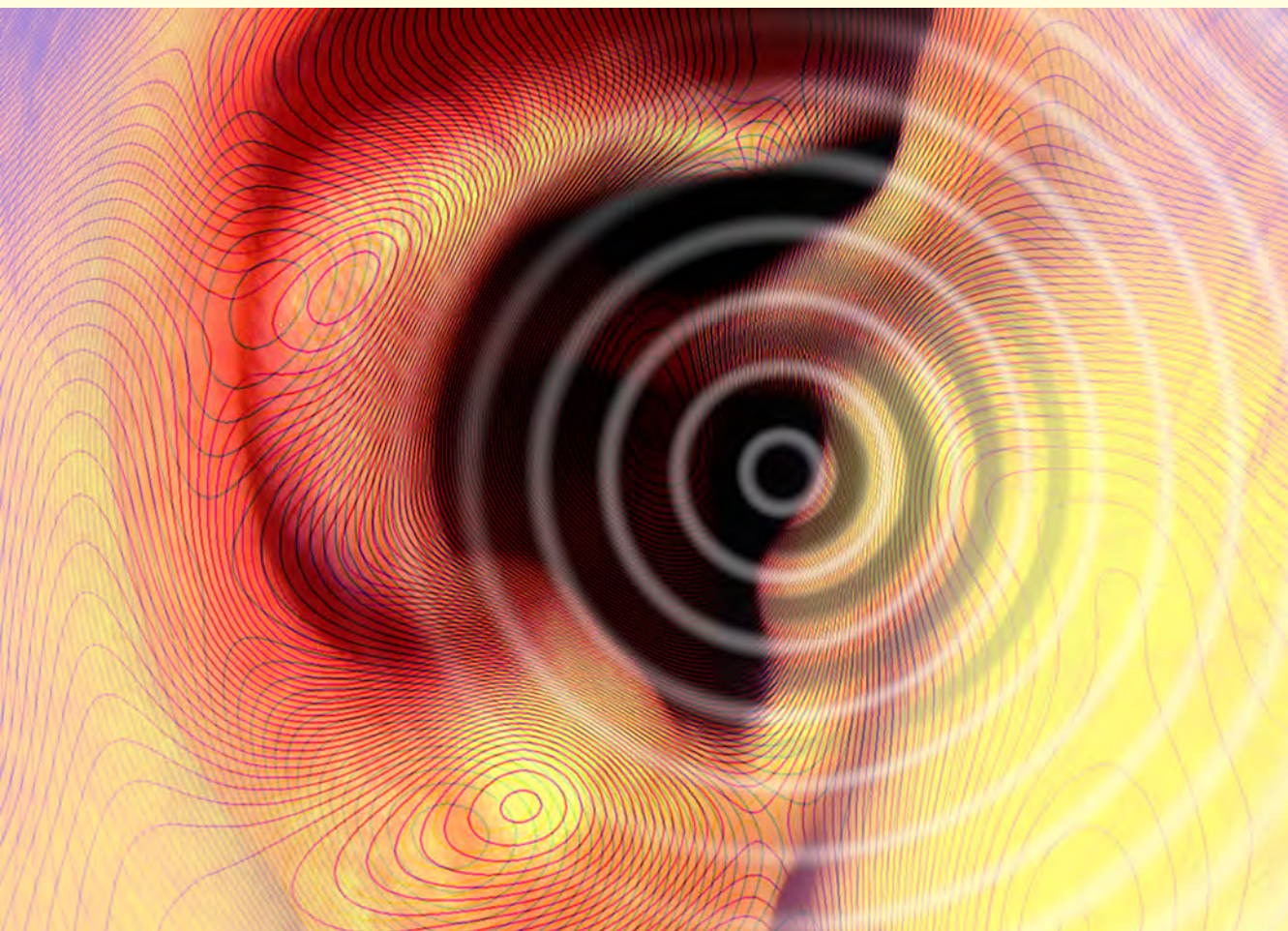


Klank en Balans

Gehoor • Evenwicht • Spraak



Chris L. van Ligtenberg en Hero P. Wit

pento

Klank en Balans

Gehoor • Evenwicht • Spraak

Chris L. van Ligtenberg en Hero P. Wit

© 2025 Pento bv

Alle rechten voorbehouden.

Behoudens de in of krachtens de Auteurswet van 1912 gestelde uitzonderingen mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van reprografische verveelvoudigingen uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16h Auteurswet 1912 dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan Stichting Reprorecht (www.reprorecht.nl). Voor de readerregeling kan men zich wenden tot Stichting UvO (Uitgeversorganisatie voor Onderwijslicenties, www.stichting-uvo.nl). Voor het gebruik van auteursrechtelijk beschermd materiaal in knipselkranten dient men contact op te nemen met Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, www.stichting-pro.nl).

Eerste druk 2012

Tweede druk 2020

Derde herziene druk 2025

Vormgeving: Paul Roos, Delft

Noot van de uitgever

Wij hebben alle moeite gedaan om rechthebbenden van copyright te achterhalen. Personen of instanties die aanspraak maken op bepaalde rechten, wordt vriendelijk verzocht contact op te nemen met de uitgever.

ISBN 978 90 818 7705 3

NUR 890/896

Een vernieuwd leerboek

Over de werking van oor en gehoor, slechthorendheid en evenwicht bestaan weinig standaardwerken waarin deze onderwerpen in samenhang worden behandeld. Zeker niet in het Nederlands. *Audiologie en audiometrie* werd in 2012 gepubliceerd en kan worden beschouwd als een basisboek voor dit vakgebied. Auteurs Chris van Ligtenberg en Hero Wit hebben met *Klank en Balans* een prachtige heruitgave van dit basisboek gerealiseerd.

De nieuwe titel *Klank en Balans* verwijst subtiel naar eerder werk. Op de eerste plaats naar het in 1996 uitgegeven leer- en tevens jubileumboek ter gelegenheid van het dertigjarig bestaan van het audiologisch centrum in Amersfoort. Het kan als kado worden beschouwd van oprichter, eerste audioloog en directeur Chris van Ligtenberg, die op dat moment zijn taken overdroeg aan een nieuwe directie.

Maar er is nog een verwijzing. *Klank en Balans* verwijst op de tweede plaats naar de inaugurele rede van prof. J J Groen in 1966, getiteld *Balans en Klank*. Het is Groen die destijds de jonge Chris van Ligtenberg op het spoor zette om zich op de audiologie te storten, een vak dat hem nooit meer heeft losgelaten.

Ik heb in de jaren '90 intensief samenwerkt met Chris — en de paden van Hero en mij kruisten ook geregeld — en bewaar goede herinneringen aan die jaren. De audiologische sector heeft veel aan hen te danken. Het audiologisch centrum van de *Prof. J.J. Groenstichting* in Amersfoort is overigens later opgegaan in *Pento, experts in horen, spreken en verstaan*. Pento bestaat in 2025 60 jaar, wat verwijst naar de leeftijd van deze oudste rechtsvoorganger.

En zo is de cirkel rond. Pento is er trots op deze heruitgave van het leerboek mogelijk te maken.

Jeroen Taalman

Raad van Bestuur Pento

Voorwoord bij de eerste druk door Prof Dr. E.H. Huizing (2012)

Het is buitengewoon belangrijk dat ir. Chris van Ligtenberg en prof. Hero Wit besloten hebben een nieuw leerboek op het gebied van audiologie en audiometrie het licht te doen zien.

De audiologie is nu na een lange aanloop ongeveer 60 jaar een zelfstandig specialisme. De benoeming tot hoogleraar in de audiologie van H.C. Huizing – in 1954 te Groningen – mag als het officiële begin worden beschouwd. Het duurde echter geruime tijd voordat in ons land boeken en naslagwerken op dit vakgebied verschenen. In het begin moest iedereen, logopedist, akoepedist, audiologie-assistent, audicien, audioloog, bedrijfsarts, schoolarts, kno-arts en alle anderen die binnen dit vakgebied werkzaam waren, het doen met de syllabi van de diverse opleidingen. Vooral die van prof. Groen te Utrecht was indertijd toonaangevend.

Eind jaren 1960 en in de jaren 1970 werden in de Nederlandse Bibliotheek der Geneeskunde van de uitgever Stafleu een aantal handzame boekjes gepubliceerd door Groen (Slechthorendheid en hoortoestellen, 1968), Rodenburg (Klinische audiologie, 1975) en Rodenburg, Huizing Kapteyn en Wanink (Revalidatie van slechthorenden, 1979). In 1983 volgde van Rodenburg bij uitgeverij Coutinho het boek Audiometrie. Een belangrijke vraagbaak is verder steeds het Nederlands leerboek kno-heelkunde geweest, omdat daarin naast de anatomie en fysiologie van het oor ook het gehooronderzoek en de therapeutische mogelijkheden uitgebreid werden beschreven.

In 1982 verscheen het boek *Over horen en slecht horen* van audioloog en hoofd van het Audiologisch Centrum te Amersfoort Van Ligtenberg en de bedrijfsarts Hoolboom. Het kreeg grote belangstelling en werd in 1986 herdrukt. Bij het schrijven van dit boek hebben Van Ligtenberg en Wit, emeritus hoogleraar audiologie te Groningen, zich gedeeltelijk gebaseerd op deze publicatie. Zij hebben zich de moeite getroost de basis van de audiologie opnieuw in boekvorm uit te geven. Het onderwerp is in een vijftal gebieden opgedeeld: 1. 'geluid', 2. 'geluid en waarneming', 3. 'anatomie en fysiologie', 4. 'audiologisch onderzoek' en 5. 'het evenwichtsorgaan'.

Natuurlijk is er tegenwoordig ook veel op internet te vinden, waaronder het boek van verscheidene auteurs van de Nederlandse Vereniging voor Audiologie. Maar ondanks de toenemende betekenis van e-readers is duidelijk geworden dat velen toch nog graag een boek in handen hebben, al was het maar omdat dit zo overzichtelijk is. De auteurs hebben hun boek van vele duidelijke illustraties voorzien en hebben daarmee de waarde van het werk aanzienlijk vergroot. Moge het een goede ontvangst hebben!

E.H. Huizing

Emeritus hoogleraar keel-, neus-, oorheelkunde

Utrecht, 2012

Inhoud

Hoofdstuk 1 Geluid	15
1.1 Inleiding	15
1.1.1 De betekenis van het waarnemen	16
1.1.2 De nauwkeurigheid van het waarnemen	17
1.1.3 Audiologie	17
1.1.4 Trillingen en golfbewegingen	18
1.2 Geluidstrillingen	20
1.2.1 Inleiding	20
1.2.2 De sinusvormige trilling (sinus = baai, welving)	21
1.2.3 Kenmerken van een sinusvormige trilling	22
1.2.4 Het geluid van een stemvork	27
1.2.5 Natuurlijke, gedempte en gedwongen trillingen. Resonantie	28
1.2.6 Complexe periodieke trillingen	31
1.2.7 Ruis- en impulsgeluiden	34
1.3 Spectra	35
1.3.1 Spectrum van een sinusvormige trilling	35
1.3.2 Spectra van complexe periodieke trillingen	36
1.3.3 Spectra van ruis	36
1.3.4 Spectrum van een impulsgeluid	37
1.3.5 Spectrum van een toonpuls	39
1.4 Geluidsdruk. Geluidsintensiteit	42
1.4.1 Inleiding	42
1.4.2 De decibel	44
1.5 Additie van geluidsniveaus	47
1.6 Zwevingen. Modulaties	53
1.6.1 Zwevingen	53
1.6.2 Amplitudemodulatie	55
1.6.3 Frequentiemodulatie	56

1.7	Filters	58
1.8	Lineaire en niet-lineaire vervorming	63

Hoofdstuk 2 | Geluid en waarneming 68

2.1	Inleiding	68
2.2	Gevoeligheid en meetbereik van het oor	69
2.2.1	Inleiding	69
2.2.2	De gehoordrempel. De pijngrens. Het gehoorveld	71
2.3	Luidheid en luidheidsvergelijkingen	77
2.3.1	De foon. De isofoon	77
2.3.2	De soon. De relatie foon-soon.	79
2.3.3	Intensiteitstrede. Toonsterktetrede (ΔI)	80
2.3.4	Luidheid als functie van de tijd. Expositieduur	82
2.3.5	Adaptatie. Vermoeidheid. Lawaaibeschadiging. Uitputting. Recruitment.	83
2.4	Toonhoogte en toonhoogtevergelijkingen	86
2.4.1	Relatie tussen toonhoogte en frequentie	86
2.4.2	De toonhoogtetrede	88
2.4.3	Absolute toonhoogte. Absoluut gehoor	89
2.4.4	Toonhoogte afhankelijk van de intensiteit	91
2.4.5	Toonhoogte van periodieke complexe geluidstrillingen	91
2.5	Frequentieanalyse. Kritische bandbreedte	94
2.5.1	Frequentieanalyse	94
2.5.2	Kritische bandbreedte	96
2.6	Horen met twee oren	99
2.6.1	Inleiding	99
2.6.2	Richtinghoren	99
2.6.3	Lateralisatie	107

Hoofdstuk 3 - Anatomie en fysiologie	110
3.1 Inleiding	110
3.2 Het uitwendige oor	111
3.2.1 De anatomie van de oorschelp	111
3.2.2 De fysiologie van de oorschelp	112
3.2.3 Embryologie: enkele aantekeningen (intermezzo)	113
3.2.4 De anatomie van de gehoorgang	114
3.2.5 De fysiologie van de gehoorgang. Versterking	115
3.2.6 De beschermingsfunctie	117
3.3 Het middenoor	118
3.3.1 De anatomie van het middenoor	118
3.3.2 De fysiologie van het middenoor. Inleiding	121
3.3.3 De overdrachtsfunctie van het middenoor	122
3.3.4 Resonantie van de gehoorbeenketen	126
3.3.5 Trillingspatroon en impedantie van het middenoorsysteem	128
3.3.6 De resonantie van de trommelholte	132
3.3.7 Het effect van de aanspanning van musculus stapedius bij harde geluiden	133
3.3.8 Afscherming van het ronde venster	133
3.3.9 De dempingsfunctie van het middenoor	134
3.3.10 De beluchting van het middenoor door de buis van Eustachius	134
3.4 Het binnenoor (de cochlea)	135
3.4.1 Haarcellen in gehoor- en evenwichtsorgaan	135
3.4.2 De haarcel in het zijlijnorgaan	137
3.4.3 Werking van een haarcel (globaal)	138
3.4.4 Vloeistoffen in het binnenoor	140
3.4.5 Werking van een haarcel in de cochlea	141
3.4.6 Bouw van de cochlea	144
3.4.7 Functie van de binnenste en de buitenste haarcellen	150
3.4.8 Hydromechanica van de cochlea	156
3.4.9 Codering in de gehoorzenuw	163

3.4.10	Cochleaire potentialen	170
3.5	Het centraal auditieve systeem	175

Hoofdstuk 4 | Audiologisch onderzoek 178

4.1	Inleiding	178
4.2	Anamnese	179
4.3	Otologische inspectie	180
4.4	Globale gehoormetingen	181
4.4.1	Screeningsonderzoek naar spraakverstaan	181
4.4.2	Onderzoek van het gehoor met behulp van stemvorken	183
4.5	Toonaudiometrie	186
4.5.1	Het audiogram	186
4.5.2	De audiometer	191
4.5.3	Het audiometreren	194
4.5.4	Overhoren, maskeren	197
4.5.5	Het principe van maskeren	201
4.6	Spraakaudiometrie	214
4.6.1	Algemeen	214
4.6.2	Het spraakaudiogram	215
4.6.3	De spraakaudiometrie in de praktijk	217
4.7	Karakteristieke toon- en spraakaudiogrammen voor enkele specifieke aandoeningen	219
4.7.1	Geleidingsslechthorendheden	219
4.7.2	Perceptieslechthorendheden	221
4.8	Impedantiemetrie	225
4.8.1	Inleiding	225
4.8.2	Meting van de impedantie van het oor	227
4.8.3	Tympanometrie	229
4.8.4	Meting van de musculus-stapedius-reflex	230

4.9	Het audiologisch basisonderzoek	234
4.10	Spraakverstaan in achtergrondruis	236
4.10.1	Inleiding	236
4.10.2	Meting van het spraakverstaan met achtergrondruis (test van Plomp)	240
4.11	Luidheidsmetingen	242
4.11.1	Inleiding, luidheidsvergelijking, isofonen	242
4.11.2	Schatten van luidheden, soon-foonrelatie	243
4.11.3	Metingen ter bepaling van recruitment en luidheidsopbouw	244
4.11.4	Adaptatie van luidheid	254
4.12	Oto-akoestische emissies (OAE's)	259
4.12.1	Inleiding	259
4.12.2	Soorten van oto-akoestische emissies	262
4.12.3	Spontane oto-akoestische emissies (SOAE)	262
4.12.4	Oto-akoestische emissies opgewekt door akoestische kliksignalen	264
4.12.5	Oto-akoestische emissies opgewekt door toonstootjes	266
4.12.6	Oto-akoestische emissies van vervormingsproducten	271
4.12.7	Oto-akoestische emissie opgewekt door een continue toon	275
4.12.8	Klinisch-audiologische toepassingen	278
4.12.9	Samenvatting	293
4.13	Auditory Evoked Potentials	293
4.13.1	Inleiding	293
4.13.2	De meetapparatuur voor de ERA	294
4.13.3	Classificatie	295
4.13.4	Brainstem Evoked Response Audiometry of meting van ABP's met behulp van klikstimuli	298
4.13.5	Meting van ABP's met frequentiespecifieke stimuli	308
4.13.6	Auditory Steady State Responsies (ASSR's)	316
4.13.7	Elektrocochleografie (ECochG)	333
4.13.8	Het cochleaire implantaat ('Cochlear Implant', 'CI')	344
4.13.9	Gehooronderzoek bij jonge kinderen	348
4.13.10	De toepassing van de Ewing-screeningstest in Nederland	351
4.13.11	Reflexaudiometrie	356

4.13.12	Spelaudiometrie	367
4.13.13	Speciale spraakaudiometrie voor kleine kinderen	368
4.13.14	Slotopmerkingen betreffende het gehooronderzoek bij kinderen	370

Hoofdstuk 5 | Het evenwicht 372

5.1	Het evenwicht	372
5.1.1	Inleiding	372
5.2	Het zesde zintuig	374
5.2.1	Inleiding	374
5.2.2	Het vestibulaire systeem	377
5.2.3	Het visuele systeem	377
5.2.4	Het auditieve systeem	378
5.2.5	Het proprioceptieve systeem	378
5.3	De anatomie van het evenwichtsorgaan	381
5.4	De fysiologie van het evenwichtsorgaan	386
5.4.1	Inleiding. Historische aantekeningen	386
5.4.2	De werking van de halfcirkelvormige kanalen	389
5.4.3	De werking van de statolietorganen	392
5.4.4	Centrale verwerking	395
5.5	Pathologie van het evenwicht	396
5.5.1	Inleiding	396
5.5.2	De ziekte van Menière	398
5.5.3	Benigne paroxismale positioneringsduizeligheid (BPPD)	402
5.5.4	Labyrinthitis	405
5.5.5	Neuritis vestibularis	405
5.5.6	Labyrinttrauma	406
5.5.7	Acusticusneurinoom	406
5.5.8	Bewegingsziekten	407
5.5.9	Centrale duizeligheid	408
5.5.10	Cervicale evenwichtsstoornissen	408

