



Delft University of Technology

Document Version

Final published version

Citation (APA)

Merino Martinez, R. (2022). Geluidshinder door windturbines: Een psychoakoestisch model. *Geluid*, 2022(3), 210-213.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

In case the licence states "Dutch Copyright Act (Article 25fa)", this publication was made available Green Open Access via the TU Delft Institutional Repository pursuant to Dutch Copyright Act (Article 25fa, the Taverne amendment). This provision does not affect copyright ownership.
Unless copyright is transferred by contract or statute, it remains with the copyright holder.

Sharing and reuse

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

This work is downloaded from Delft University of Technology.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

Geluidshinder door windturbines

Een psychoakoestisch model

Dit artikel beschrijft een holistische, op waarneming gebaseerde benadering voor de evaluatie van windturbinegeluid en de effecten van maatregelen op basis van synthetische geluidsauralisatie. Dit is waardevol voor het ontwerp van geluidsreducerende maatregelen voor windturbines.

Door: Roberto Merino-Martinez

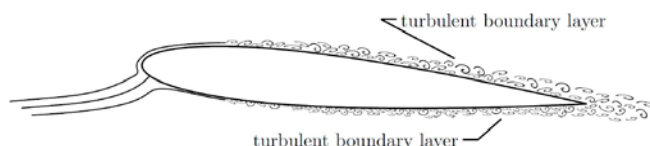
Over de auteur:

Dr. Roberto Merino-Martinez is assistent-professor aan de Technische Universiteit Delft en doet onderzoek naar vliegtuig- en windturbinegeluid en psychoakoestiek. Daarnaast werkt hij parttime als adviseur aeroakoestiek bij Peutz bv.

INLEIDING

Windturbines zijn een kansrijke optie om duurzame energie te produceren, maar hun geluidsemissie veroorzaakt overlast voor de bevolking die naast windparken woont en is daarmee een kritische factor voor de maatschappelijke acceptatie ervan. De geluidsnormen voor windturbines worden in de loop van de tijd strenger, terwijl de vraag naar windenergie toeneemt. De geëmitteerde geluidsniveaus zorgen ervoor dat windturbines niet altijd op maximale vermogensinstellingen werken en 's nachts soms zelfs stilstaan.

Windturbinegeluid is een behoorlijk complex geluid dat bestaat uit breedbandruis met soms extra discrete tonale componenten. Het turbulente grenslaaggeluid bij de achterrand (in het Engels *turbulent boundary layer trailing-edge noise* (TBL-TE)) van de rotorbladen is de belangrijkste geluidsbron van moderne windturbines onder normale omstandigheden. TBL-TE-geluid wordt gegenereerd wanneer instabiele drukfluctuaties die binnen de grenslaag bewegen bij de achterrand (in het Engels *trailing edge* (TE)) aankomen, waar ze een plotselinge verandering in akoestische impedantie ondergaan en efficiënt verstrooien als breedbandruis, zie figuur 1. Deze geluidsemissies, die worden gegenereerd bij de bladsecties nabij de tips, zijn meestal dominant vanwege hun relatief hogere snelheid.



FIGUUR 1: DIAGRAM MET TURBULENTE GRENSLAAG-ACHTERRANDGELUID ("TBL-TE NOISE") OP EEN WINDTURBINEBLAD¹

Er zijn verschillende maatregelen voor geluidsreductie voorgesteld om deze mismatch in akoestische impedantie te verminderen, waarvan *TE serrations* (in Nederlands zaagtand-, kartelrand- of borstelvormige randen) en *TE permeable inserts* (in Nederlands doorlatende inzetstukken) de meest veelbelovende benaderingen lijken te zijn. Deze maatregelen laten geluidsdrukniveaureducties tot ongeveer 10 dB zien in sommige frequentiebanden in vergelijking met de rechte, solide TE basislijnconfiguratie.^{1,2} Er is echter weinig onderzoek naar het effect van deze verminderingen van het geluidsdrukniveau op de geluidshinder.

