

Geluidkwaliteit, naar een beter kwantificeerbare leefomgeving voor het gehoor

In een tijd van grote inspanning ter bescherming van de omgeving tegen teveel lawaai wint ook de bescherming tegen ongewenst geluid van consumentenproducten meer en meer aan betekenis. Daarbij gaat het niet enkel om schade aan het gehoor te vermijden, maar veel meer om de subjectieve beleving, en daarmee het welzijn (soms ter versterking van het ego van de betrokkene), te verbeteren.

Uli Widmann, Chris Nierop en Thomas Beckenbauer

Voor de geluidsontwikkeling van voertuigen en consumentenproducten, worden tot op dit moment grenswaarden van de geluidsproductie of -reductie in dB(A) aangegeven, ondanks het feit dat de "A" bij reductie in feite een fysisch onjuiste benaming is.

Bij metingen van A-gewogen geluidsniveaus echter wordt, zoals hierna zal worden behandeld, door een eenvoudig wegingsfilter alleen de frequentieafhankelijkheid van de luidheid voor smalbandgeluiden bij lage niveaus ongeveer 40 dB) voldoende representatief weergegeven.

Grote afwijkingen kunnen echter optreden bij hogere geluidsniveaus, en in het bijzonder bij lage frequenties. Hierdoor kan de vreemde situatie ontstaan, dat door het treffen van maatregelen met als doel de "geluidskwaliteit" te verbeteren, weliswaar het geluidsniveau in dB(A) afneemt, maar de (subjectieve) luidheid sterker wordt.

Ook tussen onderling in A-weging gemeten vergelijkbare voertuigen worden duidelijke verschillen in geluidsbeeld en daardoor in de luidheid geconstateerd. Vanzelfsprekend is de persoonlijke beleving hierbij mede van invloed en in de automobiellindustrie is dit reeds jaren een verkoopargument. Een sportieve rijder in een sportwagen verwacht een ander geluid dan een rijder in een degelijke klassewagen. De liefhebbers van de aloude, alom verheerlijkte en verguisde lelijke eend, betreuren het nog steeds dat de nieuwe generatie "eenden" niet meer zo lekker ronkt. Uit onze adviespraktijk voor fabrikanten van voertuigen zoals onder meer Nedcar, DAF, Terberg en Den Oudsten blijkt al sinds jaar en dag dat tot in de kleinste details aandacht wordt besteed aan zowel interieur als

exterieurgeluid. Een sprekend voorbeeld hiervoor is een uitgebreid onderzoek aan het herdesign van een bestaande autospiegel, die een onduidelijk (slechts met grote inspanning waarneembaar) geluid aan het cabinegeluid toevoegde, welke als "niet merkeig" werd beoordeeld.

In de consumentenproductensfeer wint geluidskwaliteit eveneens langzaam terrein, zij het dat hier, meer nog dan in de automobiellindustrie, sterk wordt geleund op panelachtige onderzoeken (luistertests). Tegen moderne meet- en analysetechnieken ter ondersteuning en deels vervanging van de menselijke inbreng bij de subjectieve beoordeling (objectivering van subjectieve beleving) van het geluid van producten, wordt nog argwanend aangekeken.

Toch bieden moderne geavanceerde meet- en beoordelingssystemen, die op een juiste wijze en zo objectief mogelijke wijze rekening houden met de eigenschappen van het oor, goede vooruitzichten op een bruikbare toekomst, zoals het PAK systeem ("Prufstand - Akustik - Mess system")^{1,2,3}, zie de foto van figuur 1.

En dergelijk systeem verschaft door de beschikbare software de mogelijkheid, om naast de meer conventionele analysetechnieken zoals het op uiteenlopende wijze bewerken van meerkanaals geluids- en trillingsmeetsignalen, tevens meer geavanceerde technieken toe te passen, zoals de mogelijkheid subjectieve geluidsbeleving te objectiveren.

Hiermee worden dan uitgebreide luisterproeven voorkomen, jammer voor de koffie, maar wel efficiënt en kostenbesparend. De ervaringen met deze moderne systemen, met name ingezet in onderzoeken in de automobiellindustrie, vindt langzaam maar zeker zijn toepassing in de consumentenindustrie.