5.6	Het evenwichtsonderzoek	409
5.6.1	Inleiding	409
5.6.2	Anamnese	410
5.6.3	Eenvoudig vestibulair onderzoek	411
5.6.4	De nystagmus	414
5.6.5	Uitgebreid evenwichtsonderzoek	417
5.6.6	Draaistoelonderzoek	421
5.6.7	Het calorisch onderzoek	427
5.6.8	De VEMP Test	431
5.6.9	De Head Impulse Test (HIT)	434
5.7	Revalidatie van het evenwicht	435
5.7.1	Inleiding	435
5.7.2	Functieverlies van het evenwichtsorgaan	436
5.7.3	Revalidatiemiddelen	440

Hoofdstuk 6 | Spraakproductie en -perceptie 446

6.1	Inleiding	446
6.1.1	Enkele uitingvormen in de Natuurlijke Taal	446
6.1.2	Uitingvorm van de 'doventaal'. Enkele historische opmerkingen	447
6.2	De spraakproductie	450
6.2.1	De spraakketen	450
6.2.2	Het stemgevend orgaan	450
6.2.3	De aandrijvende kracht	450
6.2.4	Het strottenhoofd = de larynx	452
6.2.5	Het klankvormend orgaan (het aanzetstuk)	455
6.3	Het spraakgeluid	457
6.3.1	De vocalen (de klinkers)	457
6.3.2	Consonanten (medeklinkers)	459
6.4	Akoestische registratie van spraakklanken	462
6.5	Spraakperceptie	465
6.5.1	De variabiliteit in de akoestische patronen van de spraak	465

6.5.2	De snelheid van de verschillende spraakklanken (het aantal klanken per seconde) in normale spraak.	466
6.5.3	De variabiliteit in de akoestische patronen van de spraak	467
6.5.4	Categoriale waarneming	469
6.5.5	Lateralisatie van spraak	472
6.5.6	Duplex waarneming	474
6.5.7	Uitwisseling van (akoestische) kenmerken. 'Cue trading'.	476
6.5.8	Audio-visuele integratie	476
6.5.9	Samenvatting	477
6.6	Modellen van spraakwaarneming	478
6.6.1	Algemeen	478
6.6.2	De motortheorie van de spraakperceptie	478
6.6.3	Tracering van de spraakwaarneming (Trace-model)	478
6.6.4	Het 'gewone' model	480

Literatuurlijst	483
------------------------	------------

Over de auteurs	489
------------------------	------------



Figuur 1.1 Vuurtoren 'La Jument' in Ouessant (Bretagne)

Hoofdstuk 1 | Geluid

1.1 Inleiding

Nadenkend over geluid en waarneming van geluid door het gehoororgaan lijkt het moeilijk te zijn om een doeltreffend antwoord te geven op simpele vragen zoals: Wat is geluid? Wat is waarneming? Is geluid datgene wat wij horen? Als er geen waarneming is, of geen oor om te horen, is er dan geluid? Als op de Noordpool een gierende sneeuwstorm woedt of als golven met donderend geraas op de vuurtoren beuken, maar er is niemand om het geraas waar te nemen, is er dan geluid? Het was George Berkeley (1685-1753), een Ierse wijsgeer van Engelse afkomst en Bisschop van Cloyne, die zich deze vraag stelde. Berkeley als empirist vond dat de zintuiglijke waarneming de basis vormt van kennis. In deze zin trok hij de conclusie dat de zintuiglijke waarneming bepaalt of er een geluid is geweest. Met grote stelligheid werd door hem de onderstaande stelling geponeerd:

'Esse est percipi' ('zijn is waargenomen worden')

In filosofische zin zou men inderdaad kunnen zeggen dat er geen geluid kan zijn als er niemand is die het kan horen of waarnemen. Aldus beschouwd is geluid een gewaarwording die alleen bestaat doordat er een luisteraar is die het geluid waarneemt. Het lijkt alsof de verschijnselen geluid en gewaarwording onlosmakelijk met elkaar verbonden zijn. Zonder geluid geen waarneming of gewaarwording en omgekeerd; daar waar het gehoor ontbreekt, is geluid voor de betrokkene afwezig.

Natuurkundigen zullen een andere benaderingswijze willen hanteren. Zij zullen geluid willen omschrijven als een natuurkundig verschijnsel. Voor hen geldt:

Geluid zijn verstoringen in een medium die auditieve gewaarwordingen kunnen opwekken.

Dit is wel een heel algemene definitie. Het zegt niets noch over de aard en de bron van het geluid, noch over de eigenschappen van het medium. Een meer toegespitste definitie zou kunnen zijn:

Geluid of geluidsgolven zijn vibraties die opgewekt worden door een trillend elastisch voorwerp of lichaam en die zich voortplanten door een medium, bijvoorbeeld lucht, waarmee geluids- of trillingsenergie wordt overgedragen.

De natuurkundige houdt er rekening mee dat geluidstrillingen aanwezig kunnen zijn, ook al is de gewaarwording afwezig. In het verleden was dit een actuele discussie. Tegenwoordig is het duidelijk dat geluid zowel een trilling als een gewaarwording is.

1.1.1 De betekenis van het waarnemen

Het kunnen waarnemen van geluiden is van vitale betekenis voor de mens. In de eerste plaats is een goed gehoor een voorwaarde voor een goede uitwisseling van informatie van de taal door spraak en voor de taal- en spraakontwikkeling. Bij het verliezen van het waarnemingsorgaan, het gehoor, is normale communicatie met de medemens via de spraak immers niet of nauwelijks meer mogelijk. Hierdoor kan de eenzaamheid toeslaan, ondanks ontwikkelingen van alternatieve vormen van taal- en spraakcommunicatie, zoals bijvoorbeeld het omzetten van spraak in tekst die gelezen kan worden.

In de tweede plaats geeft het al of niet bewust kunnen horen van allerlei ons vertrouwde geluiden, waarin de mens als het ware is ‘ingebed’, een gevoel van ‘rust’ en ‘zekerheid’. Ook wek- en waarschuwingsgeluiden geven de luisteraar de mogelijkheid te anticiperen op zijn eigen handelen en gedrag.

Bij slechthorendheid zal veelal ook het schrik- of paniekgedrag kunnen toenemen, omdat de slechthorende mens wek- en waarschuwingsgeluiden vanaf enige afstand en vooral van gebeurtenissen buiten zijn gezichtsveld niet meer kan horen. Een claxon, van een voor hem van achteren naderende auto, wordt niet gehoord, waardoor hij niet tijdig zal kunnen anticiperen op het naderende gevaar.

Het belang van het gehoor is nog pregnanter invoelbaar indien wij het leven van een doof geborene bezien. Deze heeft immers nooit gehoord en heeft daarom geen notie van wat geluid eigenlijk betekent. Hij heeft dus ook nooit geleerd – in tegenstelling tot de mens met een verworven doofheid – een betekenis aan geluiden toe te kennen. Vooral het op natuurlijke wijze leren spreken is voor hem nauwelijks mogelijk.

De opkomst en toepassing van de **Cochlear Implant (het binnenoorimplantaat)** bij jonge dove kinderen heeft gelukkig perspectief gegeven aan perceptie en verstaan van spraak. Gedachten als deze zijn nogal droefgeestig, maar maken ons er in ieder geval van bewust dat het kunnen waarnemen van geluiden buitengewoon belangrijk is.

Het niet kunnen waarnemen van signalen uit de geluidswereld rondom ons kan leiden tot een diepe vorm van bestaansvershraling.

1.1.2 De nauwkeurigheid van het waarnemen

Het zal verwondering wekken dat het auditieve systeem – dat slechts een luttel aantal kubieke centimeters van ons lichaam uitmaakt – tijdens het waarnemen in staat is ons in te lichten over de aard van de geluidsbron en over de richting waar deze zich bevindt en soms ook over de afstand tot ons. Daarnaast is het gehoororgaan in staat om op zeer fijnzinnige en genuanceerde wijze kleine verschillen in geluiden, maar ook om snelle opeenvolgende veranderingen in een geluid, te onderscheiden.

Zelfs emotionele kenmerken van bijvoorbeeld een stem kunnen worden waargenomen. Het valt op dat de mens in een uitgesproken zin emotionele kenmerken als angst, dreiging of verwondering kan waarnemen, terwijl in het fysische geluidspatroon nauwelijks of geen verschillen meetbaar zijn. Voor een luisteraar is het stemgeluid specifiek van karakter. Het stemgeluid kan als het ware voor de luisteraar een ‘vingerafdruk’ zijn. De waarneming van (spraak)geluiden is zelfs ingebed in de taal. Voorbeelden zijn: **‘Haar stem vervulde mij met warmte’**, of **‘Het snerpende gegil ging ons door merg en been’**. Er zijn zelfs woorden die geënt zijn op klanknabootsing (onomatopeën), zoals tiktak, koekoek, enzovoort.

Het auditieve systeem is tot zeer fijnzinnige geluidswaarnemingen in staat.

1.1.3 Audiologie

Enerzijds is voor een beter begrip van het proces van geluidsgewaarwording – of eenvoudiger gezegd, van de wijze waarop wij horen of hoe wij waarnemen – kennis van de karakteristieke natuurkundige eigenschappen van geluidstrillingen onontbeerlijk. Anderzijds kunnen soms enkele aspecten van de auditieve waarneming begrepen worden door de kennis van de anatomie en de fysiologie

van het auditieve systeem. Vaak is echter slechts enig begrip van de aard van de geluidswaarneming mogelijk als resultaat van een gedragsmatige studie of van een psychofysisch experiment.

Hieruit kan enigszins duidelijk worden welke mechanismen in het auditieve systeem aanwezig zijn die ons die specifieke geluidsgewaarwordingen geven. Helaas kan dan nog niet worden aangetoond welke gedetailleerde fysiologische processen hieraan ten grondslag liggen.

De wetenschap van de audiologie houdt zich bezig met de studie naar de relatie tussen de karakteristieke fysische eigenschappen van geluidstrillingen die het oor van de luisteraar bereiken en de hoorsensaties of geluidsgewaarwordingen die zij veroorzaken. Ook omvat de audiologie het onderzoek naar de werking van het auditieve systeem, dat in staat is deze geluidssensaties te weeg te brengen. Audiologie is de wetenschap waarin natuurkunde, zintuigfysiologie en psycho-akoestiek zijn vervat.

1.1.4 Trillingen en golfbewegingen

Trillingen komen veelvuldig voor. Snaren van een piano of viool, een stemvork, maar ook de klankstaven van een xylofoon, of een veer van een unster, of de onrust van een horloge zijn voorbeelden van trillingsbronnen. Maar denk ook eens aan een spin die de trillingen voelt als een insect verward is geraakt in zijn web. Ook auto's veren op en neer als ze over een hobbelige weg rijden. Gebouwen maar ook bruggen kunnen in trilling geraken als er zware vrachtwagens passeren.

Een desastreus voorbeeld is de in resonantie geraakte Tacoma Narrows Bridge in 1940. Door zware windstoten geraakte deze brug zodanig in trilling dat deze instortte. Wanneer we een steen in een rimpelloze vijver gooien, zal vanuit de plek waar de steen het water raakte een golfbeweging ontstaan die zich cirkelvormig naar buiten beweegt. De golfbewegingen verplaatsen zich met zichtbare snelheid horizontaal naar buiten, maar elk deeltje van het water trilt alleen maar om een evenwichtspunt in verticale zin.



Figuur 1.2 Trillingen met grote amplituden van de ‘Tacoma Narrows Bridge’ vlak voordat de brug instortte in 1940.

Figuur 1.3

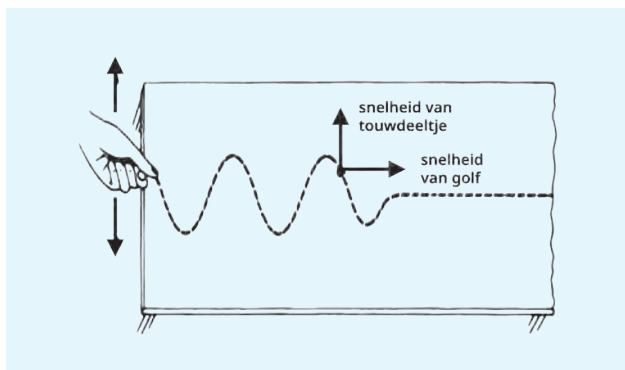
Een steentje in het water geeft een golfbeweging vanuit het middelpunt.



In het tweede voorbeeld wordt een touw dat ligt op een tafel **horizontaal** in een heen en weer gaande beweging gebracht. Ook hier geldt dat de golfbeweging zich voortplant van links naar rechts, maar dat de beweging van ieder touwdeeltje loodrecht op de richting van de golf staat. Door de golfbeweging wordt een energietransport gerealiseerd, zonder dat het medium (water, fig 1.3) naar buiten of (touw, fig 1.4) van links naar rechts beweegt.

Figuur 1.4

Een heen en weer gaande beweging van touw geeft een energietransport van links naar rechts.



1.2 Geluidstrillingen

1.2.1 Inleiding

Geluid wordt opgewekt door een geluidsbron die in trilling wordt gebracht, bijvoorbeeld door een aangestroken vioolsnaar of door een trillende luchtkolom in een aangeblazen fluit. Ook de menselijke stem is een belangrijke geluidsbron. De trillende stembanden, geactiveerd door de luchtstroom vanuit de longen, zorgen voor geluidsgolven, die door het medium (lucht) worden voortgeplant totdat ze het oor van de luisteraar bereiken en daar het trommelvlies van het oor in beweging brengen.

Geluid wordt hoorbaar indien de trillingen voldoende snel zijn en de geluidsbron via een medium voldoende geluidsenergie kan afgeven. Geluiden kunnen geclassificeerd worden in drie hoofdgroepen. Sommige geluiden hebben een **klankkarakter**, zoals het geluid van een muziekinstrument of een zangstem. Andere geluiden hebben een **impulskarakter**, zoals handgeklap of een pistoolschot. Geluiden met een **ruiskarakter** zijn bijvoorbeeld bladgeritsel, applaus, of het geluid van de branding van de zee.

Zoals reeds gezegd heeft een geluidstrilling een medium nodig om zich voort te planten. Dit medium kan zijn: a) een gas, b) een vloeistof, c) een vaste stof. De snelheid van de voortplanting van geluid door diverse stoffen is zeer verschillend, zoals de volgende tabel laat zien.

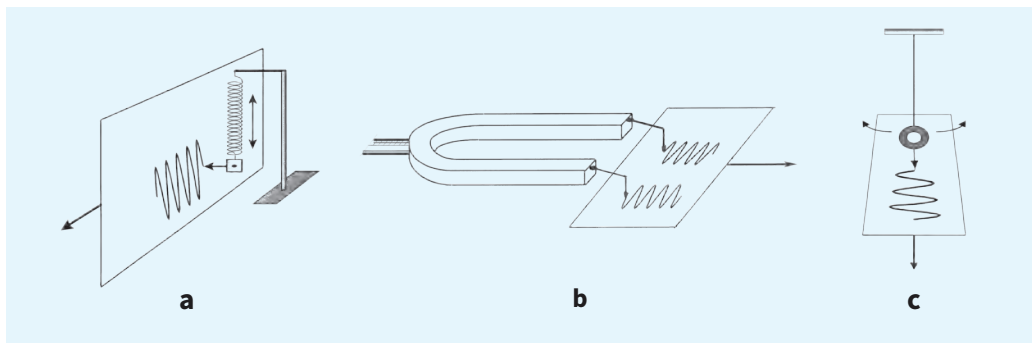
Gas	Vloeistof	Vaste stof
lucht: 340 m/s	water: 1440 m/s	koper: 4700 m/s
waterstof: 1285 m/s	kwik: 1450 m/s	aluminium: 6260 m/s

Tabel 1.1

1.2.2 De sinusvormige trilling (sinus = baai, welving)

Een bijzondere trilling is de sinusvormige trilling. Er is een aantal objecten die een sinusvormige trilling kunnen opwekken, zoals een op en neer gaande spiraalveer waaraan een gewichtje hangt, een trillende stemvork en een slinger. Maar ook een aangestoken snaar van een viool of op en neer gaande vloeistofkolommen in een verticale glazen U-buis geven sinusvormige trillingen te zien.

In *figuur 1.5* zijn de verticale veer, de stemvork en de slinger getekend. Verondersteld wordt dat de gefixeerde pennetjes wrijvingsloos de bewegingen van de veer, stemvork en de slinger kunnen tekenen op een vlak dat met een constante snelheid in de aangegeven richting wordt bewogen.



Figuur 1.5 In de figuren 1.5a, 1.5b en 1.5c zijn drie sinusvormige trillingen afgebeeld die respectievelijk de bewegingen (uitwijkingen) van de veer, de stemvork en de slinger als functie van de tijd aangeven.

Er ontstaat op alle drie de voortbewegende vlakken een gelijkvormige curve die de uitwijking **u** als functie van de tijd **t** weergeeft, kortweg de **sinus** genoemd.

1.2.3 Kenmerken van een sinusvormige trilling

Sinusvormige trillingen zijn belangrijk omdat deze door veel objecten gegeneerd kunnen worden. Ze zijn zelfs heel bijzonder omdat ook niet sinusvormige heen en weer gaande bewegingen (complexe trillingen of vibraties) ontleed kunnen worden in afzonderlijke sinusvormige trillingen. Het was de Fransman Joseph Fourier, die leefde van 1768 tot 1830, die deze belangrijke eigenschap van complexe trillingen wiskundig aantoonde (**Fourier-analyse**).

1.2.3.1 Periode en frequentie

Bij sinusvormige bewegingen valt als eerste op dat de trilling periodiek is, dat wil zeggen dat na een doorlopen cyclus, de cyclus zich herhaalt. Een dergelijke cyclus wordt een **periode** (ook wel golflengte) genoemd. Het aantal perioden dat per seconde wordt gemaakt noemt men de **frequentie**.

De frequentie **f** wordt uitgedrukt in **Hertz (Hz)**. Stel dat in één seconde de stemvork 200 trillingen (perioden) maakt, dan is de frequentie 200 Hz. De **periodes-tijd T** is dan 1/200 seconde. In formule:

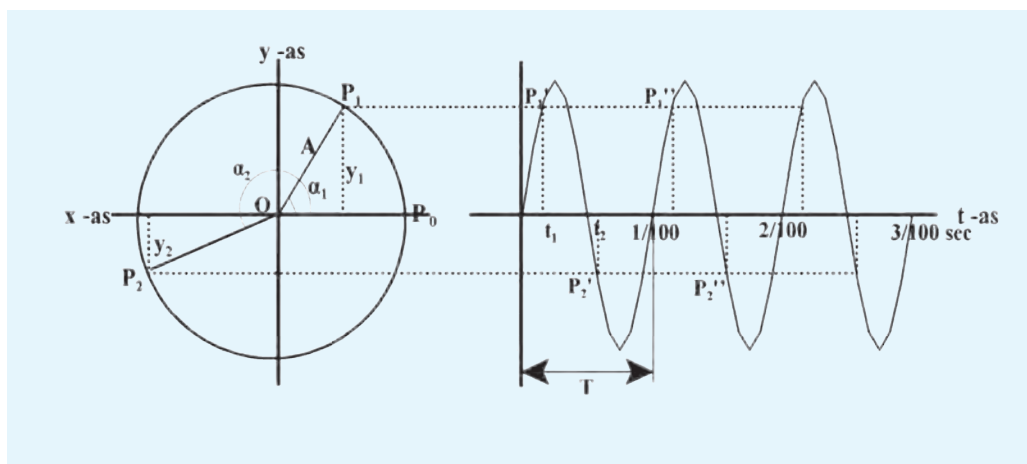
$$f = \frac{1}{T} \quad \text{en} \quad T = \frac{1}{f}$$

Hieronder wordt een wiskundige definitie gegeven van een sinusvormige trilling en wordt – volgens de methode van de projectie van een **eenparige cirkelbeweging** – de formule ervoor afgeleid.

