

Onderzoek naar nieuwe methoden voor meten van snelheid

W. Mennes
Scriptie Technische Natuurkunde
Haagse Hogeschool
Studentnr. 11094737

Begeleider Sensornet: R.L.Q. Maas
Eerste begeleider HHS: J.H.R. Lambers
Tweede begeleider HHS: J.L. van Yperen
Gecommitteerde: M. de Dood

Samenvatting

De opdracht bestond uit het bedenken van ideeën voor het genereren van meer informatie uit beschikbare sensoren. In het begin is gekeken naar het akoestisch bepalen van snelheid met het dopplereffect, het bepalen van snelheid met een laser afstandsmeter. Het bedenken van ideeën voor het meten van binnenmilieu en het testen van de mogelijkheid voor het opwekken van energie voor het meetsysteem. Na een aantal weken is besloten om te focussen op het bepalen van de snelheid met zowel de laser als de akoestische bepaling.

Voor het bepalen van de snelheid van treinen is onderzocht of het mogelijk is dit te halen uit het geluid dat wordt veroorzaakt bij een passage. Om dit te onderzoeken, is een algoritme gemaakt dat van de passage een spectrogram maakt. Elke passage is geanalyseerd op tonen die voor de trein uitreizen en na de passage langer hoorbaar blijven. Als deze tonen aanwezig zijn is met het dopplereffect de snelheid van het voertuig berekend. Het algoritme voor de akoestische snelheidsbepaling kan een globale snelheidsbepaling geven van een passage. De onnauwkeurigheid is te groot voor exacte bepalingen en het is mogelijk dat er geen snelheid uitgerekend kan worden.

Het meten van de snelheid met de laser afstandsmeter wordt gedaan door continue de afstand tot het voertuig te meten. Uit het verschil in afstand en tijd kan de snelheid bepaald worden. Ook is het mogelijk om met een dergelijke laser te tellen uit hoeveel wagons een trein bestaat. Hiervoor is een laser gekocht welke eerst is getest met kleine voertuigen om te zien of het principe werkt. Toen bleek dat het mogelijk is om zowel de snelheid als het aantal wagons te tellen, is de laser opgehangen langs de Randstadrail om deze te testen op praktijksituaties. Hiervoor is een algoritme geschreven dat zowel de snelheid als het aantal wagons kan bepalen uit de verkregen data. Uit de praktijktest is gebleken dat het mogelijk is de snelheid te bepalen en het aantal wagons te tellen. Er zijn echter nog wel een paar nadelen die de huidige opstelling heeft. Zoals het uitrichten van de laser en het bepalen van de hoek met het spoor.

Inhoud

Samenvatting	1
1. Inleiding	2
2. Akoestische Snelheidsbepaling	3
2.1 Dopplereffect	3
2.2 Snelheid van het geluid	4
2.2.1 Afhangelijkheid van temperatuur en luchtvochtigheid	5
2.3 Discrete STFT	7
2.4 Leakage en vensterfuncties	8
2.5 Anti-aliasing	9
3. Akoestische snelheidsbepaling met dopplereffect	10
3.1 Opstellingen voor meten van treingeluid	12
3.2 Beschrijving van het algoritme voor akoestische snelheidsbepaling	12
3.3 Praktijktests algoritme	14
4. Snelheidsbepaling met een laser	16
4.1 Snelheidsbepaling en tellen van aantal bakken	16
4.2 Meetopstelling	17
4.2.1 Proefopstelling Knex en Duplo trein	17
4.2.2 Testopstelling Randstadrail	17
4.2.3 Beschrijving van het algoritme	17
5. Meetresultaten lasermetingen	19
5.1 Meetresultaten Knex en Duplo treinen	19
5.2 Meetresultaten Randstadrail	20
6. Snelheidsbepaling met de radar	22
7. Beschouwing	23
8. Conclusie	24
9. Bibliografie	25
Bijlage 1 Meetresultaten bekende passages met 1500 ms venster .	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
Bijlage 2: Meetresultaten bekende passages met 1000 ms venster	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
Bijlage 3 flowchart van algoritme van akoestische snelheidsbepaling	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.

1. Inleiding

Sensornet is een bedrijf dat zich bezig houdt met het live in beeld brengen van milieuparameters aan klanten. Men meet voornamelijk geluid, trillingen en luchtkwaliteit. Voor het meten hiervan maakt het bedrijf gebruik van een aantal uiteenlopende sensoren, waaronder microfoons en versnellingsopnemers, maar ook weerstations voor het bepalen van de weersomstandigheden, sensoren voor de bepaling van de temperatuur en vochtigheid van rails en radars voor het meten van de snelheid van voertuigen.

De opdracht bestaat uit het bedenken, testen en uitvoeren van ideeën om meer informatie te halen uit dezelfde sensoren, dan wel het combineren van sensoren om meer te meten. De focus ligt op het meten van snelheid. Voor het bepalen van de snelheid van voertuigen zijn meerdere mogelijkheden. Op dit moment wordt dit gedaan met een radar, deze is echter niet altijd even betrouwbaar, duur in de aanschaf en de levering hiervan verloopt niet altijd soepel. Daarom wordt er gekeken naar andere mogelijkheden met behulp van een laser afstandsmeter en met behulp van een microfoon via het dopplereffect. Hierbij heeft de microfoon de voorkeur omdat deze in de meeste gevallen toch aanwezig is. Ook de laser zou een aantrekkelijkere optie zijn dan de radar gezien de aanschafprijs hiervan ongeveer tien keer lager is dan van een radar.

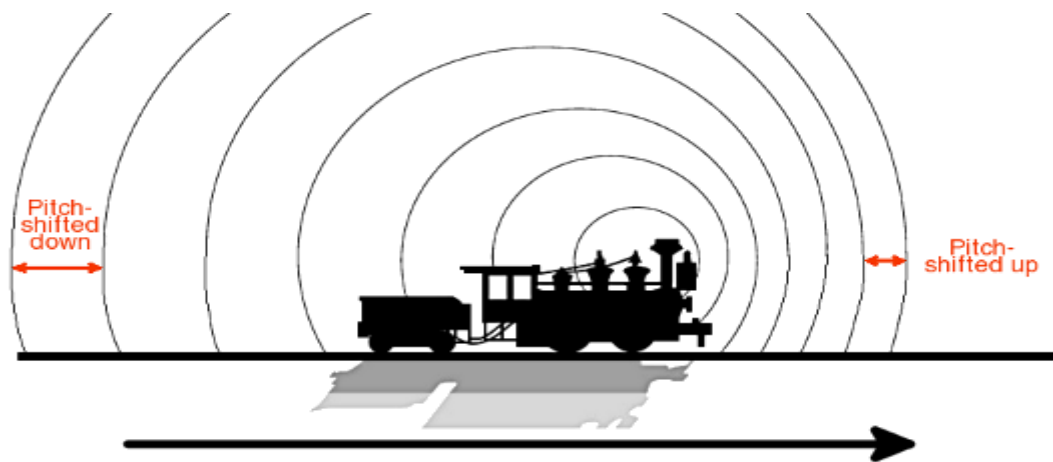
Deze scriptie beschrijft in hoofdstuk twee en drie de theorie over het dopplereffect en de effecten die optreden als het signaal digitaal wordt bewerkt met onder andere een Fourier analyse. Hoofdstuk drie behandelt de metingen en resultaten van de akoestische snelheidsbepaling. In hoofdstuk vier wordt de snelheidsbepaling met de laser uitgelegd en de meetresultaten besproken. Hoofdstuk vijf beschrijft de werking van de radar en in hoofdstuk zes en zeven worden de belangrijkste voor en nadelen besproken en een conclusie getrokken.

2. Akoestische Snelheidsbepaling

De snelheid van een passerende trein kan bepaald worden uit het geluid dat het voertuig maakt, dit wordt gedaan met het dopplereffect. Hiervoor is onderzoek gedaan naar de parameters hiervan. Er is gekeken naar weersinvloeden op de snelheid van het geluid, en de effecten waar rekening mee gehouden moet worden als van een audio fragment de frequenties worden bepaald met een Fourier transformatie.

2.1 Dopplereffect

Het dopplereffect is het veranderen van de opgevangen frequentie door een snelheidsverschil tussen zender en ontvanger. Dit effect treedt op als de bron beweegt en zijn eigen uitgezonden geluidsgolven gaat inhalen. Hierdoor zal de frequentie hoger zijn als het voertuig nadert en lager als het voertuig gepasseerd is. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Schematische weergave dopplereffect^[1]

Het verschil tussen de uitgezonden frequentie en de gemeten frequentie is te bepalen met formules 1 en 2^[2]

$$f_{\text{nader}} = f_b \left(\frac{v_g}{v_g - v_b} \right) \quad (1)$$

$$f_{\text{verw}} = f_b \left(\frac{v_g}{v_g + v_b} \right) \quad (2)$$

waarin:

f_{nader}	gemeten frequentie bij naderen	(Hz)
f_{verw}	gemeten frequentie bij verwijderen	(Hz)
f_b	originele bronfrequentie	(Hz)
v_g	geluidssnelheid	(m/s)
v_b	snelheid van de bron	(m/s)

Om hiermee de snelheid van de bron te bepalen moet de bronfrequentie bekend zijn. Omdat deze niet bekend is worden beide formules samengevoegd tot:

$$\frac{f_{\text{nader}}}{f_{\text{verw}}} = \frac{1 + \frac{v_b}{v_g}}{1 - \frac{v_b}{v_g}} \quad (3)$$

Om hieruit de snelheid te bepalen moet deze worden omgeschreven op de volgende manier:

$$\begin{aligned} f_{\text{nader}} - f_{\text{nader}} \left(\frac{v_b}{v_g} \right) &= f_{\text{verw}} + f_{\text{verw}} \left(\frac{v_b}{v_g} \right) \\ v_g f_{\text{nader}} - v_g f_{\text{verw}} &= v_b f_{\text{nader}} + v_b f_{\text{verw}} \\ v_b &= v_g \left(\frac{f_{\text{nader}} - f_{\text{verw}}}{f_{\text{nader}} + f_{\text{verw}}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Hiermee is de originele snelheid van de bron te bepalen zonder dat de bronfrequentie bekend is. Deze formule wordt gebruikt bij het bepalen van de snelheid in het algoritme. De geluidssnelheid hierin is afhankelijk van de weersomstandigheden op dat moment. Hoe het weer van invloed is op de geluidssnelheid is beschreven in de volgende paragraaf.