De luidheid is hierbij één van de belangrijkste aspecten voor de beoordeling van de geluidskwaliteit, en op dit aspect wordt in het onderhavige artikel specifiek ingegaan. Andere aspecten welke direct te maken hebben met de beoordeling van de geluidskwaliteit zullen in een later artikel worden beschreven.

Historische ontwikkeling van geluidsstrekte meting

Het duurde tot het eind twintiger jaren voordat getracht werd uitspraken als "geruischmakende" apparaten meer te kwantificeren. De eerste "geluidsstrekte meter" werd door H. Barkhausen in 1926/1927 voorgesteld en bestond uit een telefoonhoorn waarmee aan een testpersoon aan één oor een toon van 1000 Hz werd aangeboden, waarvan de amplitude zodanig kon worden veranderd tot deze even luid werd ondervonden als het te beoordelen geluid. De regelaar voor het niveau van de vergelijkende toon kreeg een logaritmische schaal.

De maat voor de geluidsstrekte werd „foon" genoemd.

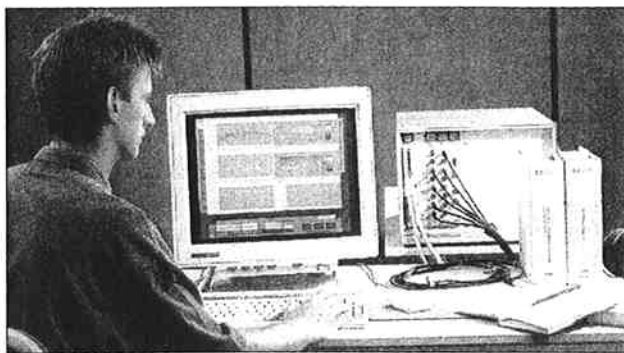
Over de auteur

Ing. Ch. Nierop Azn

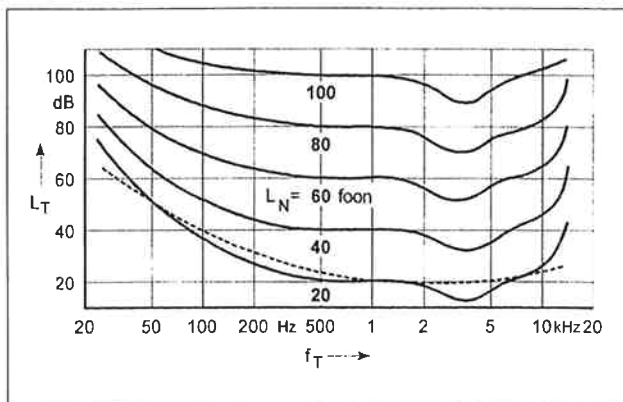
is directielid van M+P Raadgevende ingenieurs bv en redactielid van het blad Geluid. Hij is werkzaam in de vestiging Aalsmeer als hoofd van de vakgroep Industrielawaai en als zodanig belast met onder meer strategisch- en planologisch onderzoek en ontwikkeling van stille producten.

Dr.ing. U. Widmann en dr.ing. T. Beckenbauer

zijn werkzaam bij het aan M+P gelieerde adviesbureau Müller-BBM GmbH te München, als respectievelijk adviseur op het gebied van psycho-akoestisch onderzoek en op het gebied van verkeersgeluid en akoestische meetsystemen.



Figuur 1: Toepassing van het PAK systeem

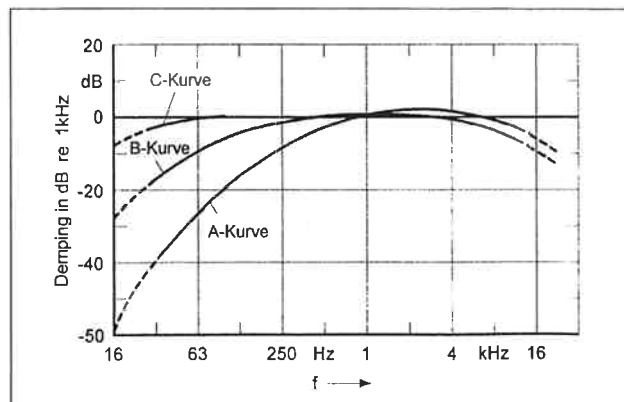


Figuur 2: Gehoordrempel en curven van gelijk luidheidsniveau voor sinustonen in een vrij geluidsveld bij twee-orig horen.

