

SCHOOL OF ARTS GENT

Piepschuim: de volgende stap voor muziekinstrumenten?

Geëxpandeerd polystyreen als alternatief voor klankhout

Tim Duerinck

Master Scriptie Instrumentenbouwkunde

Promotor: Geerten Verberkmoes

Academiejaar 2014-2015

Conservatorium Gent – School Of Arts

Hogeschool Gent

Dankwoord

Dank aan G. Verberkmoes voor de data recorder, versnellingsmeters, en voor hulp bij de metingen. Twinplast N.V. wordt bedankt voor het ter beschikking stellen van piepschuim, Isomo N.V. voor het delen van de eigenschappen van hun product. F. Brison voor klankopnames, F. Ponsele en M. Libeert voor hun introductie in carbon.

Inhoudsopgave

Inleiding: Waarom dit onderzoek?.....	1
Historisch onderzoek.....	2
1.1 Experimentele strijkinstrumenten.....	3
1.2 : Analyse en optimalisatie.....	8
1.2.1 Analyse en optimalisatie van instrumenten.....	8
1.2.2 Analyse en optimalisatie van hout.....	11
1.3 Discussie.....	15
EPS als alternatief voor klankhout.....	16
2.1 EPS als materiaal.....	18
2.2 Densiteit.....	19
2.3 Geluidssnelheid.....	20
2.4 Geluidsafstralingscoëfficiënt.....	23
2.5 Plastische en elastische vervorming.....	25
2.6 Discussie.....	28
Constructie van een cello met een klankblad uit EPS.....	29
3.1 Tests en prototypes.....	29
3.2 Ontwerp.....	32
3.3 Discussie.....	33
Resultaten en conclusies.....	34
Suggesties voor verder onderzoek.....	35
Bronnen.....	36
Literatuur & Muziekinstrumenten.....	36
Afbeeldingen.....	40

Inleiding: Waarom dit onderzoek?

Al eeuwen proberen instrumentenbouwers de werking van akoestische strijkinstrumenten te onderzoeken, te begrijpen en te optimaliseren^{1,2}. Ze sturen de instrumenten bij, overeenkomstig de behoeften van de componist, de muzikant, en een wereld in constante verandering.

Tijdens deze evolutie van de strijkinstrumenten was er een grote variatie aan maten en vormen, maar door de grote populariteit van Stradivarius, de beroemdste instrumentenbouwer aller tijden, zijn alle strijkinstrumenten meer op de zijne, of die van andere beroemde instrumentenbouwers uit zijn periode, gaan lijken. Een aantal elementen hebben over de eeuwen heen een steeds meer gestandaardiseerde vorm gekregen. Dat geldt onder meer voor de plaatsing en grootte van de basbalk, de hoek waarbij de nek aan het corpus van het instrument bevestigd is, de snaarlengte, de toets en de kam^{3,4}.

Door een toenemende uniformisering van de muzikale smaak in de westerse wereld werden deze instrumenten steeds meer gestandaardiseerd, en is er een grote diversiteit verloren gegaan ten behoeve van een 'optimalisatie' van het instrument⁵. Maar gelukkig weten we dat er voor de zoektocht naar het perfecte instrument veel onderzoek is gebeurd en er veel experimentele instrumenten zijn gemaakt. Sommige experimentele instrumenten zoals de Stroh viool zijn blijven bestaan en hebben met hun unieke klank een plaats veroverd in ons groot aanbod van muziek.

Deze scriptie beschrijft een onderzoek naar een mogelijke volgende stap in de historische evolutie van strijkinstrumenten. Deze scriptie bestaat uit drie hoofdstukken. In het eerste hoofdstuk wordt een kort overzicht geschetst, enerzijds van de evolutie in onderzoek op het vlak van akoestiek met betrekking tot strijkinstrumenten, anderzijds van de experimentele strijkinstrumenten zelf, van het begin van de 19e eeuw tot heden. De conclusies van deze onderzoeken worden kritisch geëvalueerd. Op basis van deze kritische reflectie wordt in het tweede hoofdstuk onderzocht welke de mogelijkheden zijn van het materiaal geëxpandeerd polystyreen, ook wel piepschuim genoemd in de volksmond, als klankversterker in functie van akoestische strijkinstrumenten. In het derde hoofdstuk van deze scriptie wordt een onderzoek in de kunsten beschreven. De constructie van een experimentele cello met geëxpandeerd polystyreen als klankversterkend materiaal, en de voorafgaande prototypes worden beschreven.

¹ Cremer L. (1984). *The Physics of the Violin*. Cambridge, MA. The MIT Press.

² Hutchins C. (1983). *A History of Violin Research*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 73, 1421-1440.

³ Buen A. (2006). *A brief introduction into the violin acoustics history*. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting Proceedings, Gothenburg.

⁴ Cremer L. (1984).

⁵ Aangezien de kwaliteit van de klankkleur iets subjectief is kan men lang en uitvoerig discussiëren over wat een mooie of optimale klank is voor een instrument. Vandaar dat het woord optimalisatie hier tussen aanhalingstekens geplaatst is.

1

Historisch onderzoek

Fahre fort, übe nicht allein die Kunst, sondern dringe auch in ihr Inneres; sie verdient es, denn nur die Kunst und die Wissenschaft erhöhen den Menschen bis zur Gottheit.
- Ludwig van Beethoven, 1812

Het historisch onderzoek naar de klankmogelijkheden van strijkinstrumenten kan opgedeeld worden in experimenteel en theoretisch werk. In experimentele studies maakte men prototypes van strijkinstrumenten waarbij de vorm of het materiaal afweek van de standaard strijkinstrumenten zoals we deze nu kennen. Bij theoretische studies richtte men zich op de analyse van de gegeven instrumenten. Men probeerde vaak het 'geheim' van Stradivarius te achterhalen. Het einddoel van deze studies was meestal een optimalisatie van de viool of andere strijkinstrumenten, zonder af te wijken van de standaard vorm en materialen.

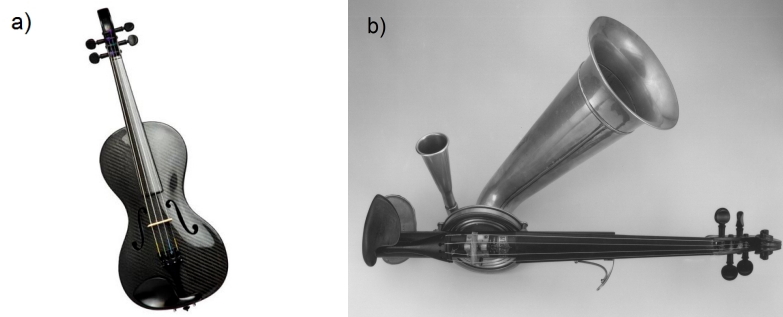
In deze scriptie worden enkel volledig akoestische strijkinstrumenten besproken, instrumenten met elektrische componenten worden buiten beschouwing gelaten.

1.1 Experimentele strijkinstrumenten

Zoals hiervoor beschreven werd er in het verleden reeds veel geëxperimenteerd. Er zijn echter slechts enkele aanpassingen in vorm en materiaal die een groot publiek hebben weten te overtuigen en die hun plaats op de markt hebben veroverd naast de normale akoestische strijkinstrumentenfamilie. De uiterlijke vorm van de gewone akoestische viool is grotendeels ongewijzigd gebleven sinds de 18e eeuw. De modellen uit Noord-Italië van deze periode werden de norm voor de komende eeuwen⁶.

Het eerste commercieel succesverhaal is de **Stroh viool**⁷. Dit strijkinstrument, genoemd naar zijn Duitse uitvinder J. M. A. Stroh, versterkt de klank van de snaren door een hoorn. De werking van dit instrument werd reeds uitvoerig beschreven door R. N. Ghosh⁸.

Een recentere doorbraak zijn strijkinstrumenten gemaakt uit **carbon vezels-versterkte polymeer**⁹. Deze strijkinstrumenten hebben een vereenvoudigde vorm geïnspireerd op de standaard strijkinstrumenten. Carbon is een zeer sterk en licht materiaal. De akoestische eigenschappen worden beïnvloed door de harsen die gebruikt worden om de carbon vezels in een vaste structuur te houden. Onderzoek toont aan dat carbon vezels-versterkte polymeer goede akoestische eigenschappen vertoont voor gebruik in de constructie van akoestische muziekinstrumenten¹⁰.



Afbeelding 1: Commercieel succesvolle experimenten. (A) Een viool uit carbon vezels-versterkte polymeer door Luis and Clark. (Cardiffviolins.co.uk, 2015). (B) een Stroh viool, J. M. A. Stroh. (Ids.si.edu, n.d.).

Naast deze twee vernieuwingen waren er veel experimenten die hun plaats op de markt niet hebben weten te veroveren. Zij zijn echter niet

⁶ Johnson C., Courtnall R., Menuhin Y. (1999). *The art of violin making*. R. Hale. London.

⁷ Stroh, A. (1900). *Improvements in Violins and other Stringed Instruments*. Patent GB 9418.

⁸ Ghosh R. N. (1926). *A Study of the acoustics of a Stroh Violin*. Indian J. Phys. Vol. 1, 142. Allahabad.

⁹ Leguia L. (2001). *Carbon fiber cello*. Patent US 6284957.

¹⁰ Jalili M., Mousavi S., Pirayeshfar A. (2014). *Investigating the acoustical properties of Carbon Fiber-, Glass Fiber-, and Hemp Fiber-reinforced Polyester Composites*. Society of Plastics Engineers Vol. 10, 2103 – 2111.

minder belangrijk indien men zich een beeld wil vormen van de evolutie van het onderzoek in strijkinstrumenten.

De eerste onderzoeker die voor ons onderwerp van belang is, is **E. F. F. Chladni**. Voor zijn akoestisch onderzoek beschreef hij bewegingspatronen in platen. Deze patronen, later Chladni patronen genoemd, werden waargenomen door een licht poeder op platen te strooien en deze dan te laten trillen op een bepaalde frequentie. Chladni E. F. F. deed dit door op de rand van de plaat te strijken met een strijkstok. Het poeder groepeerd zich vervolgens op de nodale lijnen waar de plaat niet trilt, en zo worden er patronen zichtbaar. Dit inzicht was van cruciaal belang om te begrijpen hoe de klankbladen van strijkinstrumenten bewegen.

F. Savart bouwde voort op deze Chladni patronen. Deze wetenschapper is voornamelijk bekend van de elektromagnetische wet die mede naar hem genoemd is, de wet van Biot-Savart¹¹.

Hij kwam na vele jaren van onderzoek tot een nieuw model voor de viool, gemaakt met dezelfde houtsoorten als een klassieke viool. Deze nieuwe vorm had hij ontworpen door de inzichten die hij verworven had in de akoestiek en staat nauwkeurig beschreven in zijn memoires¹². Een aantal instrumenten die naar zijn theorieën zijn gemaakt in het begin van de 19e eeuw zijn bewaard gebleven¹³, en werden recent nagebouwd¹⁴.

Hier enkele van zijn voornaamste bevindingen:

'On peut donc établir que plus la forme d'un corps est régulière, plus les vibrations s'y font avec facilité, et que plus un corps est susceptible de vibrer régulièrement et symétriquement, plus les sons qu'il produit sont beaux.'

'... Il est donc nécessaire de placer la barre au milieu, dans la direction de l'axe de la table, en manière de couvre-joint.'

'Mais il est évident, et il serait superflu d'en donner des preuves, que les tables planes sont celles qui vibrent le plus facilement quand elles sont fixées par leur contour;...' (Savart F. 1819).



Afbeelding 2: Een trapezoïdale viool, anoniem. (Carmentis.kmkg-mrah.be, n.d.).

Na een vertaling van de volledige memoires van F. Savart gedaan te hebben interpreteert de auteur deze segmenten als volgt: F. Savart concludeert dat, hoe evenwichtiger de vorm van het corpus van een instrument is, hoe gemakkelijker dit trilt, en hoe meer het corpus gemakkelijk en symmetrisch kan trillen, hoe mooier de klank is die het produceert. Daaruit besluit hij dat de basbalk dus in het midden van het bovenblad moet komen over de voeg. Hij

¹¹ Griffiths D. J. (1998). *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall.

¹² Savart F. (1819). *Mémoire sur la construction des instrumens à cordes et à archets*. Paris.

¹³ Experimentele viool, ontworpen door Félix Savart, Paris, Ca. 1818, Muziekinstrumentenmuseum Brussel, Inv. 1362.

¹⁴ Wilson C. (2002). *Cut the Curves*. The Strad July 2002, 750-755.

schrijft ook hoe hij het als evident beschouwt, dat vlakke klankbladen veel gemakkelijker kunnen trillen dan klankbladen met een welving. Hij maakt in het verder uitbouwen van zijn theorie ook gebruik van de Chladni patronen. F. Savart beschrijft hoe hij de bewegingspatronen van zijn trapezevormige klankbladen zo symmetrisch mogelijk maakt. Want het gaat volgens hem niet om de uiterlijke symmetrie (gelijke diktes) maar om de symmetrie van hoe het klankblad werkelijk trilt.

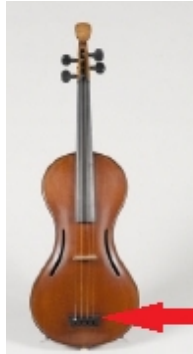
Zoals de auteur aantoonde in een onderzoek door middel van modale analyse dat recent gepubliceerd werd, beweegt een vlak klankblad inderdaad meer dan zijn gewelfde tegenhanger¹⁵. De subjectieve evaluatie van de klank van het Savart model gekoppeld aan de resultaten van de modale analyse doet vermoeden dat een gebrek aan briljantie in de klank van het Savart model zou kunnen toegeschreven worden aan de plaatsing van de basbalk. Helaas kunnen we de klank van dit instrument niet objectief evalueren. Er is volgens de kennis van de auteur nog geen bruikbare methode gepubliceerd die een objectieve evaluatie van de klank van experimentele strijkinstrumenten mogelijk maakt. **C. Fritz** is er wel in geslaagd een dubbel-blind methode te ontwikkelen om objectieve evaluatie mogelijk te maken van oude en nieuwe strijkinstrumenten, waarbij de tests plaats vonden in een donkere kamer en de geur van de instrumenten werd gemaskeerd. Hierdoor werd het onmogelijk voor de violist om het instrument te identificeren¹⁶. Deze methode is echter niet bruikbaar om experimentele instrumenten objectief te evalueren omdat deze door hun afwijkende vorm en/of materiaal anders aanvoelen dan de typische viool, en de violist dus altijd zal voelen dat hij op een atypisch instrument speelt.

Een ander experimenteel instrument uit dezelfde periode is de viool naar ontwerp van **F. Chanot**. Dit instrument is geïnspireerd op de klassieke vorm van de viool. De belangrijkste veranderingen zijn het weglaten van de hoeken, de c-klankgaten die de normale f-vormige klankgaten vervangen en het bevestigen van de snaren aan een bijgevoegde kam die gelijmd is aan het bovenblad, zoals aangeduid met een rode pijl op afbeelding 4¹⁷. F. Chanot poogde met deze tweede kam het bovenblad meer te laten trillen om een luider instrument te bekomen. De verandering en verschuiving van de klankgaten kan toegeschreven worden aan een poging om een groter percentage van het klankblad te laten trillen door de kam.

¹⁵ Duerinck T., Skrodzka E., Linde B. B. J. (2014). *Modal analysis of a trapezoidal violin built after the description of F. Savart*. Archives of Acoustics Vol. 39, No. 4. 623–628.

