze paragraaf werd de golfvorm van een enkelvoudige toon als volgt omschreven:

$$x(t) = a \sin 2\pi f t.$$

De golfvorm verandert uiteraard niet als we die als cosinus beschrijven:

$$x(t) = a \cos 2\pi f t.$$

Als we die in overeenstemming proberen te brengen met de bewegingsvergelijking $x(t) = \cos \sqrt{\frac{k}{m}}\, t$, dan moeten de argumenten van de cosinusfuncties gelijk zijn, ofwel

$$\sqrt{\frac{k}{m}}\, t = 2\pi f t.$$

Eenvoudige algebraïsche manipulatie leert ons dat dan deze trilling een frequentie f moet hebben van

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \, .$$

Met de massa van de oscillator en veerconstante ligt de frequentie van de trilling dus vast. (De amplitude van de trilling is afhankelijk van de uitwijking in de beginsituatie.) Aangezien het inzichtelijker is om de frequentie in de bewegingsformule te hebben dan de factor $\sqrt{\frac{k}{m}}$, vervangen we deze factor door $2\pi f$, dus:

$$x(t) = \cos 2\pi ft.$$

Dat er een cosinusfunctie uit de golfvergelijking voortvloeit (en bijvoorbeeld geen sinusfunctie), hangt samen met onze keuze van het beginmoment, met andere woorden, waar we t=0 leggen. In onze voorstelling begonnen we met maximale uitwijking; die correspondeert met het gegeven dat cos 0 = 1, d.w.z. ook maximaal. Aangezien het t=0-punt arbitrair is, kunnen we de (co)sinusfunctie naar believen over de tijdas verschuiven. In formule gebeurt dit door toevoeging van een extra term, die we de *fase* noemen:

$$x(t) = \cos (2\pi ft + \varphi),$$

waarin: φ — fase (in radialen of graden, waarbij π rad = 180º).

De formule wordt compleet wanneer we er een factor voor de amplitude voor de cosinus plaatsen:

$$x(t) = a \cos (2\pi ft + \varphi).$$

De sinusvormige beweging van een enkelvoudige massa wordt ook wel de *harmonische beweging* (*simple harmonic motion*) genoemd.

De zojuist uitgewerkte formule geldt voor de beweging van trillende deeltjes. Als geluid wordt beschreven in termen van luchtdrukfluctuaties, dan geldt dezelfde formule, alleen met p (geluiddruk) als variabele:

$$p(t) = a \cos (2\pi ft + \varphi).$$

2.3 De samengestelde toon

Een oscillator die we ons voor kunnen stellen als een puntmassa kan slechts op één wijze trillen en wel zoals boven afgeleid. De trilling is dus altijd sinusvormig en het geluid daarvan is een enkelvoudige toon. Zulke oscillatoren zijn echter hoogst zeldzaam. We maken de zaken wat realistischer door ons een oscillator voor te stellen die uit twee puntmassa's bestaat. Deze blijkt te kunnen trillen op twee manieren, elk met een eigen frequentie. Deze twee manieren noemt men *modi* (meervoud van het Latijnse enkelvoud *modus*). Amplitude en onderlinge fase van de twee modi zijn afhankelijk van de begintoestand van de trilling. Als beide massa's gelijk zijn, blijkt de ene modus de dubbele frequentie van de andere modus te hebben.

Het gegeven beeld voor een dubbele puntmassa laat zich generaliseren voor reële oscillatoren, die we ons kunnen voorstellen als een samenstelling van een zeer groot aantal gelijkwaardige puntmassa's. Een snaar kan men zich bijvoorbeeld voorstellen als een kralensnoer van puntmassa's en hetzelfde geldt voor de luchtkolom in een blaasinstrument. Werkelijke oscillatoren hebben dan ook een zeer groot, in theorie oneindig aantal modi. Als de puntmassa's eendimensionaal gerangschikt zijn (zoals in snaren en luchtkolommen bij benadering het geval is), zijn deze modi wat men noemt *harmonisch*, dat wil zeggen dat de frequenties van de modi gehele veelvouden zijn van de grondfrequentie. De grondfrequentie is de frequentie van de laagste of eerste modus, die ontstaat wanneer alle puntmassa's zich tegelijk in gelijke richting bewegen. Wanneer modi harmonisch zijn, noemt men ze kortweg *harmonischen* (meervoud van *harmonische*). Hiermee zijn we terug bij de samengestelde tonen die door muziekinstrumenten worden geproduceerd.