De door Barkhausen voorgestelde definitie van de geluidssterkte van een geluid als niveau van een even luid ondervonden sinustoon is principieel vandaag nog geldig.

Dit zeer eenvoudige apparaat hield bij het meten van de geluidssterkte op elegante wijze rekening met de belangrijkste eigenschappen van het gehoor. Het nadeel van dit apparaat was, dat voor elk geluid een subjectieve hoortest moest worden doorgevoerd, en het resultaat sterk van de hoorgevoeligheid van één enkele persoon afhing.

Navolgend gaf het in de dertiger jaren gepubliceerde onderzoek en de publicatie van de curven van gelijke luidheid (figuur 2) aanleiding tot het bouwen van een meetapparaat waarmee de door een luisterstest met sinustonen gevonden niveau-frequentie-afhankelijkheid van het gehoor kon worden vastgesteld. Dat toestel bevatte toen reeds de wezenlijke elementen van de huidige geluidsniveaumeter: de microfoon, wegingsfilter, meetbereik-omschakelaar en een afleesinstrument. De curvenschaar van gelijke luidheid benaderde men grof door drie curven



Figuur 3: Wegingscurven

van gelijke luidheid (telkens voor lage, middel en hoge geluidsniveaus). De omschakeling van de curven was aan de meetbereikschakelaar gekoppeld. Het apparaat werd DIN genormeerd en werd daardoor „DIN-geluidssterktemeter” genoemd. De daarmee te meten grootte werd „DIN-foon” genoemd.

De in de navolgende periode opgedane ervaringen met de DIN-geluidssterktemeter met drie wegingsfilters toonde, dat het geen ideaal toestel was, want de omschakeling van de wegingscurven voerde tot dubbelzinnige meetresultaten, met name aan de grenzen van de bereiken.

Geluidsniveaumeter met A-weging

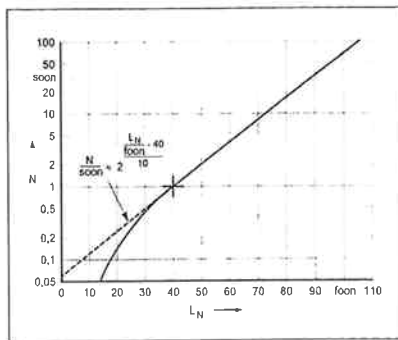
In de Engelstalige landen werd, naast de frequentiebandmetingen en -beoordelingen (veelal terts- of oktaafbanden in samenhang met NC en NR curves) met wegingscurven gewerkt die onafhankelijk van het geluidsniveau vrij kiesbaar waren. Deze werden A, B en C weging genoemd (figuur 3). De wegingscurve A werd op een curve van gelijke geluidssterkte bij 20 foon gefit, en vertegenwoordigde op pragmatische wijze de niveau- en frequentieafhankelijkheid van het gehoor voor zwakke sinustonen. De wegingscurven B en C werden gefit op hogere luidheidsniveaus. In 1967 werd in ISO-verband overeengekomen in plaats van de drie wegingskrommen, slechts nog de A-weging te hanteren.