2.2 Snelheid van het geluid

De snelheid van het geluid in lucht is afhankelijk van een aantal factoren, de belangrijkste hierbij zijn de temperatuur van de lucht, de luchtdruk en de luchtvochtigheid. Algemeen kan de snelheid van het geluid worden bepaald met formule 5.^[3]

$$v_g = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (5)$$

waarin:

γ	verhouding van specifieke warmtecapaciteiten	(-)
ρ	dichtheid van de lucht	(kg/m ³)
P	luchtdruk	(Pa)

De γ is afhankelijk van het aantal vrijheidsgraden van het gasmolecuul, welke weer afhankelijk is van de complexiteit van het molecuul. Deze zijn als volgt verdeeld:^[3]

$\gamma = 1,67$	voor monoatomaire moleculen
$\gamma = 1,40$	voor diatomaire moleculen
$\gamma = 1,33$	voor triatomaire moleculen

Deze waarden worden bepaald met formule 6.

$$\gamma = 1 + \frac{2}{d} \quad (6)$$

waarin:

d aantal vrijheidsgraden van het molecuul (-)

Het aantal vrijheidsgraden voor een mono-, een di- en een tri- atomair molecuul zijn respectievelijk, drie, vijf en zes. Aangezien lucht voor 78% uit stikstof en 21% uit zuurstof bestaat en deze allebei een diatomair molecuul zijn, mag voor de verhouding van warmtecapaciteiten in droge lucht 1,40 worden genomen. De overige 1% bestaat uit een mix van mono-, di- en triatomaire moleculen maar hun bijdrage hierin is verwaarloosbaar klein.

De verhouding van warmtecapaciteiten is anders in vochtige lucht, aangezien waterdamp een triatoom is. In vochtige lucht wordt de verhouding bepaald met:

$$\gamma_w = \frac{7 + h}{5 + h} \quad (7)$$

waarin:

γ_w verhouding van specifieke warmtecapaciteiten voor vochtige lucht (-)

h watermolecuul fractie (-)

De watermolecuul fractie is de relatieve hoeveelheid waterdamp in de lucht, niet te verwarren met de relatieve luchtvochtigheid. De formule voor het bepalen van de watermolecuul fractie is opgenomen in de volgende paragraaf. Deze formule is geldig voor lucht omdat het bijna volledige bestaat uit diatomaire moleculen.^[1]

2.2.1 Afhankelijkheid van temperatuur en luchtvochtigheid

De snelheid van het geluid is sterk afhankelijk van de temperatuur van de lucht. Een stijging van de temperatuur van nul naar tien graden geeft een snelheidsverhoging van 331,45 m/s naar 337,46 m/s.^[3] De temperatuurafhankelijkheid samen met de luchtdruk kan worden geïmplementeerd als formule 8, hierin wordt de lucht beschouwd als ideaal gas ($PV=RT$) zodat geldt:

$$v_g = \sqrt{\frac{1,4RT}{M}} \quad (8)$$

waarin:

R universele gasconstante (J/Kmol)

T temperatuur (K)

M moleculaire massa (u)

Omdat R en M constanten zijn, is te zien dat de snelheid van het geluid een eerste orde afhankelijkheid heeft met de temperatuur. Empirisch is aangetoond dat in droge lucht de snelheid volgens formule 9 stijgt bij een temperatuurverandering.

$$v_{gd} = v_{g0} \sqrt{1 + \frac{\Theta}{273}} \quad (9)$$

waarin:

v_{gd}	geluidssnelheid in droge lucht	(m/s)
v_{g0}	geluidssnelheid bij 273 K	(331,45 m/s)
Θ	temperatuur	(°C)

Luchtvochtigheid zorgt ervoor dat de lucht een lagere dichtheid heeft, hierdoor wordt de snelheid hoger. Om deze verhoging te bepalen moet de verhouding van snelheden tussen vochtige en droge lucht worden bepaald. Deze verhouding is afhankelijk van de vrijheidsgraden van de moleculen en het gemiddelde moleculaire gewicht van de lucht.

De specifieke warmtecapaciteit van droge lucht is al berekend met Formule 6. Voor de atomaire massa van droge lucht is het gemiddelde van de drie meest voorkomende gassen genomen (stikstof 78%, zuurstof 21% en argon 1%). Hierbij wordt argon meegenomen omdat het vergeleken met de andere twee stoffen een redelijk zwaar gas is en hierdoor wordt de werkelijke situatie beter benaderd. De stoffen hebben een atomaire massa M van 28 u voor stikstof, 32 u voor zuurstof en 40 u voor argon. Dit geeft een gemiddelde atomaire massa van 29 u voor lucht.^[4] Waterdamp heeft een atomaire massa van 18 u, dit betekent dat, hoe vochtiger de lucht, hoe lager de luchtdichtheid wordt. De atomaire massa van vochtige lucht is te bepalen met formule 10.

$$M_w = (29 - 11)h \quad (10)$$

waarin:

M_w	moleculaire massa vochtige lucht	(u)
-------	----------------------------------	-----

$$h = \frac{0,01H_R \cdot e(t)}{P} \quad (11)$$

H_R	relatieve luchtvochtigheid	(%)
$e(t)$	dampdruk van water	(Pa)

De dampdruk van water is de druk die het heeft als het in thermodynamisch evenwicht is met zijn gecondenseerde fase. Deze is te bepalen met de Antoine-vergelijking, welke een afleiding is van de Clausius-Clapeyron relatie. De dampdruk kan worden benaderd met de volgende vergelijking^[5]

$$e(t) = e^{20,386 - \frac{5132}{T}} \cdot 133,32 \quad (12)$$

Als formule 10 t/m 12 worden samengevoegd kan de snelheid van het geluid bepaald worden met formule 13.

$$\frac{v_{gw}}{v_{gd}} = \frac{\sqrt{\frac{\gamma_w}{M_w}}}{\sqrt{\frac{\gamma}{M}}} \quad (13)$$

waarin:

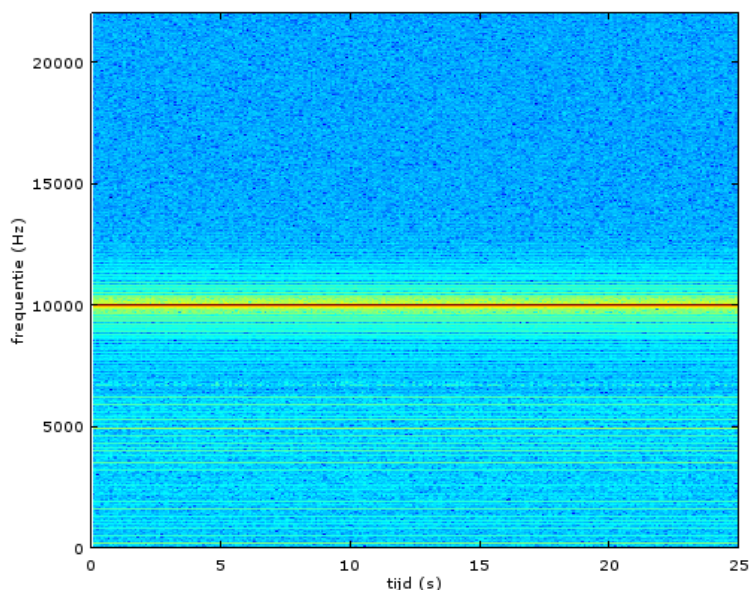
v_{gw}/v_{gd} verhouding tussen natte en droge lucht (-)

De geluidssnelheid wordt bepaald met formule 14, v_{gd} is hierin de geluidssnelheid in droge lucht welke is bepaald in formule 9.

$$v_g = v_{gd} \left(\frac{\sqrt{\frac{\gamma_w}{M_w}}}{\sqrt{\frac{\gamma}{M}}} \right) \quad (14)$$

2.3 Discrete STFT

Voor het bepalen van de frequenties uit het geluid wordt een Fourier transformatie uitgevoerd. Omdat bij een normale Fourier transformatie alle informatie over de tijd verloren gaat wordt moet een discrete Short Time Fourier transform (STFT) uitgevoerd worden. Bij een STFT wordt een Fast Fourier transform (FFT) uitgevoerd over een klein tijdsinterval, het venster. Dit venster wordt steeds een stukje verschoven waarbij een overlap is met het vorige venster. Hierdoor wordt een beeld gemaakt van hoe de frequenties verlopen over de tijd. Meestal wordt een overlap van 50 procent gebruikt vanwege het risico op artefacten aan de rand van het venster. Hiervan kan een spectrogram gemaakt worden, zoals te zien is in Figuur 2. Een spectrogram is een grafische weergave van de gemeten frequenties uitgezet tegen de tijd. In figuur 1 is met kleuren de grootte van het signaal aangegeven waarbij donkerblauw vrijwel geen signaal is en donkerrood een sterk signaal.^[6]

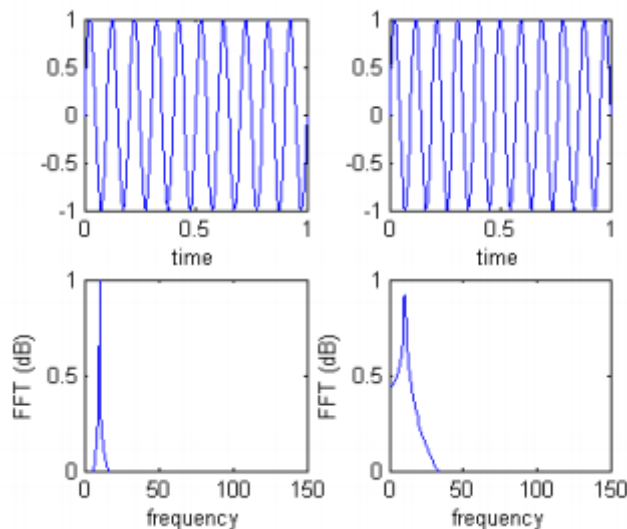


Figuur 2: Voorbeeld spectrogram van een enkele toon (10kHz)

Een nadeel van de STFT is dat de tijdsresolutie en de frequentieresolutie aan elkaar gekoppeld zijn. Dit houdt in dat, als de resolutie van de ene een factor tien kleiner wordt, de resolutie van de ander automatisch een factor tien groter wordt. De resolutie is afhankelijk van de breedte van het venster: bij een breed venster is de frequentie heel precies te bepalen, maar is de onnauwkeurigheid in de tijd groot en bij een smal venster is de tijd heel precies, maar is de onnauwkeurigheid in de frequentie heel groot. Een ander nadeel van deze koppeling is dat altijd een onnauwkeurigheid zit in de frequentie. Bijvoorbeeld bij een resolutie van 5 Hz, zal alles van 2,5 Hz tot 7,5 Hz gerekend worden als 5 Hz door de resolutie.