De modi van een oscillator zijn in feite mogelijke trillingspatronen die de oscillator kan aannemen. Welke modi werkelijk tot klinken gebracht worden, hangt in de eerste plaats af van de *excitatie* (hoe wordt de trilling op gang gebracht en in stand gehouden?) en in de tweede plaats van de *afstraling* (hoe wordt de trilling aan de omgeving van het instrument, de omringende lucht, afgegeven?). Een modus is een passief iets en wordt ook wel aangeduid met het woord *resonantie*: het vermogen om in een bepaalde frequentie (mee) te kunnen trillen. Bovendien is er nog iets anders. Van strikt harmonische modi kan men slechts spreken als de oscillator ideaal eendimensionaal is, wat in de praktijk niet voorkomt, omdat elke oscillator een bepaalde dikte heeft, hoe gering ook. Een zeer dunne, lange, soepele snaar onder spanning komt nog het dichtst bij de ideale oscillator.

De afwijking van de ideale oscillator heeft tot gevolg dat de frequenties van de modi niet precies harmonisch zullen zijn. Naarmate de relatieve dikte van de oscillator groter is, zal de afwijking van het strikt harmonische patroon groter zijn. Met andere woorden, de resonanties van een dergelijke oscillator zijn niet strikt harmonisch meer, al lijkt het resonantiepatroon nog steeds vrij veel op een harmonische reeks. Een resonantiepatroon dat niet heel sterk afwijkt van het harmonische model noemt men wel *inharmonisch*. Een bepaalde, al of niet zeer kleine inharmoniciteit is eigen aan alle bestaande akoestische oscillatoren, inclusief de muziekinstrumenten. (De elektrofonen laat ik hier buiten beschouwing.) Bij het overblazen op blaasinstrumenten en bij het spelen van flageoletten op strijkinstrumenten spreekt men de hogere resonantiemodi van de oscillator aan. Daarbij moet men nooit vergeten dat de frequentie van de overgeblazen tonen of flageoletten nooit exacte veelvouden van de grondfrequentie van de snaar of de luchtkolom zijn, maar eerder in de buurt daarvan liggen.

Ervan uitgaande dat een samengestelde toon ideaal harmonisch is, kan deze beschreven worden door de volgende formule van de geluiddruk:

$$p(t) = \sum_{n} a_n \sin(2\pi n f_1 t + \varphi_n),$$

waarin:
- $p(t)$ — geluiddruk p als functie van tijd t (s),
- n — rangnummer (harmonische nummer) van de component,
- a_n — amplitude van de n-de component,
- f_1 — frequentie van de grondtoon (Hz), en
- φ_n — fase van de n-de component (radialen).

In woorden: Een samengestelde toon bestaat uit een groot aantal componenten (elke component afzonderlijk sinusvormig of enkelvoudig), die we nummeren van 1 tot oneindig. Het rangnummer wordt ook wel het *harmonische nummer* genoemd. De frequentie van de eerste component (de eerste harmonische) noemen we de *grondfrequentie*. De frequentie van elke component is gelijk aan de grondfrequentie vermenigvuldigd met het harmonische nummer. Veel gebruikte voorbeeldfrequenties van een samengestelde toon zullen zijn: 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, ... Hz, voor de grondtoon en de vijf volgende harmonischen. De frequenties van de componenten van een harmonische samengestelde toon liggen dus altijd vast wanneer de frequentie van de grondtoon gegeven is. Andere mogelijkheden zijn er niet.

De amplitude en de fase van de componenten van een harmonische toon zijn in beginsel vrij, dat wil zeggen, ze volgen niet uit de definitie van een zodanige toon. Bij elke realisatie van een harmonische toon nemen de amplitudes en fases van de componenten natuurlijk wel bepaalde waarden aan, die doorgaans bepaald worden door de omstandigheden waarin de toon gegenereerd wordt en de plaats en de wijze waar(op) de toon bemeten en bestudeerd wordt.