Windturbinegeluid wordt doorgaans beoordeeld met behulp van klassieke indicatoren die de geluidsblootstelling op een algemene en sterk gemiddelde manier beschrijven,² zoals het equivalente continue A-gewogen geluidsdrukniveau ($L_{p,A,eq}$). Studies³ laten zien dat windturbinegeluiden met tonale componenten en een sterkere hoge frequentie-inhoud aanzienlijk hinderlijker worden ervaren dan die zonder tonale componenten en met een sterkere lage frequentie-inhoud, ondanks dat ze beide dezelfde $L_{p,A,eq}$ waarde hebben. Daarom is het onwenselijk om alleen deze conventionele indicatoren te gebruiken om het geluid van windturbines en de reductiemaatregelen te beoordelen.

Het doel van de hier gerapporteerde studie is het ontwikkelen van een holistische op waarneming gebaseerde benadering voor de evaluatie van windturbinelawaai en de prestaties van verschillende maatregelen voor geluidsreductie op basis van synthetische geluidsauralisatie.

De geïnteresseerde lezer wordt verwezen naar de originele publicatie² voor meer gedetailleerde informatie.

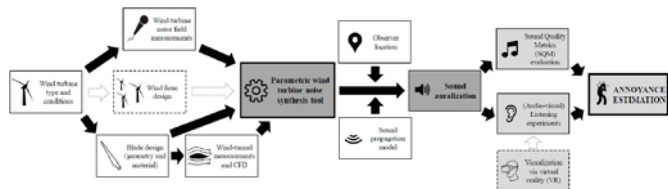
METHODOLOGIE

Overzicht van de aanpak

Figuur 2 geeft een blokschema weer dat het concept van op waarneming gebaseerde evaluatie van windturbinegeluid beschrijft, zoals voorgesteld in.² Eerst is een parametrisch instrument voor de synthese van windturbinegeluid ontwikkeld, op basis van veld-

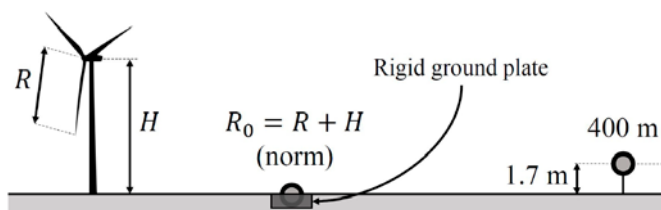
metingen van windturbinegeluiden.⁴ Deze parametrische tool kan de geluidssignalen synthetiseren die een virtuele waarnemer op een bepaalde locatie zou horen, rekening houdend met geluidsvoortplantingseffecten, op basis van het concept van auralisatie. Auralisatie is de techniek om een akoestische situatie kunstmatig hoorbaar te maken, de akoestische tegenhanger van visualisatie. Verdere details over het auralisatieproces zijn te vinden in.^{2,4}

De geluidshinder kan worden geschat in luisterexperimenten en met psychoakoestische geluidskwaliteitsmaatstaven.



FIGUUR 2: BLOKDIAGRAM TER ILLUSTRATIE VAN HET CONCEPT VAN OP WAARNEMING GEBASEERDE EVALUATIE VAN GELUIDSREDUCERENDE MAATREGELEN VOOR WINDTURBINES. DE BLOKKEN MET STIPPELIJNEN WERDEN NIET GEBRUIKT IN DE HUIDIGE STUDIE, MAAR WORDEN BESCHOUWD ALS TOEKOMSTIGE UITBREIDINGEN²

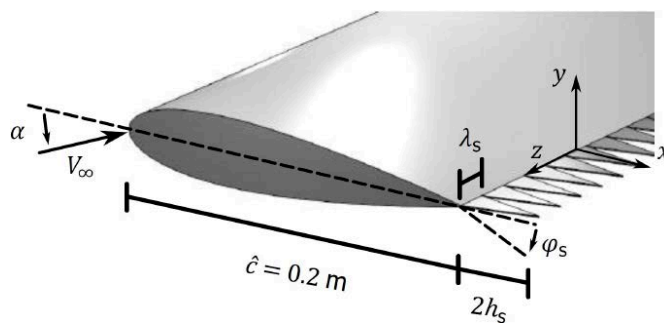
Met deze auralisatie-opstelling zijn de synthetische geluidssignalen van twee verschillende windturbines gesimuleerd: een Vestas V90-2.0 MW (WT1) en een Enercon E82-2.0 MW (WT2), rekening houdend met de twee verschillende waarnemerslocaties weergegeven in figuur 3. De locatie aangeduid als 'norm' in figuur 3 geeft de registratiepositie aan van de veldmetingen en volgt uit de IEC 61400-11-norm voor geluidscertificering van windturbines. De afstand tussen deze meetlocatie en de toren is gelijk aan de som van één windturbinebladstraal (R) en één windturbine-naafhoogte (H). Die afstand is 140 m voor WT1 en 119 m voor WT2.