1.2.3.2 Afleiding van sinusfunctie

Een sinusfunctie kan worden beschouwd als een projectie van een eenparige cirkelbeweging (*zie figuur 1.6*). Gegeven een cirkel met straal **A** en een middelpunt **O** in het kruispunt van een assenstelsel, de x-as en de y-as.

Vanaf het startpunt **P₀** beweegt zich een punt **P** met eenparige snelheid langs de cirkelboog totdat het na een bepaalde tijd **t₁** op de plek **P₁** aankomt, en daarna op tijdstip **t₂** bij punt **P₂**.



Figuur 1.6 Constructie van een sinusfunctie vanuit een eenparige cirkelbeweging

Daarna wordt de weg vervolgd totdat het uitgangspunt P_0 weer wordt bereikt. In één cyclus heeft het punt P een hoek van 360° doorlopen. Het punt P_1 vormt met x-as de hoek α_1 en P_2 met de x-as de hoek α_2 .

Uit de figuur lezen we af:

$$\sin \alpha_1 = y_1/A \quad \text{of} \quad y_1 = A \sin \alpha_1$$

$$\sin \alpha_2 = y_2/A \quad \text{of} \quad y_2 = A \sin \alpha_2$$

Bij een eenparige beweging is de grootte van α recht evenredig met t ($\alpha \sim t$). Daarbij neemt α in een tijdsduur T toe van 0° tot 360° . Op dat moment geldt $\alpha/360^\circ = t/T$. Uit de eenparige cirkelbeweging kunnen we nu de sinusfunctie construeren langs de tijd-as. In de bovenstaande tekening is uitgegaan van 100 omwentelingen per seconde: de periodetijd $T = 1/100\text{s}$. De sinus van de α_1 wordt nu bepaald door:

$$y_1 = A \sin (360^\circ \cdot t_1/T)$$

Daar $T = 1/f$, waarbij f de frequentie of het aantal perioden per seconde weergeeft, kan in het algemeen de sinusfunctie voorgesteld worden door:

$$y = A \sin (360^\circ \cdot ft)$$

In de elektriciteitsleer en akoestiek worden hoeken in plaats van graden liever uitgedrukt in radialen, waarbij 360° gelijk is aan 2π radialen.

De formule verandert dan van:

$$y = A \sin (2\pi ft) \quad \text{in} \quad y = A \sin (\omega t)$$

Hierin is:

y = de momentane uitwijking

A = de maximale uitwijking of amplitude

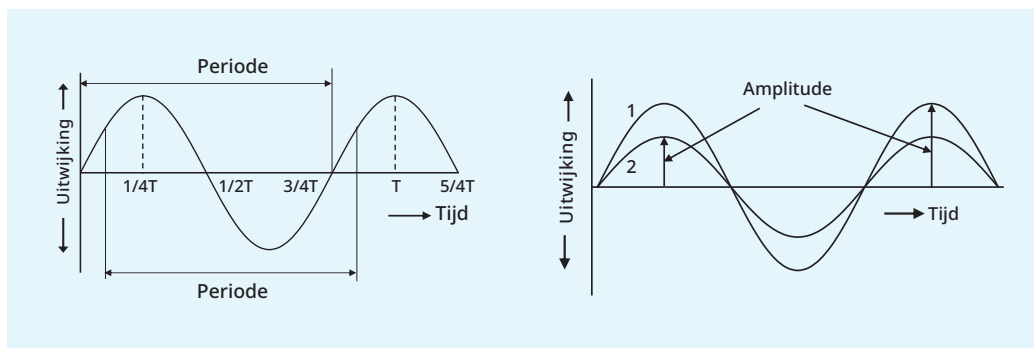
T = de periodetijd

f = de frequentie

$\omega = 2\pi f =$ de cirkelfrequentie

1.2.3.3 Relatie uitwijking en amplitude

Bij beschouwing van de *figuren 1.7a* en *1.7b* zien we bij *figuur 1.7a* een sinusfunctie getekend waar de periodeduur op twee manieren is aangegeven.



Figuur 1.7a (links) Grafische voorstelling van een sinusvormige trilling waarbij de periode van een trilling is aangegeven.

Figuur 1.7b (rechts) Twee sinusvormige trillingen met dezelfde trillingstijd (T), dus ook met dezelfde frequentie, maar met een verschillende amplitude; trilling 1 is sterker dan trilling 2.

Bij de grafiek van *figuur 1.7a* hoort de formule:

$$u = A \sin \left(\frac{t}{T} \cdot 360^\circ \right)$$

Hiervoor is het verband gelegd tussen de periodetijd **T** en de volledige cirkelhoek van 360° . Als we de hoek in plaats van in graden uitdrukken in radialen ($360^\circ = 2\pi$ **rad**) en $1/T$ vervangen door de frequentie **f** dan wordt bovengenoemde formule:

$$u = A \sin (2\pi ft)$$

Uit de bovenstaande formule kunnen we op eenvoudige wijze de uitwijking uitrekenen op verschillende tijdstippen. Als voorbeeld berekenen we de uitwijking op een tijdstip $1/4T$, dus na een $1/4$ periodeduur.

$$u = A \sin \left\{ \frac{1/4 T}{T} \cdot 360 \right\} = A \sin \left\{ \frac{1}{4} \cdot 360^\circ \right\} = A \sin 90^\circ = A \cdot 1 = A$$

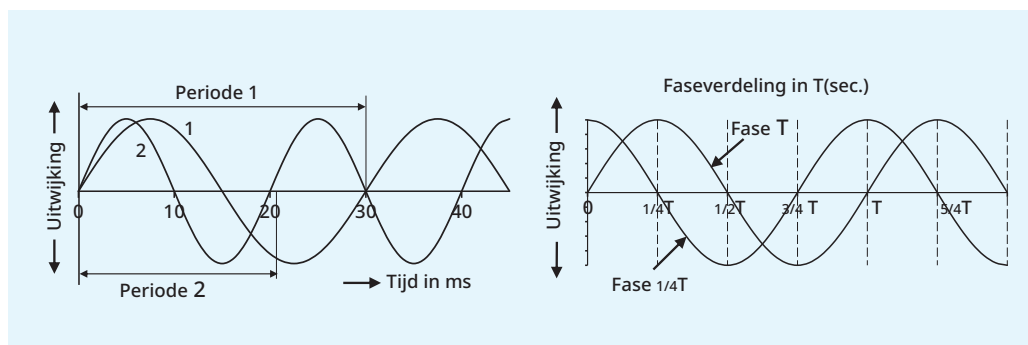
Hierin is:

$$u = \text{uitwijking} \quad A = \text{amplitude} \quad T = \text{periodetijd}$$

1.2.3.4 De fase van een sinusvormige trilling

In *figuur 1.8a* zijn twee sinusvormige trillingen aangegeven met dezelfde amplitude (maximale uitwijking) maar met een verschillende frequentie. Uit de schaalgegevens van de x-as is af te leiden dat de frequentie van trilling (1) **33,3 Hz** is en van trilling (2) **50 Hz**, omdat de periodetijd respectievelijk $3/100$ en $2/100$ seconde is. De **fase** kan gedefinieerd worden als het gedeelte van de periode dat de golfvorm reeds heeft afgelegd ten opzichte van een gekozen (vast) tijdstip. De fase geeft aan op welk tijdstip de golfvorm door de evenwichtsstand gaat.

In *figuur 1.8b* zijn twee sinusvormige trillingen afgebeeld met respectievelijk een fase van 0 en een fase van $1/4 T$.



Figuur 1.8a (links) Twee sinusvormige trillingen met verschillende frequentie van respectievelijk 33,3 en 50 Hz.

Figuur 1.8b (rechts) Twee sinusvormige trillingen met dezelfde amplitude en frequentie, maar met een faseverschil van $1/4 T$, of anders gezegd van 90° of $\pi/2$ radialen.

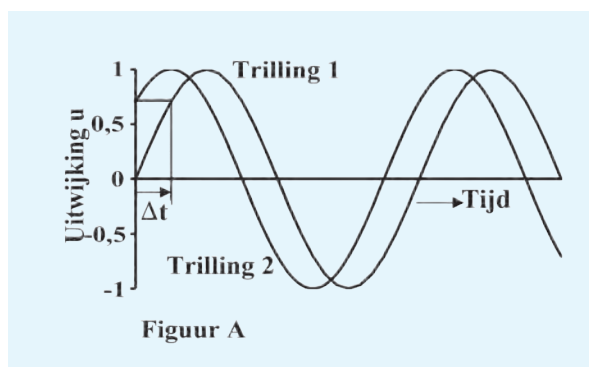
Uit het bovenstaande blijkt dat bij een tijdstip van $1/4 T$ een hoek van 90° hoort. Wij spreken dan van een fasehoek van 90° (zie *intermezzo 1.1*). Er bestaat een faseverschil van 90° tussen trilling 1 en 2. De wiskundige voorstelling van een sinus met een fasehoek is:

$$u = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad \text{waarbij } \varphi \text{ de fasehoek is}$$

De fase is over het algemeen niet van belang bij beschouwing van een enkele sinusvormige trilling. Bij samenstellingen en bij vergelijken van meerdere sinusvormige trillingen speelt de fase wel een rol.

Intermezzo 1.1 - Faseverschil

In **figuur A** zien we twee trillingen die dezelfde frequentie en amplitude hebben. De trillingen zijn echter niet in fase. Trilling 2 loopt Δt seconden voor op trilling 1.



De formule voor trilling 1 is:

$$u_1 = \sin(2\pi ft)$$

Voor trilling 2 geldt de formule:

$$u_2 = \sin 2\pi f (t + \Delta t)$$

Als $t = 0$ dan is: $u_1 = 0$ en u_2 wordt:

$$u_2 = \sin(2\pi f \Delta t)$$

Dit is de uitwijking die trilling 1 pas heeft op tijdstip Δt .

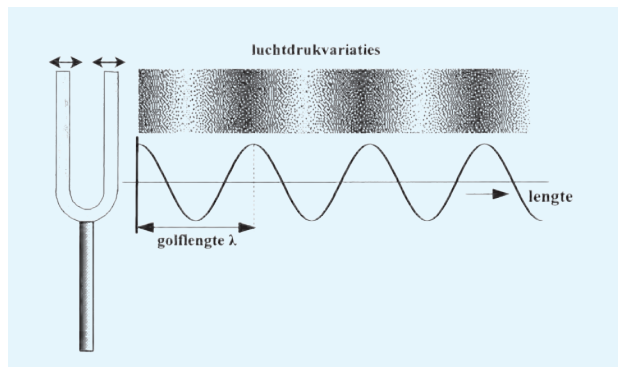
De formule voor trilling 2 wordt ook wel geschreven als:

$$u = \sin(2\pi ft + \varphi) \quad \text{dan geldt:} \quad \varphi = 2\pi f \Delta t = 2\pi(\Delta t/T)$$

φ is de hoek in radialen. φ heet het faseverschil tussen de trillingen.

1.2.4 Het geluid van een stemvork

Figuur 1.9 Trillende stemvork met een weergave van de luchtdrukvariaties als functie van de afstand tot de trillingsbron.



Zoals in de vorige paragraaf is weergegeven geeft een stemvork een sinusvormige trilling. Indien een stemvork wordt aangeslagen zullen de trillende benen van de stemvork de omgevende lucht moleculen in een trillende beweging brengen waardoor periodieke luchtverdichtingen en luchtverduunningen ontstaan.

Deze luchtverdichtingen en luchtverduunningen zijn in feite kleine luchtdrukvariaties die zich voortplanten. In *figuur 1.9* is een trillende stemvork weergegeven. Het verloop van de luchtdrukvariaties is rechts van de stemvork aangegeven. De sinusvormige curve geeft nu het verloop van de luchtdruk aan als functie van de afstand tot de trillingsbron op een bepaald tijdstip. Het is bekend dat de

voortplantingssnelheid van een geluidstrilling in lucht 340 m/s bedraagt. Als λ de golflengte in meters is, dan wordt het aantal trillingen per seconde, de frequentie f , bepaald door:

$$f = \frac{340}{\lambda} \quad (1)$$

De periodetijd bedraagt:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

Uit (1) en (2) volgt:

$$T(s) = \frac{\lambda(m)}{340\left(\frac{m}{s}\right)} \quad (3)$$

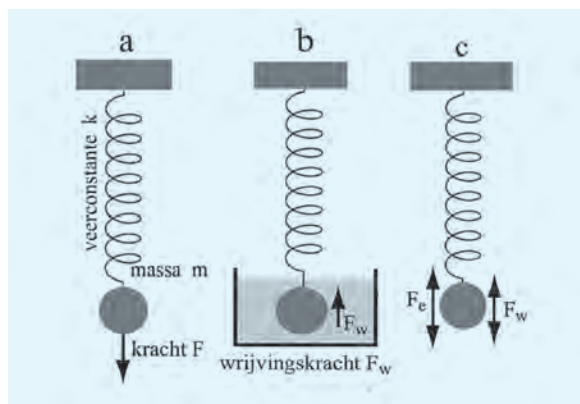
Er is dus een wiskundige relatie tussen periodetijd, frequentie, snelheid en golflengte.

1.2.5 Natuurlijke, gedempte en gedwongen trillingen. Resonantie

In *paragraaf 1.2.2* is een drietal voorbeelden gegeven van systemen die een sinusvormige trilling kunnen opwekken: een veer, een stemvork en een slinger. Als een dergelijk systeem in beweging wordt gezet, trilt het sinusvormig (harmonisch) in zijn **natuurlijke frequentie**.

Figuur 1.10

- a Een trillend veersysteem zonder wrijving.
- b Een trillend veersysteem met wrijving.
- c Een door F aangedreven veer.



In *figuur 1.10* zijn de drie veersystemen getekend. Als bij **a** het bolletje met de massa **m** een eindje naar beneden wordt getrokken trekt de veer terug met een kracht **F**. Deze kracht is evenredig met de uitrekking (**lengte-toename**) van de veer. Wiskundig kan dit uitgedrukt worden in de formule:

$$\mathbf{F} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{u}$$

Hierin is **k** de veerconstante, die groot is als de veer stug is (een grote stijfheid heeft) en klein is als de veer slap is. In het theoretische geval dat het massabolletje en de veer helemaal geen wrijving ondervinden zal de trilling harmonisch en continu zijn. De trilling is dan **ongedempt**.

De grafiek van de uitwijking **u** als functie van de tijd wordt gegeven door de formule:

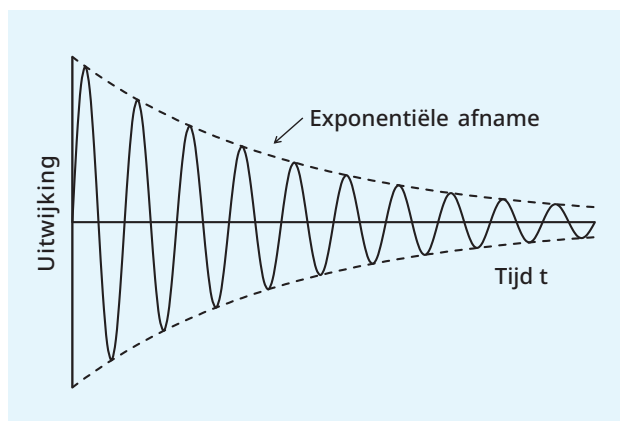
$$\mathbf{u(t)} = \mathbf{A \sin 2\pi f_0 t} \quad \text{of} \quad \mathbf{u(t)} = \mathbf{A \sin \omega_0 t}$$

Hierin is **f₀** de natuurlijke frequentie van de trilling. De cirkelfrequentie **ω₀** is gelijk aan **2πf₀**. De amplitude wordt gegeven door **A**. De frequentie of cirkelfrequentie kan worden berekend als **k** en **m** bekend zijn met de formule:

$$2\pi f_0 = \omega_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{k}}{\mathbf{m}}}$$

Hoe stugger de veer (een grote **k**-waarde) hoe hoger de frequentie van de natuurlijke trilling; hoe groter de waarde van de massa **m** hoe lager de frequentie. In de praktijk is er altijd wrijving aanwezig, waardoor de natuurlijke trilling zal uitdoven. In de *figuur 1.10b* zien we dat de wrijving wordt gesymboliseerd door **F_w = R.v** de wrijvingskracht op het bolletje in de vloeistof. De kracht **F_w** is evenredig met de snelheid **v** van het bolletje. De evenredigheidsconstante **R** is een maat voor de wrijving (weerstand). Het verloop van de gedempte natuurlijke trilling is weer gegeven in *figuur 1.11*.

Figuur 1.11 Een gedempte natuurlijke trilling als functie van de tijd.



De amplitude **A** van de trilling neemt exponentieel af. De formule voor deze afname (de stippellijn) luidt:

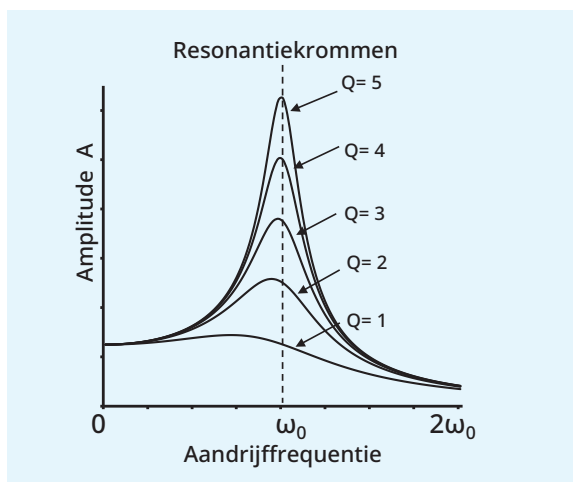
$$A(t) = A_0 e^{-\frac{R}{2m}t}$$

Hierin is **A₀** de beginamplitude (voor $t = 0$). Als **R** groot is en/of **m** klein, neemt de amplitude snel af en dooft de trilling snel uit. (**e** is het grondtal van de natuurlijke logaritme en heeft de waarde 2,7182818.....)

Veronderstel eens dat op het (ijzeren) bolletje – terwijl op het bolletje een wrijvingskracht blijft werken – een wisselende kracht **F_e**, die bijvoorbeeld sinusvormig varieert met de frequentie van $\omega_e = 2\pi f_e$, wordt uitgeoefend (zie figuur 1.10 c)¹. Er kan dan worden berekend met welke amplitude **A** het bolletje (ook sinusvormig) trilt en het amplitudeverloop kan worden uitgezet in een grafiek (zie figuur 1.12). De verschillende krommen in de figuur heten de **resonantiekrommen**.

¹ De wisselende kracht zou kunnen worden opgewekt door een elektromagneet waardoor een sinusvormige wisselstroom wordt gestuurd die onder het bolletje is geplaatst. De wisselende kracht voert energie toe aan het bolletje, die het wrijvingsverlies compenseert.

Figuur 1.12 Resonantiekrommen met verschillende Q-factoren.



De waarde van de aandrijffrequentie ω_e waarvoor de kromme zijn maximum heeft, heet de resonantiefrequentie ω_0 van het trillende veersysteem.

De maximumwaarde (**opslingering**) wordt bepaald door de wrijving **R** (weerstand). De **Q-waarde (Quality factor)** wordt gebruikt om de waarde van de bandbreedte van het maximum aan te geven. De **Q-factor** wordt berekend met de formule:

$$Q = \frac{\omega_0 m}{R}$$

Als **R** klein is, dan wordt voor een vaste waarde van **m** de Q-factor groot, hetgeen betekent dat de opslingering groot is. Uit de grafieken zien we ook dat als **R** groter wordt, de resonantie-frequentie naar een lagere waarde verschuift en de kromme minder spits wordt.