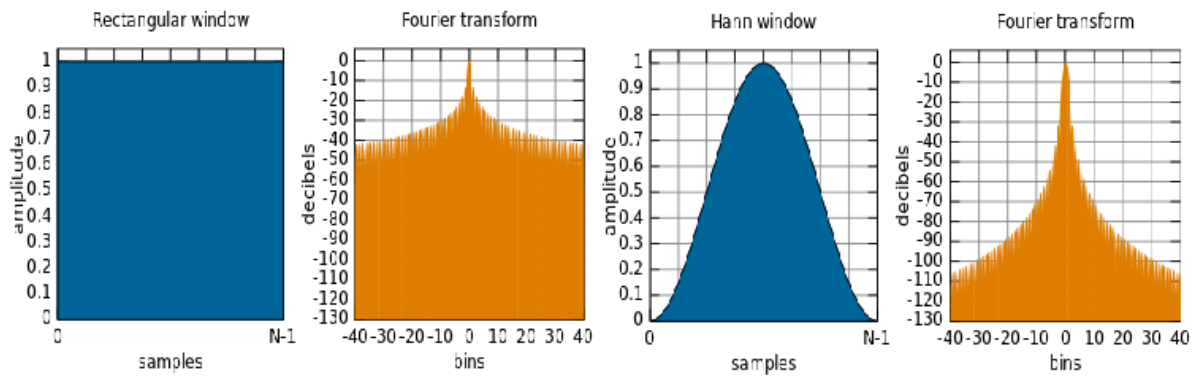
2.4 Leakage en vensterfuncties

Het venster dat wordt gebruikt voor de STFT bepaalt waar het signaal wordt afgekapt, dit heeft tot gevolg dat leakage optreedt. Leakage houdt in dat de frequentie niet exact bepaald kan worden maar wordt uitgesmeerd over een frequentiebereik. Dit ontstaat doordat bij het uitvoeren van de Fouriertransformatie ervan uitgegaan wordt dat een geheel aantal perioden in het venster zitten. In de praktijk is dit nooit het geval wat tot gevolg heeft dat de frequentie niet exact wordt bepaald. Een voorbeeld van leakage is weergegeven in Figuur 3, de linkerkant heeft een geheel aantal perioden in de transformatie waardoor de frequentie exact te bepalen is. Aan de rechterkant wordt het signaal afgebroken, hierdoor is de frequentie niet meer exact te bepalen, waardoor de spreiding groter wordt en de punt minder scherp.



Figuur 3: Voorbeeld van leakage ^[7]

Om hiervoor te compenseren wordt gebruik gemaakt van vensterfuncties. Een vensterfunctie is een vermenigvuldigingsfactor waarmee het originele venster wordt vermenigvuldigd. Hierdoor zullen de artefacten die optreden aan de randen van het venster minder aanwezig zijn en dus minder verstoringen veroorzaken. In Figuur 4 zijn het rechthoekige venster en het Hanning-venster opgenomen. Het rechthoekige venster geeft weer hoe het signaal eruit zou zien zonder vensterfunctie, het Hanning-venster is de meest gebruikte vensterfunctie en geeft duidelijk aan wat voor effect een venster heeft op het powerspectrum van de transformatie. ^[7,8]



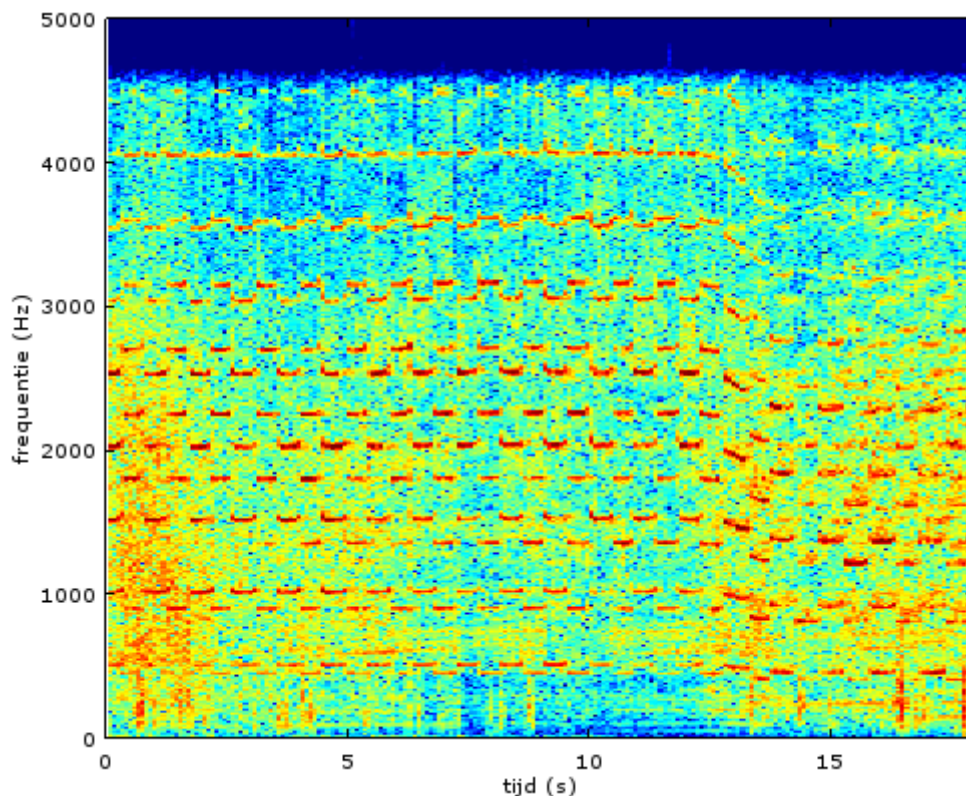
Figuur 4: Voorbeelden van vensterfuncties en effect of een Fourier transformatie^[9]

2.5 Anti-aliasing

Het meten van een signaal kan alleen worden gedaan door samples te nemen. Dit heeft tot gevolg dat aliasing ontstaat. Aliasing houdt in dat frequenties die hoger zijn dan de helft van de samplefrequentie wegvallen. Dit heeft tot gevolg dat frequenties die hoger zijn dan een half keer de samplefrequentie worden aangegeven als lagere frequenties.^[8]

3. Akoestische snelheidsbepaling met dopplereffect

Om de snelheid van een voertuig te kunnen bepalen aan de hand van het dopplereffect, moet een duidelijk waarneembare toon aanwezig zijn. Deze toon moet ook nog eens duidelijk lager liggen wanneer het voertuig gepasseerd is. Als een dergelijke toon ontbreekt, is het niet mogelijk de snelheid te bepalen. Om te testen of het überhaupt mogelijk is om zonder een bekende frequentie de snelheid te bepalen, is gekeken naar geluidsopnamen waarbij ook met het oor al een duidelijke toon te horen is (constant toerende auto, noodvoertuig). Deze audiofragmenten zijn geanalyseerd met GNU Octave (gratis alternatief voor MatLab). Voor deze analyse is gebruikt gemaakt van een STFT waar een spectrogram van is getekend, een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 5. Hierin is duidelijk te zien dat een daling van de frequentie wordt waargenomen, als de brandweerauto passeert. Hierin is ook duidelijk een mogelijk probleem te zien, namelijk dat niet alleen de originele frequentie wordt bepaald maar ook de verschillende harmonische.