In de akoestiek is het gebruikelijk om de samenstelling van samengestelde tonen weer te geven met behulp van een grafiek met als horizontale as de frequentie en als verticale as hetzij de amplitude (gewoonlijk), hetzij de fase (zelden). Elke component krijgt, afhankelijk van zijn frequentie, een plaats in de grafiek als een verticale lijn, waarvan de hoogte wordt bepaald door de amplitude (of de fase). Een beschrijving van een toon (algemener: een geluid) in termen van frequenties en amplitudes (eventueel: fases) noemt men het *spectrum* van die toon (dat geluid). Aangezien een samengestelde toon bestaat uit een reeks van discrete frequentiecomponenten, zal het spectrum van een dergelijke toon uit een aantal lijnen bestaan; we spreken dan van *lijnenspectrum*.

Omdat de frequenties van de componenten van een harmonische toon steeds gehele veelvouden zijn van de grondfrequentie van die toon, zullen de periodeduren van die componenten steeds een geheel deel van de periode van de grondtoon zijn, weer te geven door de formule:

$$T_n = \frac{T_1}{n},$$

waarin: T_n — periode van de n-de harmonische, en
T_1 — periode van de eerste harmonische ($= \frac{1}{f}$).

In de periode van de grondtoon gaat dus steeds een geheel aantal periodes van de andere componenten. Daaruit volgt dat de golfvorm van een harmonische toon zichzelf na elke periode weer herhaalt, d.w.z. *periodiek* is. Dit verband is omkeerbaar: een harmonische toon heeft altijd een periodieke golfvorm, een periodieke golfvorm impliceert altijd een harmonische toon.

De golfvorm van een samengestelde toon wordt bepaald door de optelling van de componenten van de toon, volgens het beginsel van de *lineaire superpositie*, waaraan geluidgolven gewoonlijk onderworpen zijn. Het genoemde beginsel geeft aan dat de geluiddruk van de som van twee geluiden gelijk is aan de som van de twee geluiddrukken afzonderlijk.

Terwijl een enkelvoudige toon slechts één vorm voor de geluiddrukcurve kent (namelijk de sinusvorm), is er voor een samengestelde toon een oneindigheid aan vormen mogelijk. Elke andere combinatie van amplitudes en fases geeft weer aanleiding tot een andere vorm. En aangezien zowel amplitude als fase (fase nog meer dan amplitude) van de componenten aanzienlijk kunnen veranderen in de voortplanting van het geluid (afstraling, weerkaatsing), is de golfvorm van een samengestelde toon zeer variabel, afhankelijk van de plaats van opmeting. Het proces van optelling van componenten waardoor de golfvorm van een samengestelde toon ontstaat, noemt men *fouriersynthese*.[2] Men kan niet alleen elke combinatie van amplitudes en fases van componenten in een samengestelde golfvorm omzetten, men kan ook andersom elke periodieke

[2] Naar de Franse natuurkundige Joseph Fourier (1768-1830).

geluidgolf analyseren als de optelling van een reeks harmonische componenten met bepaalde amplitudes en fases, een proces dat men *fourieranalyse* noemt. Fourier gaf als eerste de wederkerigheid aan van de beschrijving van trillingsverschijnselen in termen van frequentie en tijd, welke wederkerigheid men aanduidt als de *stelling van Fourier*. De stelling van Fourier verbindt dus frequentie- en tijddomein met elkaar.

Bij een continue excitatie wordt er voortdurend energie aan het trillende systeem, de oscillator, toegevoegd en dit zal een continue toon tot gevolg hebben. Omdat de excitatie constant blijft en de oscillator evenmin verandert, zal er tussen excitator en oscillator na kortere of langere tijd na de inzet altijd een vast, blijvend bewegingspatroon, een *bewegingsregime* optreden, dat altijd een cyclisch patroon heeft, en daarom ook periodiek is. Continue excitatie leidt altijd tot een periodieke golfvorm en daarmee tot een harmonisch samengestelde toon.