1.2.6 Complexe periodieke trillingen

Om ons heen zijn vele geluiden van allerlei aard hoorbaar. De enkelvoudige of sinusvormige geluidstrilling, zoals die van een stemvork, komt in onze dagelijkse 'geluidswereld' nauwelijks voor. De meeste geluiden die wij steeds weer kunnen waarnemen zijn zogenaamd complex van karakter.

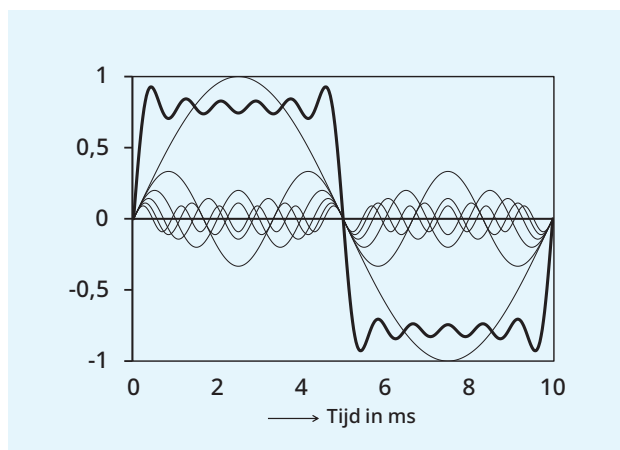
Een belangrijke groep vormt de scala van geluidstrillingen met een klankkarakter (viool, fluit, zangstem, autoclaxon, enzovoort). Deze complexe trillingen zijn

periodiek. Dat wil zeggen, indien wij deze trillingsvormen grafisch zichtbaar maken, zien we bij een specifiek geluid een willekeurige en grillige, maar steeds weerkerende golfvorm. In wiskundige zin, maar ook in de praktijk, kan iedere periodieke complexe trilling worden opgebouwd uit een aantal sinusvormige trillingen. De frequenties van de samenstellende trillingen, de grondtoon met zijn boventonen, zijn altijd een veelvoud van de grondfrequentie.

De frequentie van de grondtoon is bepalend voor de periodiciteit en daarom voor de toonhoogte. Zoals hiervoor vermeld toonde de wiskundige **Fourier** aan dat ieder geluid (zowel complexe periodieke trillingen als ruis- en klikgeluiden) opgebouwd kan worden uit sinusvormige trillingen (**Fourier-analyse**). De wijze van samenstelling, de grootte van de amplitude en de fase van de verschillende trillingen bepalen uiteindelijk de uiterlijke vorm van de complexe trilling en daarmee ook de klankkleur of het timbre van de trilling. Een en ander wordt duidelijk gemaakt bij enkele speciale complexe periodieke trillingen, zoals de **blokgolf**- en de **zaagtand-trilling**.

Voorbeeld 1 - De complexe periodieke trilling *de blokgolf*

Figuur 1.13 Constructie van een 'blokgolf' (bij benadering)



Een zuivere ideale 'blokgolf-trilling' (voorbeeld: blokgolf van 100 Hz.) bestaat uit een oneindig aantal sinusvormige trillingen, met frequenties van 100, 300, 500, 700, 900, 1100, 1300, ... Hz waarvan de amplitude afneemt overeenkomstig de reeks van $1, \frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \frac{1}{7}, \frac{1}{9}, \frac{1}{11}, \frac{1}{13}, \dots$

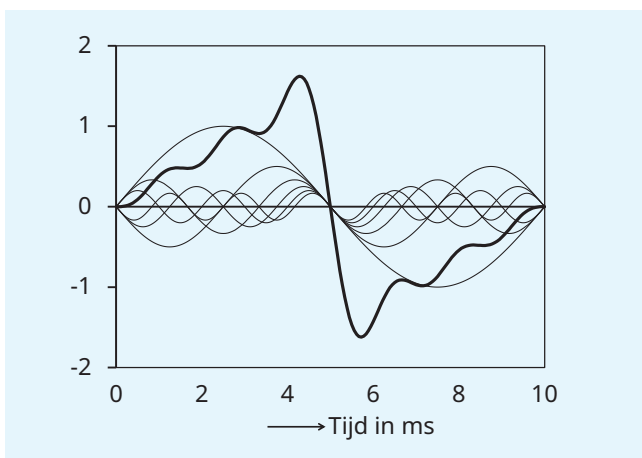
De fasehoek is van iedere trilling gelijk aan 0° . De boventonen van respectievelijk 200, 400, 600, 800, 1000, ... Hz ontbreken. De dunne lijnen geven de afzonderlijke sinustrillingen weer. De dikke lijn is de benadering van een blokgolf samengesteld uit een zestal sinusvormige trillingen van 100 tot en met 1100 Hz.

In wiskundige vorm wordt de blokgolf (bij benadering) voorgesteld volgens de formule:

$$\sin 2\pi f_1 t + 1/3 \cdot \sin 2\pi f_3 t + 1/5 \cdot \sin 2\pi f_5 t + 1/7 \cdot \sin 2\pi f_7 t + 1/9 \cdot \sin 2\pi f_9 t + \dots$$

Voorbeeld 2 - De complexe periodieke trilling *de zaagtand*

Figuur 1.14 De complexe periodieke trilling de 'zaagtand' (bij benadering).



In bovenstaande figuur zien wij de constructie van een 'zaagtand-trilling' bestaande uit 6 sinusvormige trillingen van 100, 200, 300, 400, 500, 600 Hz. De amplitude neemt af volgens de reeks $1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, \dots$

De fase(hoek) van de eerste trilling is 0° , maar van de tweede opvolgende trilling is deze 180° . De derde trilling heeft weer een fasehoek van 0° , de vierde een fasehoek van 180° . enz. De dunne lijnen geven de afzonderlijke sinussen weer, de dikke lijn (de benadering van de 'zaagtand' curve) vormt de som van deze sinusvormige trillingen.

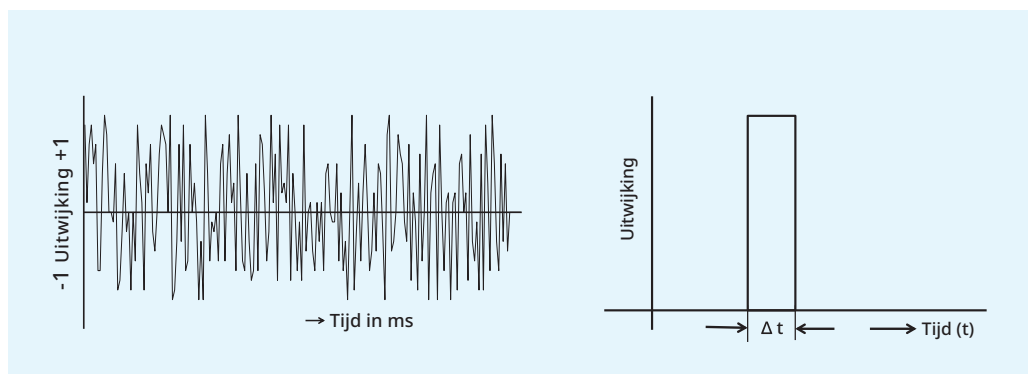
In wiskundige vorm wordt de zaagtand (bij benadering) voorgesteld volgens de formule:

$$\sin 2\pi f_1 t - 1/2 \cdot \sin(2\pi f_2 t) + 1/3 \cdot \sin 2\pi f_3 t - 1/4 \cdot \sin(\pi f_4 t) + 1/5 \cdot \sin 2\pi f_5 t + \dots$$

1.2.7 Ruis- en impulsgeluiden

Ook geluiden met een ruis- of impuls karakter zijn samen te stellen uit sinusvormige trillingen, maar een periodiciteit, zoals bij geluiden met een klank karakter, ontbreekt. Tevens is de vaste systematiek van de opbouw van een grondtoon met boventonen met alleen frequenties die een veelvoud zijn van de frequentie van de 1e harmonische (grondtoon) afwezig.

Een ruisgeluid bestaat uit alle frequenties tussen 0 Hz en oneindig (in de praktijk tot ongeveer de hoogst waarneembare frequentie van 20.000 Hz). De amplitude en de fase van iedere sinus hebben een willekeurige waarde. Strikt wiskundig uitgedrukt is een ruis een signaal waarbij de uitwijking op elk volgend moment een onvoorspelbare waarde heeft. Als in een grafiek een zeer grote rij willekeurige getallen, in het Engels: **(at random)** met elkaar worden verbonden wordt een ruissignaal verkregen.



Figuur 1.15a (links) en 1.15b (rechts) Grafische weergave van een ruis (**1.15a**) en van een enkele impuls- of klik-geluid (**1.15b**) in het tijddomein.

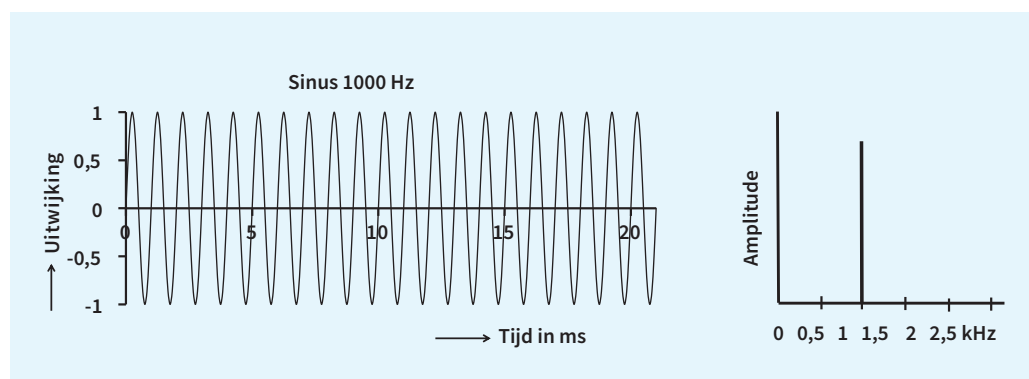
In *figuur 1.15a* is een ruissignaal getekend met een rij getallen tussen **1** en **-1**. Een speciale ruis is de **witte ruis**. Hierbij zijn ook alle frequenties aanwezig, maar de amplitude van iedere sinusvormige trilling schommelt in willekeurige volgorde om één vaste waarde. Ook een enkele impuls of klik bevat vele frequenties

(zie *figuur 1.15b*). Als de klik extreem kort is ($\Delta t \rightarrow 0$), bevat deze alle frequenties vanaf **0 Hz** tot oneindig. In de praktijk is het een goede regel de hoogste aanwezige frequentie gelijk te stellen aan $1/\Delta t$. Dit betekent dat indien de pulsduur **0,1 ms** bedraagt, de hoogst aanwezige frequentie **10 kHz** is.

1.3 Spectra

1.3.1 Spectrum van een sinusvormige trilling

Hoewel alle geluiden weergegeven kunnen worden als variaties van de geluidsdruk gedurende een tijdsperiode, wordt dit al snel onoverzichtelijk als wij een wat gecompliceerde complexe trilling met zijn samenstellende sinusvormige componenten willen weergeven. Vandaar dat men gezocht heeft naar een weergave die duidelijker aangeeft uit welke samenstellende delen een complexe trilling bestaat.

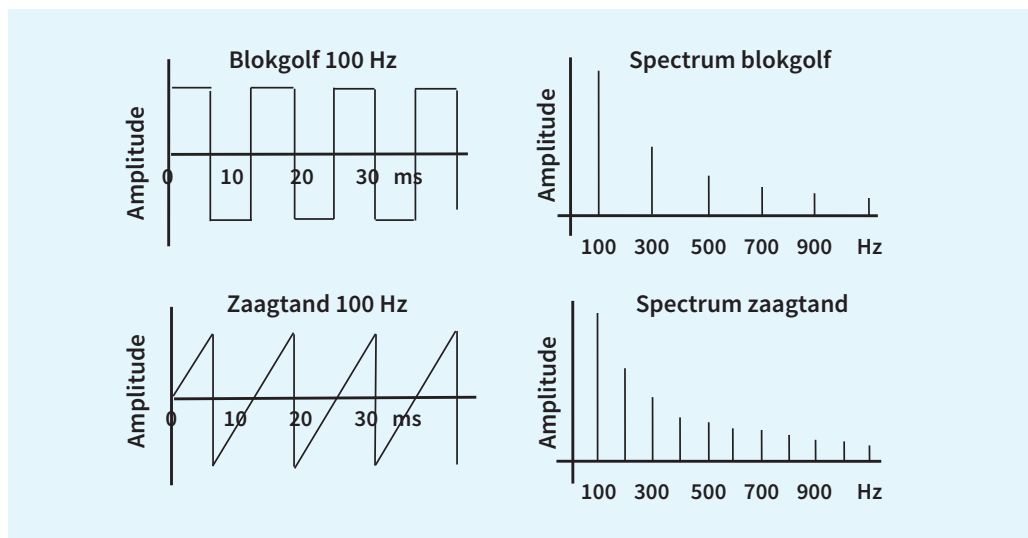


Figuur 1.16a (links) en 1.16b (rechts) Een sinusvormige curve van 1000 Hz – waarvan verondersteld wordt dat deze enige tijd duurt, bijvoorbeeld enkele seconden – getekend in het tijddomein (**1.16a**) en in het frequentiedomein (**1.16b**). Het spectrum met één frequentie.

Door een zogenaamd spectrum te maken, waarbij verticaal de amplitude of de geluidsterkte wordt uitgezet en horizontaal de frequentie in plaats van de tijd, wordt een beter overzicht verkregen. In *figuur 1.16b* zien wij de spectrale weergave van de sinusvormige trilling van 1000 Hz waarvan verondersteld wordt dat deze lang duurt. Het spectrum wordt gesymboliseerd door een enkele verticale lijn met een lengte overeenkomstig de geluidsterkte of amplitude.

1.3.2 Spectra van complexe periodieke trillingen

Voor het spectrum van de ‘blokgolf’ en van een ‘zaagtand’ kan gebruik gemaakt worden van hetgeen in *paragraaf 1.2.6* is beschreven. In *figuur 1.17* zijn nog eens een echte blokgolf en een zaagtand van 100 Hz getekend en daarnaast zijn de spectra van de eerste 6 harmonischen voor de blokgolf en 11 harmonischen voor de zaagtand weergegeven. Bij de blokgolf zijn alleen de frequenties van 100, 300, 500, 700, 900, 1100... aanwezig; bij de zaagtand zijn alle frequenties die veelvouden zijn van 100 Hz weergegeven.



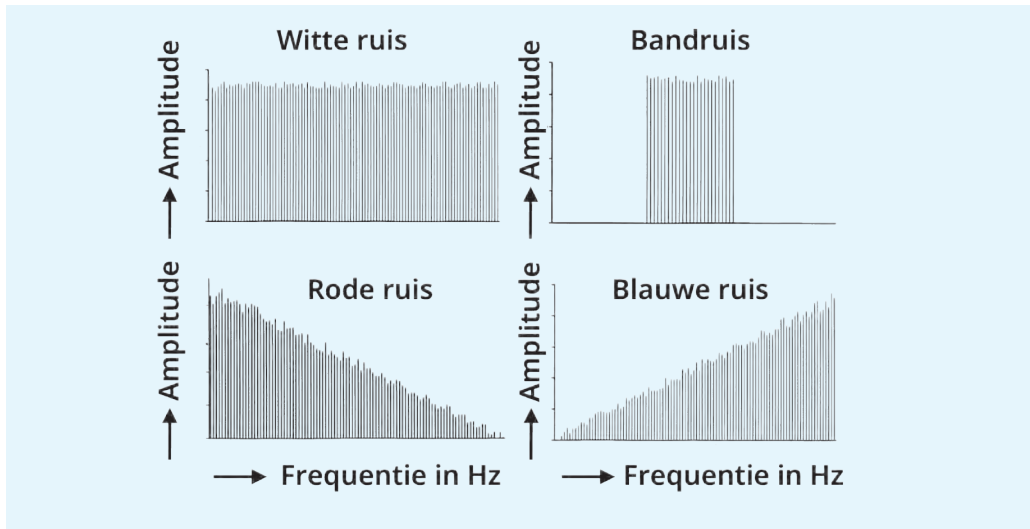
Figuur 1.17 Een ‘blokgolf’- en een ‘zaagtand-trilling’, beide van 100 Hz, weergegeven in het tijddomein, terwijl rechts de spectra met respectievelijk de eerste 6 en 11 harmonischen zijn weergegeven.

Zoals in *paragraaf 1.2.6* is aangegeven, is voor de vorm en de aard van de periodieke complexe trilling ook de fase van elke sinusvormige component van belang. Deze wordt niet in bovenbedoeld amplitude-spectrum aangegeven. Daarvoor zou een fasespectrum gemaakt moeten worden.

1.3.3 Spectra van ruis

Zoals eerder aangegeven bestaat witte ruis uit alle frequenties van 0 tot 20.000 Hz met gemiddeld dezelfde amplitude. In *figuur 1.18* is het spectrum van een witte ruis op eenvoudige wijze aangegeven. Als het frequentiebereik wordt gelimiteerd, bijvoorbeeld van 1000 Hz tot 2000 Hz, spreken we van een **witte bandruis**

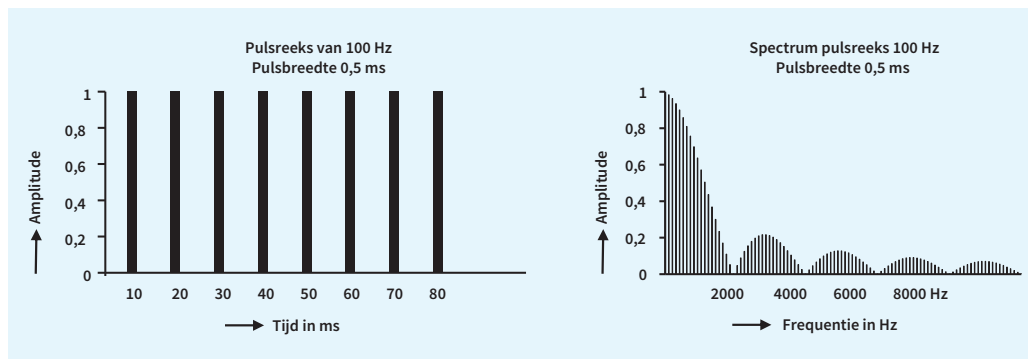
(octaafband). Indien de hogere frequenties bevoordeeld worden boven de lagere frequenties spreken wij naar analogie in de optica van een **blauwe ruis**. Indien het omgekeerde het geval is wordt er gesproken van een **rode ruis**. In de audio-logie wordt ook vaak gesproken van een **roze ruis**.



Figuur 1.18 Spectra van een ‘witte ruis’, een ‘bandruis’, een ‘rode ruis’ en een ‘blauwe ruis’.

1.3.4 Spectrum van een impulsgeluid

In *figuur 1.19a* is een reeks rechthoekige pulsen (**clicks**) aangegeven met een repetitiefrequentie van 100 Hz (de periodetijd is 10 ms). Voor de pulsduur Δt is uitgegaan van 1/20 maal de periodetijd ($1/20 \times 10 = 0,5$ ms). Wanneer op deze reeks pulsen een **Fourier-analyse** wordt toegepast, dan ontstaat er een spectrum zoals in *figuur 1.19b* is aangegeven.