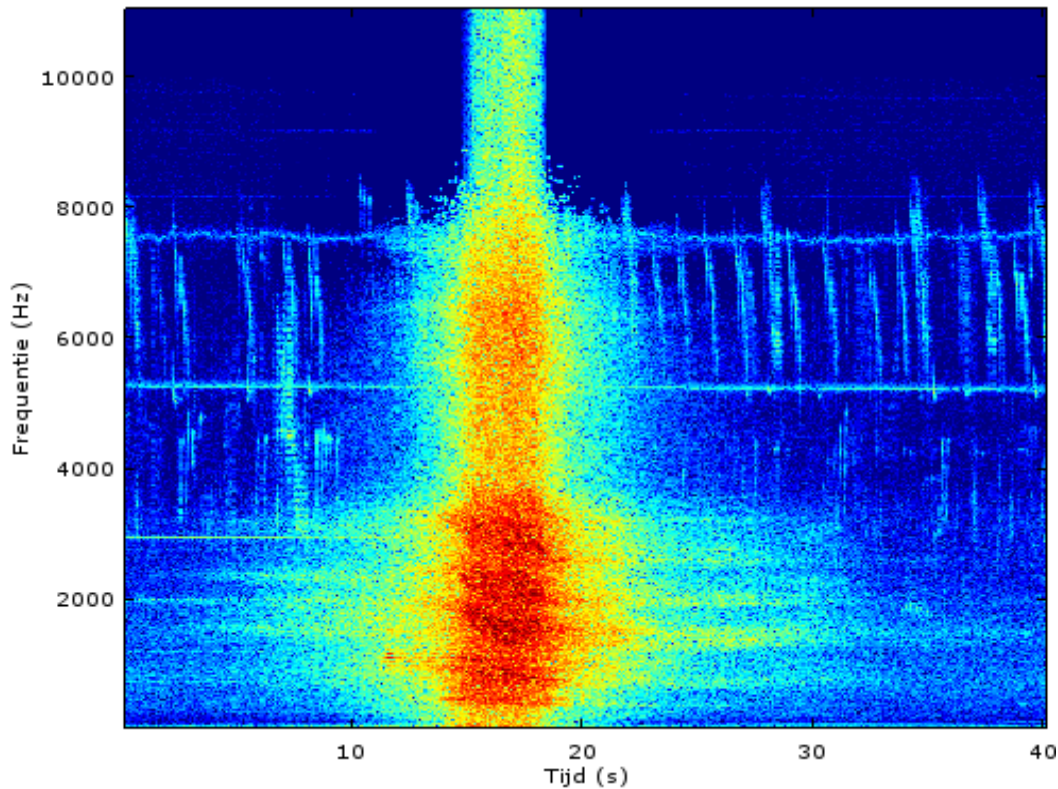


Figuur 5: spectrogram van een passerende brandweerauto met sirene

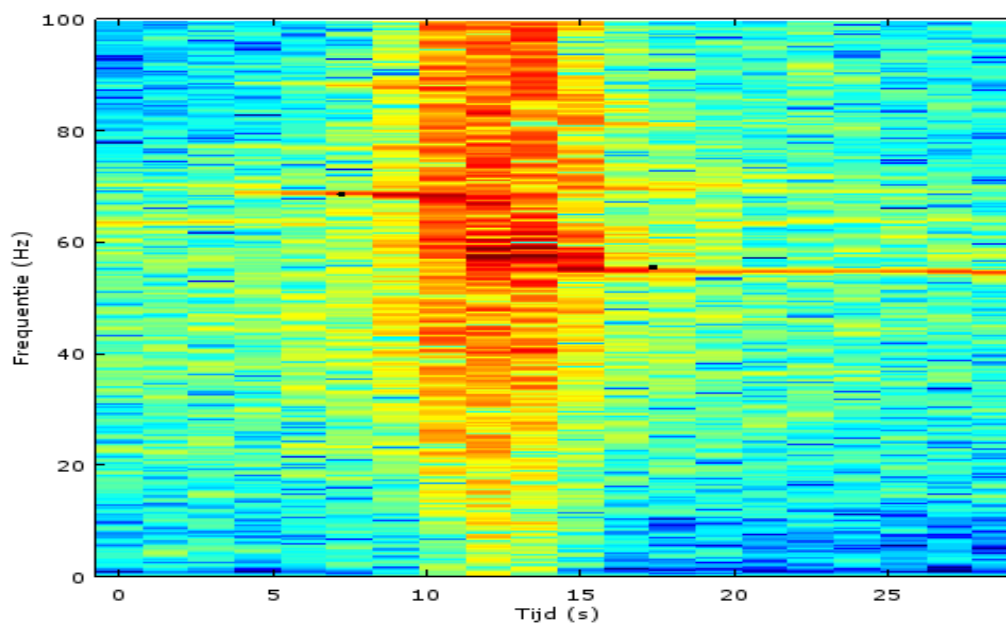
Er is geprobeerd om dit te doen met fragmenten van treinpassages. Hiervoor is eerst gekeken of überhaupt een duidelijk aanwijsbare toon aanwezig is. Om dit te kunnen analyseren is eerst een spectrogram getekend van een passage, een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 6. In dit spectrogram is de frequentie uitgezet tegen de tijd. De intensiteit van elke frequentie wordt weergegeven met kleuren. De verdeling loopt van donkerblauw (niet aanwezig), tot donkerrood (zeer luid).

In Figuur 6 is te zien dat het geluid aanzwelt als de trein dichterbij komt en weer afneemt als deze is gepasseerd. Ook zijn een aantal lijnen te zien die bij het naderen van de trein hoger liggen dan bij het verwijderen van de trein. Deze zijn in het figuur met potloodstrepen aangegeven. Omdat deze lijnen voornamelijk laagfrequent zijn, wordt vooral daar naar gekeken.

In Figuur 7 is ingezoomd op het gebied van 0 tot 100 Hz, hier is het figuur gefilterd zodat het contrast groter wordt en de overheersende toon duidelijker wordt. De overheersende lijn is duidelijk lager als de trein gepasseerd is ten opzichte van het naderen van de trein. De keuze voor het gebied van 0 tot 100 Hz is gemaakt omdat, in dit frequentiebereik bij vrijwel alle typen treinen die zijn bekeken hier het dopplereffect duidelijk optreedt. Hierbij is de lengte van de trein niet belangrijk omdat de tonen waar het effect uit af te lezen is voor de ruis uit reizen en ook nadat de trein voorbijgereden is langer zichtbaar blijven. Deze metingen zijn gedaan op trajecten waar de maximumsnelheid 130 km/h is.



Figuur 6: Volledig spectrogram treinpassage



Figuur 7: spectrogram van treinpassage ingezoomd op 0-100 Hz

3.1 Opstellingen voor meten van treingeluid

Het geluid dat een trein produceert kan worden ingedeeld in drie categorieën:

- Het rolgeluid (snelheidsbereik $50 \text{ km/h} < v < 350 \text{ km/h}$)
- Het machinegeluid (snelheidsbereik $v < 60 \text{ km/h}$)
- Aerodynamisch geluid (snelheidsbereik $v > 350 \text{ km/h}$)^[10]

De gemeten treinen betreffen hier passagierstreinen, welke op het gemeten baanvak een maximumsnelheid hebben van 130 km/h en goederentreinen met een maximumsnelheid van 95 km/h. De grootste bijdrage van het geluid dat wordt gemeten is dus het rolgeluid. Dit wordt veroorzaakt door het contact tussen de wielen en de rails. De zichtbare tonen in figuur 7 worden dan waarschijnlijk veroorzaakt door het contact tussen rails en trein.

Voor een praktijktest zijn twee locaties gebruikt waar Sensornet momenteel metingen uitvoert met zowel microfoons als een radar. Eén traject dat wordt gebruikt door de NS, waar veel verschillende typen treinen voorbijkomen, namelijk: Plan V, VIRM, ICM, SGM, intercity A'dam-Berlijn, goederentreinen en overige). De andere locatie wordt voornamelijk bereden door Synthus LINT treinstellen, intercity A'dam-Berlijn en goederentreinen. Met deze gegevens is het mogelijk om te testen of van elk type trein de snelheid te bepalen is aan de hand van het geluid en of het niet locatieafhankelijk is.

Bij de metingen wordt gebruik gemaakt van een omnidirectionele microfoon, welke met een samplefrequentie van 32000 Hz wordt bemonsterd. Via een analoog digitaal converter (ADC) wordt dit omgezet in WAVE files welke worden ingeladen in het algoritme.

3.2 Beschrijving van het algoritme voor akoestische snelheidsbepaling

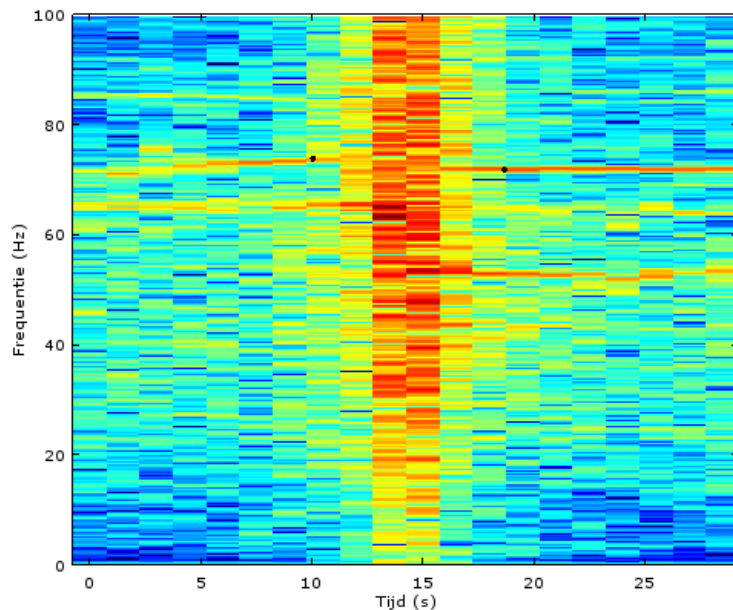
Vanwege het grote aantal stappen dat genomen wordt in het algoritme en het aantal terugkoppelingen is een flowchart opgenomen in bijlage drie voor een overzicht.

Het algoritme dat is gemaakt voor akoestische snelheidsbepaling leest eerst het hele audiobestand in, dit wordt omgezet in een complexe matrix. Om de grootte van elke frequentie te bepalen wordt deze matrix omgezet in een absolute waarde. Dit levert een matrix op die per frequentieband en tijdsinterval de intensiteit van het signaal weergeeft. Deze informatie is nodig om te bepalen wanneer de trein dermate dicht bij de microfoon is dat zoveel ruis opgevangen wordt dat het niet meer mogelijk is een duidelijke frequentie te meten. Het is van belang het gebied aan te geven wanneer de trein langskomt en wanneer deze voorbij is. In deze blokken moet gezocht worden naar een frequentie die bij het naderen en bij het verwijderen van de trein te onderscheiden is van de rest. Daarom wordt van de matrix eerst het gemiddelde genomen van elke kolom, vervolgens wordt het gemiddelde genomen van al deze waarden. Dit wordt gedaan om de passage te herkennen. Gedurende het langsrijden van de trein is het gemiddelde geluidsniveau over alle frequenties hoger dan bij het naderen of verwijderen van de trein.