Met de A-weging konden op voldoende betrouwbare wijze normen voor omgevingslawaai worden ontwikkeld, immers de niveaus daarvan liggen in het algemeen laag, en met name voor lage niveaus is de correlatie acceptabel wanneer het gaat om hinderbeleving. Deze vereenvoudiging in normering tot slechts één wegingskromme (en daarmee een ééngetalscriterium) had verder het voordeel, dat een aanzet werd gegeven internationaal te komen tot éénzelfde beoordeling van geluidsemissie en -immissie. Voorbij werd gegaan aan het feit dat bij breedbandig geluid per definitie tot lagere waarden wordt gekomen. En juist deze geluiden treden in de praktijk het meest op. Door deze, in vergelijking met apparaten voor het meten van het luidheidsniveau, afwijking voor breedbandige signalen, besloot men deze eenvoudige A-gewogen meetapparaten niet meer geluidssterktemeter, maar enkel nog 'geluidsniveaumeter' te noemen. Industrie en handel waren voorlopig tevreden en het A-gewogen geluidsniveau vond snel ingang in de wetgeving en geluidsvorschriften, en bij geluidbeoordeling van apparaten en produkten.

De spectrale analyse, in combinatie met de NR-wegingskromme is nog lang, tot in de zeventiger jaren, in Nederland toegepast als toetsingskader voor omgevingslawaai en technische installaties in gebouwen (als een "hindermaat"), en naar het schijnt kunnen met name de luchtbehandelingstechnieken er tot op heden nog geen afstand van doen. Beoordeling van de geluidskwaliteit van producten is pas van de laatste jaren, met als grote voorloper de eerder genoemde automobiellindustrie, goed op gang gekomen en wordt tot op heden met name geënt op de aloude dB(A). Het nieuwe dillennium naderbij komend wordt het tijd de steeds toegankelijker wordende technologie, om luidheid beter te beschrijven en te beoordelen, nader aan de orde te stellen.

Luidheid en de wijze van meten

Parallel aan de pragmatische ontwikkeling, uitmondende in de dB(A) als alleskunner als het gaat om geluidsmeting en -beoordeling, liepen verzoeken, de eigenschappen

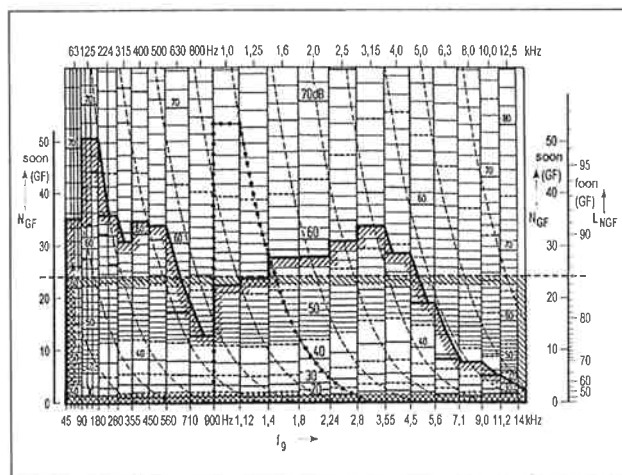


Figuur 4: Samenhang tussen luidheidsniveau L_N in foon en luidheid N in soon

bij welk niveau geluiden als dubbel zo luid of half zo luid ondervonden werden als een vergelijkend geluid. De maat voor de geluidssterkte waarneming noemt hij luidheid. Als eenheid definieerde hij „soon” (van 'sonare', lat.: klinken). De waarde 1 soon kent hij willekeurig het luidheidsniveau 40 foon toe.

Figuur 4 toont deze samenhang tussen luidheidsniveau en luidheid. Men ziet, dat boven 1 soon iedere verhoging van het luidheidsniveau met 10 foon gelijk is aan een verdubbeling van de luidheid. Onder 1 soon wordt de samenhang in deze logaritmische voorstelling niet lineair. De onderzoeken van Zwicker over de luidheid toonden verder, dat bepaalde bereiken op het basilaire membraan in het binnenoor, de zogenoemde kritieke banden, bepalend zijn voor het ontstaan van deelluidheden. Hij vond dat deze kritische frequentiebanden tot 500 Hz met een absoluut constante bandbreedte van 100 Hz en bovendien dat het basilaire membraan als analysator met relatief constante bandbreedte van ongeveer 20% van de middenfrequentie werkt (deze waarden zijn nog steeds onderwerp van discussie). De resultaten gaan op voor (quasi-)stationaire signalen (voor kortdurende signalen moet rekening gehouden worden met „trading”, dat wil zeggen dat tijd en intensiteit van een geluid min of meer uitwisselbaar zijn bij een vaste luidheid).