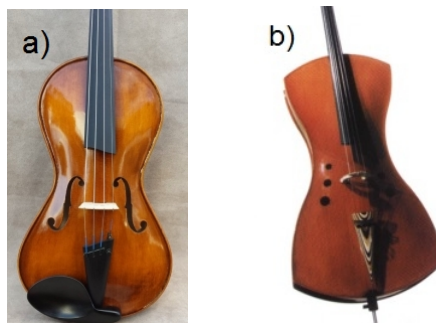
¹⁶ Fritz C., Curtin J., Poitevineau J., Borsarello H., Wollman I., Tao F.-C., Ghasarossian T. (2014). *Soloist evaluations of six Old Italian and six new violins*. PNAS Vol. 111, no. 20

¹⁷ Experimentele viool, ontworpen door Francis Chanot, Mirecourt, Ca. 1820, Muziekinstrumentenmuseum Brussel, Inv. No. 1332.



Afbeelding 3: Een viool zonder hoeken met een toegevoegde kam door F. Chanot. (Carmentis.kmkg-mrah.be, n.d.).

Het weglaten van de hoeken, en daardoor de interne hoekblokken, is vermoedelijk een poging om een massareductie te krijgen van de viool waardoor de beschikbare energie niet verloren gaat en efficiënter kan gebruikt worden door de klankbladen. Vooral het weglaten van de hoeken wordt nog regelmatig toegepast door hedendaagse vioolbouwers als **T. Phillips**¹⁸ en **R. Lanne**¹⁹ die 'moderne' versies van de viool en cello maken²⁰. Het bevestigen van de snaren aan het bovenblad bleek een overschatting van de sterkte van een bovenblad uit vurenhout, of een onderschatting van de kracht van de snaren. Net als bij een harp trekt de constante kracht uitgeoefend door de snaren het bovenblad na verloop van tijd kapot. Dit is een welbekend fenomeen voor restaurateurs van musea met harpen in hun collectie.



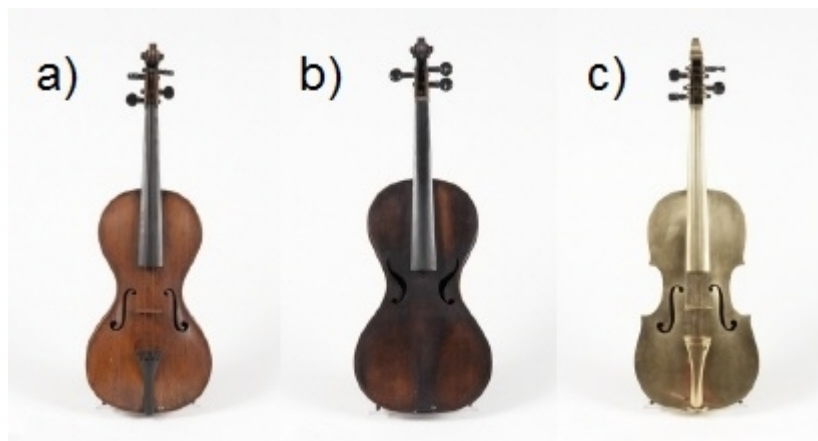
Afbeelding 4: Experimentele instrumenten door hedendaagse vioolbouwers. (A) Een viool zonder hoeken door T. Phillips. (Phillips, T. 2015). (B) Een cello met een nieuwe vorm door R. Lanne. (Lanne, R. n.d.)

¹⁸ Tim Phillips Violins. (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://www.timsviolins.co.uk/>

¹⁹ Lanne R. (n.d.). Geraadpleegd 17 April 2015, op <http://roger.lanne.free.fr/creations.htm>

²⁰ Het woord modern wordt tussen aanhalingstekens gezet omdat het een vaak gebruikte term is voor hedendaagse violen die met hun vorm afwijken van de standaard. Hoewel de auteur van mening is dat deze term een foute benaming is aangezien er al sinds de 19e eeuw violen met afwijkende vormen bestaan, legt hij zich neer bij de consensus van de bestaande term modern.

Er zijn nog veel andere experimentele strijkinstrumenten bewaard gebleven. Uit de collectie van het Muziek Instrumenten Museum Brussel vermelden we o.a. een viool zonder hoeken door **L. Kruina** (Inv. No. 1337 ca. 1795), een viool zonder hoeken uit beukenhout i.p.v. esdoorn van een onbekende auteur (Inv. No. 1336 ca. 1800), en een viool in de klassieke vorm uit koper toegeschreven aan **C.-B. Mahillon** (Inv. No. 1339 ca. 1867). Het MIM heeft 23 instrumenten die geklasseerd staan als 'experimentele viool', deze zijn terug te vinden op de website Carmentis²¹. Waarop het ontwerp van deze instrumenten gebaseerd is, werd volgens de kennis van de auteur, niet gedocumenteerd, en kan als gevolg daarvan tot op heden alleen vermoed worden. Daardoor worden deze instrumenten in deze scriptie niet verder beschreven.



Afbeelding 5: Historische experimentele violen. (A) Een viool zonder hoeken door L. Kruina. (B) Een viool zonder hoeken met experimentele klankgaten uit beukenhout, anoniem. (C) Een viool uit koper door C.-B. Mahillon. (Carmentis.kmkg-mrah.be, n.d.).

²¹ Carmentis (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://carmentis.kmkg-mrah.be/>

1.2 : Analyse en optimalisatie

1.2.1 Analyse en optimalisatie van instrumenten

Na E. F. F. Chladni waren er veel andere onderzoekers die de werking van violen onderzochten.

De 20 en 21ste eeuw hebben veel nieuwe nauwkeurige onderzoeksmethodes voortgebracht die nog steeds gebruikt worden om strijkinstrumenten te analyseren. De meerderheid van deze onderzoeken gaan over de zoektocht naar het zogenoemde geheim van Stradivarius en de andere meesters van de Cremonese bloeiperiode. Deze methodes en de evolutie in het onderzoek werden reeds goed gedocumenteerd door onderzoekers als A. Buen²². Om echter de laatste doorbraken en de evolutie daarin te begrijpen worden deze hier kort herhaald:

Door onderzoek uitgevoerd door o.a. H. Backhaus²³, H. Meinel²⁴, en L. Cremer²⁵ van de Catgut Acoustical Society slaagde **C. Hutchins**²⁶ erin, tests en aanpassingen te doen op violen tijdens het bouwproces. Door tijdens het bouwen aanpassingen te doen aan de hand van de resultaten van de tests leidde deze werkwijze volgens haar tot '*the making of consistently good violins*'.

Ze beschrijft hoe het dupliceren van een viool niet alleen inhoudt dat afmetingen zoals lengte, breedte en dikte gekopieerd moeten worden, maar dat ook de trillingspatronen in het hout moeten benadert worden. Dit doet ze door voortdurend metingen te doen terwijl ze het hout van de klankbladen van de kopie op dikte aan het brengen is, en naar gelang van de resultaten aanpassingen te maken. Haar einddoel is dat bij de afgewerkte klankbladen de trillingspatronen zoveel en zo precies mogelijk overeenkomen met die van het te kopiëren instrument. C. Hutchins en de andere onderzoekers verbonden aan de Catgut Acoustical Society vinden drie modussen die belangrijkst blijken te zijn voor een goede viool. Deze modi komen overeen met de drie tests die een vioolbouwer doet volgens de Franse traditie in Mirecourt om te kijken of het hout niet te dik is. Deze 3 methodes om de stijfheid te voelen van een vioolblad zijn accuraat beschreven door C. Johnson²⁷.

²² Buen A. (2006).

²³ Hutchins C. (1976). *Musical Acoustics, Part II Violin Family Functions*. PA. Dowden Hutchingon & Ross Inc.

²⁴ Meinel H. (1957). *Regarding the Sound Quality of Violins and a Scientific Basis for Violin Construction* J. Acoust. Soc. Am. Vol. 29(7), 817-822.

²⁵ Cremer L. (1984).

²⁶ Hutchins C. (1974). *The Acoustics of Violin Plates*. Scientific American, Vol. 230.

²⁷ Johnson C. et al. (1999).

De theorie van F. Savart dat bij een goede viool de 'tap tonen'²⁸ van het boven- en onderblad altijd een halve tot een hele toon uit elkaar liggen wordt weerlegd door C. Hutchins.

Er komt echter kritiek op het onderzoek van C. Hutchins. De belangrijkste is dat ze de klankbladen als aparte onderdelen beschouwt en de viool in haar geheel niet onderzoekt. **W. Fry** doet dat wel en ontwikkelt technieken om de diktepatronen van violen aan te passen zonder het bovenblad te moeten verwijderen²⁹.

Vioolbouwers als **M. Schleske** bouwen voort op dit onderzoek en slagen erin om dat wat zij 'akoestische kopieën van instrumenten' noemen te maken op basis van modale analyse en andere technieken³⁰. Modale analyse is een veel gebruikte techniek om de natuurlijke vibraties te meten van klassieke instrumenten als violen^{31,32}, gitaren^{33,34} of de cello³⁵ en van minder bekende instrumenten als de Russische balalaika³⁶, de kantele³⁷ of de jarana jarocho³⁸. Hoewel modale analyse helpt om inzicht te verkrijgen in de werking van een instrument, zijn er redenen om het gebruik hiervan om de kwaliteit van een instrument te meten in vraag te stellen.

Zoals **G. Bissinger** in zijn onderzoek concludeert:

'Examining the totality of our experimental results for violins of widely varying quality it was impossible to reach a conclusion different than that of previous researchers, viz. that the very best violins measure little different from the worst.'

(Bissinger G. 2008)³⁹.

²⁸ Tap tonen is een term uit de vioolbouw gebruikt om de laagste toon te beschrijven die men kan vinden wanneer men een los klankblad met duim en wijsvinger vasthoudt op een nodaal punt en tikt op een niet nodaal punt.

²⁹ Wali K. C. (2010). *Cremona Violins: A Physicist's Quest for the Secrets of Stradivari* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.

³⁰ Schleske M. (2002). *Empirical tools in contemporary violin making. 1. Analysis of design, materials, varnish and normal modes*. *Catgut Acoust. Soc. J.* Vol. 4, No. 5 50–65.

³¹ Marshall K.D. (1985). *Modal analysis of a violin*. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 77, 695-709.

³² Skrodzka E., Krupa A., Rosenfeld E., Linde B. B. J. (2009). *Mechanical and optical investigation of dynamic behavior of violins in modal frequencies*. *Appl. Opt.* Vol. 48 165-170.

³³ Skrodzka E., Łapa A., Linde B. B. J., Rosenfeld E. (2011). *Modal parameters of two complete guitars differing in the bracing pattern of the soundboard*. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 130, No. 4 2186-2195.

³⁴ Torres J.A., Boullosa R.R. (2009). *Influence of the bridge on the vibration of the top plate of a classic guitar*. *Appl. Acoust.* Vol. 70, 1371-1377.

³⁵ Foulhe E., Goli G., Houssay A., Stoppani G. (2011). *Vibration modes of the cello tailpiece*, *Arch. Acoust.* Vol. 26, No. 4 713-726.

³⁶ Morrison A., Rossing T. D. (2009). *Modal analysis of the Russian balalaika*, *Proc. Int. Symposium on Musical Acoustics (ISMA)* Vol. 2, 421–4.

³⁷ Penttinen H., Erkut C., Pölkki J., Välimäki V., Karjalainen H. (2005). *Design and analysis of a modified kantele with increased loudness*, *Acta Acust. Acustica* Vol. 91, 261-268.

³⁸ Boullosa R. R., Gomez S. R. (2014). *Acoustics of the jarana jarocho*. *Appl. Acoust.* Vol. 78, 59-67.

³⁹ Bissinger G. (2008). *Structural acoustics of good and bad violins*, *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 124, No. 3 1764–1773.

Modale analyse en andere moderne technieken zoals Synchrotron-radiatie microscopie (SRM), Gas chromatographie – massaspectrometrie (GC-MS), Dendrochronologie, en carbon dating hebben ons een groot inzicht gegeven in hoe muziekinstrumenten werken en gemaakt werden of worden.

Een zeer invloedrijk werk dat hier moet vermeld worden is **Strad 3D**⁴⁰, waarin drie violen, twee naar de hand van A. Stradivarius en één gemaakt d. G. Guarneri, in ongeprecedenteerd detail in kaart worden gebracht. Voor het eerst kon men aan de hand van modale analyse in 3D animaties zien hoe deze instrumenten werkelijk trilden, maakte men precieze CT scans, en maakte men resonantie profielen van de instrumenten. Het Strad 3D project is zo belangrijk omdat het een groot bereik had en nog steeds heeft bij instrumentenbouwers wereldwijd, hierdoor kregen zij meer inzicht in de instrumenten die ze maken.

Voor instrumentenbouwers kan er echter een hoge drempel bestaan voor het gebruik van de vele wetenschappelijke publicaties. Het grote kluwen aan wetenschappelijk onderzoek is namelijk niet geschreven als bruikbare handleiding. Hoe interpreteert men de resultaten en hoe gebruikt men ze? Om dit hiaat op te vullen bestaan er publicaties voor een specifiek doelpubliek van viool- en gitaarbouwers⁴¹. Ook deze specifieke publicaties hebben er echter niet toe bijgedragen dat vioolbouwers hun bouwmethoden veel veranderd hebben, zoals **S. Pollens** concludeert in zijn overzicht van de voornaamste onderzoeksmethodes in akoestiek en vioolbouw:

'Modern acoustical science has provided little of practical benefit to musical instrument makers.'
(Pollens S. 2014)⁴².

Hieruit zou men kunnen concluderen dat, op enkele luthiers zoals M. Schleske na, deze onderzoeken weinig praktisch nut hebben voor de meeste vioolbouwers. Er is echter wel een bewustwording gegroeid, zoals men kan zien aan de toevoeging van lessen akoestiek in de meeste vioolbouwscholen. Steeds meer vioolbouwers zijn beter geïnformeerd over de werking van strijkinstrumenten en het onderzoek daarin. Men kan zijn bedenkingen hebben bij de vraag hoeveel verandering dit voortdurende onderzoek heeft teweeggebracht op de werkwijze van instrumentenbouwers in hun ateliers. Er is veel kennis ontwikkeld, maar deze wordt slechts door een zeer geringe groep luthiers in praktijk omgezet. Indien men dit in perspectief plaatst en vergelijkt met historisch onderzoek in de vioolbouw, ziet men dat ook baanbrekende ontdekkingen daarin slechts een kleine groep van instrumentenbouwers beïnvloeden.

⁴⁰ Zygmuntowicz S., Bissinger G. (2009). *Strad 3D - a Unified Inquiry: Scientists, Violinmakers & Musicians Study; 3 Classic Violins: Plowden, Willemotte, Titian*. London.