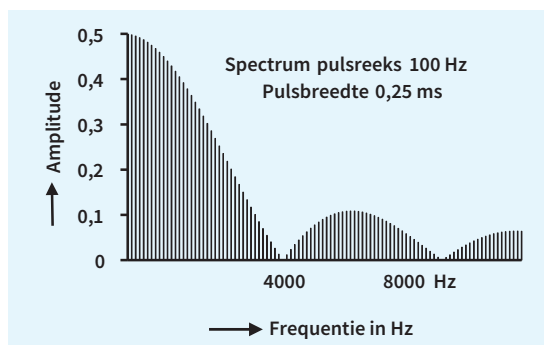


Figuur 1.19a en 1.19b Links is een pulsreeks van 100 Hz aangegeven met een pulsduur van 0,5 ms. Rechts is het spectrum van deze pulsreeks getekend.

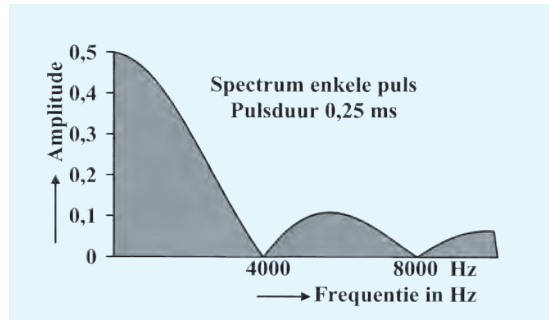
Het frequentiespectrum is opgebouwd uit afzonderlijke sinusvormige trillingen van 0, 100, 200, 300, ... Hz. Dit zijn exact de veelvouden van de herhalingsfrequentie van de pulsreeks. De amplitude van de eerste reeks sinussen is afnemend en is 0 bij 2000 Hz. Het eerste nulpunt op de frequentie-as ligt bij de waarde van $1/\text{pulsduur}$. Voor een pulsduur van **0,5 ms** is dit $1/0,0005 = 2000$ Hz. De volgende sinusreeks bestaat uit frequenties van 2100, 2200, 2300, ... Hz. De amplituden zijn kleiner dan van de eerste reeks en deze wordt weer 0 bij 4000 Hz.

Als we de pulsduur van de pulsreeks van 100 Hz halveren tot 0,25 ms dan wordt het spectrum verkregen van *figuur 1.20*. We zien dat bij het verkleinen van de pulsduur het eerste 0-punt verschuift naar rechts (bij halvering van de pulsduur wordt de frequentie van het eerste 0-punt nu 4000 Hz).

Figuur 1.20 Spectrum van een pulsreeks van 100 Hz met een pulsduur van 0,25 ms.



Figuur 1.21 Spectrum van een enkele puls met een pulsduur met een pulsduur van 0,25 ms.



Wij zien ook dat de amplituden in waarden zijn gehalveerd ten opzichte van die in *figuur 1.19b*. Als we de herhalings-frequentie verminderen, bij voorbeeld tot 50 Hz, dan zullen de frequenties van het spectrum veelvoudig zijn van 50 Hz en komen de sinussen van het spectrum dicht bij elkaar te liggen.

Uit deze gegevens kunnen we drie conclusies trekken.

- 1 Als de herhalingsfrequentie klein wordt (tot nul nadert) dan is er eigenlijk nog maar **één** puls. Alle sinussen liggen dan tegen elkaar. Het spectrum van een enkele puls bestaat dus uit alle frequenties van nul tot oneindig. Het spectrum kan afgebeeld worden als de omhullende van bijvoorbeeld de grafiek van *figuur 1.20* (zie *figuur 1.21*).
- 2 Als de pulsduur tot nul nadert dan zal het eerste nulpunt naar oneindig verschuiven (oneindig hoge frequentie).
- 3 Bij verkleinen van de pulsduur wordt ook de amplitude van de sinussen steeds kleiner. Indien de pulsduur tot nul nadert, nadert ook de amplitude tot nul.

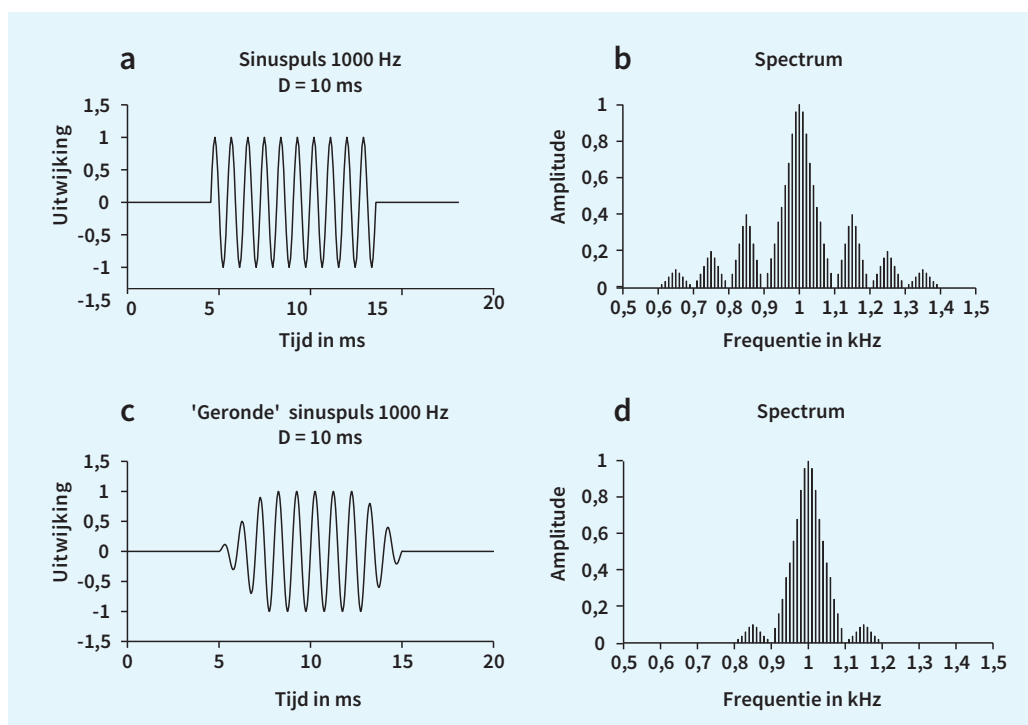
Het is nu aannemelijk geworden dat het spectrum van een enkele zeer kortduurende puls of klik bestaat uit alle frequenties van 0 tot bijna oneindig groot met allemaal dezelfde, zij het zeer kleine, amplitude.

1.3.5 Spectrum van een toonpuls

Het is interessant om de spectra van afzonderlijke **toonpulsen** nog eens nauwkeurig te bezien. Bij de toonpuls (**toneburst**) treden nagenoeg dezelfde effecten op als bij afzonderlijke klikgeluiden. In *figuur 1.22a* is een toonpuls van 1000 Hz weergegeven gedurende 10 ms (exact 10 perioden). De toonpuls begint en eindigt abrupt. Dit betekent in feite dat zowel bij het begin als bij het eind een soort **klikeffect** optreedt. Voor het spectrum heeft dit ingrijpende gevolgen.

De kortdurende sinus heeft nu niet één spectraallijn, maar een continu spectrum over een aantal gebieden van het frequentiebereik zoals in *figuur 1.22b* is weergegeven. Het hoofdgebied is gegroepeerd rondom de 1000 Hz en is 200 Hz breed. De overige gebieden zijn 100 Hz breed.

Als vuistregel geldt dat bij een toonpuls met een duur **D** de gebieden van de randspectra **1/D** breed zijn (**D = 10 ms = 10⁻² s**): het frequentiegebied wordt dan bepaald door: **1/D = 1/10⁻² = 100 Hz**). De geluidsenergie van de enkele sinuspuls wordt als het ware verdeeld over een groot frequentiegebied (**energy splatter**).



Figuur 1.22

- a** Sinusvormige toonpuls van 1000 Hz gedurende 10 ms ($D = 10$ ms).
- b** Spectrum van toonpuls met een groot 'energy splatter' wegens abrupte opbouw en afname van de puls.
- c** Sinusvormige toonpuls met geleidelijke opbouw en afname van de amplitude.
- d** Spectrum van de geleidelijk opgebouwde toonpuls. Het spectrum is nu veel smaller.

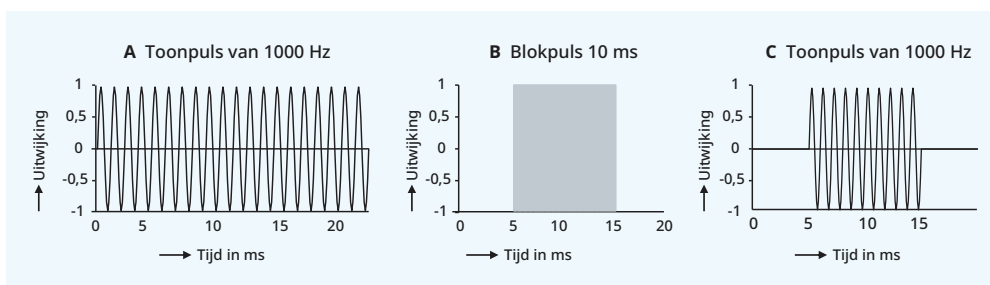
In *figuur 1.22c* is dezelfde toonpuls weergegeven, maar nu met een geleidelijke opbouw en afname van de uitwijking. Het klikverschijnsel is nu veel geringer, hetgeen tot gevolg heeft dat de **energy splatter** veel geringer is, zoals in *figuur 1.22d* duidelijk te zien is.

Bij de audiometrie is het van belang dat de aan de patiënt te geven toonpuls niet te kort van duur mag zijn. Ook de opbouw en de beëindiging van de puls moet geleidelijk zijn (de grootte van de **fading** moet circa 100 ms bedragen). De audiometer moet op de mate van fading goed geijkt zijn. Indien aan deze voorwaarden onvoldoende is voldaan kan het zijn dat de patiënt niet reageert op de bedoelde frequentie van de puls, maar op een andere frequentie binnen het spectrum.

Hieronder wordt in *intermezzo 1.2* een tweetal voorbeelden gegeven over het maken van een puls en het effect op het spectrum. Vooral interessant is de productie van een puls door deze te vermenigvuldigen met een ‘**Gausscurve-puls**’ in plaats van een ‘**blokpuls**’.

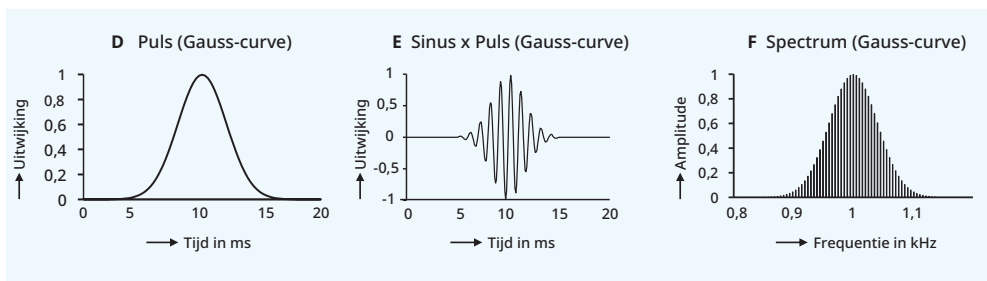
Intermezzo 1.2 - Invloed van een puls op het spectrum

Een toonpuls zoals weergegeven in *figuur 1.22a* kan worden verkregen door een langdurige sinusvormige trilling (bijvoorbeeld 1000 Hz met een duur van 20 ms) te vermenigvuldigen met een blokpuls met een duur van 10 ms (zie figuren A, B, C).



In *figuur 1.22* is weergegeven dat een sinuspuls van 1000 Hz met een duur van 10 ms een spectrumband rondom de 1000 Hz geeft met een breedte van 200 Hz, met aan beide zijden een reeks zijbanden. Een afronding van een sinuspuls heeft tot gevolg dat het aantal zijbanden en de amplituden daarvan zullen afnemen. Een speciale ‘afronding’ van een toonpuls kan worden verkregen door een sinusvormige trilling te

vermenigvuldigen met een ‘gaussvormige’ puls. Dan ontstaat er geen enkele zijband meer en heeft ook de omhullende van het spectrum een gaussvormig verloop (zie figuren D, E en F).



1.4 Geluidsdruk. Geluidsintensiteit

1.4.1 Inleiding

Van een aangeslagen stemvork of een trillende snaar trillen de benen of trilt de snaar rondom een evenwichtsstand. Door de heen en weer gaande bewegingen worden luchtmoleculen in trilling gebracht, waardoor rondom de geluidsbron luchtverdichtingen en luchtverduunningen optreden, die zich voortplanten. Hoe groter de maximale uitwijking (amplitude), des te harder het geluid is en des te meer geluidsenergie er wordt uitgestraald. Deze energie wordt in alle richtingen doorgegeven.

De grootte van de luchtdrukvariaties noemen wij de **geluidsdruk** of **geluidssterkte**. Deze wordt uitgedrukt in de eenheid **Pascal (Pa)**. De hoeveelheid geluids- of trillingsenergie die ten gevolge van de geluidsdruk een bepaald oppervlak per tijdseenheid treft (bijvoorbeeld het trommelvlies) wordt als geluidsintensiteit gedefinieerd, en uitgedrukt in de eenheid **Watt/m² (W/m²)**. De geluidsintensiteit heeft een vaste relatie met de geluidsdruk en wel zo dat, indien de geluidsdruk met een factor 2 toeneemt, de intensiteit met een factor 4 toeneemt. Als de geluidsintensiteit met **I** wordt aangeduid en de geluidsdruk met **P** dan is

$$I \sim P^2 \quad \text{of} \quad I = c P^2$$

De geluidsintensiteit is evenredig met het kwadraat van de geluidsdruk.

Men heeft, in onderzoek bij grote groepen gezonde jonge personen, gemeten dat

een zuivere toon met een frequentie van 1000 Hz nog net hoorbaar is voor een gezond menselijk oor indien de geluidsdruk bedraagt:

$$2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} = (20 \text{ } \mu\text{Pa} = 20 \text{ micro-Pascal})$$

Deze geluidsdruk correspondeert met een geluidsintensiteit van:

$$10^{-12} \text{ W/m}^2$$

In *intermezzo 1.3* wordt uiteengezet dat een geluidsdruk van $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ overeenkomt met een geluidsintensiteit van 10^{-12} W/m^2 .

Intermezzo 1.3

Wanneer de benen van een stemvork trillen dan wordt een sinusvormige trilling opgewekt met een bepaalde amplitude. Er treden dus kleine luchtdrukvariaties (p) op, die eveneens een sinusvormig verloop hebben. De luchtdeeltjes krijgen een heen en weer gaande **momentane snelheid (u)** waardoor de luchtdeeltjes zich heen en weer verplaatsen (eveneens volgens een sinuscurve). Door de elasticiteit van de lucht planten de lucht-drukvariaties zich voort. Indien wij de luchtdrukvariaties willen meten of ermee willen rekenen, gaan wij niet uit van de momentane waarde (p) maar van een **soort gemiddelde** die we de effectieve waarde noemen (in het Engels: **root-mean-square**). Deze is bij een sinus ongeveer 0,7 maal de amplitude. Deze druk duiden wij vaak aan met een hoofdletter (P). Er geldt nu dat de **gemiddelde deeltjessnelheid (U)** van de lucht bij propagatie van geluidsgolven gelijk is aan de geluidsdruk gedeeld door de impedantie van de lucht, of in formule:

$$U = P/Z$$

Waarbij Z de **specifieke akoestische impedantie** van de lucht is. Deze Z is weer gelijk aan:

$$Z = \rho \cdot v$$

Hier is (ρ) de dichtheid van de lucht (1,21 kg/m³) en (v) de snelheid van het geluid van 343 m/s (bij 20°). [Bij droge lucht en 0° is de snelheid 331 m/s.] Aangezien de intensiteit van een geluidsgolf het product is van de effectieve geluidsdruk en de gemiddelde deeltjessnelheid, kan nu het verband gelegd worden tussen de effectieve geluidsdruk (P) en de intensiteit (I).

$$I = P \cdot U = P \cdot P / Z = P^2 / \rho \cdot v$$

Hieruit volgt:

$$P^2 = c \cdot I \quad \text{waarin } c \text{ gelijk is aan } \rho \cdot v$$

Indien het verband tussen de geluidsdruk en de intensiteit bij de drempel van de mens wordt bepaald dan blijkt:

$$I = \frac{(2 \times 10^{-5})^2}{1,21 \times 344} = \text{circa } 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

1.4.2 De decibel ²

In de praktijk is het vaak minder van belang om precies te weten hoeveel energie een geluidsbron uitstraalt. Meestal is men meer geïnteresseerd in het vergelijken van intensiteiten of geluidsterkten van verschillende geluiden. Om wat makkelijker te kunnen rekenen met intensiteits- of geluidsterkteverhoudingen is een nieuwe eenheid ingevoerd: **de decibel**.

Het intensiteits- of geluidsdrukniveau L in **dB** wordt gedefinieerd als:

$$L_{\text{dB}} = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} = 20 \cdot \log \frac{P_1}{P_0}$$

Hierin is **log** de logaritme met grondtal 10.

Zoals hiervoor al is beschreven kunnen jongeren met gezonde oren nog net een geluidstrilling van 1000 Hz met een geluidsterkte van **$2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (0 dB)**, overeenkomend met een intensiteit van **10^{-12} W/m^2 (120 dB)** waarnemen. Dit niveau definiëren wij nu als **0 dB SPL (Sound Pressure Level)**.

Indien de intensiteit met een factor 10 wordt verhoogd neemt de geluidsintensiteit met 10 dB toe, volgens bovenstaande formule. Een geluid dat 100 maal in

² De naamgeving van de eenheid bel en decibel (1/10 bel) is afgeleid van de naam van Alexander Graham Bell, die in 1847 te Edinburgh werd geboren en in 1871 naar de Verenigde Staten van Amerika emigreerde. Aldaar werd hij later benoemd tot hoogleraar in de fysiologie van de spraak te Boston. In 1876 vond hij de telefoon uit.

intensiteit groter wordt neemt 20 dB toe, en een geluid 10.000 maal zo intens geeft 40 dB toename. Als de **intensiteit 2x** zo groot wordt is de toename **3 dB**

Voor de geluidsdruk kan eenzelfde redenering worden gevolgd. Een geluid met geluidsdruk van $2 \cdot 10^{-5}$ Pa wordt gelijkgesteld aan 0 dB SPL. Een 100-voud toename van de geluidsdruk geeft een vermeerdering van 40 dB. Een toename met een factor 10.000 betekent 80 dB. Als de geluidsterkte 2x zo groot wordt betekent dit een toeneming van 6 dB. Enig gevoel voor het begrip dB is buitengewoon handig. Met behulp van enkele getallen kun je met voldoende nauwkeurigheid uit het hoofd de intensiteit of geluidsterkte in dB berekenen (*zie intermezzo 1.4*).

Intermezzo 1.4

Het leren hoofdrekenen met dB is zeer instructief. Als gegevens hebben we nodig:

$$\log 10 = 1 \quad \log 2 = \text{circa } 0,3 \quad \log 3 = \text{circa } 0,5$$

en de rekenregels: $\log a \cdot b = b \cdot \log a$ en $\log a \cdot b = \log a + \log b$

Voorbeeld 1

Een geluidsterkteniveau van 0,2 Pa is uitgedrukt in dB:

$$L_{dB} = 20 \log P_1 / P_0 = 20 \log 0,2 / 2 \cdot 10^{-5} = 20 \log 10^4 = 80 \text{ dB}$$

Voorbeeld 2:

Een geluidsdruk is 75 x zo groot als 20 μ Pa:

$$\begin{aligned} L_{dB} &= 20 \log P_1 / P_0 = 20 \log 75 \cdot 20 \cdot 10^{-5} / 20 \cdot 10^{-5} = 20 \log 75 = \\ &= 20 \log (3 \times 10 / 2 \times 10 / 2) = \\ &= 20 \{ \log 3 + (\log 10 - \log 2) + (\log 10 - \log 2) \} = \\ &= 20 \{ 0,5 + (1 - 0,3) + (1 - 0,3) \} = 20 \cdot 1,9 = 38 \text{ dB} \end{aligned}$$

(Een calculator zou 37,5 dB hebben opgeleverd.)