2.4 GELUIDVOORTPLANTING

Geluid heeft de eigenschap zich binnen een medium voort te planten. Deze voortplanting betreft niet de bewegende deeltjes zelf, maar de beweging van de deeltjes. Men spreekt in dit verband, zoals al gezegd, van een *geluidgolf*. Men onderscheidt twee vormen van geluidgolven. Bij *transversale golven* staat de bewegingsrichting van de trillende deeltjes loodrecht op de voortplantingsrichting. Een voorbeeld hiervan is de trilling van een snaar: de geluidgolf plant zich voort in de lengterichting van de snaar, terwijl de trillende deeltjes loodrecht op de lengterichting bewegen. Trillingen van platen en vellen zijn normaal gesproken ook transversaal. Bij *longitudinale* golven is de bewegingsrichting van de trillende deeltjes dezelfde als de voortplantingsrichting. Deze situatie doet zich voor bij de trilling van vloeistoffen en gassen, waaronder luchtgeluid. De trilling neemt de vorm aan van een afwisseling van een verdichting van het medium (*compressie*) en verdunning (*rarefactie*).

De voortplantingssnelheid van een longitudinale geluidgolf in een onbegrensd medium, zoals een lopende golf in het vrije veld, wordt gegeven door de volgende formule:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} ,$$

waarin: v — voortplantingssnelheid van het geluid (m/s),
B — compressiemodulus van het medium (Pa), [3] en
ρ — dichtheid van het medium (kg/m^3).

Voor de berekening van de geluidsneldheid in lucht wordt vaak gebruik gemaakt van een afgeleide vorm van bovenstaande formule, die beknopt kan worden weergegeven als:

$$v = 404\sqrt{T} ,$$

waarin T — absolute temperatuur in K (Kelvin; 0º Celsius = 273 K), en

De snelheid van het geluid in de lucht is dus niet afhankelijk van de luchtdruk, maar slechts van de temperatuur, en wel evenredig met de wortel uit de absolute temperatuur. Bij de gangbare temperaturen is het

[3] De compressiemodulus is een maat voor de weerstand van het medium tegen samendrukking. De modulus is groot voor een moeilijk samendrukbaar medium, klein voor een makkelijk samendrukbaar medium

verband nagenoeg linear. Eén graad temperatuurstijging levert dan ongeveer 0,6 m/sec extra snelheid op. Voor lucht bij kamertemperatuur (20º) kan de geluidsnelheid op 344 m/s worden gesteld, globaal gelijk aan 1000 m per 3 s. De variatie van de geluidsnelheid als functie van de temperatuur is van belang bij het bespelen van blaasinstrumenten: als de temperatuur stijgt wordt de toon hoger. Hetzelfde geldt voor een pijporgel, wanneer door stoken in de winter de temperatuur zodanig varieert dat dit in de toonhoogte hoorbaar is.

Enkele waarden van de geluidsnelheid in lucht en andere gassen en water zijn:

medium	temperatuur (ºC)	geluidsnelheid (m/s)
lucht	0	331
lucht	10	338
lucht	20	344
lucht	30	350
helium	20	999
waterstof	20	1330
water	0	1402
water	20	1482

Uit deze tabel zien wij dat de geluidsnelheid in lucht relatief laag is. In helium is de snelheid bijna driemaal zo hoog, welke eigenschap soms als effect wordt gebruikt: door helium in te ademen (geheel onschuldig) worden de resonanties van de zangstem veel hoger en klinkt een mannenstem als een hoge vrouwenstem.