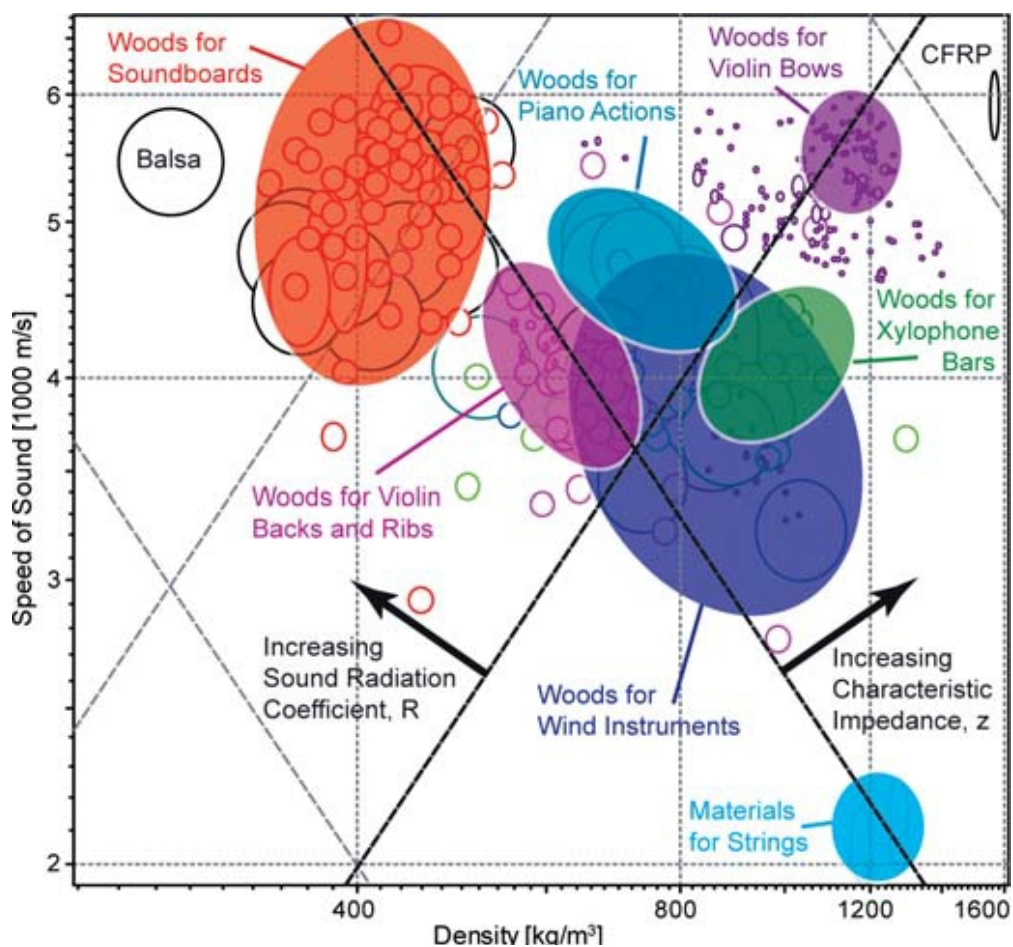
⁴¹ Jansson E. (2002). *Acoustics for violin and guitar makers*. Stockholm. Kungl Tekniska Högskolan.

⁴² Pollens S. (2014). *The Appliance of science*. The Strad Vol. 124, 54-58.

1.2.2 Analyse en optimalisatie van hout

Terwijl de invloed van het onderzoek naar optimalisatie van instrumenten tijdens het bouwproces slechts een kleine groep luthiers weet te overtuigen, zijn de resultaten van onderzoek naar het optimale hout voor strijkinstrumenten veel wijder verspreid en gebruikt. Deze resultaten zijn namelijk veel gemakkelijker te implementeren, aangezien een instrumentenbouwer slechts zijn criteria waarmee hij hout koopt moet veranderen⁴³.

Grafiek 1, gepubliceerd door **U. G. K. Wegst**⁴⁴, brengt de verschillende houtsoorten en hun gebruik in muziekinstrumenten overzichtelijk in beeld.



Grafiek 1: De geluidssnelheid in m/s en dichtheid in kg/m^3 weergegeven voor houtsoorten gebruikt voor muziekinstrumenten en andere materialen. Door U. G. K. Wegst.

⁴³ Johnson C. et al. (1999).

⁴⁴ Wegst U. G. K. (2006). *Wood for sound* American Journal of Botany Vol. 93, No. 10 1439–1448.

Men kan zien dat hout voor klankbladen doorgaans een hoge snelheid van geluid en een lage dichtheid heeft. Deze twee eigenschappen hebben samen een hoge geluidsafstraling coëfficiënt tot gevolg. Hout gebruikt voor strijkstokken combineert een hoge geluidssnelheid met een hoge dichtheid, in de tabel wordt daardoor duidelijk dat vooral houtsoorten met een hoge impedantie geschikt zijn voor strijkstokken. In de grafiek ziet men dat hout voor achterbladen en zijkanten van strijkinstrumenten een gelijkaardige geluidsafstralingscoëfficiënt hebben als hout voor piano toetsen, ze hebben echter wel een lagere dichtheid en geluidssnelheid.

Vroeger selecteerde een instrumentenbouwer, bij gebrek aan toegang tot gepaste, goedkope of toegankelijke meetapparatuur, zijn hout voornamelijk instinctief. Men keek naar het hout om te zien of de nerven zo recht mogelijk liggen en of de afstand tussen de nerven niet te groot is. Het hout werd subjectief met de handen gewogen, en/of men luisterde naar de klank die een plank voortbrengt wanneer erop getikt wordt. Verder werd er ook vaak gezocht naar oud hout⁴⁵. De selectie van hout op deze manier varieerde uiteraard tussen verschillende instrumentenbouwers, aangezien elke luthier een eigen waarde aan bepaalde tests verbond.

Hoewel hout voor instrumentenbouw nog vaak op deze manier geselecteerd wordt gebruiken steeds meer luthiers de beschikbare technologie en kennis om hun hout te selecteren. **G. Lucchi**, een Italiaanse strijkstokkenbouwer, maakte met zijn introductie van de Lucchi meter in 1983⁴⁶ de techniek om geluidssnelheid door hout te meten toegankelijk voor een groot publiek.

De violen gemaakt door A. Stradivarius en zijn tijdgenoten hebben de reputatie superieure tonale kwaliteiten te hebben⁴⁷. Hoewel hierover discussie bestaat⁴⁸, wordt wel algemeen aangenomen dat het vurenhout (*Picea Abies*) dat deze instrumentenbouwers gebruikten, van een uitstekende kwaliteit is⁴⁹. Zoals **L. Burckle** beschrijft tonen dendrochronologische studies aan dat het gebruikte hout voornamelijk gegroeid is in het Maunder Minimum, een periode van verminderde activiteit van de zon. Hierdoor waren de temperaturen relatief lager waardoor de bomen trager groeiden. Dit had tot gevolg dat het percentage van vroeg hout (dunnere celwanden en lagere dichtheid, aangegeven op afbeelding 9 met een blauwe pijl) tegenover laat hout (dikkere celwanden, hogere dichtheid, aangegeven op afbeelding 9 met een zwarte pijl) hoger lag dan bij bomen die onder optimale omstandigheden groeien. Dit verschil ging gepaard met een hogere modulus van elasticiteit waardoor het

⁴⁵ Johnson C. et al. (1999).

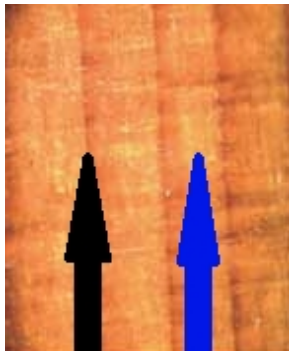
⁴⁶ Lucchi G. (1988). *The Use of Empirical and Scientific Methods to Measure the Velocity of Propagation of Sound*. The Violin Society of America Vol. 9, No. 1 107 – 123.

⁴⁷ Rohloff E. (1950). *Zeitschrift für angewandte Physik, Der Klangcharakter altitalienischer Meistergeigen*. Lübeck.

⁴⁸ Fritz C. , Curtin J., Poitevineau J., Morrel-Samuels P., Tao F.-C. (2012). *Player preferences among new and old violins* PNAS Vol. 103, No. 3.

⁴⁹ Topham T. J., McCormick M. D. (2000). *A dendrochronological investigation of stringed instruments of the Cremonese School (1666–1757) including 'The Messiah' violin attributed to Antonio Stradivari*. Journal of Archaeological Science Vol. 27, 183–192.

hout geschikter is om te dienen als klankblad^{50,51}.



Afbeelding 6: Laat- (zwarte pijl) en vroeghout (blauwe pijl) in P. Abies. (Spaceplace.nasa.gov, n.d.).

Daardoor gaan gespecialiseerde klankhouthandelaars zoals **A. Pahler** op zoek naar hout dat dezelfde eigenschappen bezit, zoals hij mij meedeelt in onderlinge correspondentie (11/09/2012):

'I aim at high sound velocities with medium to low densities. Our densities used are from approx. 0.36 to 0.39 (low) to 0.40 to 0.43 kg / m³ (medium). [...] The speed of sound should be in the region of more than 5000 m/s but it is not the most critical factor if wood is of a good feeling 'in the hands'. Some speed of sound is even over 6000 but mostly wood is getting to the more dense edge then.'

(Pahler A. 2012).

Zoals blijkt uit bovenstaande opmerking selecteert A. Pahler zijn hout op de dichtheid en de snelheid waarmee geluid zich door het hout begeeft. Hij meet de snelheid van het geluid omdat dit rechtstreeks verbonden is met een hoge elasticiteitsmodulus, zoals aangegeven in de formule hieronder. Hoe hoger de elasticiteitsmodulus van een materiaal hoe hoger de snelheid waarmee geluid zich erdoor beweegt. De verhouding van de snelheid van trillingen tot de elasticiteit en de densiteit in vaste materialen kan via de volgende formule berekend worden⁵²:

De snelheid van geluid door een materiaal **c**

$$c = \sqrt{E/\rho}$$

⁵⁰ Burckle L., Grissino-Mayer H. D. (2003). *Stradivaris, violins, tree rings, and the Maunder Minimum: a hypothesis*. Dendrochronologia Vol. 21, 41–45.

⁵¹ Esper J., Cook E. R., Schweingruber F. H. (2002). *Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability*. Science Vol. 295, 2250–2252.

⁵² Feilding, C. (n.d.). College of Santa Fe Auditory Theory. Geraadpleegd 2 Maart 2015, op http://www.feilding.net/sfuad/musi3012-01/html/lectures/002_sound_1.htm#pressurewavetransmission

Met c = snelheid van geluid door een materiaal (m/s)
 E = elasticiteitsmodulus van het materiaal (N/m²)
 ρ = dichtheid van het materiaal (kg/m³)

Doordat hout een anisotroop materiaal is, zijn de dichtheid van het materiaal en de elasticiteitsmodulus niet constant. De dichtheid van het materiaal is verschillend in vroeg of laat hout, en de elasticiteitsmodulus E is bij hout afhankelijk van de hoek van de meting tegenover de jaarringen. Zo verschilt ook de snelheid waarmee geluid zich door het materiaal verplaatst voor verschillende richtingen in hout. Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 2.3 van deze scriptie.

Voor goed klankhout zoekt men de ideale combinatie tussen een hoge snelheid van geluidsgolven, doorgaans in de richting van de vezels, en een lage gemiddelde dichtheid. Het probleem in de zoektocht naar het meest optimale klankhout is dat deze twee kwaliteiten elkaar tegenwerken. Zoals A. Pahler meedeelt in onderlinge correspondentie: naarmate de snelheid van geluid in het hout toeneemt, wat wenselijk is, neemt ook de dichtheid toe, en vice versa. Er zijn reeds onderzoeken uitgevoerd waarin behandelingen van hout met chemicaliën en/of schimmels om deze eigenschappen te beïnvloeden, besproken worden⁵³.

F. Schwarze zorgde voor een doorbraak:

'Degradation of Norway spruce wood by P. vitreus was accompanied by changes in its acoustic properties. A significant increase in R was recorded after 12 and 20 wk incubation and can be attributed to a reduction in density (-14.8% after 20 wk), coupled with little change in the speed of sound (-2.7% after 20 wk). [...] Microscopic assessment of the incubated specimens and measurement of five physical properties (density, modulus of elasticity, speed of sound, radiation ratio, and the damping factor) using resonance frequency revealed that in the wood of both species there was a reduction in density, accompanied by relatively little change in the speed of sound. Thus, radiation ratio was increased from 'poor' to 'good', on a par with 'superior' resonance wood grown in a cold climate.'
(Schwarze F. 2008)⁵⁴.

De schimmel *P. Vitreus* heeft dus een positief effect gehad op de geluidsafstralingscoëfficiënt R na een incubatie periode van 12 en 20 weken. De geluidsafstralingscoëfficiënt geeft weer hoe goed een materiaal zijn energie kan afstralen in geluid. Hoe hoger R in een materiaal is, hoe beter het geschikt is om geluid te versterken. Hierop wordt verder ingegaan in het tweede deel van de scriptie.

⁵³ Nagyvary J., Guillemette R. N., Spiegelman C. H. (2009). *Mineral Preservatives in the Wood of Stradivari and Guarneri* PLoS ONE Vol. 4, No. 1

⁵⁴ Schwarze F., Spycher M., Fink S. (2008). *Superior wood for violins - wood decay fungi as a substitute for cold climate*. New Phytologist Vol. 179, 1095–1104.

1.3 Discussie

Op basis van dit laatst beschreven akoestisch en materiaalkundig onderzoek kan men zich afvragen of de optimalisatie van akoestische strijkinstrumenten in hun huidige vorm en materiaal een nieuw hoogtepunt bereikt heeft. Door het optimaliseren van het materiaal kan men op gemakkelijke wijze en op grote schaal de kwaliteit van strijkinstrumenten verbeteren. De auteur stelt daarom de vraag of men de zoektocht naar het optimale materiaal voor strijkinstrumenten kan uitbreiden. Kan men, indien men de tonale kwaliteiten van akoestische instrumenten wilt verbeteren, niet beter opzoek gaan naar een nieuw materiaal? Men probeert klankhout te behandelen zodat het betere akoestische eigenschappen bezit. Waarom zoekt men niet gewoon een materiaal met superieure akoestische kwaliteiten?

2

EPS als alternatief voor klankhout

Preserving the tradition of violinmaking necessarily involves breaking away from it. Why? The tradition is rooted in the development of new sounds.

- Martin Schleske, 2012

Indien men het eerste deel van deze scriptie in acht neemt kan men zich de volgende vraag stellen: wat als men op zoek gaat naar nieuwe materialen met superieure akoestische kwaliteiten ter vervanging van het traditionele klankhout?

We zoeken geen materiaal met dezelfde eigenschappen als klankhout, want dan zou men enkel op een materiaal stuiten dat dezelfde restricties heeft. Zoals kan afgeleid worden uit grafiek 1 is de verhouding van de snelheid van geluid door een materiaal tot de dichtheid, de geluid straling coëfficiënt R , een belangrijke factor in houtkeuze met betrekking tot de geschiktheid als klankblad voor muzikale instrumenten. Het materiaal in kwestie moet een zo hoog mogelijke snelheid van geluid toestaan onder een zo laag mogelijke dichtheid. We zoeken dus een materiaal met een hoge geluidsafstralingscoëfficiënt.

U. Wegst⁵⁵ beschrijft enkele parameters die bepalen of een materiaal geschikt is voor muziekinstrumenten, en in welke functie:

De impedantie van het materiaal **z**

$$z = c\rho$$

Met z = impedantie
 c = snelheid van het geluid door een materiaal (m/s)
 ρ = densiteit van een materiaal (kg/m³)

De impedantie is gedefinieerd als het product van de geluidssnelheid door een materiaal en zijn densiteit. Zoals zichtbaar in de tabel van U. Wegst in het eerste hoofdstuk worden voor strijkstokken doorgaans houtsoorten gebruikt met een hoge impedantie. De hoge impedantie van carbon vezels verklaart het succes van strijkstokken gemaakt uit carbon vezels-versterkt polymeer. Aangezien U. Wegst beschrijft dat de impedantie geen bepalende factor is voor de kwaliteit van klankbladen wordt hier niet verder op ingegaan.

De geluidsafstralingscoëfficiënt **R**

$$R = c/\rho$$

Met R = geluidsafstralingscoëfficiënt (m⁴/kg*s)
 c = snelheid van het geluid door een materiaal (m/s)
 ρ = densiteit van een materiaal (kg/m³)

De geluidsafstralingscoëfficiënt van een materiaal is de verhouding van de geluidssnelheid door een materiaal en de densiteit van een materiaal. Een hoge geluidsafstralingscoëfficiënt is voor klankbladen van muziekinstrumenten zeer belangrijk.

F. Schwarze zegt hierover:

'Particularly in the case of the top plates for violins, a large R of the material is desirable to produce a big sound. A high radiation ratio in the axial direction is of utmost significance for first-quality resonance wood. [...] A material with a high ratio of the speed of sound to density increases the sound emission of the instrument, which means that the plate amplitudes are high in relation to the force that excites the strings. This enhancement of resonance makes the difference between a violin of average quality and one that is suitable for a top soloist.'
(Schwarze F. 2008).

⁵⁵ Wegst U. G. K. (2006).