Voorbeeld 3

De intensiteit van een toon van een generator wordt met een factor 4 opgevoerd.

$$L_{dB} = 10 \log I_1 / I_0 = 10 \log 4 = 10 \log 2 \times 2 =$$
$$10 (\log 2 + \log 2) = 10 (0,3 + 0,3) = 6 \text{ dB}.$$

Hieronder is ter indicatie een geluidsschaal voor de ‘dagelijkse’ geluiden aangegeven. Deze tabel geeft een overzicht van de respectievelijke intensiteits- en geluidsdrukverhoudingen en de daarbij behorende waarden in dB.

Verhouding in intensiteit	Verhouding in geluidsdruk	Geluidsschaal in decibel	Geluidsschaal voor dagelijkse geluiden
1	1	0	Gehoordrempel
10	3,16	10	
100	10	20	Fluisteren
1.000	31,6	30	
10.000	100	40	Bromvlieg op 0,5 m.
100.000	316	50	
1.000.000	1000	60	Conversatiespraak
10.000.000	3160	70	
100.000.000	10.000	80	Zeer luide stem
1.000.000.000	31600	90	
10.000.000.000	100.000	100	Straaljager
100.000.000.000	316.000	110	
1.000.000.000.000	1.000.000	120	Pijndrempel

Tabel 1.2 Intensiteits- en geluidsdrukverhoudingen met bijbehorende waarden in dB.

1.5 Additie van geluidsniveaus

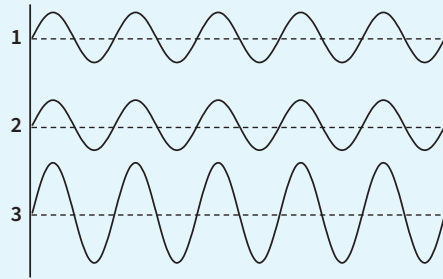
In *figuur 1.23* is de optelling van twee sinusvormige geluidstrillingen met gelijke frequentie en amplitude weergegeven (1) en (2). In *figuur 1.23a* zijn ook de fases gelijk, hetgeen bij optelling weer een sinus geeft met een tweemaal zo grote amplitude. In *figuur 1.23b* zijn de twee gelijke sinusvormige trillingen precies in tegenfase (180° verschil). Het resultaat is nu nihil, dat wil zeggen: de twee sinusvormige trillingen heffen elkaar op. In *figuur 1.23c* zijn de twee trillingen in fase verschillend, wat weer een sinus tot gevolg heeft met een amplitude die ligt tussen de uitersten in curve 3 van de *figuren 1.23 en 1.23b*.

Het voorgaande laat zien dat de uitkomst van additie van twee sinusvormige trillingen met dezelfde frequentie afhangt van de fase.

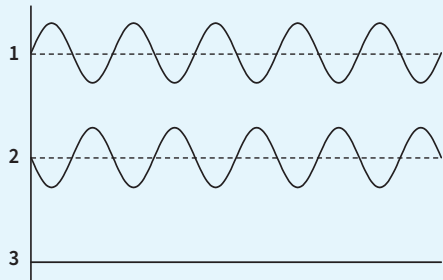
In *intermezzo 1.5* wordt het effect van de fase bij optelling van twee sinus-vormige trillingen op een wiskundige manier aangegeven

Figuur 1.23

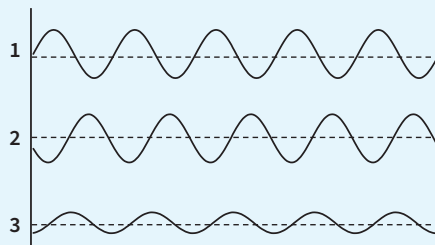
- a** Twee sinusvormige trillingen met dezelfde frequentie, dezelfde amplitude en dezelfde fase geeft een sinus met dezelfde frequentie en fase maar met een verdubbeling van de amplitude.



- b** Twee sinusvormige trillingen met dezelfde amplitude en dezelfde frequentie maar met een faseverschil van 180° geeft opgeteld een totale uitdoving.



- c Twee sinusvormige trillingen met dezelfde frequentie en dezelfde amplitude, maar met een faseverschil liggend tussen de 0° en 180° , geeft wederom een sinus met een amplitude die ligt tussen 0 en tweemaal de amplitude van de oorspronkelijke trilling (afhankelijk van het faseverschil)



Intermezzo 1.5

De optelling van twee sinusvormige trillingen met dezelfde amplitude **A** en (hoek-) frequentie **ω** (**$\omega = 2\pi f$**), maar met een faseverschil van **φ** , wordt bepaald door:*

$$A \sin \omega t + A \sin(\omega t - \varphi) =$$

$$A \left\{ 2 \sin \frac{1}{2}(\omega t + \omega t - \varphi) \right\} \left\{ \cos \frac{1}{2}(\omega t - \omega t + \varphi) \right\} =$$

$$2A \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right)$$

Dit is weer een trilling met een frequentie **f** en met een amplitude

$$2A \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

Vraag: bij welk faseverschil heeft de somtrilling ook weer de amplitude **A**?

Antwoord: er moet dan gelden:

$$2A \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) = A \quad \text{of} \quad \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{1}{2}$$

Dit geldt als:

$$\varphi = 120^\circ \quad \text{want} \quad \cos 60^\circ = \left(\frac{1}{2}\right)$$

* Volgens de goniometrische regel: $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cdot \cos \left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)$

Wanneer er sprake is van complexe geluiden, bijvoorbeeld een mengvorm van ruis en klanken zoals **lawaai**, dan heeft de fase een steeds veranderende waarde. De optelling is dan faseonafhankelijk. In de praktijk is het vaak van belang om te weten hoe hoog de lawaai-belasting zal zijn voor het menselijk oor, als diverse machines tegelijk in een ruimte in gebruik zijn. Van iedere machine wordt veelal het lawaainiveau in dB op het etiket aangegeven. Maar hoe hoog wordt nu het niveau als er twee of meer machines tegelijk in bedrijf zijn?

Omdat de eenheid dB een logaritmische maat is, mogen wij de dB-waarden niet zonder meer optellen. Dit is invoelbaar als we weten dat bij geluiden van 120 dB de pijngrens voor het oor wordt bereikt.

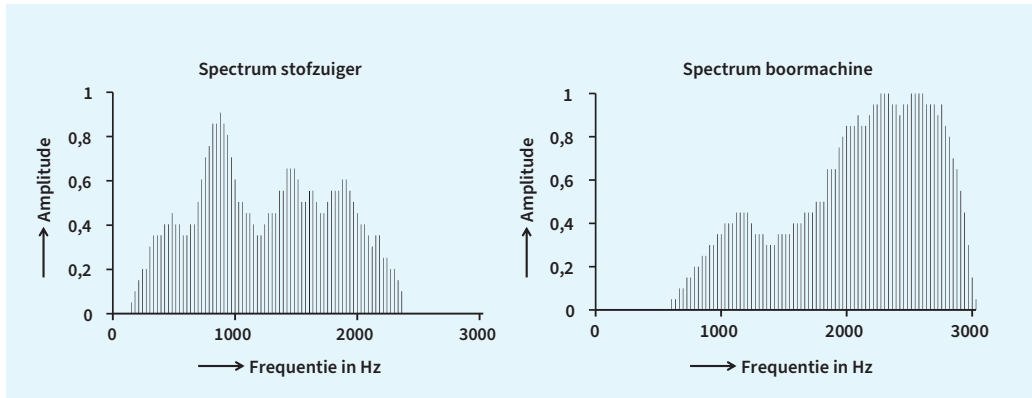
Als bijvoorbeeld twee machines in bedrijf zijn, die elk een lawaainiveau van bijvoorbeeld 70 dB produceren (hetgeen een gematigd niveau is), dan is het totale niveau zeker geen 140 dB. Het oor zou dan onmiddellijk grote schade oplopen. De waarden in dB's moeten eerst geïnverteerd (teruggezet) worden in lineaire intensiteitswaarden. Daarna kunnen de intensiteitswaarden $I_1, I_2, I_3, \dots$ opgeteld worden tot I_{tot} . Vervolgens kan de totale waarde weer omgezet worden in dB's.

In *intermezzo 1.6* wordt de inversie in intensiteitswaarden en de omzetting in dB's uitgewerkt. In de praktijk kunnen wij gebruik maken van de grafiek in *figuur 1.25*. Daarin kan eenvoudig worden afgelezen hoe groot het totale lawaainiveau in dB wordt als twee machines, elk met een geluidsniveau van respectievelijk (**X**) dB en (**Y**) dB, tegelijk in een ruimte worden gebruikt.

Eerst wordt het verschil in dB bepaald tussen de twee machines (**X-Y**). Dit verschil is uitgezet op de horizontale as van de grafiek (x-as). Bij een bepaalde waarde op de x-as kan op de y-as het getal in dB worden afgelezen dat opgeteld moet worden bij het hoogste lawaainiveau van de twee machines, om het totale geluidsniveau te verkrijgen.

Voorbeeld 1: stofzuiger en boormachine

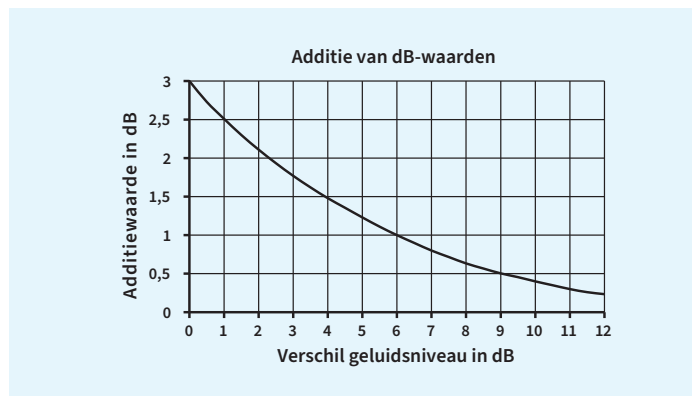
Twee machines, een stofzuiger en een boormachine, hebben geluidsspectra zoals in *figuur 1.24a* en *1.24b* zijn weergegeven. De spectra zijn grillig en bevatten veel harmonischen. De fase van iedere harmonische is willekeurig, zodat somming van intensiteiten mogelijk is. Wat is nu het totale intensiteitsniveau, wanneer deze twee machines tegelijk aangezet worden? Het verschil bedraagt **60 - 55 dB = 5 dB**. Bij het getal 5 van de x-as lezen we af dat het uiteindelijke lawaainiveau moet worden verhoogd met **1,2 dB** tot **61,2 dB** (zie *figuur 1.25*). Voor een berekening zie *intermezzo 1.6*.



Figuur 1.24 In de figuren 1.24a en 1.24b worden de geluidsspectra van twee machines (stofzuiger en boormachine) weergegeven met respectievelijk een geluidsniveau van 60 en 55 dB.

Figuur 1.25

Toename van lawaai in dB indien twee lawaaibronnen actief zijn. Op de x-as is het niveauverschil in dB van de 2 lawaaibronnen aangegeven. Op de y-as wordt de toename afgelezen.



Intermezzo 1.6

De stofzuiger geeft 60 dB af terwijl de boormachine een geluidsterkte heeft van 55 dB. Hieronder wordt eerst de intensiteit uitgerekend ten opzichte van het Internationaal 0-niveau van 10^{-12} W/m^2 door de dB-waarden te inverteren. Na additie van I_1 met I_2 tot I_{tot} kan de eindwaarde weer omgezet worden in dB. De uitkomst is zoals reeds uit de grafiek is afgelezen **61,2 dB**.

Intensiteit stofzuiger

$$L_{1\text{dB}} = 60 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} = 10 \log \frac{I_1}{10^{-12}}$$

Geïnverteerd geeft dit:

$$10^{\frac{60}{10}} = \frac{I_1}{10^{-12}}$$

Hieruit volgt:

$$I_1 = 10^6 \cdot 10^{-12}$$

Intensiteit boormachine

$$L_{2\text{dB}} = 55 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \frac{I_2}{10^{-12}}$$

Geïnverteerd geeft dit:

$$10^{\frac{55}{10}} = \frac{I_2}{10^{-12}}$$

Hieruit volgt:

$$I_2 = 10^{5,5} \cdot 10^{-12}$$

Totale intensiteit

$$I_{\text{tot}} = I_1 + I_2 = (10^6 + 10^{5,5}) \cdot 10^{-12}$$

Dit geeft

$$\frac{I_{\text{tot}}}{10^{-12}} = 10^6 (1 + 10^{-0,5}) = 10^6 \cdot 1,316$$

Terug naar de geluidssterkte in dB

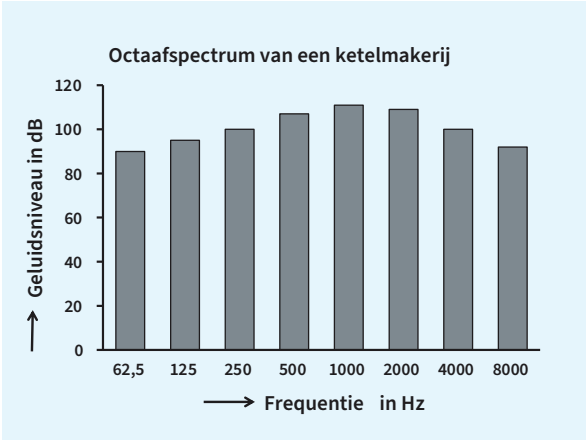
$$\begin{aligned} L_{\text{dB tot}} &= 10 \log (10^6 \cdot 1,316) = 10 \log 10^6 + 10 \log 1,316 \\ &= 10,6 + 10,12 = 61,2 \text{ dB} \end{aligned}$$

Voorbeeld 2: een ketelmakerij

Door een geluidsniveaumeter is per octaaf het niveau gemeten van een ketelmakerij. Zowel de grafiek als de tabel laat de niveaus voor de verschillende frequentiebanden zien (*figuur 1.26 en tabel 1.3*).

Figuur 1.26

Een geluidsniveauspectrum van een ketelmakerij. Op de verticale as is het geluidsniveau in dB uitgezet ten opzichte van het internationale 0-niveau van 10^{-12} W/m². Op de horizontale as staan de middenfrequenties van de filterbanden die een octaaf breed zijn.



Bandfreq. (Hz)	Niveau in dB	Niveau in W/m2
62,5	90	1,0 x 10-3
125	95	3,2 x 10-3
250	100	10,0 x 10-3
500	107	50,1 x 10- 3
1.000	111	125,9 x 10-3
2.000	109	79,4 x 10-3
4.000	100	10,0 x 10-3
8.000	92	1,6 x 10-3
Totaal		281,2 x 10-3 (=114,5 dB)

Tabel 1.3 In de derde kolom zijn de dB-waarden geïnverteerd naar intensiteitswaarden in W/m², daarna opgeteld, waarna vervolgens de uitkomst is geconverteerd naar dB's. Voor de berekening is de methode gevolgd die in *intermezzo 1.6* is weergegeven.

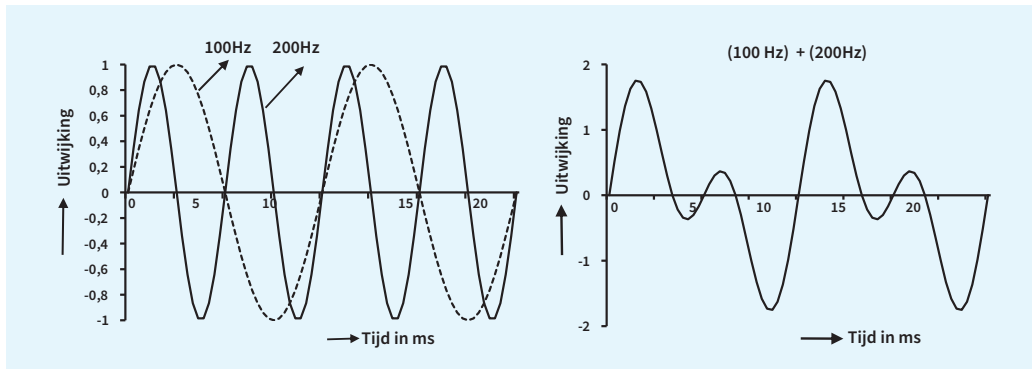
NB Uit dit tweede voorbeeld blijkt duidelijk dat bij de optelling alleen de niveaus in de sterkste banden noemenswaard meetellen.

1.6 Zwevingen. Modulaties

1.6.1 Zwevingen

Een eenvoudige periodieke complexe trilling kan worden verkregen door slechts 2 sinusvormige trillingen bij elkaar op te tellen, die van elkaar aanmerkelijk in frequentie verschillen. In *figuur 1.27a* zijn twee sinustrillingen getekend van 100 en 200 Hz met respectievelijk een periodetijd **T** van 10 ms en van 5 ms.

De curve in *figuur 1.27b* geeft de complexe trilling weer. Deze curve is verkregen door de sinusvormige trilling van 100 Hz en die van 200 Hz bij elkaar op te tellen. Indien wij de complexe trilling hoorbaar maken zal ons oor de twee frequenties apart waarnemen.



Figuur 1.27a (links) Twee sinusvormige trillingen van 100 en 200 Hz.

Figuur 1.27b (rechts) De samengestelde trilling.

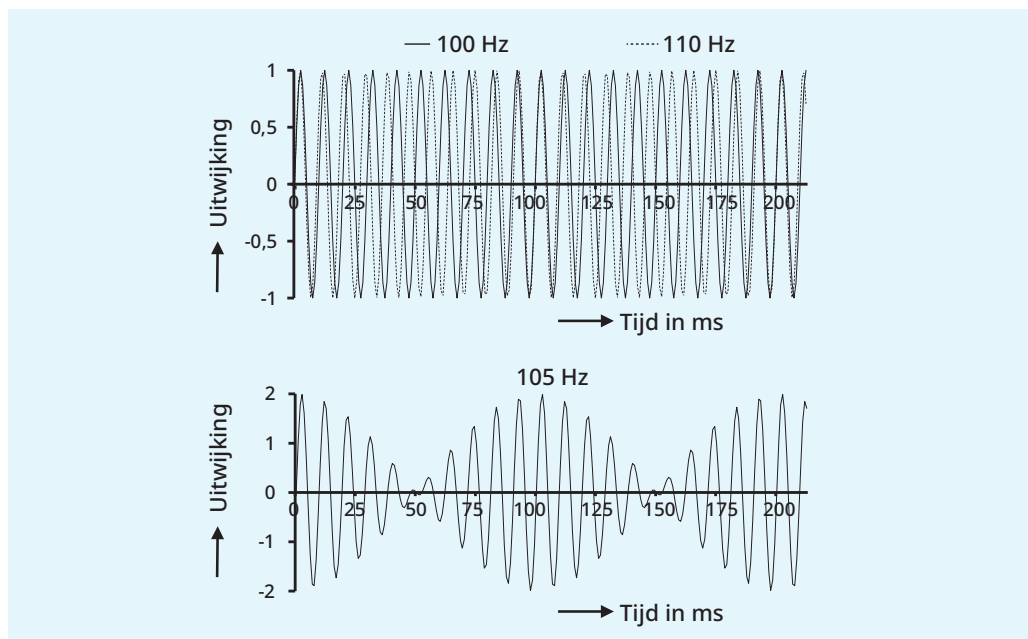
Wanneer twee sinusvormige trillingen met dezelfde amplitude en met frequenties die zeer dicht bij elkaar liggen bij elkaar gevoegd worden, ontstaat er een geheel ander fenomeen. Er wordt nu slechts één toon gehoord die in sterkte varieert. De frequentie van de toon wordt bepaald door:

$$\left[\frac{f_1 + f_2}{2} \right],$$

terwijl de frequentie van de sterktevariatie wordt bepaald door

$$\left[\frac{f_2 - f_1}{2} \right].$$

In *figuur 1.28* zijn twee sinustrillingen getekend van respectievelijk 100 en 110 Hz. De amplitudes van beide trillingen zijn gelijk. Er wordt nu één toon gehoord van **105 Hz**, die met een frequentie van **5 Hz** (de **zwevingsfrequentie**) varieert in sterkte. De frequentie van een zweving kan met behulp van goniometrie worden berekend, zoals is weergegeven in *intermezzo 1.7*.



