

Regelgebaseerd modulaties genereren met de MALS-machine

W.T. van Vliet

Juli 2017



Bachelor Kunstmatige Intelligentie, UU
15 ECTS

Begeleider: dr. ir. J.M. Broersen
Tweede beoordelaar: dr. ir. G. Bloothoof

Samenvatting

In deze scriptie wordt een algoritme voorgesteld dat in staat is om via gegeven kennis vanuit de muziektheorie en bestaande technieken vanuit de kunstmatige intelligentie zelfstandig modulaties te genereren. Het streven is om deze modulaties zo vloeiend mogelijk te laten klinken en tegelijkertijd de regels die de klassieke harmonieleer voorschrijft te waarborgen. Diverse technieken vanuit de artificiële intelligentie worden gebruikt, zoals contextvrije grammatica's, rule based systems (Prolog) en zoekalgoritmen op grafen. De bestaande harmonieleer draagt aan het generatieproces bij door informatie te verschaffen over akkoordstructuren, stemvoeringsregels en modulatietechnieken.

Trefwoorden: Algoritmische compositie, moduleren via spilakkoorden, kunstmatige intelligentie.

Inhoudsopgave

1	Introductie	3
2	Muziektheoretische achtergrond	5
2.1	Romeinse trappenbecijfering	5
2.2	Akkoordfuncties	8
2.3	Moduleren	9
2.3.1	Manieren om te moduleren	10
2.3.2	Modulaties schrijven	10
3	Technische achtergrond	13
3.1	Het modulatiepad genereren	13
3.2	Akkoordprogressies genereren	19
3.3	Akkoordprogressies harmoniseren	23
3.3.1	Akkoorden harmoniseren met aandacht voor de stemvoerings- en verdubbelingsregels	24
4	Implementatie	25
5	Resultaten	30
5.1	Het genereren van het modulatiepad	30
5.2	Het genereren van de akkoordstructuur	33
5.3	Het harmoniseren van de akkoordstructuur	35
5.4	Resultaten van proefpersonen	36
6	Discussie en conclusie	40
7	Dankwoord	42
8	Bibliografie	43
	Appendices	44
A	Fragmenten in vragenlijst	44
B	Reacties van participanten	56

1 Introductie

Al sinds het ontstaan van de moderne computer en kunstmatige intelligentie zijn wetenschappers op zoek naar algoritmen die muziek componeren, analyseren en genereren. De uitkomsten van deze onderzoeken zijn veelbelovend als het gaat om relatief simpele Bach-koraaltjes of harmonisatiealgoritmen, maar kunnen nog niet tippen aan grote en meer ingewikkelde stukken die gecomponeerd zijn door grote componisten.

In het verleden zijn er verschillende algoritmen gebruikt om muziekstukken te genereren of te harmoniseren. Onderzoek is gedaan naar het genereren van muziek door middel van neurale netwerken (Mozer & Soukop, 1991) en andere leeralgoritmen (Liang, 2016), maar ook genetische algoritmie is gebruikt voor het genereren van melodielijnen en het harmoniseren daarvan (Freitas & Guimaraes, 2011). Stuk voor stuk zijn de algoritmen die in deze onderzoeken gebruikt worden welbekend binnen de kunstmatige intelligentie.

In dit onderzoek wordt naar een specifiek subprobleem bij het automatisch genereren van muziek gekeken, namelijk het moduleren¹. In veel muziekstukken moet volgens de klassieke vormleer gemoduleerd worden (bijvoorbeeld in sonate-vormen en rondo-vormen). Een aanpak om dergelijke stukken automatisch te kunnen genereren, is om twee stukken in twee verschillende toonsoorten te componeren en deze aan elkaar te plakken door middel van een modulerend algoritme.

Het programma dat in deze scriptie voorgesteld wordt, de *Modulatie-Assemblage via Laddereigen Spilakkoorden-machine* (MALS-machine), kan, gegeven twee toonsoorten, de structuur van een dergelijke transitie automatisch genereren door het gebruik van laddereigen spilakkoorden: akkoorden die twee toonsoorten gemeen hebben. Met behulp van een graaf die opgesteld kan worden op basis van deze spilakkoorden, een grammatica die akkoordprogressies beschrijft, en een rule-based system dat regels beschrijft om deze akkoordprogressies met daadwerkelijke noten en melodielijnen te vullen, wordt deze modulatie uiteindelijk automatisch verwezenlijkt. De vakgebieden informatica, taalkunde en logica komen daarmee duidelijk voor in dit onderzoek.