Door het gemiddelde over alle waarden te bepalen is een drempelwaarde ingesteld die bepaald of de ruis overheersend is. Door middel van deze drempelwaarde is het gebied van het naderen en het gebied van verwijderen te bepalen. Doordat bekend is in welke gebieden teveel ruis optreedt kan worden gezegd dat in de laatste kolom voor, en de eerste kolom na, het overschrijden van de drempelwaarde gezocht moet worden naar de juiste frequentie. Deze frequentie zal altijd overheersend zijn ten opzichte van de overige frequenties omdat dit een heel specifieke toon betreft die wordt uitgezonden terwijl de overige frequenties ruis zijn en een kleinere amplitude zullen hebben. Het algoritme zal op zoek gaan naar deze toon, hiervoor zoekt het naar de grootste waarde in de twee aangewezen kolommen. Hierbij worden een aantal eisen gesteld waaraan de gevonden waarden moeten voldoen.

1. Het verschil tussen de inkomende en uitgaande frequentie moet minimaal 2,5 Hz zijn.
2. Het verschil mag niet meer dan 60 Hz zijn.
3. De uiteindelijke snelheid mag niet hoger zijn dan 39 m/s.

Deze eisen worden gesteld om te zorgen dat het algoritme geen extreem hoge of extreem lage snelheden zal uitrekenen of dat deze de verkeerde toon eruit filtert. Een voorbeeld hiervan is opgenomen in Figuur 8, hierin zijn twee tonen te zien, één hiervan blijft vrijwel gelijk gedurende de passage. Door de eisen te stellen wordt voorkomen dat deze waarde wordt meegenomen in de uiteindelijke berekening.



Figuur 8: Voorbeeld van een passage met twee duidelijke tonen

Om te voorkomen dat direct een foutmelding wordt gegeven als de eerste poging niet aan de eisen voldoet, wordt de beginfrequentie vastgelegd en zal er een eindfrequentie bijgezocht worden. Als binnen vijftien pogingen geen match gevonden wordt zal gezocht worden naar een nieuwe beginfrequentie. Dit wordt ook gedaan als een snelheid is bepaald. Daarnaast is een maximumsnelheid ingesteld, dit is gedaan omdat het mogelijk is dat het binnen het frequentiebereik valt maar dat er een snelheid uitkomt die veel hoger is dan de baanvaknsnelheid.

Als twee punten worden gevonden die aan de eisen voldoen, wordt de snelheid bepaald volgens formule 4. Hierbij moet nog gecorrigeerd worden omdat de microfoon niet op het spoor is geplaatst. Deze correctie wordt gedaan met onderstaande formule

$$v_c = v_b \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{t \cdot v_b}{A_s}\right)\right) \quad (15)$$

waarin:

A_s	afstand tot het spoor	(m)
v_c	gecorrigeerde snelheid	(m/s)
t	tijd	(s)

Deze bewerking wordt in totaal vijf keer uitgevoerd voor vijf verschillende ingangsfrequenties. Van de vijf berekende snelheden wordt vervolgens de hoogste waarde uitgezocht die niet hoger is dan de baanvaknsnelheid plus 5 km/h. Dit om te zorgen dat treinen die iets harder rijden wel worden meegenomen. Er wordt vanuit gegaan dat treinen niet veel te hard rijden. Vervolgens worden van de vijf snelheden gekeken of ze binnen 30 km/h van de hoogste waarde liggen. Dit wordt gedaan om te

zorgen dat waarden die veel lager liggen eruit gefilterd worden omdat deze hoogstwaarschijnlijk een foutieve waarde geven. Ook wordt dit gedaan om te zorgen dat de gevallen waar geen snelheid bepaald kan worden eruit gehaald worden, (als geen snelheid berekend kan worden geeft het algoritme deze terug als een snelheid van 0 km/h). Van de waarden die aan alle eisen voldoen wordt het gemiddelde genomen, dit geldt als de berekende snelheid.

3.3 Praktijktests algoritme

Om de betrouwbaarheid van het algoritme te testen is deze vergeleken met de radar, welke wordt besproken in hoofdstuk 6, en wordt gekeken wat de afwijking is in de bepaalde snelheid. Hiervoor is van 51 passages, verdeeld over vijf typen treinen, de snelheid bepaald met zowel de radar als het algoritme. In Tabel 1 zijn de gemiddelde verschillen tussen radar en algoritme opgenomen. Alle meetgegevens zijn opgenomen in bijlage 9.1 en 9.2. Hierin is te zien dat er een groot verschil zit tussen de bepaalde snelheden. Enkele grote verschillen kunnen verklaard worden door een vreemde waarde van de radar of vanwege veel harmonische. Als de radar als uitgangspunt wordt genomen kan worden opgemerkt dat de akoestische snelheidsbepaling een behoorlijke afwijking heeft.

Tabel 1: Verschil tussen snelheden bepaald door radar en algoritme bij venster van 1500 ms

Type trein	Gemiddelde afwijking $\pm 4,5$ (km/h)	Gemiddelde afwijking zonder uitschieters $\pm 4,5$ (km/h)	Grootste verschil $\pm 4,5$ (km/h)	Kleinste verschil $\pm 4,5$ (km/h)
ICM	10	-	25	1
VIRM	21	10	16	3
SGM	21	15	62	2
Plan V	9	-	35	1
Goederentrein	12	-	20	6

Tabel 2: Verschil tussen snelheden bepaald door radar en algoritme bij venster van 1000 ms

Type trein	Gemiddelde afwijking $\pm 3,7$ (km/h)	Gemiddelde afwijking zonder uitschieters $\pm 3,7$ (km/h)	Grootste verschil $\pm 3,7$ (km/h)	Kleinste verschil $\pm 3,7$ (km/h)
ICM	9	-	17	2
VIRM	23	14	21	5
SGM	14	12	60	1
Plan V	12	-	40	1
Goederentrein	11	-	32	2

De onnauwkeurigheid in de snelheid wordt bepaald door de onnauwkeurigheid in de geluidssnelheid, de breedte van een frequentieband en de breedte van de tijdsbanden. De onnauwkeurigheid in de geluidssnelheid is afhankelijk van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur, hoe hoger de onnauwkeurigheid. Deze varieert tussen 0 en 30 graden Celsius tussen 0,3 m/s en 0,32 m/s.

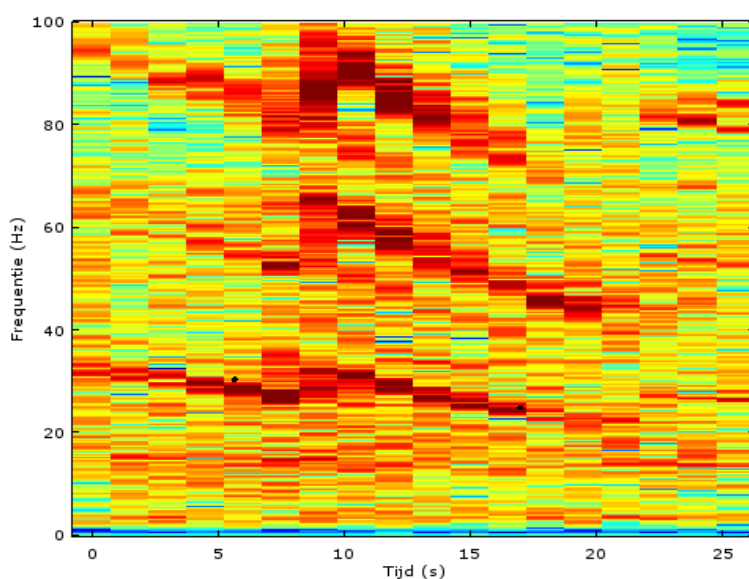
De onnauwkeurigheid voor de frequentiebanden tijdsband is afhankelijk van welke stapgrootte wordt gekozen. De gemiddelde onnauwkeurigheden zijn uitgerekend door alle significante waarden partieel te differentiëren. Dit geeft een theoretische onnauwkeurigheid van 3,7 km/h bij een venster van 1000 ms en van 4,5 km/h bij een venster van 1500 ms.

Een andere test is uitgevoerd door het algoritme van 800 passages te laten bepalen wat de snelheid is. Hierbij wordt niet gekeken wat de afwijking is in snelheid maar wordt gekeken naar of überhaupt een snelheid wordt uitgerekend. De resultaten hiervan zijn opgenomen in Tabel 3. Hieruit blijkt dat het algoritme een ander groot nadeel heeft, namelijk dat het van ongeveer één op de zeven treinen niet uit kan rekenen wat de snelheid ervan is.

Tabel 3: Meetresultaten onbekende treinen

1500 ms	Metingen	Aantal treinen	Aantal andere bronnen	Aantal gemiste treinen
Aantal	800	460	226	114
Percentage (%)	100	57,5	28,25	14,25
1000 ms	Metingen	Aantal treinen	Aantal andere bronnen	Aantal gemiste treinen
Aantal	800	438	226	130
Percentage (%)	100	54,75	28,25	17

Alle gegevens zijn afkomstig van de locatie Bathmen, dit is gedaan omdat het materieel dat op deze locatie voorbijkomt in de meeste gevallen een duidelijke toon produceert en dus met een grotere nauwkeurigheid gemeten kan worden. Treinen van het type LINT blijken veel laagfrequent geluid te maken waar heel moeilijk een duidelijke toon uit te halen is. Ook is het lastig te bepalen over welk deel de trein nadert en waar deze echt pal naast de microfoon zit. Hiervan is een voorbeeld te zien in Figuur 9, hierin zit veel ruis rond de luidste lijnen en zijn er veel harmonische. Dit maakt het lastig om de juiste lijnen bij elkaar te vinden. Overigens is deze locatie überhaupt lastig om te meten aangezien de treinen hier optrekken en afremmen voor een station, wat te zien is in de daling in de lijn.