Rijgt men van lage naar hoge frequenties zonder overlapping en zonder gaten de ene kritische band met de andere aan, dan ontstaan 24 kritische banden die juist de omvang van het hoorbereik weergeven. De aldus geschaalde schaal wordt toonheid genoemd. Eenheid is „Bark” in herinnering aan H. Barkhausen. 1 Bark staat voor één kritische band. Daar in de meest gebruikte akoestische meetapparaten de tertsfilters een relatief constante bandbreed-



Figuur 5: Gebruik van het grafische procédé om de luidheid $N = 24$ soon en het luidheidsniveau $L_N = 86$ foon van een geluid te berekenen.

van het menselijke gehoor beter te benaderen en een preciezer geluidssterktemeetmethodiek te ontwikkelen. Hier waren het in het bijzonder de onderzoeken van S. Stevens in de USA en E. Zwicker in Stuttgart en later in München, die fundamentele inzichten over de geluidssterkte waarneming inzichtelijker maakten. Zwicker liet testpersonen vaststellen,

te van 23% van de middenfrequentie bezitten, benaderen zij voldoende bij frequenties boven de 500 Hz het oplosend vermogen met betrekking tot de frequentie-informatie van het gehoororgaan. Bij lage frequenties echter moeten meerdere tertsen samengevat worden (sommen van intensiteit), om een in absolute zin constante bandbreedte van 100 Hz te realiseren. Om de luidheid vast te stellen heeft Zwicker op basis van het gemeten tertsniveau een grafisch procédé (sjabloonprocédé) ontwikkeld, waarmee de luidheid van stationaire geluiden met hogere nauwkeurigheid zonder psycho-akoestische hoortesten (luistertesten) vastgelegd kon worden. En deze aanpak is naar ons huidige inzicht nog steeds goed toepasbaar wanneer het gaat om het opzetten van een geavanceerdere methode om geluidskwaliteit te kwantificeren.

In de door Zwicker ontwikkelde methode wordt het gemeten tertsbandgeluidsniveau van een te analyseren geluid als „kernluidheid” in een zogenaamd curvenblad opgetekend (figuur 5). Door de schuin afvallende flanken (flankluidheid), aansluitend aan de tertsbereiken wordt met de maskerings-eigenschap van ons gehoor rekening gehouden. Hiermee wordt als het ware de subjectieve maat geobjectiveerd en men spreekt dan vaak van „objectief subjectieve maten”. Geluidsdelen, die onder één flankluidheid liggen, zoals bijvoorbeeld het tertsniveau van 51 dB bij 630 Hz in figuur 5, dragen tot luidheid absoluut niets bij omdat ze gemaskeerd worden. Het bepalen van de luidheid (of het luidheidsniveau) geschiedt door in een staafdiagram de tertsniveaus uit te zetten als functie van de frequentie (in Hz of Bark-getal; 24 Bark = 8 octaven). De rechterflanken van de staven worden iets uitgerekt om het effect van maskering mee te nemen. Daarna wordt van het zo ontstane staafdiagram de totale oppervlakte bepaald. Deze oppervlakte is een maat voor de luidheid. Als nu een rechthoek (een wit spectrum) wordt genomen met dezelfde oppervlakte (=luidheid) kan de luidheid afgelezen worden op de verticale schaal.

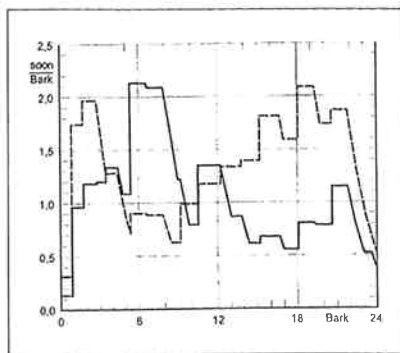
Dit grafische procédé heeft voor de gebruiker het grote voordeel, dat deelluidheden in het diagram met deelvlakken overeenkomen. In vele gevallen kan uit het diagram afgelezen worden, dat één deelvlak domineert. Om lawaai effectief te verminderen, moet vooreerst dat deel van het geluid verminderd worden, dat het grootste deelvlak beslaat. Bovendien wordt uit de kwantitatieve raming van de reductie van oppervlakken duidelijk, welke luidsterktereductie door niveauverlaging in bepaalde frequentiebereiken bereikbaar zijn. Een reductie van luidheid met 24 soon naar 12 soon wordt dan ook als halvering ondervonden.