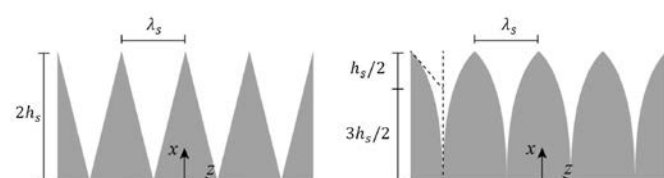
FIGUUR 3: MEETLOCATIE OP EEN HORIZONTALE AFSTAND VAN DE TOREN VAN ($R_0 = R + H$, "NORM") VOOR DE WINDTURBINE-VELDTTESTEN EN DE EXTRA WAARNEMERSLOCATIE OP 400 M AFSTAND VAN DE TOREN DIE GEBRUIKT WORDT VOOR AURALISATIE. AANGEPAST VANUIT DE LITERAATUUR.²

Afgezien van het basisscenario (zonder geïmplementeerde addons), werden vier ultramoderne TBL-TE-geluidsreductiemaatregelen getoetst: *sawtooth serrations*,⁵ *concave serrations*,⁶ *3D-printed permeable inserts*⁷ en *metal foam inserts*⁸ (in het Nederlands respectievelijk zaagtandrand, concave rand, 3-D geprinte doorlatende inzetstukken en metalen schuiminzetstukken), zie figuur 4. Hun respectievelijke waarden voor geluidsvermindering werden rechtstreeks verkregen uit recente publicaties in de literatuur⁵⁻⁸ en geschaald naar de volledige geometrie van elke corresponderende windturbine.² Een gedetailleerde uitleg van de fysieke mechanismen die betrokken zijn bij deze geluidsreducerende maatregelen en de aannames die zijn gemaakt voor de opschaling van de geluidsreducties is te vinden in de literatuur.^{1,2, 5-8}

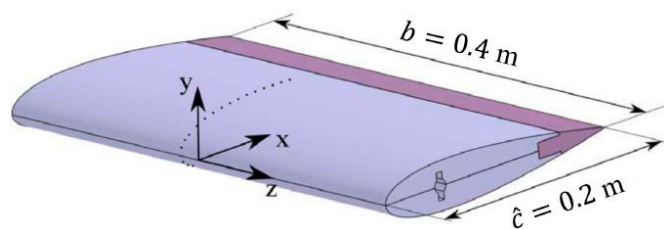
Het totale aantal voor auralisatie beschouwde synthetische geluiden is $20 = 2 \text{ windturbines} \times 2 \text{ waarnemerslocaties} \times 5 \text{ TE configuraties}$ (basisconfiguratie + 4 geluidsreducerende maatregelen).



FIGUUR 4A: ILLUSTRATIE VAN EEN VLEUGELPROFIEL UITGERUST MET "SAWTOOTH SERRATIONS"



FIGUUR 4B: SCHETS DIE HET VERSCHIL LAAT ZIEN TUSSEN DE "SAWTOOTH SERRATIONS" (LINKS) EN "CONCAVE SERRATIONS" (RECHTS).



FIGUUR 4C: ILLUSTRATIE VAN EEN VLEUGELPROFIEL UITGERUST MET EEN "PERMEABLE TE INSERT" (IN DONKERPAARS)



FIGUUR 4D: DETAIL VAN HET "3D-PRINTED PERMEABLE INSERT"



FIGUUR 4E: DETAIL VAN HET "METAL FOAM INSERT". ALLE FIGUREN ZIJN OVERGENOMEN UIT DE LITERAATUUR.^{2,5-8}

LUISTEREXPERIMENT

Het luisterexperiment werd uitgevoerd in het AuraLab bij de 'Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology' (Empa), zie figuur 5, en ontworpen om de korte termijn geluidshinderreacties ten gevolge van de windturbines met de vijf verschillende TE-configuraties te beoordelen. Tijdens de proef moesten de proefpersonen naar elke stimulus luisteren en deze op hinder beoordelen. Dit werd gedaan door gebruik te maken van de ICBEN 11-puntsschaal om tijdens of na het afspelen van elke stimulus de volgende vraag te beantwoorden: "Als u zich voorstelt dat dit de geluidssituatie in uw tuin is, welk getal van 0 tot 10 geeft het beste weer hoeveel u er last van zou hebben, gestoord of geïrriteerd zou zijn." Hier staat 0 voor de laagste en 10 voor de hoogste mate van ergernis.