De verliescoëfficiënt η

$$\eta = 1/Q = \delta/\Pi = \tan\psi$$

Met: η = verliescoëfficiënt
 Q = kwaliteitsfactor
 δ = logaritmisch decrement
 ψ = verlies hoek

De verliescoëfficiënt drukt de mate uit waarin een materiaal vibratie-energie verliest door interne frictie. De verliescoëfficiënt van een materiaal dient zo laag mogelijk te liggen voor een optimale geluidsversterking. Alle energie die verloren gaat door interne frictie kan niet uitgestraald worden naar de lucht⁵⁶. Andere parameters gerelateerd aan de demping zijn de kwaliteitsfactor; het logaritmisch decrement en de verlieshoek, beschreven door D. E. Newland⁵⁷.

Ook de plastische vervorming van een materiaal, hoe een materiaal zich gedraagt wanneer er druk op wordt uitgeoefend, en de maximale puntdruk die een materiaal aan kan, zijn belangrijke eigenschappen die een invloed hebben op de geschiktheid van materiaal voor akoestische muzikale instrumenten. Op de invloed van deze eigenschappen komen we later in deze scriptie terug.

Indien men een materiaal zoekt met een hoge verhouding tussen de geluidssnelheid en dichtheid komt men zoals verder in de scriptie te zien in tabel 1 uit bij geëxpandeerd polystyreen, in de volksmond ook wel piepschuim genoemd. Hoewel dit materiaal vanwege zijn eigenschappen reeds beschreven staat als een geschikte klankversterker⁵⁸ en gebruikt wordt door experimentele instrumentenbouwers zoals **G.-W. Raes**⁵⁹ is er nog geen publicatie die de toepassing van het materiaal in muziekinstrumenten beschrijft.

2.1 EPS als materiaal

Geëxpandeerd polystyreen of PS-hardschuim, ook wel EPS of piepschuim genoemd, is veruit de meest toegepaste vorm van polystyreen (PS). Niet-geëxpandeerde polystyreen is een amorf, bros en hard polymeer, het heeft een dichtheid van $1,05 \text{ kg/dm}^3$ met een verwekingspunt van ca. 90° . De slagsterkte van het materiaal wordt vaak verbeterd door het te mengen of te copolymeriseren met rubber, dit gaat echter ten koste van de stijfheid. EPS wordt vervaardigd door middel van een fysisch blaasmiddel: de grondstof (korreltjes polystyreen waarin pentaan is opgelost) wordt met

⁵⁶ Krüger F, Rohloff E, (1938). *Über die innere Reibung von Holz*. Zeitschrift für Physik Vol. 110, 58-68.

⁵⁷ Newland D. E. (1989). *Mechanical vibration analysis and computation*. Longman, Harlow, UK.

⁵⁸ Hopkin B. (1996). *Musical Instrument Design*, Tucson AZ USA.

⁵⁹ Geautomatiseerde zither, ontworpen door Godfried-Willem Raes, Gent, 2015, in de collectie van vzw Logos Foundation.

stoom tot 100 C° verwarmd. Het polymeer verweekt en de pentaan verdampt, waarbij de damp de korrel sterk doet expanderen. Deze schuimbolletjes worden dan in een gesloten vorm gebracht waarin ze verder verhit worden tot 120 C°. Bij deze vorm zetten de korrels verder uiteen en versmelten⁶⁰.

Er zijn verschillende varianten van EPS die onderling verschillen in dichtheid en korrelgrootte. In het onderzoek hier beschreven worden de volgende dichtheden onderzocht: 15 kg/m³, 25 kg/m³, 40 kg/m³ en 60 kg/m³, met een korrelgrootte die overeenkomt met de meeste applicaties van EPS. Ook EPS met een dichtheid van 25 kg/m³ en een fijnere korrel wordt onderzocht.

2.2 Densiteit

EPS heeft een zeer lage dichtheid die afhankelijk van de productie varieert van 10 kg/m³ tot 60 kg/m³. De dichtheid van *Picea abies* (vuren), gebruikt voor bovenbladen van strijkinstrumenten, varieert van 360 kg/m³ tot 495 kg/m³. *Acer pseudoplatanus* (Esdoorn), gebruikt voor het achterblad en zijkanten van strijkinstrumenten, varieert van 569 kg/m³ tot 625 kg/m³⁶¹. Wereldwijd varieert de dichtheid van hout van *Ochroma pyramidale* (Balsa) met 100 kg/m³, tot 1400 kg/m³ voor onder meer *Brosimum guianense* (Slangenhout)⁶². Ter vergelijking is de dichtheid van carbon vezels 1850 kg/m³⁶³.

Als we de geluidsafstralingscoëfficiënt R van EPS willen vergelijken met die van klankhout hebben we zowel de dichtheid van het materiaal nodig (zoals hierboven aangegeven) als de geluidssnelheid. Volgens de kennis van de auteur is deze laatste voor EPS nog niet onderzocht in publicaties. Daarom wordt in het volgende hoofdstuk de geluidssnelheid van EPS met verschillende dichtheden gemeten. Aangezien EPS een homogeen materiaal is, is de geluidssnelheid door het materiaal in alle richtingen hetzelfde. Bij klankhout is dit niet het geval. Daarom wordt in het volgende hoofdstuk ook de geluidssnelheid door vurenhout over verschillende hoeken tegenover de vezelrichting gemeten.

⁶⁰ Van der Vegt A. K., Govaert L. E. (1991). *Polymeren : van keten tot kunststof*. Delft Academic Press.

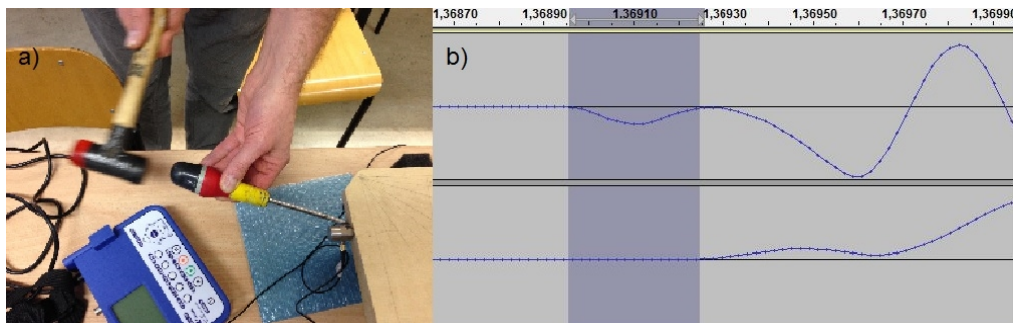
⁶¹ Spycher M., Schwarze F., Steiger R. (2007). *Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties*. Wood Sci. Technol. Vol. 42, 325–342.

⁶² Wegst U. G. K. (2006).

⁶³ Structural Materials. (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://settlement.arc.nasa.gov/Nowicki/SPBII1MA.HTM>

2.3 Geluidssnelheid

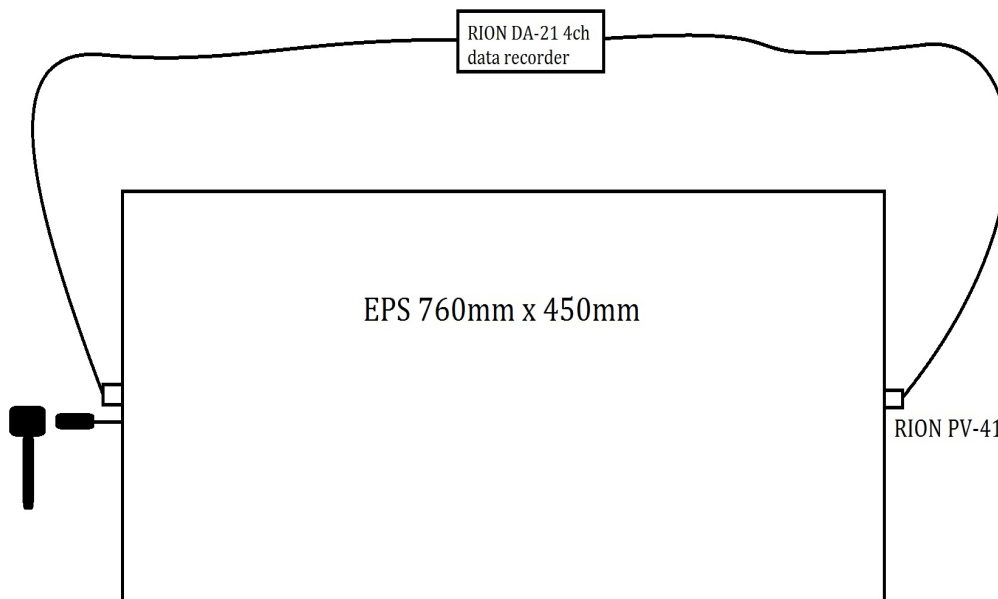
De geluidssnelheid in EPS werd gemeten over een lengte van 760 mm in het midden van blokken met een volume van 760 x 450 x 100, met een dichtheid van respectievelijk 15 kg/m^3 , 25 kg/m^3 , 40 kg/m^3 en 60 kg/m^3 . Ook een blok met een fijnere korrelgrootte van 25 kg/m^3 , aangeduid in de resultaten als 25F, werd gemeten. Alle individuele meetresultaten zijn toegevoegd in de bijlage. De metingen zijn uitgevoerd met 2 RION PV-41 versnellingsmeters en een RION DA-21 4ch data recorder. De versnellingsmeters hadden een massa van 23 g, en een sensitiviteit van $9.09\text{E}+01 \text{ m/s}^2$ werd gebruikt. Ze werden bevestigd met de standaard methode RION VP-53A M6 bevestigingsschroeven, die op hun beurt op de EPS gemonteerd werden met dubbelzijdige tape in het verlengde van de uit te voeren meting. Er werden meerdere breedbandexcitatie per meetregistratie opgewekt door korte tikken te geven naast de versnellingsmeter, bevestigd aan kanaal 1 van de data recorder. De korte tikken werden uitgevoerd met een rubberen hamer via een schroevendraaier. De sensitiviteit van de data recorder was aangepast aan de sterkte van de tik. De excitatiemethode van het signaal is afgebeeld in afbeelding 11 bij een plank vurenhout die gemeten werd als controle. Nadat de opgewekte excitatie de lengte van de blok doorlopen had werd deze gemeten door de versnellingsmeter bevestigd aan kanaal 2 van de data recorder.



Afbeelding 7: Meten van de geluidssnelheid. (A) Breedbandexcitatie opgewekt naast de versnellingsmeter door een korte tik op een schroevendraaier met een rubberen hamer. (B) Tijdsverschil gemeten tussen de signalen van de twee versnellingsmeters.

De data werd geanalyseerd met behulp van Audacity 2.0.3. ®.

De snelheid van geluid door het materiaal werd berekend door het verschil in tijd tussen het signaal uit kanaal 1 en kanaal 2 van de data recorder te meten, zoals afgebeeld in afbeelding 12, en deze in rekening te brengen met de lengte van de meting via de formule die hieronder wordt aangegeven. Dit werd berekend voor de eerste 10 excitaties van elke meetregistratie.



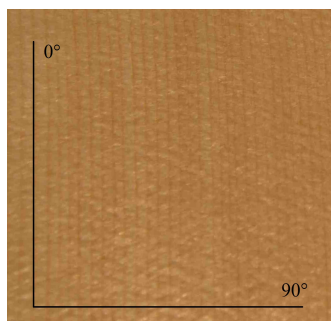
Afbeelding 8: Schematische voorstelling van de proefopstelling voor de meting van de geluidssnelheid in verschillende blokken EPS.

De geluidssnelheid c

$$c = l/\Delta t$$

Met: c = de snelheid van het geluid door een materiaal (m/s)
 l = lengte tussen twee punten van het materiaal (m)
 Δt = verschil in tijd van een signaal passerend door twee punten van het materiaal (s)

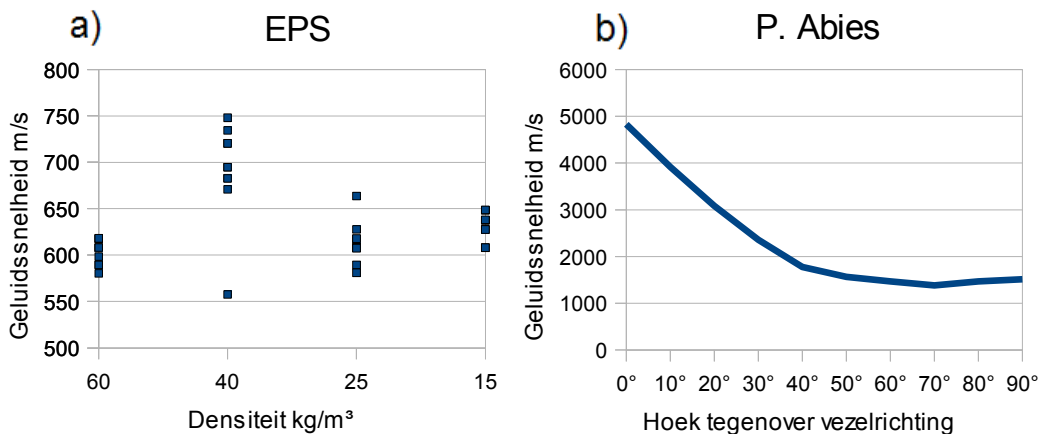
De metingen van EPS hadden een standaarddeviatie van minimum 13,46 m/s bij EPS met een dichtheid van 60 kg/m^3 , tot maximaal 52,49 m/s bij een dichtheid van 40 kg/m^3 . De standaard deviaties zijn toegevoegd bij de tabellen met alle meetresultaten in bijlage. De minimum en maximum geluidsafstralingscoëfficiënt van EPS uit Tabel 1 werd berekend door de resultaten voor de snelheid van 15 kg/m^3 en 60 kg/m^3 in rekening te brengen.



Afbeelding 9: Meethoeken tegenover de vezelrichting.

Dezelfde metingen werden uitgevoerd op een radiaal gezaagde plank P. Abies gevoegd met beenderlijm en verkocht door A. Pahler als klankhout voor het bovenblad van een cello. De individuele resultaten van deze metingen zijn toegevoegd in bijlage. De snelheid waarmee een trilling zich door het materiaal begeeft werd gemeten in verschillende hoeken tegenover de lengterichting van de vezels. 0° geeft de meting weer in de lengterichting van de vezels, 90° loodrecht op de vezels, zoals geïllustreerd op afbeelding 9. De andere gradenwaarden zijn de respectievelijke hoeken daartussen.

Aan de resultaten van grafiek 2a ziet men dat de snelheid van geluid door EPS zich tussen 550 en 750 m/s bevindt. Deze resultaten geven geen correlatie weer tussen de dichtheid van het materiaal en de snelheid waarmee de excitatie zich door het materiaal heeft verplaatst. In grafiek 2b ziet men dat de geluidssnelheid in hout sterk afneemt van 4826 m/s bij een voortplantingshoek van 0°, tot 1380 m/s bij 70°. Vervolgens neemt zij weer licht toe tot 1513 m/s bij een voortplantingshoek van 90°. De standaard deviaties bij de meetresultaten van de plank P. Abies variëren van 36,83 m/s tot 227,39 m/s.



Grafiek 2: De geluidssnelheid door EPS en P. Abies. (A) De geluidssnelheid door blokken EPS met een verschillende dichtheid. (B) De geluidssnelheid in P. Abies in verschillende hoeken tegenover de vezelrichting.

2.4 Geluidsafstralingscoëfficiënt

In tabel 1 staan de waarden voor de dichtheid en geluidssnelheid van verschillende materialen. Bij de houtsoorten is de geluidssnelheid in de richting van de vezels weergegeven. De dichtheid en geluidssnelheid van *Picea Abies* en *Acer Pseudoplatanus* zijn deze gepubliceerd door M. Spycher en M. S. Gilani^{64,65}. De waarden voor carbon vezels zijn literatuurwaarden⁶⁶. De dichtheid van de geteste blokken EPS werd opgegeven door de fabrikant en de geluidssnelheid werd berekend door middel van twee versnellingsmeters en een breedband excitatie, zoals voorafgaand beschreven. De geluidsafstralingscoëfficiënt werd berekend uit deze waarden.