Figuur 1.28a Twee sinusvormige trillingen van 100 en 110 Hz.

Figuur 1.28b De samengestelde trilling met een frequentie van 105 Hz met een zwevingsfrequentie van 5 Hz.

Intermezzo 1.7 - Zwevingen

In de goniometrie bestaan er veel formules die relaties uitdrukken tussen goniometrische grootheden, zoals:

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cdot \cos \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right)$$

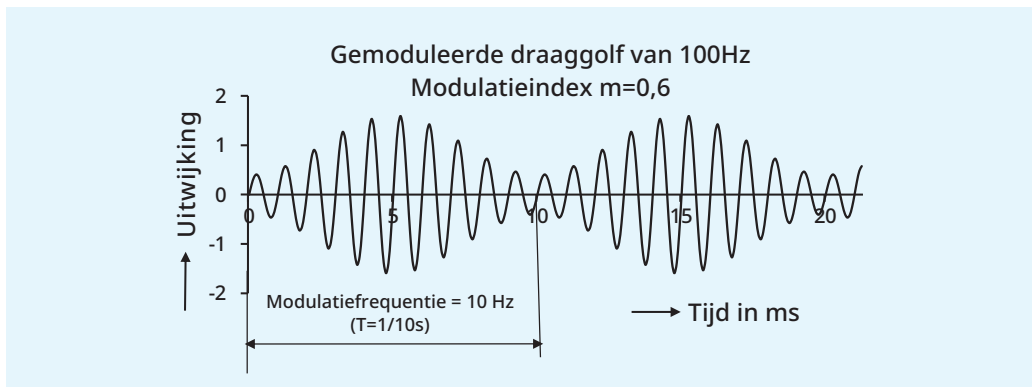
Indien er twee sinusvormige trillingen met frequenties die dicht bij elkaar liggen worden opgeteld, ontstaat zweving. Overeenkomstig bovenstaande formule geldt dan:

$$A \sin 2\pi f_1 t + A \sin 2\pi f_2 t = 2 A \sin 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) t \cdot \cos 2\pi \left(\frac{f_2 - f_1}{2} \right) t$$

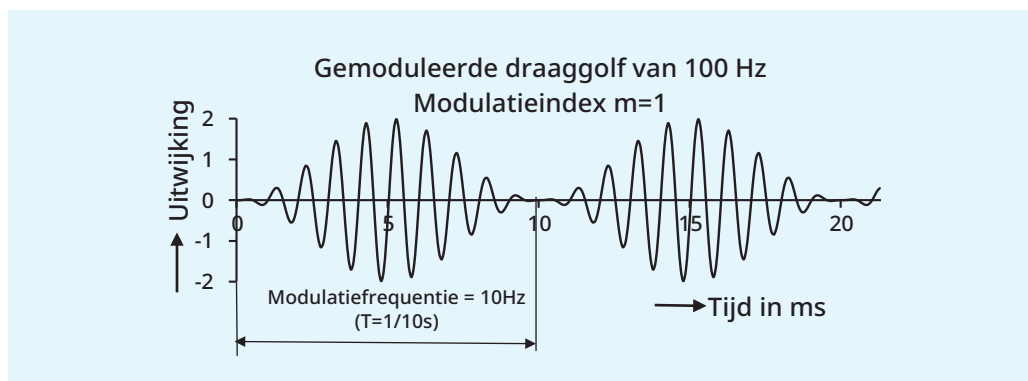
Er ontstaat dus een trilling met een frequentie van $(f_1 + f_2)/2 = 105 \text{ Hz}$.
De amplitude van deze trilling varieert tussen 0 en $2A$ met een frequentie van $(f_2 - f_1)/2 = 5 \text{ Hz}$.

1.6.2 Amplitudemodulatie

Bij amplitudemodulatie kan er een gelijksoortige curve als bij zwevingen ontstaan, hoewel amplitudemodulatie niet hetzelfde is als een zweving. Een zweving wordt verkregen door twee sinusvormige trillingen met een klein verschil in frequentie samen te voegen. Bij amplitudemodulatie wordt van een sinusvormige trilling regelmatig de amplitude gewijzigd. Als de verandering in amplitude ook volgens een sinus- patroon verloopt dan wordt *figuur 1.29b* verkregen. Uitgegaan is van een trilling van 100 Hz (**draaggolf** of **carrier** genoemd) die met een sinusvormige trilling van 10 Hz wordt gemoduleerd.



Figuur 1.29a Een amplitudegemoduleerde sinustrilling van 100 Hz met een modulatiefrequentie van 10 Hz en een modulatie diepte van $m = 0,6$.



Figuur 1.29b Dezelfde draaggolf gemoduleerd met dezelfde modulatiefrequentie van 10 Hz maar met een modulatie diepte van $m = 1$.

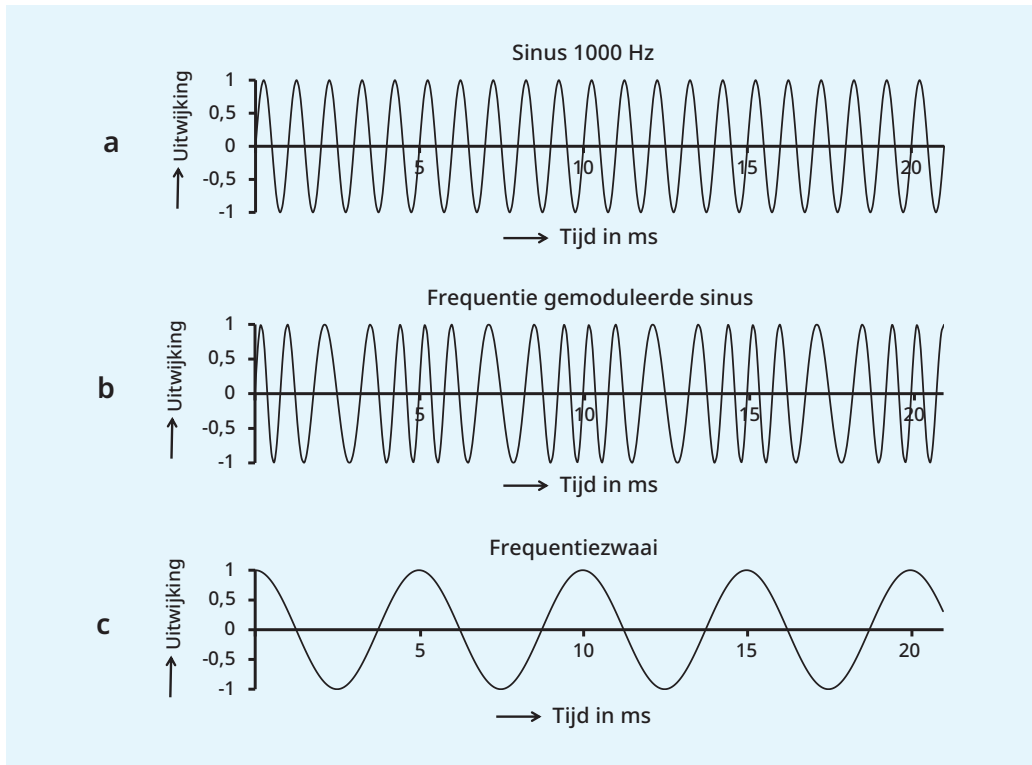
De curve is dan nagenoeg identiek aan die van een zweving, althans als de modulatie volledig is (vergelijk *figuur 1.29b* met *figuur 1.28b*). De sterkte van de trilling moet dan sinusvormig van maximaal naar nul en vice versa veranderen. De modulatie diepte – ook wel modulatie-index genoemd – heeft dan een waarde 1 ($m = 1$). Bij een modulatie-index van bijvoorbeeld 0,6 ($m = 0,6$) wordt de sterkte van maximaal naar 40% van de amplitude geregeld en vice versa. In *figuur 1.29a* is de amplitudegemoduleerde sinus met een index van 0,6 weergegeven.

Amplitudemodulatie kan ook op willekeurige signalen worden toegepast, bijvoorbeeld op een ruis. Als een witte ruis sinusvormig gemoduleerd wordt, blijft de ruis bestaan, maar de amplitude van de witte ruis zal dan periodiek (volgens de sinusmodulatiefrequentie) veranderen. De diepte van de modulatie hangt weer af van de modulatie-index. Ook kunnen signalen gemoduleerd worden met een niet sinusvormig verloop van de modulatie, bijvoorbeeld een complexe periodieke trilling. Amplitudegemoduleerde signalen zijn erg nuttig bij de studie naar bepaalde processen van het horen, omdat de amplitudemodulatie voorziet in signalen die langzaam of snel periodiek in amplitude kunnen veranderen.

1.6.3 Frequentiemodulatie

Naast de mogelijkheid dat de amplitude van signalen periodiek kan veranderen, kunnen ook signalen periodiek in frequentie gewijzigd worden. In *figuur 1.30a* is een sinusvormige trilling van 1000 Hz weergegeven. Deze wordt de draaggolf of **carrier** genoemd. Bij frequentiemodulatie wordt de draaggolf periodiek in frequentie veranderd. Dat kan met een bepaald tempo (modulatiefrequentie) en

met een bepaald bereik (**zwaai**) gebeuren. De zwaai wordt ook wel met de modulatie-index (m) aangeduid.



Figuur 1.30

- a** Draaggolf van 1000 Hz.
- b** De frequentie-gemoduleerde sinus met een frequentiezwaai van 150 Hz en met een modulatiefrequentie van 200 Hz.
- c** Verloop van de frequentie als functie van de tijd. De uiterste grenzen zijn 1150 en 850 Hz. De frequentiezwaai is van + naar - 150 Hz.

In *figuur 1.30b en c* is het modulerende signaal een sinus van 200 Hz en is de modulatie diepte (zwaai) 150 Hz. Dit wil zeggen dat de draaggolf-frequentie periodiek verandert tussen de grenzen 850 en 1150 Hz. De periodetijd van de verandering is 5 ms, dat is 5 perioden van de draaggolf. In *figuur 1.30b* is de frequentie-gemoduleerde trilling aangegeven. In *figuur 1.30c* is de grootte van de zwaai getekend. De modulatie-index is: $(1150 - 850) / 1000 = 0,3$.

Intermezzo 1.8

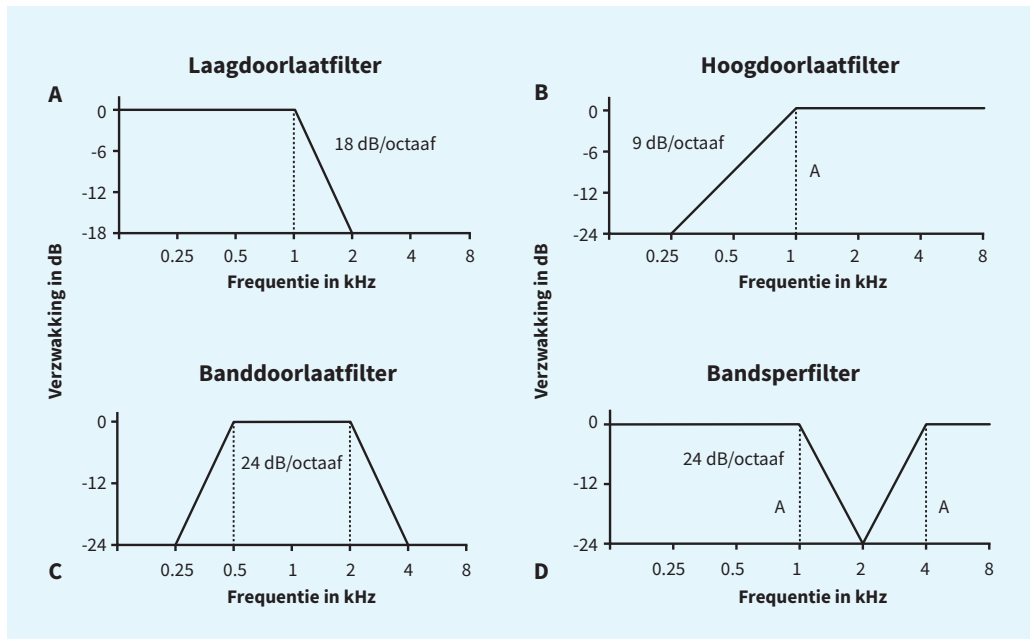
Zowel het moduleren van de amplitude (AM) of het moduleren van de frequentie (FM) van een relatief hoogfrequent sinusvormig signaal (draaggolf) heeft het mogelijk gemaakt de overdracht van radio(omroep) signalen over grote afstanden over te dragen. Als voorbeeld: de eerste radio-uitzending door Hanso Idzerda in 1919 en 5 jaar daarna de eerste publieke radio omroep (AVRO). Amplitudemodulatie werd toegepast met een (midden)frequentiebereik van de draaggolf van 150 tot 1600 kHz, en voor de Wereld Omroep was de frequentieband van 6 MHz tot 26 MHz van belang.

In 1954 werd overgegaan tot de FM-radio uitzendingen en werden de publieke AM uitzendingen afgebouwd. AM-uitzendingen hebben het nadeel dat de frequentie waarmee de amplitude wordt gemoduleerd maximaal 9000 Hz is, zodat niet alle voor de mens hoorbare frequenties uit de luidspreker komen. Naast de geringere storingsgevoeligheid in vergelijking met AM-signalen hebben FM-radiosignalen het voordeel dat overdracht van het voor de mens hoorbare frequentiegebied van 20 tot 18.000 Hz mogelijk is. Het bereik van FM-radiosignalen is echter beperkt tot de afstand vanaf de zendantenne via een rechte lijn tot aan de horizon. Dit geeft een beperkt bereik van circa 100 tot 150 km.

In de twee laatste decennia zijn de digitale radio-ontvangst (**DAB**) en de **online** radio-ontvangst in de picture gekomen. Daarmee zijn de FM-uitzendingen echter nog niet verdwenen.

1.7 Filters

Bij vele psycho-akoestische experimenten is het nodig spectra van signalen te wijzigen. Bij een onderzoek kan het bijvoorbeeld zo zijn dat bepaalde componenten van spectra ongewenst zijn, terwijl andere componenten ongewijzigd moeten blijven. In de praktijk wordt dit gerealiseerd door het elektrische signaal te wijzigen, voordat het door een luidspreker wordt omgezet in een akoestisch signaal. Filters zijn in staat het elektrisch signaal te wijzigen; ze laten slechts een beperkt frequentiegebied door. In feite zijn er 4 hoofdtypen: a) laagdoorlaatfilter (**low-pass filter**), b) hoogdoorlaatfilter (**high-pass filter**), c) banddoorlaatfilter (**band-pass filter**) en d) bandsperfilter (**band-stop filter**) of (**band-reject filter**). In **figuur 1.31** zijn de 4 typen filters getekend.



Figuur 1.31

- a** Laagdoorlaatfilter met een afsnijfrequentie van 1000 Hz met een afval van 18 dB/octaaf.
- b** Hoogdoorlaatfilter met een afsnijfrequentie van 1000 Hz met een afval van 9 dB/octaaf.
- c** Banddoorlaatfilter van twee octaven breed (van 0,5 tot 2 kHz) en met een afval van 24 dB/octaaf.
- d** Bandsperfilter van twee octaven breed (van 1 tot 4 kHz) en met een afval van 24 dB/octaaf.

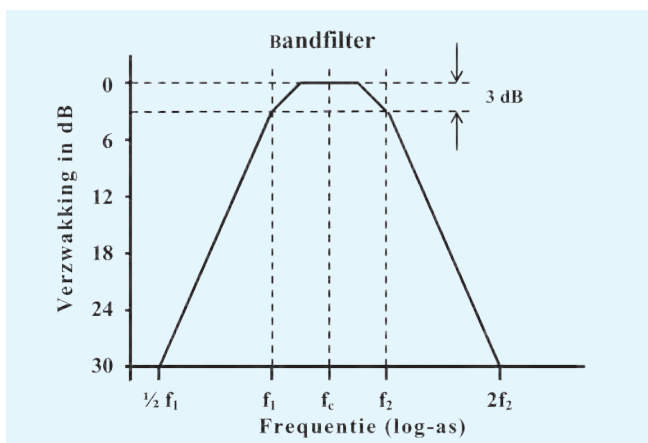
Een laagdoorlaatfilter zal alle frequenties doorlaten beneden een ingestelde waarde. Een hoogdoorlaatfilter laat alle frequenties door die hoger zijn dan een gekozen waarde. Een banddoorlaatfilter laat alle frequenties door, die tussen twee gekozen waarden liggen, terwijl een bandsperfilter precies het tegenovergestelde doet.

De speciale waarden waarbij scheiding optreedt tussen het niet en wel verzwakken van frequenties worden de afsnijfrequenties genoemd van het filter. Banddoorlaatfilters zijn van bijzonder belang voor de audiologie, omdat in een bepaalde fase van de signaalbewerking in het binnenoor het auditieve systeem opgevat kan worden als een aaneengesloten reeks van banddoorlaatfilters, elk daarvan met een eigen centrumfrequentie. In de praktijk is het niet mogelijk elektronische filters te ontwerpen met perfect scherpe afsnijfrequenties. In werkelijkheid bestaat er een reeks van frequenties naast de afsnijfrequentie waar het niveau van

het signaal steeds meer wordt gereduceerd naarmate deze frequenties verder van de afsnijfrequentie komen te liggen. De mate van verzwakking van de amplitudes van de componenten naast de afsnijfrequentie wordt uitgedrukt in dB/octaaf. In *figuur 1.31* zijn de 4 filtertypen afgebeeld waarbij het laagdoorlaat- en het hoogdoorlaatfilter een afsnijfrequentie hebben bij 1000 Hz met respectievelijk een afval van 18 dB/octaaf en 9 dB/octaaf. Het geschematiseerde banddoorlaatfilter en bandsperfilter zijn 2 octaven breed en tonen een afval van 24 dB/octaaf. De hellingen van de filtergrafieken zijn rechte lijnen omdat de frequentie-as een logaritmische schaal verdeling heeft. In de praktijk is ook het afsnijnpunt niet exact. Daarom wordt de afsnijfrequentie gedefinieerd als die frequentie waarbij een verzwakking van 3 dB optreedt ten opzichte van de frequenties die volledig onverzwakt worden doorgelaten. Zoals reeds eerder gezegd zijn bandfilters van bijzonder belang in de audiologie. Er worden vooral bandfilters gebruikt die smaller zijn dan 1 octaaf, bijvoorbeeld 1/3 octaaf. In *figuur 1.32* is een schets gegeven van een bandfilter met een flank van 27 dB/octaaf verzwakking.

Figuur 1.32

Banddoorlaatfilter (breedte van 1 octaaf) met een afval van 27 dB per octaaf waarbij het 3 dB-niveau is aangegeven.