FIGUUR 5: LABORATORIUMOPSTELLING IN AURALAB BIJ EMPA²

Er namen zestien proefpersonen (8 vrouwen, 8 mannen) met zelfgerapporteerd normaal gehoor, die zich gezond en goed voelden en die niet moe waren op het moment van het experiment, deel aan het onderzoek. Ze waren 27 tot 57 jaar oud (gemiddeld 41,2 jaar). Alle proefpersonen waren medewerkers van Empa.

STATISTIEKEN VOOR PSYCHOAKOESTISCHE GELUIDSKWALITEIT

Sound Quality Metrics (SQM's) op het gebied van psychoakoestiek worden momenteel bestudeerd en overwogen voor hun toepassing in windturbinegeluid-evaluatie.² Over het algemeen geven SQM's sensatiegroottes in plaats van stimulusgroottes, dat wil zeggen, ze beschrijven de hoorsensatie in plaats van een puur fysieke grootte, zoals de akoestische druk of L_p . Daarom wordt verwacht dat deze maten het gedrag van het menselijk oor beter vastleggen en nauwkeuriger zijn in het weergeven van hinder in vergelijking met de conventionele geluidsmaten die doorgaans worden gebruikt voor de beoordeling van windturbinegeluid.

De vijf meest voorkomende SQM's zijn:

- **Luidheid** (N) is de subjectieve perceptie van de hoogte van een geluidsniveau en komt overeen met de algehele geluidssintensiteit. De berekening van luidheid is gestandaardiseerd binnen de ISO-norm 532-1 met behulp van de methode van Zwicker.⁹
- **Tonaliteit** (K) meet de waargenomen sterkte van de vastgestelde tonale energie binnen een complex geluid. In dit onderzoek werd de methode van Aures¹⁰ gebruikt.

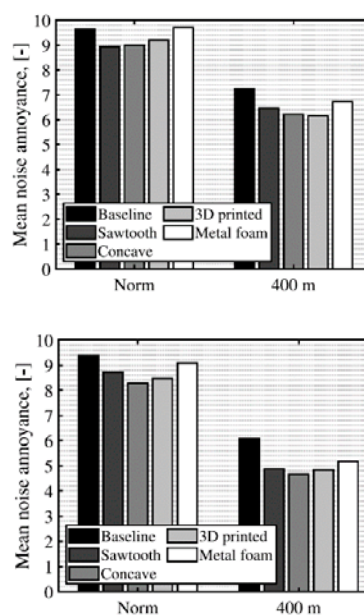
- **Scherpte** (S) beschrijft de hoogfrequente inhoud van een geluid. De methode van Von Bismark¹¹ werd gebruikt.
- **Ruwheid** (R) verwijst naar de snelle amplitudefluctuaties van sommige geluiden in het frequentiebereik tussen 50 Hz en 90 Hz. De methode van Daniel en Weber¹² werd gebruikt.
- **Fluctuatiesterkte** (FS) beoordeelt langzame fluctuaties in luidheid, met een maximale waarde voor fluctuaties van ongeveer 4 Hz. De methode van Fastl en Zwicker¹³ werd gebruikt.

Deze vijf SQM's kunnen worden gecombineerd in een grootte zoals de *Psychoacoustic Annoyance* (PA), geïntroduceerd door Fastl en Zwicker.¹³ Het huidige onderzoek beschouwt de gewijzigde formulering voorgesteld door Di *et al.*¹⁴ om ook het effect van tonaliteit op te nemen.

RESULTATEN

De gemiddelde waargenomen hinderreacties in het luisterexperiment als functie van het windturbintype, de waarnemersafstand en de TE-configuratie zijn weergegeven in figuur 6. De meeste TE add-ons voor geluidsreductie resulteren in duidelijk lagere hinderscores in vergelijking met de basisconfiguratie ('baseline'), behalve voor het *metal foam insert* dat geen significante verbeteringen oplevert. Dit komt waarschijnlijk door de toename van hoogfrequent geluid veroorzaakt door deze maatregel.^{2,8} In het beschouwde voorbeeld vertoonden de *concave serrations* over het algemeen de beste prestaties bij het verminderen van de hinder.