De longitudinale geluidsnelheid in een vast of vloeibaar onbegrensd medium wordt berekend met de eerder gegeven basisformule. Voor enkele materialen kunnen de volgende gegevens worden gebruikt:

materiaal	dichtheid (kg/m^3)	geluidsnelheid (m/s)
messing	8600	3400
brons	8800	4700
koper	8900	3570-4700
nieuw zilver[4]	8400	4760
glas	2600	4000-4500
ijzer	7900	5130
gietijzer	7100	4600 (3600-5200)
smeedijzer	7600	5100
zilver	10600	2600
staal	7700	6000
aluminium	2700	6300

Voor de snelheid van een transversale golf over een snaar geldt:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}},$$

[4] "Nieuw zilver" (Engels *German silver* of *new silver*; Duits *Neusilber*) is een legering van uit koper, nikkel en zink.

waarin: v — voortplantingssnelheid van het geluid (m/s),
F — spanning van snaar (N), en
μ — lineaire dichtheid (gewicht per lengte-eenheid, kg/m).

Als de spanning van de snaar wordt veroorzaakt door er een gewicht aan te hangen, dan geldt:

$$F = mg,$$

waarin F — spanning,
m — massa in kg, en
g — versnelling door de zwaartekracht = 9.8 m/s^2.

Met de geluidsnelheid samen hangt de *golflengte*, de afgelegde weg tijdens één periode. Uit de constatering dat snelheid afgelegde weg per tijdseenheid is volgt:

$$v = \lambda/T \quad \text{of:}$$

$$\lambda = Tv \quad \text{of:}$$

$$\lambda = v/f,$$

waarin: λ — golflengte (m),
T — periodeduur (s),
c — geluidsnelheid (m/s), en
f — frequentie (s^{-1}).

Voor geluid dat zich door de lucht voortplant, geldt

$$\lambda = 344/f,$$

hetgeen voor een toon van 100 Hz (ongeveer *As*) en golflengte van vrijwel 3,5 m betekent, voor één van 440 Hz (*a1*) ongeveer 80 cm, voor een toon van 1000 Hz (ongeveer *b2*) 35 cm.

De begrippen voortplantingsrichting, geluidsnelheid en golflengte zijn zeer belangrijk bij het begrijpen van de trillingen van snaren en pijpen.

2.5 Geluiddruk en geluidniveau

Terwijl de frequentie de subjectieve gewaarwording van toonhoogte bepaalt, hangt de luidheid van een geluid samen met de geluiddruk en de intensiteit. We gaan uit van de geluiddrukcurve. De gemiddelde geluiddruk is geen bruikbare maat omdat deze altijd gelijk aan nul is. De maximale waarde die bereikt kan worden, de amplitude, is een maat die alleen bruikbaar is om de geluiddruk te vergelijken van tonen met dezelfde golfvorm. Tonen met dezelfde intensiteit en luidheid kunnen uiteenlopende golfvormen en amplitudes hebben, terwijl tonen met gelijke amplitude geheel verschillend van intensiteit kunnen zijn. Deze verschillen zijn een gevolg van het feit dat de amplitude slechts één moment van de golfvorm betreft en alle uitwijkingen met minder geluiddruk negeert.

De problemen met de gemiddelde geluiddruk en de amplitude worden omzeild door gebruik te maken van de zgn. *Root-Mean-Square* (RMS), de wortel van het gemiddelde van het kwadraat. Op geluiddruk toegepast betekent dat het volgende. Stel een enkelvoudige toon:

$$p = a \sin 2\pi ft;$$

het kwadraat van de geluiddruk is dan:

$$p^2 = \mathrm{S}(p) = a^2 (\sin 2\pi ft)^2;$$

de gemiddelde waarde daarvan (over de tijd gemeten) is de *Mean-Square* of MS:

$$\mathrm{gem}\ (p^2) = \mathrm{MS}\ (p) = \tfrac{1}{2}a^2;$$

de wortel daaruit is de *Root-Mean-Square* of RMS:

$$\mathrm{RMS}\ (p) = \frac{a}{\sqrt{2}}.$$

In woorden: De RMS van de geluiddruk van een enkelvoudige toon is gelijk aan de amplitude gedeeld door de wortel van 2. De bepaling van de RMS van de som van twee enkelvoudige tonen, met geluiddrukfuncties *p* en *q* en amplitudes *a* en *b*, is ingewikkelder, vooral als ze dezelfde frequentie hebben. Bij ongelijke frequenties geldt dat de twee MSs van de geluiddrukken kunnen worden opgeteld. Om de RMS van de som te bepalen trekt men de wortel uit de gesommeerde MS. Als de frequentie van de tonen hetzelfde is, dan is het onderlinge faseverschil (φ) van belang. We geven hier het volgende overzicht:

- (1) ongelijke frequentie RMS (p+q) $= \sqrt{\tfrac{1}{2}a^2 + \tfrac{1}{2}b^2}$;
- (2) gelijke frequentie
    - (2a) ongelijke amplitude $= \sqrt{\tfrac{1}{2}a^2 + \tfrac{1}{2}b^2 + ab\cos\varphi}$;
    - (2b) gelijke amplitude ($a = b$) $= a\ \sqrt{1+\cos\varphi}$;
        - (2b-1) gelijke fase (φ=0) $= a\ \sqrt{2}$;
        - (2b-2) tegenfase (φ=π) = 0;
        - (2b-3) gemiddelde fase (φ=π/2) = a.

Geval (1) kan gegeneraliseerd worden naar de samengestelde toon. Als:

$$p(t) = \sum_n a_n \sin (2\pi f_n t + \varphi_n),$$

dan:

$$\mathrm{RMS}\ (p) = \sqrt{\tfrac{1}{2}\sum_n {a_n}^2}.$$

Geluiddrukken worden gemeten in pascals (newton/meter²) en hetzelfde geldt voor de RMS.

Als we de sterkste en de zwakste geluiden uit onze omgeving opmeten, dan blijkt de geluiddruk (als RMS opgemeten) van de sterkste geluiden vele miljoenen malen groter te zijn dan die van de zwakste. Bovendien blijkt dat de geluiddrukverhoudingen veel belangrijker zijn dan geluiddrukverschillen. (Merk de analogie op met frequentieverhoudingen tegenover frequentieverschillen.) Om deze redenen wordt de geluiddruk van een geluid dikwijls logaritmisch getransformeerd, en wel na vergelijking met de geluiddruk van een referentiesignaal of anker:

$$L = 20 \log \frac{\mathrm{RMS}_s}{\mathrm{RMS}_r} \qquad \text{dB SPL},$$

waarin: L — geluiddrukniveau (dB SPL),
dB — decibel,
SPL — Sound Pressure Level (Engels voor geluiddrukniveau),
RMS_s — RMS van de geluiddruk van het te meten signaal, en
RMS_r — RMS van de geluiddruk van het referentiesignaal of anker.

Over deze formule valt het volgende op te merken. Als de geluiddrukmaat logaritmisch is getransformeerd spreken we van *geluiddrukniveau*. (In het algemeen reserveren we de aanduiding “niveau” voor een logaritmische maat.) Aangezien de logaritmische transformatie wordt toegepast op de verhouding tussen twee grootheden met dezelfde dimensie (namelijk N/m² of pascal), heeft de logaritmische transformatie (het niveau) geen dimensie, evenmin als de verhouding zelf. De *bel* is een algemene maataanduiding voor logaritmische transformaties van het type “L= log a/b”.[5] Als we de logaritmische waarde met 10 vermenigvuldigen ontstaat de *decibel*. (Vgl. meter en decimeter.) De extra factor 2 in bovengegeven formule hangt samen met de “SPL”.

Wat betreft het referentiesignaal of anker in bovengegeven formule zijn er twee mogelijkheden. Indien het om algemene aanduidingen gaat (“Dit vliegtuig produceert 140 dB”; “Het achtergrondniveau is hier 25 dB”), wordt de volgende geluiddruk als anker impliciet aangenomen:

$$\mathrm{RMS}_r = 2{\times}10^{-5}\ \mathrm{N/m^2},$$

wat bij benadering de geluiddruk (RMS) is van de zwakste hoorbare toon van 1000 Hz. Het geluiddrukniveau van het referentieniveau is per definitie 0 (nul), aangezien in dat geval geldt dat s=r, dus $\mathrm{RMS}_s/\mathrm{RMS}_r$=1 en log 1 = 0. De geluiddrukniveaus (korter: geluidniveaus, nog korter: niveaus) ten opzichte van dit (internationaal afgesproken) referentiesignaal noemt men wel ‘absolute niveaus’ (al impliceert de dB altijd een vergelijking). Praktijkwaarden van deze absolute niveaus liggen meestal tussen de 30 en de 120 dB. Spraak bevindt zich op 60 tot 70 dB, muziek varieert van 50 tot 90 dB, verkeerslawaai en dergelijke van 60 tot 100 dB, enzovoorts. Negatieve dB waarden zijn in deze situatie zeer ongebruikelijk. Aangezien een niveauverschil van 1 dB maar net hoorbaar is, worden dB slechts zeer zelden met decimalen achter de komma gegeven.