Materiaal	Dichtheid Min-Max in kg/m ³	Geluidssnelheid Min-Max in m/s	Geluidsafstralingscoëfficiënt R in m ⁴ /kg s
<i>Picea Abies</i> (Vuren)	360 - 495	5103 - 5449	11,1 - 15
<i>Acer Pseudoplatanus</i> (Esdoorn)	569 - 625	3533 - 4180	6,1 - 7,3
Geëxpandeerd polystyreen (EPS)	15	632	42,1
	60	603	10,1
Carbon vezels	1850	11600 - 21200	6,3 - 11,5

Tabel 1: De dichtheid, geluidssnelheid en geluidsafstralingscoëfficiënt voor verschillende materialen.

In grafiek 3 wordt de geluidsafstralingscoëfficiënt zoals berekend in twee eerdere onderzoeken vergeleken met de gemeten waarden voor EPS. Het eerste onderzoek is dat van **J. Curtin**⁶⁷, waarin hij een schatting van de geluidsafstralingscoëfficiënt van vijf oude Italiaanse violen, waaronder

⁶⁴ Spycher M. (2007).

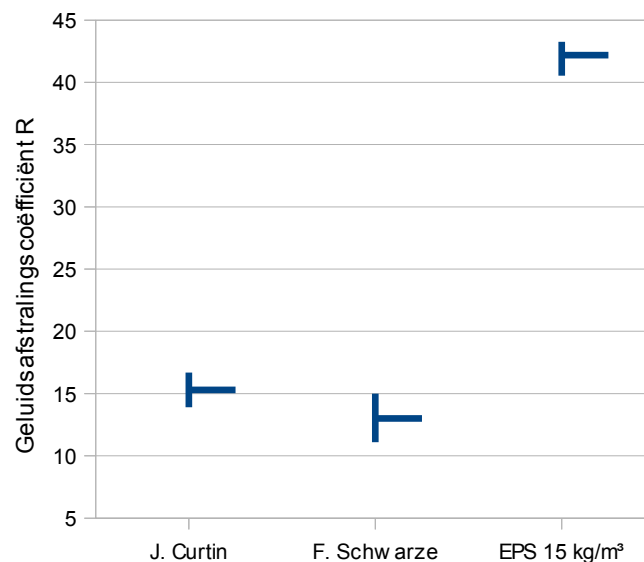
⁶⁵ Gilani M. S., Boone M., Mader K., Schwarze F. (2014). *Synchrotron X-ray microtomography imaging and analysis of wood degraded by *Physisporinus vitreus* and *Xylaria longipes**. Journal of Structural Biology Vol. 187, 149 – 157.

⁶⁶ Structural Materials. (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://settlement.arc.nasa.gov/Nowicki/SPB11MA.HTM>

⁶⁷ Curtin J. (2006). *Tap Routine*. The Strad October 2006, 48 – 54.

drie toegeschreven aan Stradivarius, beschrijft. Deze waarden zouden volgens J. Curtin kunnen afwijken van de werkelijke waarden. De tweede waarden zijn die uit de twee eerder vernoemde publicaties ook gebruikt in tabel 1. Aangezien F. Schwarze auteur was van beide van deze publicaties worden deze gegevens onder zijn naam in grafiek 3 weergegeven. Uit de resultaten van de metingen van geluidssnelheid in verschillende blokken EPS, zoals eerder beschreven, kan men besluiten dat de geluidssnelheid niet afhankelijk is van de dichtheid van EPS. Hierdoor heeft EPS een grote waarde voor de geluidsafstralingscoëfficiënt R voor de EPS met de laagste dichtheid van 15 kg/m^3 .

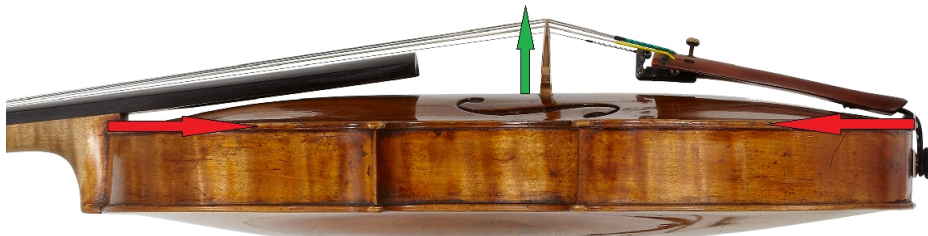
F. Schwarze beschrijft in zijn publicatie een toename in R door het behandelen van klankhout met schimmels. De hoogste gemiddelde R berekend met de uitgevoerde meetresultaten voor EPS is 42,1 voor de EPS met een dichtheid van 15 kg/m^3 . De hoogste R van klankhout berekend door F. Schwarze is 15. De gemeten blok EPS met dichtheid van 15 kg/m^3 heeft dus een R die vele keren groter is dan de hoogste waarden van klankhout.



Grafiek 3: De geluidsafstralingscoëfficiënt van P. Abies uit de onderzoeken van J. Curtin en F. Schwarze vergeleken met EPS met een dichtheid van 15 kg/m^3 .

2.5 Plastische en elastische vervorming

Indien men een materiaal wilt gebruiken als klankblad voor muziekinstrumenten moet men rekening houden met de plastische of ductiele vervorming van het materiaal, en met de elastische vervorming. Men moet in acht nemen hoe het materiaal zich gedraagt indien er een kracht wordt op uitgeoefend. Bij instrumenten uit klankhout komen vaak vervormingen voor door de constante druk uitgeoefend op het klanklichaam door de snaren. Deze zijn nefast voor de werking van het instrument en de klank die het produceert, en dienen dus zoveel mogelijk vermeden te worden⁶⁸. Het bovenblad van een strijkinstrument wordt door de spanning van de snaren aan drie krachten blootgesteld die het dient te weerstaan. Op afbeelding 10 worden de eerste twee krachten weergegeven door rode pijlen. De kracht van de snaren trekt via de hals en het onderkammetje het instrument naar zichzelf toe. Indien het instrument niet sterk genoeg is zou het vervormen of imploderen. Bij een standaard strijkinstrument zoals de viool of cello wordt deze kracht opgevangen door de verschillende delen van de klankkast. Bij het klankblad wordt deze kracht door de vorm van de welving omgezet in een kleine kracht naar boven, afgebeeld met een groene pijl. Hoewel deze twee krachten een constante druk uitoefenen op het klankblad hebben zij bij een normale viool zelden destructieve gevolgen.

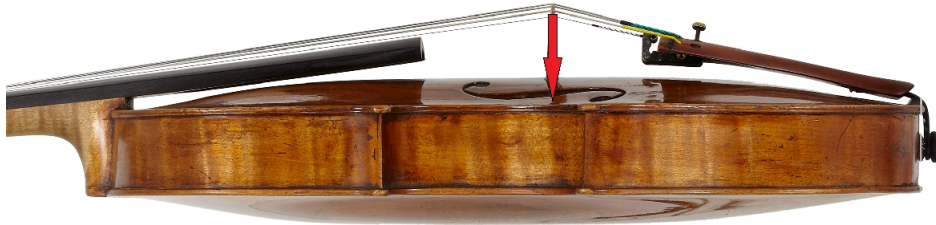


Afbeelding 10: Kracht één en twee zijn weergegeven door rode pijlen, zij vormen een opwaartse kracht weergegeven door de groene pijl. Foto van de auteur.

De derde kracht is kleiner dan de voorgaande maar wordt minder goed verdeeld over het klanklichaam. Hierdoor is ze veel vaker de oorzaak van beschadigingen en vervormingen aan het instrument. De derde kracht is de druk die door de snaren via de kam op het bovenblad wordt uitgeoefend, zoals afgebeeld in afbeelding 11 met een rode pijl. Doordat deze kracht ook verantwoordelijk is voor de klankopwekking moet hier een afweging gemaakt worden door instrumentenbouwers. Indien de druk te groot wordt voor het bovenblad vervormt het, wat nefast is voor de klank die het instrument moet voortbrengen. Wanneer de kracht minder

⁶⁸ Weisshaar H., Shipman M. (1988). *Violin Restoration: A Manual for Violin Makers* Weisshaar-Shipman, LA, USA.

is, kan er minder energie worden doorgegeven van de snaren aan het klankblad. Dit heeft tot gevolg dat er dan een kleiner volume van klank kan worden opgewekt. Hieruit kan men concluderen dat er een ideaal evenwicht moet bestaan tussen de sterkte van het klankblad en de druk die erop wordt uitgeoefend⁶⁹.



Afbeelding 11: De neerwaartse druk van de snaren via de kam heeft kracht drie tot gevolg, geïllustreerd door de rode pijl. Foto van de auteur.

Indien men een klankblad uit EPS wilt vervaardigen voor een strijkinstrument dient het dezelfde drie krachten te weerstaan zonder schade of vervormingen op te lopen die een optimale klankopwekking hindert. Aangezien de derde kracht voor het meeste problemen zorgt bij strijkinstrumenten werd deze eerst onderzocht. Ook de puntdrukkracht van EPS werd onderzocht, aangezien de weerstand tegen puntdrukkracht bepaalt of de kam al dan niet inzakt in het materiaal.

De weerstand tegen druk werd getest door de blokken geëxpandeerd polystyreen op een frame te plaatsen en te meten hoe zij druk verdragen.



Afbeelding 12: Een blok EPS onder snaarspanning.

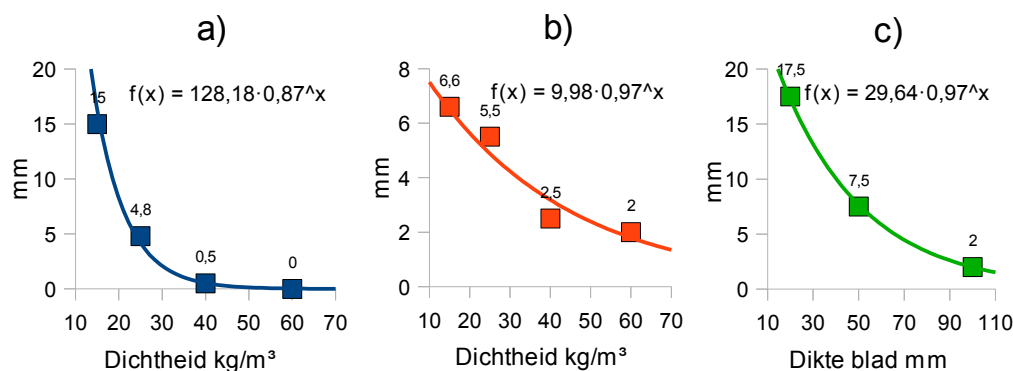
⁶⁹ Weisshaar H. (1988).

Dit gebeurde zoals afbeelding 12 illustreert door op de blokken EPS een cello kam te plaatsen. De kam werd vervolgens onder druk gezet door er cello snaren over te spannen⁷⁰ onder een standaard hoek van 154°. De snaren werden gestemd op 440 Hz, zo werd de druk nagebootst die een klankblad van een cello ontvangt via de kam. De druk van een kam op een cello varieert afhankelijk van het merk en type snaren van 417 N tot 507 N⁷¹. De druk van de kam werd enkele uren aangehouden en de snaren werden regelmatig opnieuw gestemd tot de indrukking van de kam en de doorbuiging van de geteste blok EPS gestabiliseerd waren. Cello's komen voor in verschillende vormen, lengtes en breedtes. Voor deze proeven hadden de blokken een lengte en breedte vergelijkbaar met de meeste cello's. De blokken EPS hadden een lengte van 760 mm, een breedte van 450 mm, en een hoogte van 100 mm. De doorbuiging van het blad werd gemeten door het hoogteverschil in de lengterichting te meten tussen de uiteinden van de blokken EPS en de kam terwijl de snaren onder spanning stonden. De doorbuiging van het blad was volledig elastisch. De indrukking van de kam bleek een plastische vervorming en werd gemeten nadat de kam verwijderd was. Voor de indrukking werd een gemiddelde berekend tussen beide voeten van de kam. Uit de resultaten afgebeeld in grafiek 5a blijkt dat de indrukking van de kam een exponentiële functie volgt:

$$f(x) = 128,18 \cdot 0,87^x$$

De doorbuiging van het blad kan beïnvloed zijn door de indrukking van de kam. Ze lijkt quasi exponentieel te verlagen naarmate de dichtheid toeneemt, zoals afgebeeld in grafiek 5b. De berekende exponentiële functie wijkt te ver af van de waarden en is daardoor niet geschikt om bij verder onderzoek te gebruiken. In grafiek 5c is te zien dat de verhouding tussen de dikte en de stijfheid van het materiaal, in dit geval de doorbuiging van drie blokken EPS met een dichtheid van 60 kg/m³, exponentieel verloopt volgens de functie:

$$f(x) = 29,64 \cdot 0,97^x$$



Grafiek 5: Doorbuiging en indrukking van EPS. (A) Indrukking van de kam bij verschillende dichtheden van EPS. (B) Doorbuiging van EPS met verschillende dichtheden. (C) Doorbuiging van EPS met verschillende diktes.

⁷⁰ De snaren gebruikt in de test zijn een set Medium Precision String Chromium Steel van het merk Prim, geproduceerd in Zweden.

⁷¹ Weisshaar H. (1988).

In tabel 2 zijn de resultaten voor alle geteste blokken te zien. De eerste vijf geteste blokken hebben een afmeting van 760 x 450 x 100 mm. 25 F staat voor een blok met een dichtheid van 25 kg/m³, maar met een fijnere dichtheid van de korrels. De laatste twee geteste blokken EPS hebben een dichtheid van 60 kg/m³ en afmetingen van 760 x 450 mm, op respectievelijk 50 mm en 20 mm. Uit deze resultaten kan men concluderen dat de EPS met een fijnere korrel minder bestand is tegen puntdrukkracht en doorbuiging onder stress dan EPS met eenzelfde dichtheid en een grotere korrel.

EPS	Indrukking kam in mm	Doorbuiging EPS in mm
15 kg/m ³	15	6
25 F kg/m ³	7,6	5,5
25 kg/m ³	4,8	3,5
40 kg/m ³	0,5	2,5
60 kg/m ³	0	2
60 kg/m ³ (hoogte 50mm)	0	7,5
60 kg/m ³ (hoogte 20 mm)	0	17,5

Tabel 2: Indrukking van de kam en doorbuiging van het blad bij blokken EPS van verschillende diktes en dichtheden.

2.6 Discussie

Indien men het materiaal EPS wilt gebruiken als klankblad voor een strijkinstrument zijn er enkele praktische problemen die dienen opgelost te worden. Zoals men kan concluderen in het onderzoek hier beschreven is EPS zeer vatbaar voor vervorming onder druk. De EPS met de laagste dichtheid, die de hoogste geluidsafstralingscoëfficiënt heeft, is het minst bestand tegen doorbuiging en indrukking van de kam. Dit geeft een instrumentenbouwer die een klankblad uit EPS wilt vervaardigen twee paden om te bewandelen. Men kan kiezen voor een hogere dichtheid van 40 kg/m³, waarbij de indrukking van de kam geen probleem meer vormt, en verstevigt het bovenblad door middel van bebalking. Men kan ook kiezen voor de EPS met een dichtheid van 15 kg/m³ en zorgt dat de druk van de kam verdeeld wordt over een grotere oppervlakte. Ook hier dient de doorbuiging verholpen te worden door bebalking of andere methodes. In het derde hoofdstuk van deze scriptie worden de mogelijkheden van het tweede pad getoetst, aangezien de EPS met een dichtheid van 15 kg/m³ de hoogste geluidsafstralingscoëfficiënt bezit.

3

Constructie van een cello met een klankblad uit EPS.