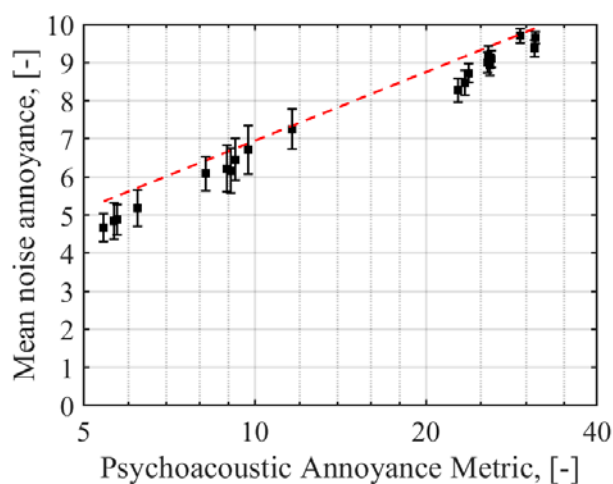
Verder is de waargenomen hinder bij de WT1 iets hoger dan bij de WT2 en nemen de hinderreacties op de laatstgenoemde sterker af met de afstand (dus van de 'norm'-afstand naar 400 m). Echter de effectiviteit van de maatregelen voor beide windturbines was vrij overeenkomstig en veranderde ook niet significant tussen de afstanden. Vergelijkbare prestaties kunnen hierdoor ook verwacht worden voor de geluidsreducerende maatregelen op afstanden tussen de 'norm'-afstand en 400 m (en ook voor grotere afstanden, hoewel deze extrapolatie van resultaten experimenteel geïnterpreteerd zou moeten worden).



FIGUUR 6: GEMIDDELDE WAARGENOMEN GELUIDSHINDER IN HET LUISTEREXPERIMENT ALS FUNCTIE VAN DE WINDTURBINE, WAARNEMERAFSTAND (NORMAFSTAND EN 400 M) EN GELUIDREDUCERENDE MAATREGEL (LINKS WT1, RECHTS WT2)

Figuur 7 vergelijkt de waargenomen geluidshinder in het luisterexperiment met de geschatte waarde berekend met de eerder genoemde PA-maat. Er is een zeer nauwe relatie (met een determi-

natiecoëfficiënt van $\rho^2 = 0.986$) tussen beide parameters die aanzienlijk hoger is dan die gevonden is voor de conventionele maat $L_{p,A,eq}$ ($\rho^2 = 0.77$). Er moet wel worden opgemerkt dat de relatie tussen waargenomen hinder en PA niet altijd geldig zal zijn, deze kan veranderen bij verschillende geluidsbronnen. Echter, als de relatie tussen PA en de waargenomen hinder eenmaal is vastgesteld voor een bepaalde geluidsbron en dataset, zoals in de huidige studie, kan PA worden gebruikt om de opgewekte hinderreacties te schatten, bijvoorbeeld voor het effect van een extra geluidsreducerende maatregel of andere waarnemerslocaties.



FIGUUR 7: SCATTERPLOT VAN DE GEMIDDELTE WAARGENOMEN GELUIDSHINDER IN DE LUISTEREXPERIMENTEN VERSUS DE GEWIJZIGDE PSYCHOAKOESTISCHE HINDERMAAT (PA) OP EEN LOGARITMISCHE SCHAAL. DE STIPPEN GEVEN DE GEMIDDELTE WAARDEN PER STIMULUS WEER, DE FOUTBALKEN ZIJN DE STANDAARDFOUT VAN DE WAARNEMINGEN EN DE RODE STIPPELIJN GEEFT DE LINEAIRE REGRESSIE WEER

CONCLUSIES

Deze studie stelt een innovatieve holistische benadering voor om de hinder veroorzaakt door windturbinegeluid te schatten en om de prestaties van TE-add-ons van rotorbladen van windturbines te evalueren. Hiervoor is een auralisatie van plausibele akoestische scenario's van windturbinegeluid gemaakt met behulp van een parametrische synthesesetool op basis van veldexperimenten. De verwachte veranderingen in geluidsemisatie van windturbines die worden veroorzaakt door geluidsreducerende maatregelen zijn synthetisch toegepast en vervolgens geëxtrapoleerd naar verschillende waarnemerslocaties. De verkregen synthetische geluidssignalen zijn vervolgens gereproduceerd in luistertests en geanalyseerd met psychoakoestische geluidskwaliteitsmaten om de hinder in te schatten.