Subjectieve en meettechnische beoordeling van geluiden

Bij de omzetting van luidheidsmeetsystemen moeten naast de bovenbeschreven spectrale samenhangen ook tijdelijke effecten, zoals de na-maskeringseigenschap en de temporele integratie van het gehoor in acht genomen worden. Hierop wordt in dit kader niet nader ingegaan.

Twee voorbeelden uit uitgevoerde pilotstudies laten zien dat deze wijze van kwantificering goed overeenkomt met de werkelijke subjectieve beleving van personen. Bij deze pilotstudies is gebruik gemaakt van het geavanceerde PAK systeem waarin onder meer de theorie van Zwicker is opgenomen.

Als eerste voorbeeld een onderzoek van twee snorfietsen. Figuur 6 toont het luidheidsmodel van deze snorfietsen,



Figuur 6: Luidheidsmodel van geluiden bij twee snorfietsen

van wie de luidheid verschilt met een factor 1.33, bij een voor beide snorfietsen gelijk A-gewogen geluidsniveau van 70 dB(A).

Uit luisteronderzoek (subjectieve geluidsbeoordelingen) is gemiddeld een 1,4-voudige luidheid voor snorfiets 2 vastgesteld, de grootste verschillen zijn in het rechterdeel (bij de hogere frequen-

ties) te vinden. Snorfiets 2 wordt door de personen dus gemiddeld rond 40% luider beschreven dan snorfiets 1 ondanks de gelijke A-niveau waarden. De meettechnische (objectieve) beoordeling van de luidheid geeft een verhouding van 27,7 sone/20,8 soon = 1,33, en komt hiermee goed overeen met de subjectieve beleving.

Als tweede voorbeeld een onderzoek van een aantal printers. Met de enorme toename van het gebruik van PC's ontstaan steeds meer vragen over het geluid van perifere apparaten. In het bijzonder bij matrixprinters kunnen er zeer grote verschillen in luidheid worden gevonden. De geluiden van de printers werden in een reflectiearme ruimte, op de positie waar de persoon dit toestel bedient, opgenomen en daarna bewerkt. De printers A, B, E, F en G zijn naaldprinters van verschillende merken, C en D representeren daisywielprinters en H een inkjetprinter. De cirkels in figuur 7 representeren de luidheidsbeoordelingen van acht personen in een (subjectieve) panel-luister-test. Tussen de luidste (F) en de stilste (B) gebruikte naaldprinter bestaat er een verschil in luidheid van krap een factor 2. De daisywielprinters hebben ongeveer een gelijke luidheid als de naaldprinter A en G. De luidheid van de inkjetprinter (F) ligt rond het 1.4-voudige onder de luidheid van de stilste onderzochte naaldprinter. Tevens kan worden afgelezen dat de (objectief) gemeten luidheidsverschillen de subjectieve beoordeling goed weergeven. De A-gewogen geluidsprestaties geven wel de tendens in luidheidsverschillen weer, maar de mate van de verschillen wordt echter overschat of onderschat.

Conclusies

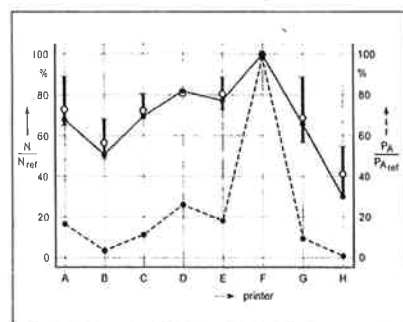
Zoals uit bovenstaande duidelijk zal zijn geworden is het, als het gaat om de geluidskwaliteit van een product,

in veel gevallen niet zinvol, en soms misleidend, de A-gewogen geluidsniveaus als verkoopargument van producten te gebruiken.