Every time man makes a new experiment he always learns more. He cannot learn less.
- Richard Buckminster Fuller, 1963

In het derde deel van deze scriptie wordt de constructie van een experimentele cello onderzocht. De eerste twee delen van deze scriptie beschrijven een wetenschappelijk onderzoek, het derde deel van deze scriptie bouwt voort op de verworven kennis van de eerste twee delen maar beschrijft een artistiek onderzoek in de kunsten. Hieronder wordt het proces beschreven van hoe de auteur een cello met een klankblad uit piepschuim ontwikkelt. Het ontwerp van het experimentele instrument wordt verduidelijkt, en een subjectieve evaluatie van het instrument wordt beschreven.

3.1 Tests en prototypes

Aangezien het onderzoek beschreven in deel twee van deze scriptie aantoont dat de EPS met de laagste dichtheid de hoogste afstralingscoëfficiënt heeft werd er verder onderzocht of deze kan functioneren als klankblad. Om de doordrukking van de kam op te lossen zijn er verschillende mogelijkheden. De druk van de kam verminderen is niet wenselijk. Men zou dit kunnen bekomen door een lagere stemming, of door de snaren over een minder scherpe hoek over de kam de kam te laten lopen. De auteur wijst erop dat dit, zoals eerder beschreven in hoofdstuk 2.5, nefast is voor het volume van de klank. Om ervoor te zorgen dat de kam niet door het piepschuim zakt kan men de oppervlakte van de voetjes van de kam vergroten. Hierdoor wordt het gewicht van de kam echter groter en wordt zijn normale akoestische functie verstoord. Men kan ook de oppervlakteterkte van de EPS onder de voetjes van de kam versterken. Voor een eerste prototype werd een fineerlaag van 1mm dik en 12 cm

breed van de houtsoort *Larix decidua*, ook lork of lariks genoemd, gelijmd in het midden van een blok EPS over de gehele lengte. Het blok had een dichtheid van 15 kg/m^3 , een dikte van 100 mm en dezelfde afmetingen als de blokken getest in het tweede deel van deze paper. Als deze blok met finerlaag onder snaarspanning werd gebracht boog het blok niet zichtbaar door. De indrukking van de kam werd gereduceerd tot 2mm. Bij het herhalen van de test met hetzelfde blok brak de finer echter over de vezelrichting in het verlengde van de kam. Men kan dus concluderen dat een enkele finerlaag voldoende sterkte geeft om de doorbuiging van een blok EPS met een dikte van 100mm tegen te houden maar niet om de indrukking van de kam te verhelpen. Hoewel het toevoegen van een finerlaag ongetwijfeld moet zorgen voor meer interne frictie en dus demping, gaf een subjectieve evaluatie van de klank geen grote verschillen weer met de andere blokken EPS. Het blok was minder vatbaar voor wolftonen dan voordat de finer was aangebracht.

Voor een bovenblad van een cello dient het hoogteverschil tussen de krans en het hoogste punt van het klankblad de grens van 26mm niet te overstijgen. Dit om het instrument speelbaar te houden⁷². Indien men het klankblad echter dunner maakt wordt het blad flexibeler en vatbaarder voor doorbuiging zoals geïllustreerd in grafiek 5c.

Voor het tweede prototype werden twee stroken carbon (Carbon roving HTS 40, 1600 TEX) met een dichtheid van $1,77 \text{ g/cm}^3$ en een treksterkte van 4300 MPa op een blok piepschuim met een dichtheid van 60 kg/m^3 en een dikte van 2cm gelijmd. Dit halveerde de doorbuiging van 17,8mm naar 9mm. Men kan concluderen dat het lijmen van twee stroken carbonvezels een blad piepschuim versterkt, maar niet voldoende om de doorbuiging van een blad tegen te houden. Hoewel op basis van dit prototype kan vermoed worden dat piepschuim versterkt met bredere stroken carbon wel voldoende sterkte zou kunnen geven werd hier niet verder mee geëxperimenteerd.

Niet onbelangrijk is dat een klankblad niet alleen de indrukking van de kam moet weerstaan maar ook van de ziel, die langs de binnenkant van het instrument het bovenblad met het onderblad verbindt. Men moet dus ook de oppervlaktesterkte aan de binnenkant van het bovenblad versterken.

Voor het derde prototype werd op een blok EPS met een dichtheid van 15 kg/m^3 en een dikte van 26 mm langs beide kanten een finerstrook van 1 mm dik en 12 mm breed gelijmd. Het resultaat van deze test was dat het blok EPS voldoende sterk werd om de kracht van de kam te weerstaan zonder door te buigen. De sterkte van het blok in de lengterichting leek na een subjectieve evaluatie door de auteur vergelijkbaar met die van een houten klankblad zonder bebalking. Uit de evaluatie van het derde prototype kan geconcludeerd worden dat het lijmen van twee finerstroken een positief effect heeft op de sterkte van een klankblad uit EPS.

⁷² Weisshaar H. (1988).

Vervolgens werd een eerste klankblad uit piepschuim vervaardigd. De EPS had een dichtheid van 15 kg/m^3 en een dikte van 15 mm. In de lengterichting van het klankblad werd een strook fineer met een breedte van 120 mm en een dikte van 1 mm gelijmd langs de binnen- en de buitenkant van het instrument. Op de plaats van de kam en de ziel werden twee extra lagen fineer aangebracht met de vezelrichting haaks op de eerste. Deze tweede fineerlaag had een breedte van 120 mm, een lengte van 9 mm en een dikte van 1 mm. De basbalk en ziel hadden standaard dimensies en plaatsing⁷³. Er werden twee rechte klankgaten gemaakt naar het model van F. Savart⁷⁴. De vorm en bouw van dit prototype wordt verder toegelicht in hoofdstuk 3.2.

Subjectieve evaluatie van het eerste bespeelbare prototype met een klankblad uit piepschuim door de auteur:

“Het eerste prototype geeft een zeer groot volume aan klank, vooral als het instrument getokkeld wordt blijkt het significant luider dan een normale cello. Het heeft een zeer volle toon met veel lage frequenties wat zorgt voor een sterke bas. Bij het spelen van hogere noten wordt een echo duidelijk in het instrument, alsof men in een kleine kapel speelt. De snaarkeuze lijkt een zeer grote invloed te hebben op het instrument. Bij het bespelen met een strijkstok blijkt het moeilijk het instrument goed aan te spreken indien men zachter strijkt.”

Het eerste bespeelbare prototype bleek niet bestand aan de puntdrukkracht van de kam en vervormde zo sterk dat het onspeelbaar werd. Daarom werd een volgende prototype gemaakt waarbij de tweede laag fineer aan de kam en de ziel vervangen werd door een plaat carbonvezels versterkt polymeer met de dimensies 1 x 120 x 90 mm.



Afbeelding 13: Prototype versterkt met fineerstrook en carbonplaat

⁷³ Weisshaar H.(1988).

⁷⁴ Savart F. (1819).

3.2 Ontwerp

Bij het ontwerp van het instrument werd rekening gehouden met de standaardafmetingen van een cello, zodat een cellist die het instrument bespeelt niet gehinderd wordt in zijn gebruikelijke bewegingen. De vorm werd uitgetekend door de auteur maar is geïnspireerd op de experimentele cello Art 2000 van **R. Lanne**⁷⁵ en andere strijkinstrumenten die de klassieke hoeken weglaten, zoals beschreven in het eerste deel van deze scriptie. Het doel van het ontwerp was een instrument te maken met een mooie vrouwelijke vorm die gemakkelijker te maken is dan een instrument met de traditionele vorm. Er werd bij het ontwerp rekening gehouden met de oppervlakte van het klankblad en het volume van de klankkast, zodat deze vergelijkbaar bleven met die van een traditionele cello. De lengte van het klanklichaam is 76cm en komt overeen met de standaard voor cello's. De breedte van het smalste punt werd berekend zodat een cellist ongehinderd kan strijken zonder de rand van het instrument te raken, zoals op een normale cello met een gewelfd klankblad uit P. Abies. Het breedste punt boven- en onderaan het instrument zijn in verhouding met die van een gewone cello om de muzikant geen ongemak te bezorgen. Deze punten werden vervolgens met vloeiende lijnen verbonden. Voor de klankgaten werd voor een vereenvoudigd model gekozen naar het voorbeeld van **F. Savart**⁷⁶. De klankgaten en hun plaatsing op de trapezoidale viool werden omgerekend naar celloafmetingen. Het midden van de klankgaten duidt de plaats aan waar de kam dient te komen en is net als bij een normale cello 403 mm verwijderd van de bovenrand van de klankkast.



Afbeelding 14: De vorm en binnenkant van de experimentele cello voor het lijmen van het klankblad.

⁷⁵ Lanne R. (n.d.). Geraadpleegd 17 April 2015, op <http://roger.lanne.free.fr/creations.htm>

⁷⁶ Savart F. (1819).

De boven- en onderklossen van het instrument komen overeen met deze van een normale cello. De klossen in de hoeken dienen net als bij een traditionele cello ter versteviging van de zijkanten, waar zij tegen elkaar gelijmd zijn. De typische krul aan het uiteinde van de nek van een strijkinstrument wordt weggelaten. In de plaats komt een eigen ontwerp waarbij de vorm gebaseerd is op het deel van de nek dat zich net onder de krul bevindt. De schroevenkast wordt opengewerkt langs beide kanten om het vervangen van snaren te vergemakkelijken. Om de constructie sterk genoeg te houden om de snaarspanning, en kleine stoten, te kunnen weerstaan wordt deze langs de binnenkant versterkt met carbonvezels versterkt polymeer. De typische houten stempinnen van strijkinstrumenten die veel onderhoud vergen en last ondervinden van schommelingen in luchtvochtigheid worden vervangen door duurzamere mechanieken uit messing, die geproduceert worden voor basgitaren⁷⁷. Toegevoegd in bijlage tabellen met de gebruikte materialen en afmetingen van het experimentele instrument, vergezeld door verklarende foto's.



Afbeelding 15: De kop van de experimentele cello met stemmechanieken uit messing.

3.3 Discussie

In dit laatste hoofdstuk werd aan de hand van verschillende tests een eerste cello gemaakt met een klankblad uit geëxpandeerd polystyreen. Hoewel de maten en het volume van de klankkast van de experimentele cello vergelijkbaar zijn met deze van een traditionele cello wijkt het ontwerp sterk af van het originele instrument. Er kan gesteld worden dat de afwijking van de vorm een invloed heeft op de klank. Hoewel de auteur dit niet betwist koos hij bewust om naar het voorbeeld van de vele experimentele instrumenten uit het eerste hoofdstuk niet vast te houden aan de traditionele vorm. Zoals beschreven in hoofdstuk 3.2 werd gepoogd een cello te maken met een vorm die gemakkelijker en sneller gemaakt kan worden. In het derde hoofdstuk werd slechts de constructie van een eerste prototype beschreven. Er is bijkomend onderzoek nodig om instrumenten met een klankblad uit piepschuim te optimaliseren.

⁷⁷ Bass Machine Heads, Gotoh Gut Co. GB11

Resultaten en conclusies

In het eerste hoofdstuk van deze thesis werd een kort overzicht geschetst van eerder uitgevoerd onderzoek. De evolutie op het vlak van akoestiek met betrekking tot strijkinstrumenten werd besproken, en de evolutie van de experimentele strijkinstrumenten zelf, van het begin van de 19e eeuw tot heden, werd overlopen. Uit dit onderzoek kan men concluderen dat publicaties die handelen over het materiaal van een klankblad een veel groter bereik of invloed hebben bij instrumentenbouwers dan de onderzoeken die suggesties geven voor bijkomende technieken of tests in het productieproces. De auteur vermoedt dat dit te wijten is aan de extra tijd die een instrumentenbouwer moet investeren tijdens de bouw. Het hout waarmee men werkt kiezen aan de hand van gemakkelijk te meten eigenschappen is slechts een kleine tijdsinvestering. Technieken als modale analyse toevoegen aan het bouwproces van een instrument is echter veel arbeidsintensiever. Het onderzoek beschreven in het eerste hoofdstuk toont aan dat een hoge afstralingscoëfficiënt van het materiaal mogelijk een bepalende factor is voor de kwaliteit van de klank die een instrument voortbrengt.

Volgend op de conclusies getrokken uit het eerste hoofdstuk werd in het tweede hoofdstuk onderzocht welke de mogelijkheden zijn van het materiaal geëxpandeerd polystyreen als klankversterker in functie van akoestische strijkinstrumenten. De resultaten van de uitgevoerde metingen tonen dat geëxpandeerd polystyreen met een lage dichtheid van 15kg/m^3 een hogere geluidsafstralingscoëfficiënt bezit dan die met een hogere dichtheid. De geluidsafstralingscoëfficiënt van EPS werd vergeleken met die van klankhout. Hieruit bleek dat de geluidsafstralingscoëfficiënt van piepschuim significant hoger is dan die van klankhout. Uit de resultaten van de metingen blijkt dat het materiaal EPS enkel sterk genoeg is om de kracht uitgeoefend door de kam van een cello via de snaren te weerstaan als het piepschuim versterkt wordt. De uitgevoerde tests tonen aan dat piepschuim kan versterkt worden door het lijmen van fineer, bebalking of carbon.

Het onderzoek beschreven in het tweede en derde deel van deze scriptie toont aan dat indien geëxpandeerd polystyreen versterkt wordt door andere materialen, het als alternatief voor klankhout kan gebruikt worden. Subjectieve klankevaluatie doet de auteur vermoeden dat muziekinstrumenten gemaakt uit piepschuim interessante mogelijkheden kunnen bieden aan muzikanten en componisten.

Suggesties voor verder onderzoek

Aangezien deze scriptie, volgens de kennis van de auteur, de eerste is die de akoestische eigenschappen van geëxpandeerd polystyreen onderzoekt als klankversterker voor akoestische snaarinstrumenten, kunnen er verschillende voorstellen voor verder onderzoek gedaan worden.

Om de akoestische eigenschappen verder in kaart te brengen zou het interessant zijn om de demping van het materiaal en de frequentierespons van een breedbandexcitatie in kaart te brengen. De mogelijkheden en invloeden van verschillende methodes om het materiaal te versterken kunnen getest worden.

Er kunnen meerdere prototypes van muziekinstrumenten met een klankblad uit geëxpandeerd polystyreen gemaakt en onderzocht worden. Met deze prototypes kan men onderzoeken welke mogelijkheden dit materiaal biedt tegenover muziekinstrumenten gemaakt met de klassieke houtsoorten. Er kan verder onderzocht worden of piepschuim een goed alternatief vormt voor klankhout door prototypes te evalueren aan de hand van verschillende parameters die volume en klankkleur duiden. Er kan onderzocht worden of het materiaal met zijn akoestische eigenschappen meer of andere opties biedt aan muzikanten en componisten.

Literatuur & Muziekinstrumenten

Bissinger G. (2008). Structural acoustics of good and bad violins, *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 124, No. 3 1764–1773.

Boullosa R. R., Gomez S. R. (2014). *Acoustics of the jarana jarocho*. *Appl. Acoust.* Vol. 78, 59-67.

Buen A. (2006). *A brief introduction into the violin acoustics history*. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting Proceedings, Gothenburg.

Burckle L., Grissino-Mayer H. D. (2003). *Stradivaris, violins, tree rings, and the Maunder Minimum: a hypothesis*. *Dendrochronologia* Vol. 21, 41–45.

Carmentis (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://carmentis.kmkg-mrah.be/>

Cremer L. (1984). *The Physics of the Violin*. Cambridge, MA. The MIT Press.

Curtin J. (2006). *Tap Routine*. *The Strad* October 2006, 48 – 54.

Duerinck T., Skrodzka E., Linde B. B. J. (2014). *Modal analysis of a trapezoidal violin built after the description of F. Savart*. *Archives of Acoustics* Vol. 39, No. 4 623–628.

Esper J., Cook E. R., Schweingruber F. H. (2002). *Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability*. *Science* Vol. 295, 2250–2252.