Geluidskarakteristieken van het windturbinegeluid voor de waargenomen hinder, zoals de tonaliteit, de spectrale inhoud of de amplitudemodulatie (niet gevarieerd in dit onderzoek), zijn belangrijk. De karakterisering van geluid door psycho-akoestische maten kan hierdoor helpen om de hinder, veroorzaakt in verschillende scenario's en voor verschillende waarnemerslocaties, snel in te schatten. Deze karakterisering is vooral handig als de bevindingen worden gevalideerd door luisterexperimenten.

DANKBETUIGING

De auteur wil graag de twee co-auteurs van de originele wetenschappelijke publicatie² Dr. Reto Pieren en Dr. Beat Schäffer van Empa, de proefpersonen van het luisterexperiment van deze studie, en Corinne Gianola bedanken voor het uitvoeren van de luisterexperimenten. Veel dank ook aan Ligaya Wopereis voor haar hulp bij de Nederlandse vertaling.

REFERENTIES

- Merino-Martinez, R., "Microphone arrays for imaging of aerospace noise sources," PhD thesis, Delft University of Technology, 2018. DOI: 10.4233/uuid:a3231ea9-1380-44f4-9a93-dbbd9a26f1d6.
- Merino-Martinez, R., Pieren, R., and Schäffer, B., "Holistic approach to wind turbine noise: From blade trailing-edge modifications to annoyance estimation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 148, No. 11285, pp. 1-14, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111285.
- Persson Wayne K, Agge A., "Experimental quantification of annoyance to unpleasant and pleasant wind turbine sounds". In: 29th international congress and exposition of noise control engineering. International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE); 2000.
- Pieren R, Heutschi K, Müller M, Manyoky M, Eggenschwiler K., "Auralization of wind turbine noise: Emission synthesis". *Acta Acoust United Acoust* 2014;100:25-33. DOI: 10.3813/AAA.918683.
- Arce León C, Merino-Martinez R, Ragni D, Avallone F, Snellen M., "Boundary layer characterization and acoustic measurements of flow-aligned trailing edge serrations". *Exp Fluids* 2016;57(182):1-22. DOI: 10.1007/s00348-016-2272-z.
- Avallone F, van der Velden WCP, Ragni D., "Benefits of curved serrations on broadband trailing-edge noise reduction". *J Sound Vib* 2017;400:167-77. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.04.007.
- Rubio Carpio A, Avallone F, Ragni D, Snellen M, van der Zwaag S., "3D-Printed perforated trailing edges for broadband noise abatement". In: 25th AIAA/CEAS aeroacoustics conference. 2019. DOI: 10.2514/6.2019-2458.
- Rubio Carpio, A., Merino-Martinez, R., Avallone, F., Ragni, D., Snellen, M., and van der Zwaag, S. "Experimental characterization of the turbulent boundary layer over a porous trailing edge for noise abatement" *Journal of Sound and Vibration* 443 (2019). DOI: 10.1016/j.jsv.2018.12.010.
- ISO norm 532-1 – acoustics – method for calculating loudness – Zwicker method. Tech. rep., (1). International Organization for Standardization; 2017.
- Aures W., "Procedure for calculating the sensory euphony of arbitrary sound signal". In German: Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale. *Acustica* 1985;59(2):130-41.
- von Bismark G., "Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds". *Acta Acoust United Acoust* 1974;30(3):159-72.
- Daniel P, and Webber R., "Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model". *Accust-Acta Acust* 1997;83:113-23.
- Fastl H, and Zwicker E., "Psychoacoustics – facts and models". 3rd ed. Springer Series in Information Sciences; 2007.
- Di G-Q, Chen X-W, Song K, Zhou B, and Pei C-M., "Improvement of Zwicker's psychoacoustic annoyance model aiming at tonal noises". *Appl Acoust* 2016;105:164-70. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.12.006.