In het geval van de printers zou dat betekenen, dat de printer H slechts het honderdste deel van het geluid zou voortbrengen ten opzichte van printer F. Daardoor wordt bij de aanschaf een verkeerde hoop gekoesterd, dat ertoe

leidt, dat daadwerkelijk technisch-succesvolle luidheid-reducties rond de factor 2,5 (printer F/printer H) niet naar waarde geschat worden. Bij lawaai verminderende maatregelen wordt vaak de afname in een A-gewogen geluidsniveau gepubliceerd als bereikt effect, en gelijktijdig wordt dan als „vuistregel” aangegeven, dat bij een reductie van A-gewogen geluidsniveaus rond 10 dB(A) de waargenomen geluidssterkte zou halveren. Dit geldt evenwel alleen voor een 1000 Hz - sinustoon of bij vergelijkende smallebandgeluiden bij deze middenfrequentie. De juistheid van deze bewering wordt verder beperkt als de te vergelijkende geluiden tamelijk gelijke spectra bezitten. In ons voorbeeld zou deze „vuistregel” (geluidsprestatie 1:100; geluidsniveau verschillen van 20 dB(A)) een luidheidsverschil van ongeveer factor 4 voorspellen. Door het spectrale verschil zijn de subjectief beoordeelde luidheidsverschillen in dit geval echter duidelijk kleiner (factor 2,5).

De dB(A)-waarde heeft sinds de jaren zestig uitstekende diensten bewezen, en zal ook in het nieuwe millennium zeker zijn diensten blijven bewijzen als het gaat om het normeren en beoordelen van omgevingsgeluiden en hinderscores (alhoewel hiertegen telkens weer te hoop gelopen wordt). Maar voor het akoestisch beoordelen van de geluidskwaliteit van producten schiet de simpele A-weging duidelijk tekort. Back to the future zouden we willen zeggen, waarom niet teruggerepen naar ervaringen en kennis van Zwicker en de zijnen om de werkelijke geluidskwaliteit van producten als verkoopargument in te brengen. Samen met de moderne technologieën en computermogelijkheden en recentelijke onderzoeken op deze gebieden bieden deze inzichten voldoende basis om de subjectieve beleving van geluidskwaliteit op betrouwbare wijze (objectief) te kwantificeren, en voorspellingen te kunnen doen omtrent de te verwachten geluidskwaliteit van een nog te ontwikkelen product. Met het juist gebruiken van deze moderne technologieën en inzet van vakkennis kunnen grootschalige luisterpanels, inclusief de liters koffie en langdurige discussies over de representativiteit van luister ruimten en opstellingen worden beperkt door toepassing van op zich ingewikkelde, maar wanneer deskundig toegepast in uitvoering, uiterlijk simpele analysetechnieken. De dB(A) zal dan naar wij hopen een lagere rangorde krijgen wanneer het gaat om de beoordeling van de geluidskwaliteit.



Figuur 7: Luidheid van printers (volgens [4]). Cirkels subjectieve beoordeling (gemiddelde waarden en standaard afwijkingen); doorlopende curve: gemeten luidheid; gestippelde curve: A-gewogen geluidsprestatie

Literatuur

1. Widmann, U. "Ein neue Dimension auf dem Prüfstand. Ber. Ing. 4 (1995)
2. Hobelsberger, J.; Widmann, U.; Lindener, N.; "Konzeption und anwendung eines Vielkanalmesssystems für akustische und schwingungstechnische Untersuchungen am Beispiel des Akustikwindkanals der BMW Technik GmbH. Fahrzeugtechnik (1995)
3. Widman, U.; Hobelsberger, J.; Simulating hearing sensations with a digital measurement system for applications in automotive industry. Proc. 23th ISATA (1993)
4. Zwicker, E.; Fastl, H.; "Psychoacoustics- facts and models". Springer (1970)