**Figuur 9: Spectrogram van een SLT trein**

4. Snelheidsbepaling met een laser

Voor het bepalen van de snelheid met behulp van een laser wordt gebruik gemaakt van een afstandsmeter. Deze meet de afstand tot het voertuig, door het verschil in afstand tussen twee metingen te bepalen en de tijd tussen deze metingen, kan de snelheid van het voertuig worden bepaald. Het voordeel van het gebruiken van een laser is, dat deze niet alleen gebruikt hoeft te worden voor het bepalen van de snelheid. Door deze onder een hoek te plaatsen is het ook mogelijk om openingen tussen de wagons te meten. Dit is vooral interessant in het geval van goederentreinen voor het bepalen van het aantal wagons in een trein, aangezien bij deze treinen de lengte van de wagons niet vaststaat. Het aantal wagons is vooral interessant, omdat de spoorbeheerder, ProRail, niet rekent in lengte van treinen maar in aantal wagons. Hierop worden de berekeningen voor kosten en hinder van treinen bepaald.

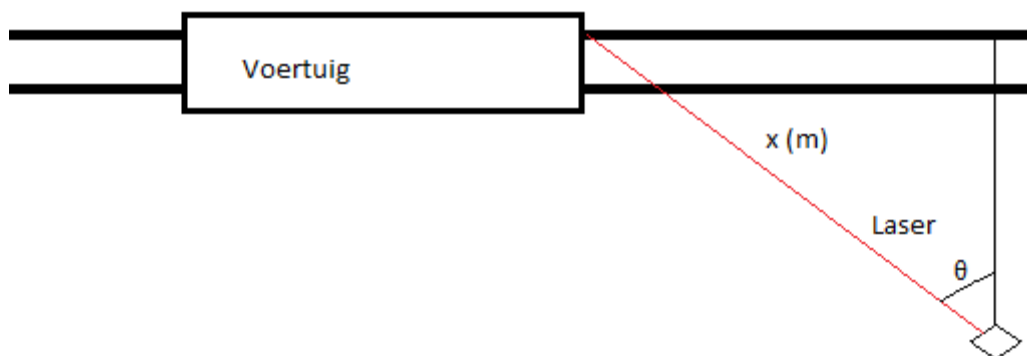
4.1 Snelheidsbepaling en tellen van aantal bakken

Bij het meten van de snelheid wordt het verschil tussen twee afstanden genomen. Deze afstanden worden bepaald door een laser afstandsmeter. Deze stuurt een lichtpuls uit en meet de tijd die het duurt tot deze weer opgevangen wordt. Hieruit wordt de afstand bepaald. Om de snelheid van een voertuig te bepalen zou de laser in het ideale geval parallel moeten worden gezet met de baan van het voertuig. Om echter het aantal bakken te tellen zou de ideale positie loodrecht op het voertuig moeten zijn. De meest praktische oplossing is de laser naast het spoor te zetten en deze in een hoek te zetten ten opzichte van het spoor zodat beide gemeten kunnen worden. Dit zorgt dat bij de snelheid rekening moet worden gehouden met een hoekverschil. In Figuur 10 is een schematische opstelling voor het gebruik van de laser getekend. Als de trein passeert zal de laser op een moment altijd over de voor- of achterkant van de trein gaan. Uit de gemeten afstanden en tijden is volgens formule 16 de snelheid van het voertuig te berekenen.

$$v = \frac{x}{t} \cdot \sin \theta \quad (16)$$

waarin:

v	snelheid	(m/s)
x	afstand	(m)
t	tijd	(s)
θ	hoek	(°)



Figuur 10: Schematische voorstelling laseropstelling

Voor het tellen van het aantal bakken is het van belang dat de frequentie groot genoeg is zodat het 'gat' tussen twee bakken gezien kan worden in de meetdata als een piek in de afstand. Hierbij is het grootste risico dat de laser te langzaam pulst en hierbij het gat tussen de bakken dus mist. In het geval van de Randstadrail is de afstand tussen twee treinstellen ongeveer een halve meter. De metro komt bij

het meetpunt in Pijnacker voorbij met een snelheid van ongeveer 80 km/h (22,2 m/s). De laser afstandsmeter heeft dan 0,0225 s de tijd om het gat te detecteren. Dit betekent dat de laser een pulssnelheid moet hebben die hoger is dan 44,4 Hz om minimaal één keer in het gat te schijnen en dit ook weer te ontvangen.

4.2 Meetopstelling

De opstelling voor de laser afstandsmeter is eerst getest op kantoor met behulp van een Knex voertuig en een Duplo-trein. Dit is gedaan om te testen of het mogelijk was de bakken te tellen en ook daadwerkelijk snelheden te meten aan de hand van de berekende afstanden, ook om het programma van de laser zelf te testen en te debuggen. De gebruikte laser afstandsmeter is de LIDAR lite van Pulsed Light, dit is een klasse 1 infrarood laser met een bereik van 60 meter, een onnauwkeurigheid van $\pm 0,025$ m en een maximale frequentie van 100 Hz. De metingen worden gedaan op een frequentie van 60 Hz.

4.2.1 Proefopstelling Knex en Duplo trein

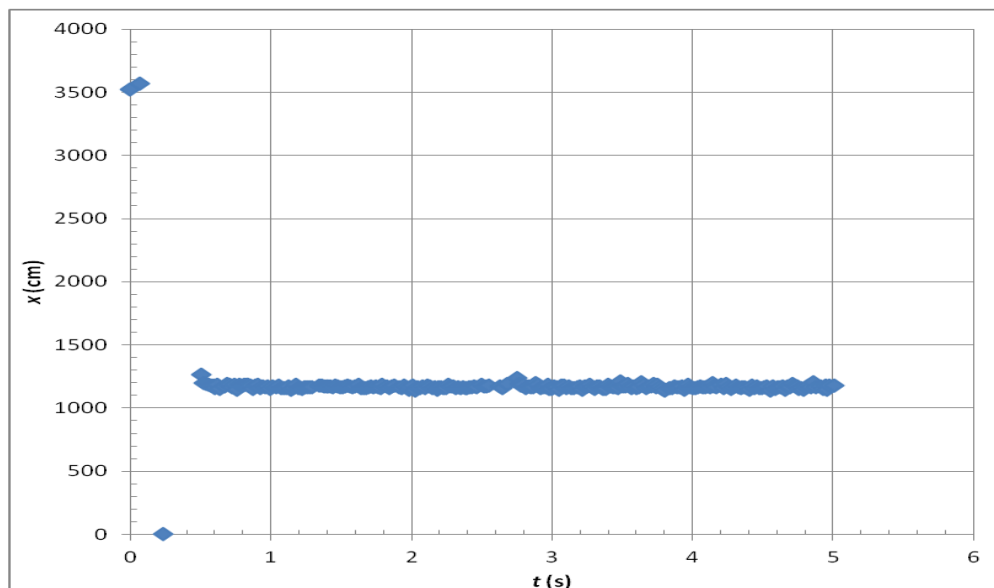
Voor het testen is in eerste instantie gemeten met een Knex voertuig waarop dozen zijn geplaatst. Het doel van deze test was bepalen of het mogelijk is om de snelheid te kunnen bepalen en om te testen of het gat tussen de dozen daadwerkelijk gedetecteerd kan worden. Daarna is deze test herhaald door een Duplo-trein neer te leggen en deze rondjes te laten rijden. Dit is gedaan om te testen of de kleine afstanden tussen de bakken gemeten kan worden (tussenruimte is slechts enkele centimeters). Omdat de snelheid van de trein ook hoger is dan die van het Knex voertuig is dit een betere praktijktest.

4.2.2 Testopstelling Randstadrail

Voor een test met echte voertuigen is besloten om de laser langs de Randstadrail in Pijnacker te hangen. Hiervoor is gekozen als eerste praktijktest vanwege de makkelijke bereikbaarheid van de locatie. Omdat hier meestal met twee treinstellen gereden wordt en dus ook getest kan worden of het mogelijk is de bakken daadwerkelijk te tellen. De laser is gericht op het gebied tussen de ramen en de wielen, zodat in elk geval niet naar binnen geschoten wordt. Hierdoor zou de afstand tot de laser in elk geval constant moeten zijn gedurende de passage en is alleen een verhoging zichtbaar in het gebied tussen de wagons.

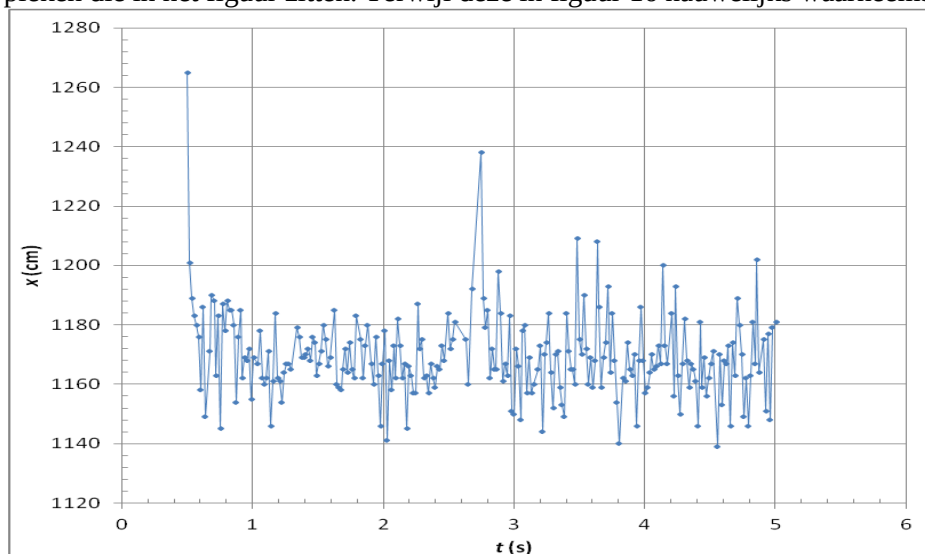
4.2.3 Beschrijving van het algoritme

Bij het ontwerpen van het algoritme met als doel het bepalen van de snelheid en het tellen van het aantal bakken. Wordt gebruik gemaakt van de data die is verkregen van de opstelling in Pijnacker. De laser meet bij het opstarten de gemiddelde afstand van dat moment. Om te zorgen dat alleen passerende treinen worden herkend wordt een meter van het gemeten gemiddelde afgetrokken. Deze fungeert als nulmeting. De afstandsmeter meet continue, pas als minimaal vijf opeenvolgende metingen worden gedaan waarbij de gemeten waarde onder de nulmeting ligt wordt er sprake van een event. Een event duurt net zo lang, tot de gemeten waarde weer boven de nulmeting ligt. Soms wordt een onjuiste waarde teruggegeven. Dit is meestal geen probleem, als een dergelijke onjuiste meting echter gedaan wordt vlak voor of vlak na een treinpassage wordt de foute waarde meegenomen in het event. Een voorbeeld van een dergelijk event is te zien in Figuur 11. De waarden rond de 1200 cm is de passage van de trein, terwijl de eerste drie waarden duidelijk een foutieve meting zijn.