Men kan als referentiesignaal ook een in een bepaald apparaat of in een bepaald onderzoek gekozen waarde kiezen. Een voorbeeld ervan is de VU-meter (VU=volume unit) op een bandrecorder. Alle niveaus worden dan uitgedrukt ten opzichte van het 0 dB niveau van de referentie. In deze situatie zijn negatieve waarden net zo gewoon als positieve.

De *intensiteit* van een geluid is de hoeveelheid energie die per tijdseenheid door een oppervlakte-eenheid stroomt in de richting loodrecht daarop. Intensiteit wordt uitgedrukt in watt/m². Intensiteit is bij gelijkblijvende golfvorm recht evenredig aan het kwadraat van de gemiddelde geluiddruk en daarmee aan de MS. Als

[5] Genoemd naar de Schots-Amerikaanse uitvinder Alexander Graham Bell (1847-1922).

verschillende geluiden tegelijk klinken, mag men de intensiteiten optellen om de totale intensiteit te berekenen. (Alleen niet bij tonen met gelijke frequentie.) Intensiteitswaarden kunnen, net als geluiddrukwaarden, een factor van een miljoen of meer verschillen, zodat ook hier logaritmische transformatie vaak wordt toegepast, waarbij het *intensiteitsniveau* ontstaat. De formule hiervoor luidt:

$$L = 10 \log \frac{I_s}{I_r} \text{ dB IL},$$

waarin: L — intensiteitsniveau,
I_s — intensiteit van het te bemeten signaal,
I_r — intensiteit van het referentiesignaal, en
dB IL — Intensity Level.

(Omdat de intensiteit recht evenredig is aan het kwadraat van de RMS-geluiddruk, is het (wiskundig) noodzakelijk dat in de formule voor het geluiddrukniveau een factor 2 aanwezig is, die in de formule voor het intensiteitsniveau ontbreekt.)

Net als bij het geluiddrukniveau kan men met absolute en relatieve intensiteitsniveaus werken. Voor “absolute” niveaus kiest men als referentie:

$$I_r = 10^{-12} \text{ watt/m}^2.$$

Intensiteitsniveau wordt op een andere basis berekend dan geluiddrukniveau en mag daarmee niet worden verward. Bij het gebruik van de gegeven referenties zullen echter de getalsmatige uitkomsten niet noemenswaardig van elkaar verschillen. Verschillen tussen intensiteit en geluiddruk treden vooral op bij staande golven (snaren, geluid in een ruimte), wanneer er geen energietransport is en de intensiteit dus nul bedraagt.

De logaritmische transformaties hebben vooral zin omdat ze het enorme bereik van de praktisch voorkomende waarden inperken tot een handelbaar bereik van ca. 100 eenheden. (De keuze van de dB in plaats van de bel heeft daar alles mee te maken.) Bovendien heeft perceptief en ook fysisch de verhouding van RMS en intensiteit een veel grotere betekenis dan het verschil. Na logaritmische transformatie blijven gelijke verhoudingen als gelijke niveauverschillen behouden. Enkele vuistregels voor het gebruik van geluidniveaus (dB) zijn:

- Niveaus mogen nooit worden opgeteld (of afgetrokken).
- Niveauverschillen mogen wel worden opgeteld en afgetrokken.
- Verdubbeling van intensiteit of energie is niveautoename van 3 dB.
- Verdubbeling van amplitude of RMS is niveautoename van 6 dB.
- Tienvoudige intensiteit geeft 10 dB meer.
- Tienvoudige amplitude geeft 20 dB meer.