Experimentele viool, ontworpen door Félix Savart, Paris, Ca. 1818, Muziekinstrumentenmuseum Brussel, Inv. 1362.

Experimentele viool, ontworpen door Francis Chanot, Mirecourt, Ca. 1820, Muziekinstrumentenmuseum Brussel, Inv. No. 1332.

Feilding, C. (n.d.). College of Santa Fe Auditory Theory. Geraadpleegd 2 Maart 2015, op http://www.feilding.net/sfuad/musi3012-01/html/lectures/002_sound_I.htm#pressurewavetransmission

Fouilhe E., Goli G., Houssay A., Stoppani G. (2011). *Vibration modes of the cello tailpiece*, *Arch. Acoust.* Vol. 26, No. 4 713-726.

Fritz C., Curtin J., Poitevineau J., Morrel-Samuels P., Tao F.-C. (2012). *Player preferences among new and old violins* *PNAS* Vol. 103, No. 3.

Fritz C., Curtin J., Poitevineau J., Borsarello H., Wollman I., Tao F.-C., Ghasarossian T. (2014). *Soloist evaluations of six Old Italian and six new violins* PNAS Vol. 111, no. 20

Geautomatiseerde zither, ontworpen door Godfried-Willem Raes, Gent, 2015, in de collectie van vzw Logos Foundation.

Ghosh R. N. (1926). *A Study of the acoustics of a Stroh Violin*. Indian J. Phys. Vol. 1, No. 142. Allahabad.

Gilani M. S., Boone M., Mader K., Schwarze F. (2014). *Synchrotron X-ray micro-tomography imaging and analysis of wood degraded by *Physisporinus vitreus* and *Xylaria longipes**. Journal of Structural Biology Vol. 187, 149 – 157.

Griffiths D. J. (1998). *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall.

Hopkin B. (1996). *Musical Instrument Design*, Tucson AZ USA.

Hutchins C. (1974). *The Acoustics of Violin Plates*. Scientific American, Vol. 230.

Hutchins C. (1976) *Musical Acoustics, Part II Violin Family Functions*. PA. Dowden Hutchingon & Ross Inc.

Hutchins C. (1983). *A History of Violin Research*, J. Acoust Soc. Am., Vol. 73, 1421-1440.

Jalili M., Mousavi S., Pirayeshfar A. (2014). *Investigating the acoustical properties of Carbon Fiber-, Glass Fiber-, and Hemp Fiber-reinforced Polyester Composites*. Society of Plastics Engineers Vol. 10, 2103 – 2111.

Jansson E. (2002). *Acoustics for violin and guitar makers*. Stockholm. Kungl Tekniska Högskolan.

Johnson C., Courtnall R., Menuhin Y. (1999). *The art of violin making*. London: R. Hale.

Krüger F, Rohloff E, (1938). *Über die innere Reibung von Holz*. Zeitschrift für Physik Vol. 110, 58-68.

Lanne R. (n.d.). Geraadpleegd 17 April 2015, op <http://roger.lanne.free.fr/creations.htm>

Leguia L. (2001). *Carbon fiber cello*. Patent US 6284957.

Lucchi G. (1988). *The Use of Empirical and Scientific Methods to Measure the Velocity of Propagation of Sound*. The Violin Society of America Vol. 9,

No. 1 107 – 123.

Marshall K.D. (1985). *Modal analysis of a violin*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 77, 695-709.

Meinel H. (1957). *Regarding the Sound Quality of Violins and a Scientific Basis for Violin Construction* J. Acoust. Soc. Am. Vol. 29, No. 7 817-822.

Morrison A., Rossing T. D. (2009). *Modal analysis of the Russian balalaika*. Proc. Int. Symposium on Musical Acoustics (ISMA) Vol. 2, 421–4.

Nagyvary J., Guillemette R. N., Spiegelman C. H. (2009). *Mineral Preservatives in the Wood of Stradivari and Guarneri* PLoS ONE Vol. 4, No. 1.

Newland D. E. (1989). *Mechanical vibration analysis and computation*. Longman, Harlow, UK.

Penttinen H., Erkut C., Pölkki J., Välimäki V., Karjalainen H. (2005). *Design and analysis of a modified kantele with increased loudness*, Acta Acust. Acustica Vol. 91, 261-268.

Pollens S. (2014). *The Appliance of science* . The Strad Vol. 124, 54-58.

Rohloff E. (1950). *Zeitschrift für angewandte Physik, Der Klangcharakter altitalienischer Meistergeigen*. Lübeck.

Savart F. (1819). *Mémoire sur la construction des instrumens à cordes et à archets*. Paris.

Schleske M. (2002). *Empirical tools in contemporary violin making. 1. Analysis of design, materials, varnish and normal modes*. Catgut Acoust. Soc. J. Vol. 4, No. 5 50–65.

Schwarze F., Spycher M., Fink S. (2008). *Superior wood for violins - wood decay fungi as a substitute for cold climate*. New Phytologist Vol. 179, 1095–1104.

Spycher M., Schwarze F., Steiger R. (2007). *Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties*. Wood Sci. Technol. Vol. 42, 325–342.

Skrodzka E., Krupa A., Rosenfeld E., Linde B. B. J. (2009). *Mechanical and optical investigation of dynamic behavior of violins in modal frequencies*. Appl. Opt. Vol. 48, 165-170.

Skrodzka E., Łapa A., Linde B. B. J., Rosenfeld E. (2011). *Modal parameters of two complete guitars differing in the bracing pattern of the soundboard*. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 130, No. 4 2186-2195.

Stroh, A. (1900). *Improvements in Violins and other Stringed Instruments*. Patent GB 9418.

Structural Materials. (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://settlement.arc.nasa.gov/Nowicki/SPBI1MA.HTM>

Tim Phillips Violins. (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://www.timsviolins.co.uk/>

Topham T. J., McCormick M. D. (2000). *A dendrochronological investigation of stringed instruments of the Cremonese School (1666–1757) including ‘The Messiah’ violin attributed to Antonio Stradivari*. *Journal of Archaeological Science* Vol. 27, 183–192.

Torres J.A., Boullosa R.R. (2009). *Influence of the bridge on the vibration of the top plate of a classic guitar*. *Appl. Acoust.* Vol. 70, 1371-1377.

Van der Vegt A. K., Govaert L. E. (1991). *Polymeren : van keten tot kunststof*. Delft Academic Press.

Wali K. C. (2010). *Cremona Violins: A Physicist's Quest for the Secrets of Stradivari* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.

Wegst U. G. K. (2006). *Wood for sound* *American Journal of Botany* Vol. 93, No. 10 1439–1448.

Weisshaar H., Shipman M. (1988). *Violin Restoration: A Manual for Violin Makers* Weisshaar-Shipman, LA, USA.

Wilson C. (2002). *Cut the Curves*. *The Strad*, July 2002, 750-755.

Zygmuntowicz S., Bissinger G. (2009). *Strad 3D - a Unified Inquiry: Scientists, Violinmakers & Musicians Study; 3 Classic Violins: Plowden, Willemotte, Titian*. London.

Afbeeldingen

Afbeelding 1a

Cardiffviolins.co.uk (2015). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op http://www.cardiffviolins.co.uk/creo_files/upload/shop/lc/_thumb/LuisaandClarkVIOLIN.jpg

Afbeelding 1b

Ids.si.edu (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://ids.si.edu/ids/deliveryService?id=NMAH-92-13659&>

Afbeelding 2

Carmentis.kmkg-mrah.be (n.d.). Geraadpleegd op 2 Maart 2015 , op <http://carmentis.kmkg-mrah.be/eMuseumPlus?service=DynamicAsset&sp=SU5mxm4Yx%2FVbg9LVP7MZLDqo6z5lhONBxez%2FYx5EhVSCZjU0bcvvsnPxkoLiFJnF9QzRY980ZwV3L%0ATpwyJeR7NMPvp3RRP61q%2FZaOrpMIarXcfDFBLA2xx5qlPqbqrNmy&sp=Simage%2Fjpeg>

Afbeelding 3

Carmentis.kmkg-mrah.be (n.d.). Geraadpleegd op 2 Maart 2015, op <http://carmentis.kmkg-mrah.be/eMuseumPlus?service=DynamicAsset&sp=SU5mxm4Yx%2FVbg9LVP7MZLDqo6z5lhONBxez%2FYx5EhVSCZjU0bcvvsnPxkoLiFJnF9QzRY980ZwV1b%0AfnOjhdzPjCrGy%2BOIZxfXys9Yi8S8yOjYowCHMFBEANZB9DZfvgZw&sp=Simage%2Fjpeg>

Afbeelding 4a

Phillips, T. (2015). Timsviolins.co.uk. Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://www.timsviolins.co.uk/wp-content/gallery/infidels/dynamic/dsc08024-nggid0291-ngg0dyn-180x0-00f0w010c010r110f110r010t010.jpg>

Afbeelding 4b

Lanne, R. (n.d.). Roger.lanne.free.fr. Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://roger.lanne.free.fr/art2000.gif>

Afbeelding 5a

Carmentis.kmkg-mrah.be (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://carmentis.kmkg-mrah.be/eMuseumPlus?service=DynamicAsset&sp=SU5mxm4Yx%2FVbg9LVP7MZLDqo6z5lhONBxez%2FYx5EhVSCZjU0bcvvsnPxkoLiFJnF9QzRY980ZwV3L%0ATpwyJeR7NMPvp3RRP61q%2FZaOrpMIarU9lsxTwnJDQ5qlPqbqrNmy&sp=Simage%2Fjpeg>

Afbeelding 5b

Carmentis.kmkg-mrah.be (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://carmentis.kmkg-mrah.be/eMuseumPlus?service=DynamicAsset&sp=SU5mxm4Yx%2FVbg9LVP7MZLDqo6z5lhONBxez%2FYx5EhVSCZjU0bcvvsnPxkoLiFJnF9QzRY980ZwV3L%0ATpwyJeR7NMPvp3RRP61q%2FZaOrpMIarUoTxCVVf9Cw5qlPqbqrNmy&sp=Simage%2Fjpeg>

Afbeelding 5c

Carmentis.kmkg-mrah.be (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://carmentis.kmkg-mrah.be/eMuseumPlus?service=DynamicAsset&sp=SU5mxm4Yx%2FVbg9LVP7MZLDqo6z5lhONBxez%2FYx5EhVSCZjU0bcvvsnPxkoLiFJnF9QzRY980ZwV3L%0ATpwyJeR7NMPvp3RRP61q%2FZaOrpMIarWQTBEgofXW4ZqlPqbqrNmy&sp=Simage%2Fjpeg>

Afbeelding 6

Spaceplace.nasa.gov (n.d.). Geraadpleegd 2 Maart 2015, op <http://spaceplace.nasa.gov/violins/en/messiah-mosaic.en.jpg>

Afbeelding 7 – 15

Ongepubliceerde afbeeldingen door de auteur Duerinck T.

Bijlage

Materialen experimentele cello

Beschrijving

Materiaal

Bovenblad
Geëxpandeerd polystyreen (15kg/m³)
Larix decidua
Carbon vezels-versterkt polymeer

Achterblad

Acer pseudoplatanus

Zijkanten

Acer pseudoplatanus

Klossen

Picea Abies

Nek

Acer pseudoplatanus
Carbon vezels-versterkt polymeer

Lijmrepen

Pyrus communis

Toets

Diospyros ebenum

Topkammetje

Diospyros ebenum

Onderkammetje

Diospyros ebenum

Kam

Behandelde Acer pseudoplatanus
(Aubert à Mirecourt, De Luxe)

Stemmechanieken kop

Geelkoper (CuZn)

Inleg (zwart – wit – zwart)

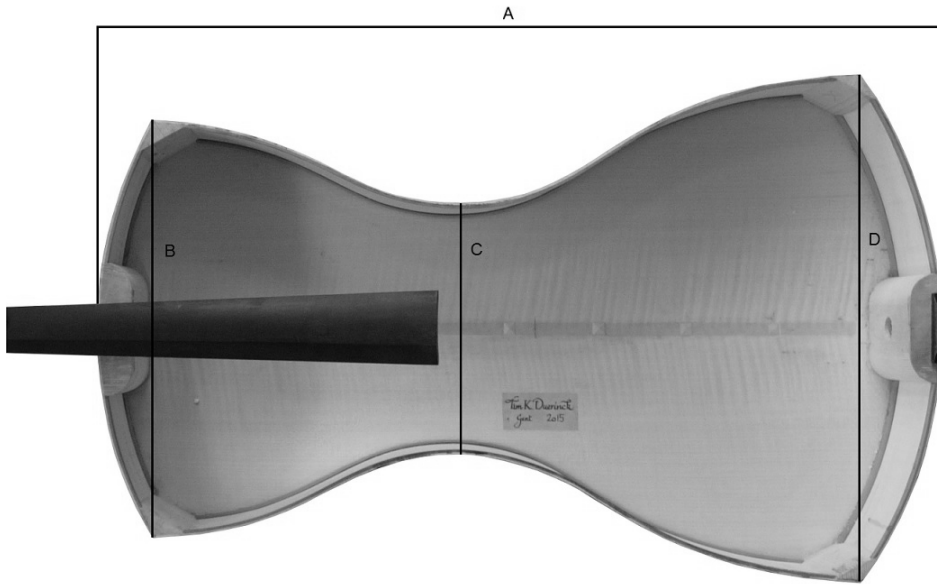
Vezel - Acer pseudoplatanus - Vezel

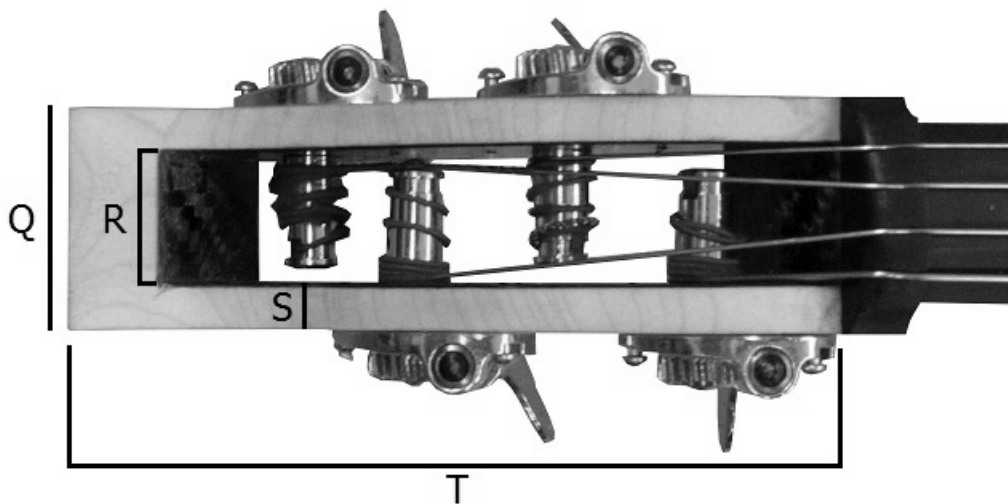
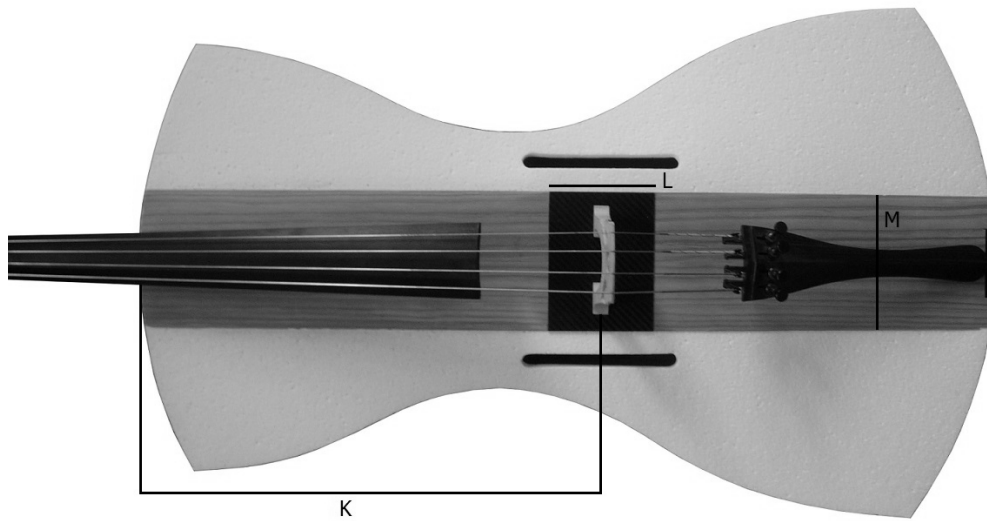
Afmetingen experimentele cello