Figuur 11: voorbeeld van ruwe meting met de laser

Om deze foute waarden eruit te filteren, wordt het gemiddelde bepaald en vervolgens van alle waarden afgetrokken. Als het verschil groter is dan de breedte van het voertuig wordt deze waarde verwijderd. De aangepaste grafiek zonder de uitschieters is opgenomen in Figuur 12. (hierin zijn de punten de daadwerkelijke meetwaarden, de lijn tussen de punten is opgenomen voor de duidelijkheid van de grafiek). Het naderen van de trein en de opening tussen twee wagons is waar te nemen als de twee pieken die in het figuur zitten. Terwijl deze in figuur 16 nauwelijks waarneembaar is.



Figuur 12: voorbeeld van meting zonder uitschieters

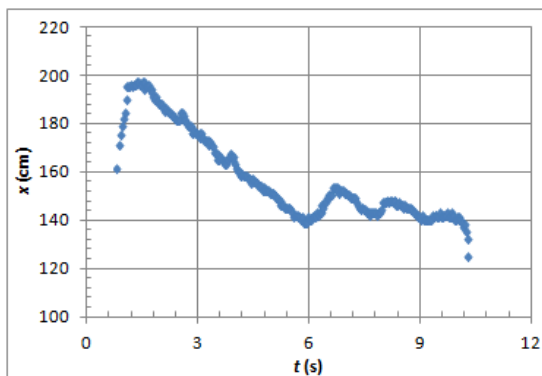
Het algoritme bepaald opnieuw het gemiddelde en zoekt naar punten die ver genoeg boven het gemiddelde liggen. De hoge pieken worden veroorzaakt door de openingen tussen de wagons. Aan de hand van deze pieken wordt dan het aantal bakken bepaald. Een lastig punt is de behoorlijke spreiding tussen de meetpunten, als de trein voorbij komt rijden en de afstand ongeveer gelijk blijft. Hierdoor is het lastig het gat tussen de wagons waar te nemen. Voor het bepalen van de snelheid wordt de helling genomen van de hoogste piek, omdat hier altijd de voor of achterkant van het voertuig beschenen wordt.

5. Meetresultaten lasermetingen

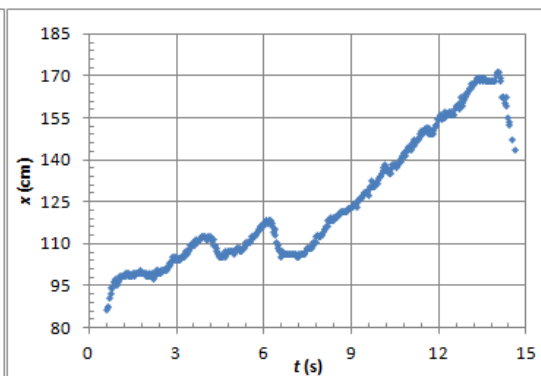
Bij elke test zijn verschillende metingen uitgevoerd. Hiervan zijn de belangrijkste in dit hoofdstuk opgenomen.

5.1 Meetresultaten Knex en Duplo treinen

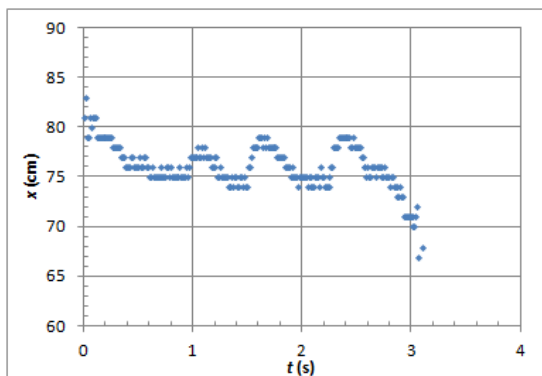
De eerste metingen met de Knex-trein waren bedoeld om te testen of het principe werkt met de aangekochte laser. Twee metingen hiervan zijn hieronder opgenomen in Figuur 13 en figuur 19. Hierbij is een tussenruimte van 10 cm tussen de dozen gebruikt. In deze is een duidelijk onderscheid te maken tussen de bakken. Wat hier opvalt is dat de lijn aan het begin en eind heel snel stijgt en afvalt. Hier is geen verklaring voor. Ook bij de metingen met de Duplo-trein, figuur 20 en figuur 21, is duidelijk het aantal bakken te tellen. Wat hier wel opvalt is de relatief grote spreiding tussen de punten als het treintje voorbij komt en de afstand constant blijft.



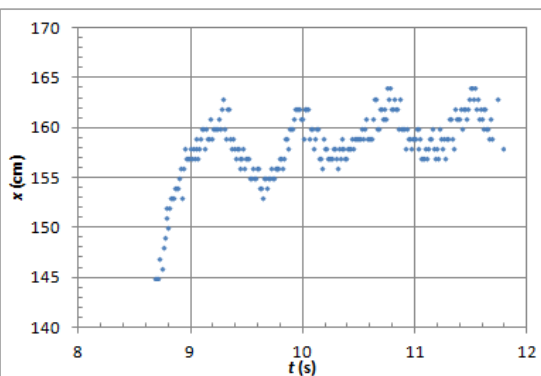
Figuur 13: Knex meting met naderende trein



Figuur 14: Knex meting met verwijderende trein



Figuur 15: Duplo meting met verwijderende trein



Figuur 16: Duplo meting met naderende trein

Met deze tests is aangetoond dat het mogelijk is om met deze laser onderscheid te maken tussen de verschillende wagons en de snelheid bepaald kan worden. Vanwege de kleine afstand en de lage snelheid van de treinen is nog een praktijktest uitgevoerd met metrovoertuigen van de Randstadrail. Hier wordt de laser getest in realistische omstandigheden zoals: snelheid, afstand, afstand tussen wagons en weersomstandigheden.

5.2 Meetresultaten Randstadrail

Bij de metingen aan de Randstadrail is de laser opgehangen bij een bestaand meetpunt op een afstand van ongeveer 14 meter van de rails. De hoek met de rails bedraagt ongeveer 55 graden. Voor het meten van het aantal wagons is de data van zeventien dagen bekeken, dit komt overeen met 4194 events. Van deze events is het aantal wagons geteld en gecontroleerd. De controle van het aantal wagons wordt gedaan door het aantal metingen te delen door de updatefrequentie. De tijdsduur van de passage van een enkel treinstel duurt ongeveer twee seconden duurt en de passage van een dubbel treinstel ongeveer vier seconden. Hiermee kan redelijk bepaald worden wat het aantal wagons is dat voorbijkomt. Deze controle wordt vergeleken met de bepaling uit het algoritme. Hieruit volgt dat het algoritme en de controle in 2452 gevallen overeenkomen, een percentage van 58,5%. Dit lage percentage heeft meerdere oorzaken. Als eerste is de controle niet helemaal betrouwbaar, uit een analyse van de data blijkt dat soms gedurende een passage punten niet zijn gemeten. Als tweede gebeurt het dat de laser op het achterste stuk van het eerste treinstel mikt, daardoor is de volgende meting op de voorkant van het tweede treinstel te ver naar de zijkant en is het gat niet goed op te merken tussen de spreiding.

Een dergelijke controle is ook gedaan met de snelheid. De lengte van de voertuigen is bekend, hiermee kan een benadering van de snelheid gemaakt worden en vergeleken worden met de bepaling uit het algoritme. Met deze controle kan in elk geval gezegd worden of het mogelijk is met de laser de snelheid van een voertuig te bepalen. Voor elke passage is het verschil bepaald tussen de controlesnelheid en de berekende snelheid. Het gemiddelde hiertussen is van 30,5 km/h. Het kleinste verschil is 0,01 km/h en het grootste verschil is 606,8 km/h. De laser heeft een gemiddelde theoretische onnauwkeurigheid van 0,4 km/h. Deze onnauwkeurigheid is bepaald met formule 17. De tijd wordt hierin niet meegenomen omdat deze significant veel kleiner is ten opzichte van de andere waarden.

$$\Delta v = \left(\frac{\Delta x}{x} \cdot \frac{\Delta \theta}{\theta} \right) v \quad (17)$$

waarin:

Δv	onnauwkeurigheid in snelheid	(km/h)
Δx	onnauwkeurigheid in afstand	(m)
$\Delta \theta$	onnauwkeurigheid in hoek	(°)

De snelheden zijn globaal vergeleken met de radar. Aangezien het meetpunt vlak bij een station staat waar wordt afgeremd en opgetrokken. De radar meet tot een afstand van 150 meter in de richting van een station. De laser staat bij het meetpunt en zou dus altijd hogere snelheden dan de radar moeten meten. Om toch een beeld te krijgen van de verschillen tussen de metingen van radar en laser zijn van een tiental passages de snelheden opgenomen in Tabel 4. Hier is te zien dat de snelheidsbepaling nog wat te wensen overlaat, in vier gevallen is een lagere snelheid gemeten dan de radar. Er zitten ook een paar resultaten tussen die een realistische waarde geven. Voor een betere test wat betreft het meten van de snelheid moet een punt gekozen worden waar de voertuigen een vrijwel constante snelheid rijden over het gebied dat de radar en de laser meten.