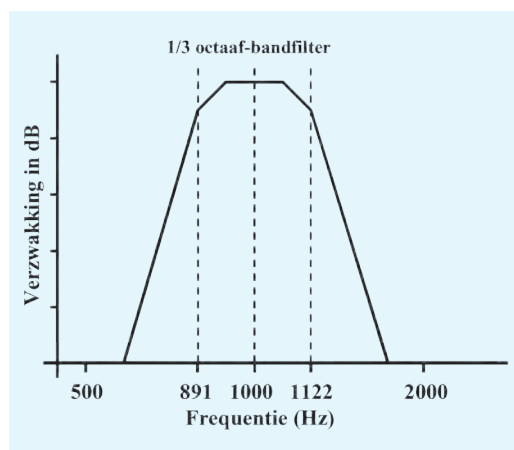
Een bandfilter wordt altijd aangeduid met zijn centrale frequentie f_c . De bandbreedte van een filter wordt gegeven door het aantal octaven n dat het filter bestrijkt. We spreken bijvoorbeeld van een **1-octaaftandfilter** of **1/2- of 1/3-octaaftandfilter**. Bij elk filter is het van belang te weten wat de afsnijfrequenties zijn. Zie *Intermezzo 1.9*

Intermezzo 1.9

Als voorbeeld berekenen wij deze afsnijfrequenties in het geval van een 1/3-octaaft-bandfilter ($n=1/3$), met middenfrequentie 1000 Hz (f_c), waarbij de horizontale frequentie-as een logaritmische schaalverdeling heeft. In het algemeen geldt:

Eerst worden de logaritmische waarden van **f_2 , f_1 en f_c** bepaald: daarna de verhouding tussen **f_2/f_c en f_c/f_1** . Daaruit volgt dat de middenfrequentie de wortel is van het product van de twee afsnijfrequenties. Hiernaast is een 1/3-octaaft-bandfilter getekend. In een technische brochure wordt altijd gesproken over een 1/3-octaaft-bandfilter van 1000 Hz, waarmee de centrumfrequentie (f_c) wordt bedoeld. De vraag is nu: wat zijn de waarden van de afsnijfrequenties?

$$\begin{aligned} \frac{f_2}{f_c} \quad \text{en} \quad \frac{f_c}{f_1} \\ \log f_2 - \log f_c = \log f_c - \log f_1 \\ \log \frac{f_2}{f_c} = \log \frac{f_c}{f_1} \\ \frac{f_2}{f_c} = \frac{f_c}{f_1} \\ f_1 \cdot f_2 = f_c^2 \\ \sqrt{f_1 \cdot f_2} = f_c \end{aligned}$$



Berekening van f_1 en f_2

$$n = \text{aantal octaven} \quad \frac{f_2}{f_1} = 2^n = 2^{\frac{1}{3}} = 1,26$$

$$\text{Hieruit volgt:} \quad f_2 = 1,26 \cdot f_1$$

$$\text{Uit:} \quad \sqrt{f_2 \cdot f_1} = f_c \text{ volgt } \sqrt{1,26 \cdot f_1^2} = 1000$$

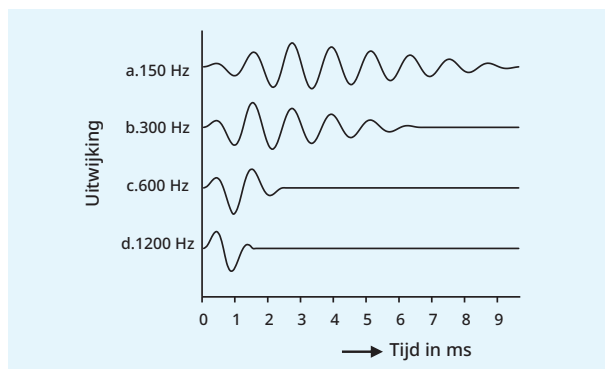
$$\text{Vervolgens:} \quad f_1 = \frac{1000}{\sqrt{1,26}} = 891 \text{ Hz}$$

$$\text{Geeft voor } f_2 \quad f_2 = 1,26 \cdot f_1 = 1,26 \cdot 891 = 1122 \text{ Hz}$$

Indien witte ruis – als elektrisch signaal – een bandfilter passeert, dan zal het oorspronkelijke vlakke spectrum de vorm krijgen van de filterdoorlaatkromme. Hoe smaller het filter wordt, des te meer zal de karakteristiek van de ruis gaan lijken op een **sinusvormige** toon, die dan weliswaar in amplitude enigszins fluctueert, overeenkomstig de momentane fluctuaties in amplitude van de oorspronkelijke ruis. De verkregen zeer smalle bandruis klinkt dan ongeveer als een toon. Ook de respons van een smal bandfilter op een enkele klik is zeer informatief. Zoals bekend bestaat een (zeer korte) klik uit alle frequenties met gelijke amplitude. Na filtering door een (smal) bandfilter zal alleen een **sinusvormachtige** puls van zeer korte duur zichtbaar zijn.

Figuur 1.33 laat een aantal responses zien van een klik na het passeren van een bandfilter met een centrumfrequentie van 1000 Hz. De bandbreedte wordt gevarieerd van 150 Hz tot 1200 Hz. Voor het filter met de smalste band (150 Hz) zien we een sinuspuls met een opbouw en een afname in amplitude (**een inslingeren uitslingereffect**).

Figuur 1.33 De responses van een bandfilter met een variabele bandbreedte op een korte puls. Het filter heeft een centrumfrequentie van 1000 Hz.



In het Engels wordt dit **ringing** genoemd, hetgeen vergelijkbaar is met het uitklinken van een aangeslagen wijnglas. Bij een grotere bandbreedte verschijnt steeds meer de oorspronkelijke puls. Omgekeerd: hoe smaller de band is en hoe steiler de flank van het filter, des te langer wordt de responsietijd. In het algemeen gaat een beter oplossend vermogen in frequentie van het bandfilter gepaard met een vermindering van het oplossend vermogen in tijd. Als de input van een smal bandfilter bestaat uit een serie pulsen dan zal de responsie op 1 puls nog niet zijn weggestorven voordat de volgende puls zich weer aandient. De responsies worden dan uitgesmeerd tot een sinustoon.

Stel dat we een **pulstrein** met een repetitiefrequentie van 333 Hz toevoeren aan een filter met een centrumfrequentie van 1000 Hz en bijvoorbeeld een bandbreedte van 150 Hz, dan zal de responsie een (continue) sinus van 1000 Hz zijn. In feite laat het filter nu de 3e harmonische van de pulstrein door. Filters met verschillende centrumfrequenties die een veelvoud zijn van 333 Hz zullen dus verschillende **harmonischen** van de **pulstrein** doorlaten. Als de bandbreedte voldoende groot wordt gemaakt zal er weer een pulstrein met de oorspronkelijke frequentie van 333 Hz zichtbaar worden. De golfvorm lijkt dan wel op een sinus-puls van 1000 Hz bij een filter met een centrumfrequentie van 1000 Hz.

Intermezzo 1.10

Stimuli voor psycho-akoestisch en elektrofysiologisch onderzoek worden tegenwoordig met de computer gegenereerd. Het proces van filteren met de computer verloopt globaal als volgt:

- 1 Van het te filteren signaal wordt het frequentiespectrum berekend met Fourier-transformatie.
- 2 Via formules wordt het frequentiespectrum van het filter berekend.
- 3 Het frequentiespectrum van het signaal wordt vermenigvuldigd met dat van het filter. Dit levert het frequentiespectrum van het gefilterde signaal op.
- 4 Het frequentiespectrum van het gefilterde signaal wordt terug getransformeerd naar een signaal als functie van de tijd. Dit proces heet **inverse Fourier-transformatie**.

Met deze wijze van 'filtering' met de computer worden veel scherpere **afgrenzingen** van frequentiegebieden verkregen dan met klassieke **passieve** filters, samengesteld uit condensatoren, spoelen en weerstanden.

1.8 Lineaire en niet-lineaire vervorming

Vervorming wordt gedefinieerd als de afwijking van de signaalvorm – na versterking door een elektroakoestisch systeem (bijvoorbeeld een geluidsinstallatie met microfoon, versterker en luidspreker) – ten opzichte van de oorspronkelijke signaalvorm. Het signaal – de drager van de informatie – kan men opvatten als

een combinatie van sinusvormige trillingen met verschillende frequenties en amplituden en verschillende faseverhoudingen (*zie paragraaf 1.2.6*). Men kan onderscheid maken, afhankelijk van de oorzaak, tussen **lineaire** en **niet-lineaire** vervorming.

1. Lineaire vervorming treedt op als de versterking niet hetzelfde is voor alle frequenties waaruit het oorspronkelijke signaal is samengesteld. Het uitgangssignaal bevat dan harmonische trillingen waarvan de amplitudeverhoudingen niet meer dezelfde zijn als die van het ingangssignaal.

Onder lineaire vervorming wordt ook begrepen faseverdraaiing van het signaal bij transport door het versterkersysteem. Als fasedraaiing optreedt is de **looptijd** van de verschillende frequenties door het versterkersysteem verschillend.

2. Niet-lineaire vervorming heeft tot gevolg dat er nieuwe – meestal ongewenste – frequenties ontstaan in het uitgangssignaal. Niet-lineaire vervorming ontstaat als de grootte van het uitgangssignaal $y(t)$ niet meer evenredig is aan het ingangssignaal $x(t)$. Veronderstel dat het ingangssignaal een sinusvormige trilling is, voorgesteld door:

$$x(t) = A \sin 2\pi f t$$

Indien na versterking het uitgangssignaal hogere harmonischen bevat met frequenties van **2f, 3f, 4f, 5f...**, dan spreekt men van **harmonische vervorming**.

Indien het ingangssignaal uit twee of meer sinusvormige trillingen bestaat, bijvoorbeeld:

$$x(t) = A \sin 2\pi f_1 t + B \sin 2\pi f_2 t$$

dan ontstaan na niet-lineaire versterking behalve hogere harmonischen ook som- en verschilfrequenties, zoals:

$$2f_1 - f_2; \quad 2f_2 - f_1; \quad f_2 - f_1; \quad f_2 + f_1; \quad 2f_2 + f_1; \quad 2f_1 + f_2; \quad \dots$$

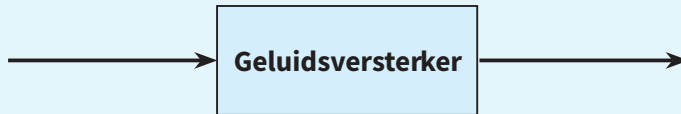
Dit type van vervorming wordt als **intermodulatievervorming** aangeduid. In *intermezzo 1.11* worden enkele voorbeelden van harmonische en intermodulatievervorming uitgewerkt.

Deze vervormingsproducten met de genoemde frequenties komen ook voor in de cochlea als twee frequenties f_1 en f_2 aan het oor worden aangeboden. De frequentie $2f_1 - f_2$ wordt als oto-akoestische emissie gemeten (zie hoofdstuk 4).

Intermezzo 1.11

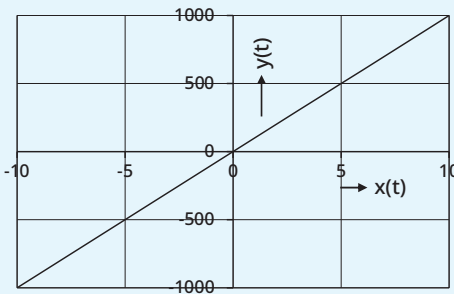
Aan een elektroakoestisch versterkersysteem (*figuur A*) wordt een sinusvormig signaal met een frequentie van 1000 Hz toegevoerd:

$$x(t) = A \sin(2\pi f t) = 10 \sin(2\pi \cdot 1000 \cdot t)$$

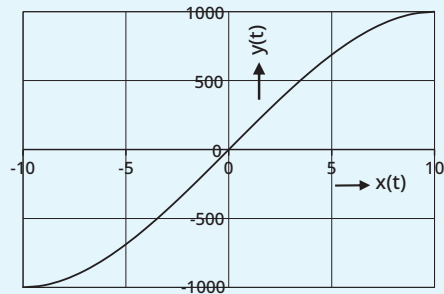


Figuur A

Stel dat het toestel een versterkingsfactor heeft van honderd, dan zal op elk tijdstip het uitgangssignaal **y(t)** honderd keer zo groot zijn als het **ingangssignaal x(t)**.



Figuur B



Figuur C

Dit verband is weergegeven (**y=100x**) in de 'transferkarakteristiek' van *figuur B*. Het is een rechte (lineaire) lijn.

In *figuur C* is de ingangs-uitgangskarakteristiek niet lineair. De transferkarakteristiek in het voorbeeld van *figuur C* voldoet aan de vergelijking:

$$y = 150x - 0,5x^3$$

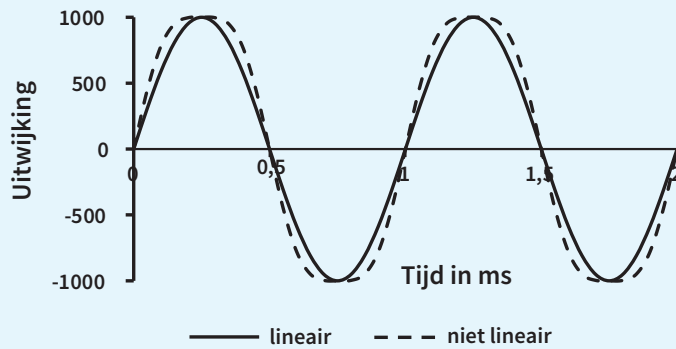
De grafiek in *figuur D* laat het uitgangssignaal y(t) zien, zowel voor de lineaire als de niet-lineaire transferkarakteristiek, voor het bovengenoemde ingangssignaal van:

10 sin(2π.1000.t). Bij het lineaire verband **y=100x** geldt:

$$y_1 = 1000 \sin(2\pi \cdot 1000 \cdot t)$$

Bij het niet-lineaire verband $y = 150x - 0,5x^3$ geldt:

$$y_2 = 1500 \sin(2\pi \cdot 1000 \cdot t) - 500 (\sin 2\pi \cdot 1000 \cdot t)^3$$



Figuur D

Het uitgangssignaal $y_2(t)$ ziet eruit als een 'afgeplatte' sinus. Het ingangssignaal is door de niet-lineaire ingangs-uitgangskarakteristiek vervormd.

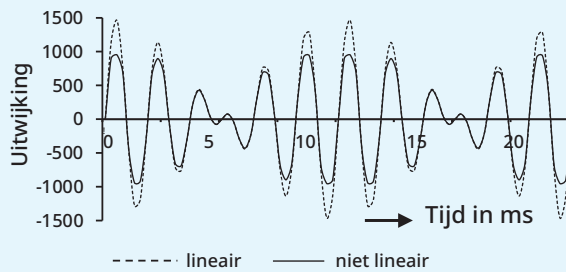
Het is een voorbeeld van harmonische vervorming. Hogere harmonischen zullen nu in het uitgangssignaal aanwezig zijn.

Het tweede voorbeeld betreft een samengesteld signaal van twee sinusvormige trillingen van 500 Hz en 600 Hz met een amplitude van 5 eenheden.

$$x(t) = 5 \sin(2\pi \cdot 500 \cdot t) + 5 \sin(2\pi \cdot 600 \cdot t)$$

Dit signaal wordt door een versterkersysteem geleid met respectievelijk een transferkarakteristiek van:

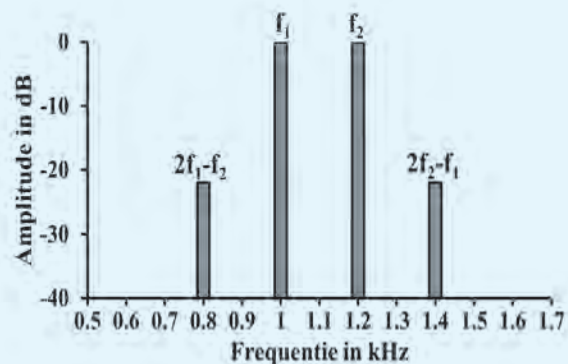
$$y = 150x \quad \text{en} \quad y = 150x - 0,5x^3$$



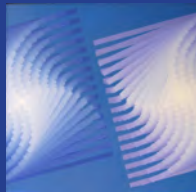
Figuur E

In het eerste geval zal het uitgangssignaal precies dezelfde vorm hebben als het ingangssignaal, alleen honderdvijftig keer sterker. In het tweede geval blijkt de vorm van het ingangssignaal af te wijken: de toppen zijn afgerond. De twee grafieken zijn over elkaar heen geprojecteerd, zodat het verschil zichtbaar wordt (*zie figuur E*). Met behulp van een wiskundige bewerking, die Fourier-transformatie heet, kunnen wij de spectra van beide signalen bepalen. Het spectrum van het signaal dat alleen maar 100 keer is versterkt volgens $y = 100x$ bestaat uiteraard alleen uit de twee frequenties van 1000 Hz en 1200 Hz. Het versterkte uitgangssignaal van de versterker met de ingangs- uitgangskarakteristiek $y = 150x - 0,5x^3$ geeft een spectrum met 4 sinusvormige trillingen. In het spectrum zijn de signalen met frequenties van 1000 Hz en 1200 Hz het sterkst aanwezig. De andere twee signalen (in dit geval 22 dB zwakker) zijn signalen met frequenties van 800 Hz en 1400 Hz.

Omdat we in het voorbeeld een speciale transferkarakteristiek hebben gekozen, zijn er maar twee vervormingsproducten aanwezig met de frequenties $2f_1 - f_2$ en $2f_2 - f_1$. Het spectrum is weergegeven in *figuur F*.



Figuur F



Klank en Balans

Slechthorendheid en doofheid zijn ernstige handicaps. Veel ouderen, maar ook steeds meer jongeren hebben te maken met gehoorproblemen. De audiologie houdt zich bezig met deze problemen: met het opsporen, onderzoeken en behandelen ervan. Ook de preventie van slechthorendheid en de revalidatie van slechthorende of dove kinderen en volwassenen horen bij het vakgebied van de audiologie. Daarbij wordt gebruikgemaakt van audiometrie: het meten van het functioneren van het gehoor.

Klank en Balans is een basisboek voor dit vakgebied. Het biedt kennis over geluid, over de waarneming ervan en over het gehoororgaan, vanuit natuurkundige en anatomische invalshoek. Hierbij ligt de nadruk op het onderzoeken van het gehoorprobleem en het komen tot de juiste behandeling. Eerst komen de eigenschappen van geluid en auditieve waarneming aan de orde. Vervolgens wordt inzicht gegeven in de fysiologie en anatomie van het oor en in de manier waarop geluidsgolven het oor binnenkomen. Ook het uitvoeren van audiologisch onderzoek wordt besproken. Ten slotte worden de preventie van gehoorstoornissen, de spraakperceptie, de beginselen van hoorrevalidatie en vestibulair onderzoek behandeld.

Klank en Balans is geschreven voor (aankomende) kno-artsen, klinisch fysici-audiologen, logopedisten, audiciens en studenten van iedere andere opleiding met een audiologische component.

Chris L. van Ligtenberg is klinisch fysicus-audioloog en ruim dertig jaar als directeur verbonden geweest aan het audiologisch centrum van de Prof. J.J. Groen Stichting te Amersfoort. Hero P. Wit was hoogleraar audiologie aan het Audiologisch Instituut van de kno-afdeling van het Academisch Ziekenhuis Groningen (nu UMCG). Beiden zijn daarnaast betrokken geweest als initiator en docent bij tal van opleidingen en leergangen op audiologisch gebied.