Beschrijving	Millimeter
--------------	------------

Lengte klanklichaam (A)	760
Breedte boven (B)	372
Breedte midden (C)	222
Breedte onder (D)	460
Breedte bovenklos (E)	120
Diepte bovenklos	30
Breedte bovenste hoekklossen (F)	50
Breedte onderste hoekklossen (G)	45
Breedte onderklos (H)	100
Diepte onderklos	30
Hoogte krans top (I)	116
Hoogte krans onder (J)	119
Dikte EPS	15
Afstand top klanklichaam – kam (K)	403
Lengte carbonplaat (L)	9
Dikte carbonplaat	1
Breedte fineerstrook (M)	12
Dikte fineerstrook	1
Breedte klankgaten (N)	12
Afstand tussen klankgaten (O)	158
Lengte klankgaten (P)	138
Breedte kop (Q)	42
Breedte Opening (R)	24
Dikte kop (S)	9
Lengte kop (T)	138
Diepte kop boven (U)	27
Diepte kop onder (V)	32
Breedte basbalk top	11
Breedte basbalk onder	12
Projectie toets	81

Dikte lijmrepen	2
Hoogte lijmrepen	14
Dikte inleg (zwart - wit - zwart)	0,4 - 1 - 0,4







Metingen geluidssnelheid in P. Abies

Measurement nr: 1 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,834

0°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,3544825	1,3543065	0,0001760	4738,64
Measurement 2	3,0642290	3,0640675	0,0001615	5164,09
Measurement 3	5,1185260	5,1183500	0,0001760	4738,64
Measurement 4	6,9422170	6,9420410	0,0001760	4738,64
Measurement 5	9,3611425	9,3609670	0,0001755	4752,14
Measurement 6	11,3865525	11,3863765	0,0001760	4738,64
Measurement 7	13,4784080	13,4782325	0,0001755	4752,14
Measurement 8	15,3674900	15,3673105	0,0001795	4646,24
Measurement 9	17,1075100	17,1073340	0,0001760	4738,64
Measurement 10	19,0228420	19,0226860	0,0001560	5346,15

Total 0,0017280
 Average 0,0001728

Speed in m/s 4826,39
 Standaard dev. 227,39

Measurement nr: 2 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,847

10°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,3075685	1,3073540	0,0002145	3948,72
Measurement 2	3,6804790	3,6802640	0,0002150	3939,53
Measurement 3	6,0662400	6,0660255	0,0002145	3948,72
Measurement 4	8,9214550	8,9212210	0,0002340	3619,66
Measurement 5	11,2043460	11,2041310	0,0002150	3939,53
Measurement 6	13,4733490	13,4731350	0,0002140	3957,94
Measurement 7	15,6627440	15,6625290	0,0002150	3939,53
Measurement 8	17,6933880	17,6931740	0,0002140	3957,94
Measurement 9	19,6954980	19,6952840	0,0002140	3957,94
Measurement 10	21,6668850	21,6666700	0,0002150	3939,53

Total 0,0021650
 Average 0,0002165

Speed in m/s 3912,24
 Standaard dev. 104,05

Measurement nr: 3 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,867

20°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,0366310	1,0363380	0,0002930	2959,04
Measurement 2	2,7942290	2,7939360	0,0002930	2959,04
Measurement 3	4,7261820	4,7259080	0,0002740	3164,23
Measurement 4	6,5697950	6,5695020	0,0002930	2959,04
Measurement 5	8,5449515	8,5446780	0,0002735	3170,02
Measurement 6	10,3927640	10,3924900	0,0002740	3164,23
Measurement 7	12,2061820	12,2058885	0,0002935	2954,00
Measurement 8	14,1436040	14,1433300	0,0002740	3164,23
Measurement 9	15,9125880	15,9123140	0,0002740	3164,23
Measurement 10	17,8704980	17,8702250	0,0002730	3175,82

Total 0,0028150
 Average 0,0002815

Speed in m/s 3079,93
 Standaard dev. 108,18

Measurement nr: 4 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,847

30°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	2,5356150	2,5352635	0,0003515	2409,67
Measurement 2	4,6647755	4,6644040	0,0003715	2279,95
Measurement 3	6,5011815	6,5008100	0,0003715	2279,95
Measurement 4	8,1493260	8,1489550	0,0003710	2283,02
Measurement 5	9,9643070	9,9639360	0,0003710	2283,02
Measurement 6	11,6661425	11,6657910	0,0003515	2409,67
Measurement 7	13,2690915	13,2687405	0,0003510	2413,11
Measurement 8	14,8956350	14,8952830	0,0003520	2406,25
Measurement 9	16,5171970	16,5168460	0,0003510	2413,11
Measurement 10	18,1265140	18,1261620	0,0003520	2406,25

Total 0,0035940
 Average 0,0003594

Speed in m/s 2356,71
 Standaard dev. 66,25

Measurement nr: 5 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,722

40°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,8625880	1,8621780	0,0004100	1760,98
Measurement 2	3,3494240	3,3490330	0,0003910	1846,55
Measurement 3	4,8838770	4,8834670	0,0004100	1760,98
Measurement 4	6,3236040	6,3232125	0,0003915	1844,19
Measurement 5	8,0100290	8,0096190	0,0004100	1760,98
Measurement 6	9,7523140	9,7518850	0,0004290	1682,98
Measurement 7	11,1952830	11,1948740	0,0004090	1765,28
Measurement 8	12,6279010	12,6274900	0,0004110	1756,69
Measurement 9	14,1364740	14,1360650	0,0004090	1765,28
Measurement 10	15,5793650	15,5789750	0,0003900	1851,28

Total 0,0040605
 Average 0,0004060

Speed in m/s 1778,11
 Standaard dev. 52,81

Measurement nr: 6 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,607

50°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,1108490	1,1104390	0,0004100	1480,49
Measurement 2	2,8334860	2,8330960	0,0003900	1556,41
Measurement 3	4,3865910	4,3862010	0,0003900	1556,41
Measurement 4	6,1176860	6,1173150	0,0003710	1636,12
Measurement 5	7,9268260	7,9264360	0,0003900	1556,41
Measurement 6	9,6495990	9,6492090	0,0003900	1556,41
Measurement 7	11,2899510	11,2895600	0,0003910	1552,43
Measurement 8	12,6368460	12,6364550	0,0003910	1552,43
Measurement 9	14,2491115	14,2487210	0,0003905	1554,42
Measurement 10	15,8649900	15,8646190	0,0003710	1636,12

Total 0,0038845
 Average 0,0003885

Speed in m/s 1562,62
 Standaard dev. 44,68

Measurement nr: 7 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,538

60°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,5157720	1,5154000	0,0003720	1446,24
Measurement 2	3,5425880	3,5422165	0,0003715	1448,18
Measurement 3	5,3668850	5,3665340	0,0003510	1532,76
Measurement 4	7,0613570	7,0609870	0,0003700	1454,05
Measurement 5	8,7506150	8,7502780	0,0003370	1596,44
Measurement 6	10,4438380	10,4434670	0,0003710	1450,13
Measurement 7	12,2334280	12,2330560	0,0003720	1446,24
Measurement 8	13,9270220	13,9266510	0,0003710	1450,13
Measurement 9	15,5785250	15,5781540	0,0003710	1450,13
Measurement 10	17,2162600	17,2158900	0,0003700	1454,05

Total 0,0036565
 Average 0,0003656

Speed in m/s 1471,35
 Standaard dev. 50,71

Measurement nr: 8 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,504

70°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,6117290	1,6113570	0,0003720	1354,84
Measurement 2	3,3211030	3,3207520	0,0003510	1435,90
Measurement 3	5,1071780	5,1068065	0,0003715	1356,66
Measurement 4	6,8533500	6,8529985	0,0003515	1433,85
Measurement 5	8,5786035	8,5782320	0,0003715	1356,66
Measurement 6	10,2495020	10,2491310	0,0003710	1358,49
Measurement 7	11,8592870	11,8589165	0,0003705	1360,32
Measurement 8	13,3956740	13,3953220	0,0003520	1431,82
Measurement 9	15,1369625	15,1365920	0,0003705	1360,32
Measurement 10	16,6356350	16,6352635	0,0003715	1356,66

Total 0,0036530
 Average 0,0003653

Speed in m/s 1379,69
 Standaard dev. 36,83

Measurement nr: 9 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,481

80°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	2,7939550	2,7936425	0,0003125	1539,20
Measurement 2	4,3693460	4,3690330	0,0003130	1536,74
Measurement 3	5,9437010	5,9433890	0,0003120	1541,67
Measurement 4	7,5477640	7,5474125	0,0003515	1368,42
Measurement 5	9,0996190	9,0992870	0,0003320	1448,80
Measurement 6	10,6259080	10,6255765	0,0003315	1450,98
Measurement 7	12,1369040	12,1365720	0,0003320	1448,80
Measurement 8	13,6074320	13,6071000	0,0003320	1448,80
Measurement 9	16,6366890	16,6363570	0,0003320	1448,80
Measurement 10	18,1592280	18,1588965	0,0003315	1450,98

Total 0,0032800
 Average 0,0003280

Speed in m/s 1466,46
 Standaard dev. 54,97

Measurement nr: 10 Material: Picea Abies
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,473

90°	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,3692480	1,3689550	0,0002930	1614,33
Measurement 2	3,0470220	3,0467090	0,0003130	1511,18
Measurement 3	4,7684085	4,7680960	0,0003125	1513,60
Measurement 4	6,3680960	6,3677640	0,0003320	1424,70
Measurement 5	7,9476270	7,9473140	0,0003130	1511,18
Measurement 6	9,5689160	9,5686030	0,0003130	1511,18
Measurement 7	11,1687015	11,1683890	0,0003125	1513,60
Measurement 8	12,5926270	12,5923145	0,0003125	1513,60
Measurement 9	14,1861040	14,1857910	0,0003130	1511,18
Measurement 10	15,6496385	15,6493260	0,0003125	1513,60

Total 0,0031270
 Average 0,0003127

Speed in m/s 1512,63
 Standaard dev. 44,81

RESULTS	Speed of sound in m/s	Precision
0°	4826,39	13,6%
10°	3912,24	9,2%
20°	3079,93	7,3%
30°	2356,71	5,7%
40°	1778,11	9,6%
50°	1562,62	10,0%
60°	1471,35	9,6%
70°	1379,69	5,6%
80°	1466,46	12,0%
90°	1512,63	12,5%

Metingen geluidssnelheid in EPS

Measurement nr: 17 Material: EPS 60 kg/m³
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,76

	60 Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,4569440	1,4556935	0,0012505	607,76
Measurement 2	2,9525100	2,9512210	0,0012890	589,60
Measurement 3	4,4149120	4,4136815	0,0012305	617,64
Measurement 4	5,9275880	5,9262990	0,0012890	589,60
Measurement 5	7,4964160	7,4951460	0,0012700	598,43
Measurement 6	9,0424510	9,0412015	0,0012495	608,24
Measurement 7	10,4995210	10,4982915	0,0012295	618,14
Measurement 8	11,9942870	11,9930375	0,0012495	608,24
Measurement 9	13,4481340	13,4469040	0,0012300	617,89
Measurement 10	14,7726860	14,7713765	0,0013095	580,37

Standaard deviatie 13,46 Total 0,0125970
 Average 0,0012597

Speed in m/s 603,32

Measurement nr: 12 Material: EPS 40 kg/m³
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,76

	40 Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	2,4694630	2,4683690	0,0010940	694,70
Measurement 2	3,8602440	3,8591310	0,0011130	682,84
Measurement 3	5,4352250	5,4340920	0,0011330	670,79
Measurement 4	7,1498530	7,1484900	0,0013630	557,59
Measurement 5	8,6211425	8,6200875	0,0010550	720,38
Measurement 6	10,2166510	10,2155960	0,0010550	720,38
Measurement 7	11,7664360	11,7654010	0,0010350	734,30
Measurement 8	13,3415530	13,3405370	0,0010160	748,03
Measurement 9	14,9589360	14,9578420	0,0010940	694,70
Measurement 10	16,3732325	16,3721190	0,0011135	682,53

Standaard deviatie 52,94 Total 0,0110715
 Average 0,0011071

Speed in m/s 686,45

Measurement nr: 15 Material: EPS 25 kg/m³
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,76

	25 Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,4335250	1,4322170	0,0013080	581,04
Measurement 2	2,8761230	2,8748920	0,0012310	617,38
Measurement 3	4,4478415	4,4465915	0,0012500	608,00
Measurement 4	5,9215720	5,9203615	0,0012105	627,84
Measurement 5	7,3552240	7,3539750	0,0012490	608,49
Measurement 6	8,9260450	8,9247560	0,0012890	589,60
Measurement 7	10,4695610	10,4683110	0,0012500	608,00
Measurement 8	11,9681160	11,9668650	0,0012510	607,51
Measurement 9	13,6868850	13,6857400	0,0011450	663,76
Measurement 10	15,2518650	15,2506350	0,0012300	617,89

Standaard deviatie 22,38 Total 0,0124135
 Average 0,0012414

Speed in m/s 612,24

Measurement nr: 13 Material: EPS 25 kg/m³ F
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,76

25 F	Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,2496385	1,2481340	0,0015045	505,15
Measurement 2	2,5943650	2,5928620	0,0015030	505,66
Measurement 3	4,0391700	4,0376850	0,0014850	511,78
Measurement 4	5,5083110	5,5068850	0,0014260	532,96
Measurement 5	6,9678220	6,9663570	0,0014650	518,77
Measurement 6	8,4758110	8,4743850	0,0014260	532,96
Measurement 7	9,9118070	9,9103810	0,0014260	532,96
Measurement 8	11,4175290	11,4160650	0,0014640	519,13
Measurement 9	12,9177830	12,9163770	0,0014060	540,54
Measurement 10	14,5783690	14,5769440	0,0014250	533,33

Standaard deviatie 12,86 Total 0,0145305
 Average 0,0014531

Speed in m/s 523,04

Measurement nr: 14 Material: EPS 15 kg/m³
 Name .wav: WR_001_2015011 Length in m: 0,76

	15 Signal 2	Signal 1	Time in sec	Speed in m/s
Measurement 1	1,3565140	1,3553220	0,0011920	637,58
Measurement 2	2,7741700	2,7729980	0,0011720	648,46
Measurement 3	4,2449710	4,2437790	0,0011920	637,58
Measurement 4	5,8392680	5,8380960	0,0011720	648,46
Measurement 5	7,3781540	7,3769430	0,0012110	627,58
Measurement 6	8,8894040	8,8882130	0,0011910	638,12
Measurement 7	10,4898925	10,4887210	0,0011715	648,74
Measurement 8	12,0468260	12,0455760	0,0012500	608,00
Measurement 9	13,6038770	13,6026660	0,0012110	627,58
Measurement 10	15,2568260	15,2555760	0,0012500	608,00

Standaard deviatie 15,29 Total 0,0120125
 Average 0,0012013

Speed in m/s 632,67

RESULTS

Density kg/m ³	Speed of sound in m/s	Precision	Radiation Ratio
60	603,32	6,3%	10,06
40	686,45	24,3%	17,16
25	612,24	13,1%	24,49
15	632,67	6,5%	42,18

25	612,24	13,1%
25 F	523,04	6,8%