Tabel 4: Meetresultaten Pijnacker

Laser ±0,4 (km/h)	Verwachte snelheid ±1 (km/h)	Radar ±0,5 (km/h)
57,6	63,5	56,7
68,8	75,8	61,1
42,3	67,6	56,6
35,2	49,2	66,5
66,7	69,5	61,5
8,8	54,3	68,0
61,7	40,0	68,3
66,4	72,2	58,6
77,6	67,0	55,2
42,2	65,6	52,3
65,2	72,0	66,6

6. Snelheidsbepaling met de radar

De snelheidsbepaling van de radar werkt met een combinatie van de laser en het dopplereffect. Een signaal wordt uitgestuurd, dit botst met het voertuig en wordt weer opgevangen. Uit de dopplerverschuiving wordt de snelheid van het voertuig bepaald.^[11] Bij de radar wordt niet de afstand gemeten maar de tijd tussen twee metingen. Uit deze metingen wordt met het dopplereffect de snelheid bepaald.

De gebruikte radar is de ViaRadar van Viatronics. Deze radar zendt uit in de K-band ($24,125 \pm 1$) GHz, heeft een straalbreedte van 12° en meet de snelheid met een onnauwkeurigheid van 0,5 km/h. De radar meet de snelheid 1 keer per seconde. Dit is wat wordt weergegeven en ook wat wordt gebruikt als ijsnelheid. Deze radar wordt gebruikt als ijking voor de snelheidsbepaling door zowel de laser als het akoestische model. Er is voor deze radar gekozen vanwege zijn lage vermogen (1,26 W nominaal), zijn nauwkeurigheid en het kleine formaat. Deze wordt opgehangen onder een zo klein mogelijke hoek met het spoor voor een optimale meting.

7. Beschouwing

Het meten van de snelheid met de radar heeft de volgende nadelen: de hoge aanschafprijs en de onbetrouwbare levering van de fabrikant. Daarom is gezocht naar alternatieven hiervoor, welke gevonden zijn in een akoestische snelheidsbepaling en een laser afstandsmeter.

Het belangrijkste voordeel van een akoestische snelheidsbepaling is dat deze werkt met het geluid dat wordt gemaakt bij een passage. Aangezien vaak al een microfoon geplaatst is voor het bepalen van de geluidsniveaus, hoeft verder geen apparatuur geplaatst te worden om een inschatting te krijgen van de snelheid. Voor een preciezere snelheid zou een luchtdruk-, luchtvochtigheid-, en temperatuurmeter opgehangen kunnen worden. De kosten van een dergelijke systeem zijn lager dan een radarsysteem. Als gekozen wordt dit niet direct bij het systeem te plaatsen moet een connectie zijn met een ander systeem dat deze grootheden wel meet. Ook heeft regen geen invloed op de metingen, waar de radar hele lage snelheden meet als het regent. Het systeem heeft echter ook een paar nadelen: zo is de onnauwkeurigheid redelijk groot. Afhankelijk van het type trein dat wordt gemeten is de afwijking met de radar gemiddeld tussen de 10 en 20 km/h. De kwaliteit van de meting is afhankelijk van de kwaliteit van de gemaakte opname. De meting moet onverstoord zijn, er mag bijvoorbeeld geen sprake zijn van dubbele passages, andere motorvoertuigen mogen niet te horen zijn en zowel het naderen van de trein als het weggrijden moet hoorbaar zijn op de opname. Dit betekent dat een akoestische manier van snelheidsbepaling alleen gebruikt kan worden buiten de bebouwde kom en op punten waar zelden twee treinen tegelijk passeren. In het geval dat op de geluidsopname geen duidelijke passage hoorbaar is zal geen snelheid worden uitgerekend. Dit is ook het grootste nadeel. Als gemeten moet worden op een rustige locatie en weinig waarde wordt gehecht aan precisie is deze methode een goedkope oplossing voor het meten van de snelheid.

Het bepalen van de snelheid met een laser is een duurdere optie dan de akoestische oplossing maar wel veel goedkoper dan de radar. De snelheid kan nauwkeurig worden gemeten en gelijktijdig kan ook het aantal wagons waaruit de trein bestaat worden geteld. Het voordeel van dit systeem is de lage aanschafprijs en vanwege het kleine formaat past het gemakkelijk in alle gebruikte meetkastjes. De laser heeft ook geen last van regen. Nadelen zijn: het uitrichten van de laser, omdat van een infrarood laser nooit precies bekend is waar de spot op gericht staat. Ook is het lastig de hoek tussen laser en spoor precies te bepalen wat invloed heeft op de berekening van de snelheid. Daarbij komt het nog te vaak voor dat de laser punten mist en is de spreiding in afstand erg groot tussen de verschillende metingen. Ook dubbele passages kunnen niet gemeten worden, als twee treinen tegelijk langskomen zal alleen de voorste gemeten worden. Ook is de frequentie nog te laag waardoor de openingen tussen de wagons soms gemist worden.

8. Conclusie

Uit de metingen met de akoestische snelheidsbepaling is gebleken dat het mogelijk is op deze manier de snelheid te bepalen. Deze methode heeft een aantal nadelen. Hiervan is de belangrijkste, treinen worden gemist en hiervan dus geen snelheid kan worden uitgerekend. Daarbij is de relatief grote onnauwkeurigheid (10-20 km/h) een nadeel als precies gemeten moet worden. Het verschil tussen twee vensterbreedtes is ook lastig te zeggen, bij 1500 ms is de onnauwkeurigheid iets groter maar worden meer treinen gemeten dan bij een venster van 1000 ms. Daarentegen is het een goedkoop alternatief voor de radar als de klant niet geïnteresseerd is in de exacte snelheid van elk voertuig, maar slechts een globale indruk wil van de gereden snelheden. Er zijn ook nog mogelijkheden om de software op enkele punten te veranderen wat mogelijk tot een verbetering kan lijden. De frequenties worden gemeten in een enkel tijdblok, er kan gekozen worden om, als de snelheid niet kan worden bepaald, te zoeken in een blok ervoor of erna. Dit kan vooral handig zijn in gevallen waarbij de overgang niet duidelijk gedefinieerd is. Ook kan ervoor worden gekozen te gaan zoeken in hogere frequenties dan nu is gedaan.

Uit de metingen met de laser is gebleken dat het mogelijk is de snelheid te bepalen met een onnauwkeurigheid van ongeveer 0,4 km/h. Er is ook gebleken dat de gemeten snelheid behoorlijk afwijkt van de werkelijke snelheid. Dit heeft te maken met de updatefrequentie van de laser. Deze is ingesteld op 60 Hz, met deze frequentie en onder een hoek van ongeveer 55 graden worden slechts twee of drie metingen op de voorkant van het voertuig gedaan. Dit is te weinig voor een nauwkeurige snelheidsbepaling. Om dit te verbeteren zou, of de updatefrequentie omhoog moeten, of de hoek waaronder de laser gericht is moet kleiner worden. Beide methoden zorgen ervoor dat meer meetpunten van de voorkant worden genomen en zullen dus de betrouwbaarheid van de snelheidsbepaling verhogen.

Wat betreft het tellen van het aantal bakken, hiervoor zou ook de updatefrequentie omhoog moeten zodat altijd minimaal één meetpunt ver op de tweede wagon gericht wordt. Hiervan zou de nauwkeurigheid verbeteren als de hoek groter wordt zodat deze meer loodrecht op het spoor komt te staan. Omdat het hoofddoel van de laser is om goederenwagons mee te tellen is het waarschijnlijk verstandiger om de laser loodrecht op het spoor te zetten en het aantal wielen te tellen. Uit de configuratie van de wielen kan dan worden bepaald wat de snelheid is. Dit moet dan worden uitgevoerd met een programma dat aangeeft wat voor type passagierstrein, of in het geval van een goederentrein wat voor type locomotief voorbij komt. Aangezien de lengte tussen de wielen en tussen de assen van elk type passagierstrein en elke locomotief vast ligt kan hiermee ook de snelheid bepaald worden. Deze typeherkenning kan met audio of beeldherkenning gedaan worden.

Eventueel zou ook nog gekeken kunnen worden, als uitbreiding van het tellen van het aantal wagons, naar de of het mogelijk is met bijvoorbeeld een lichtsluis te meten hoe hoog de wagons boven het spoor hangen. Hieruit zou dan niet alleen het aantal wagons geteld kunnen worden wellicht ook een inschatting gemaakt kunnen worden van het gewicht van de lading.

9. Bibliografie

1. **Taylor, Phil.** Effectrode.com. *Effectrode*. Geraadpleegd op: 28 April 2015.
<http://www.effectrode.com/tube-vibe/a-little-vibe-history/>.
2. **Giancoli, Douglas C.** *Natuurkunde Deel 1*. Amsterdam : Pearson Education Benelux, 2010. 978-90-430-1324-6.
3. *Environmental effects on the speed of sound*. **Bohn, Dennis A.** 4, Mukilteo WA : J. Audio Eng. Soc. , 1988, Vol. 36.
4. **Verkerk, G., et al.** *Binas*. Groningen/Houten : Noordhoff Uitgevers bv, 2008. 978-90.01-89380-4.
5. Vapour pressure of water. *Wikipedia.org*. Geraadpleegd op: 20 April 2015.
http://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water.
6. **Benesty, Jacob, Sondhi, M. M., Huang, Yiteng.** *Handbook of speech processing*. New York, NY : Springer , 2008.
7. **LDS-group.** *Universität Würzburg Fakultät für Physik und Astronomie*. 2003. Geraadpleegd op: 28 April 2015. <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~praktiku/Anleitung/Fremde/ANO14.pdf>.
8. **Sas, Prof. Dr. Ir. P.** *Hogere Kursus Akoestiek, On digital signal processing for system identification: basic theory and applications*. Nieuwegein : Brüel & Kjaer.
9. **Wikipedia.** *Window_function*. Geraadpleegd op: 26 April 2015.
http://en.wikipedia.org/wiki/Window_function.
10. **Rüdiger G. Wettschureck, Günther Hauck, Rolf J. Diehl, Ludger Willenbrink.** *Handbook of Engineering Acoustics*. Berlijn : Springer-Verlag, 2013.
11. **Bailey, William G.** *The Encyclopedia of Police Science*. USA : Routledge, 1995. Vol. 1995. 0815313314.