Een verder (maatschappelijk) relevante vraag die bij ‘kunstzinnige’ AI’s recentelijk veelbesproken is, is de vraag in hoeverre computers of algoritmen creatief kunnen zijn. Deze vraag heeft, gezien het doel van het onderzoek en los van alle definitiekwesties rondom het woord ‘creatief’, bij voorbaat een negatief antwoord. Het programma genereert enkel modulatiestructuren en gebruikt daarbij voorgeprogrammeerde regels. Door waar nodig willekeurige keuzes te maken, wordt een deterministische output uitgesloten. Het algoritme werkt in een duidelijk bestaand kader (namelijk dat van de bestaande regels die de muziektheorie voorschrijft) en maakt in die zin geen eigen of experimentele keuzes. Arnold Smeulders zegt in de bijlage van De Volkskrant, in het artikel *Help! Zijn computers nu ook al creatief?* (Verhagen, 2017): “Bij kunst gaat het

¹Het veranderen van toonsoort binnen een muziekstuk.

ook over het creatieve moment, over disruptieve doorbraken.”
Bij de MALS-machine is van geen van beide sprake.

Als voorkennis is enige kennis van de muziektheorie vereist: hoe majeur- en mineurtoonsoorten opgebouwd worden, muzikale intervallen, kennis van typen versierende noten (doorgangsnoten en wisselnoten) en de beheersing van het notenschrift. Deze voorkennis wordt in dit onderzoek aangenomen.

2 Muziektheoretische achtergrond

Om een weg te kunnen vinden in het componeren van muziek en het implementeren van automatische muziekcompositie is veel kennis nodig van de regels en richtlijnen, die componisten en muziekwetenschappers door de jaren heen gebruikt en nageleefd hebben. Gelukkig biedt de muziektheorie antwoord op veel vragen en biedt het een goede basis bij het componeren van muziek. Hoewel de regels vrij ‘hard’ aanvoelen, dient de opmerking gemaakt te worden dat zij meer als richtlijnen dan als eisen geïnterpreteerd moeten worden.

Om modulaties te schrijven is er kennis nodig van de muziektheorie. Uiteraard is de hoofdvraag hoe componisten überhaupt van toonsoort wisselen in hun muziekstukken en hoe zij dat op een vloeiende manier doen. Relevant hierbij zijn de volgende twee stappen. Als eerste moet er een onderliggende structuur gemaakt worden, die beschrijft hoe de modulatie zal gaan verlopen. Vervolgens moet deze structuur opgevuld worden met akkoorden die elkaar logisch opvolgen. Hieronder volgen enkele uitkomsten die de muziektheorie ons biedt voor deze problemen.

De delen van de muziektheorie die in dit hoofdstuk beschreven worden, zijn om verschillende redenen van belang bij het muziekgeneratieproces dat de MALS-machine doorloopt. Om die reden verdienen ze aandacht in dit deel van deze scriptie.

De muziektheorie zoals beschreven in dit hoofdstuk is gebaseerd op de richtlijnen van de musicoloog Steven Laitz in zijn boek *The Complete Musician* (2012).

2.1 Romeinse trappenbecijfering

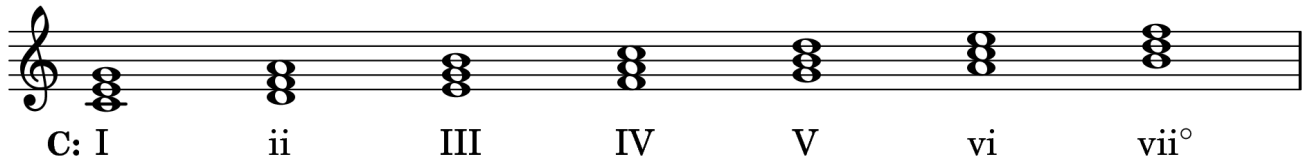
Om akkoorden gemakkelijk te benoemen en een beschrijving op hoog niveau te kunnen geven van een akkoordstructuur, wordt in de muziektheorie de *Romeinse trappenbecijfering* gebruikt. Deze weergave van akkoorden zorgt ervoor dat muziekstukken makkelijk geanalyseerd kunnen worden. De MALS-machine gebruikt een representatie in Romeinse trappenbecijfering bij het genereren van akkoorden.

In de muziektheorie worden drie- en vierklanken in een bepaalde toonsoort aangeduid met Romeinse nummers. Een akkoord gebouwd op de eerste noot in een majeurtoonladder, zoals C-groot, wordt geschreven als I, een akkoord op de derde als III, et cetera. Er wordt hierin onderscheid gemaakt in grote (majeur) en kleine (mineur) drieklanken². Een grote drieklank wordt beschreven met ‘grote’ Romeinse nummers (I, III, et cetera), en kleine drieklanken met ‘kleine’ Romeinse cijfers (i, ii, et cetera). Verminderde drieklanken³ worden beschreven met

²Drieklanken bestaan uit een terts en een kwint bovenop de grondtoon. De kwaliteit van de terts en de kwint bepaalt of een drieklank majeur of mineur is. Er vanuit gaande dat de kwint rein is, geldt: Een grote terts maakt een majeur of grote drieklank. Een kleine terts maakt een mineur of kleine drieklank.

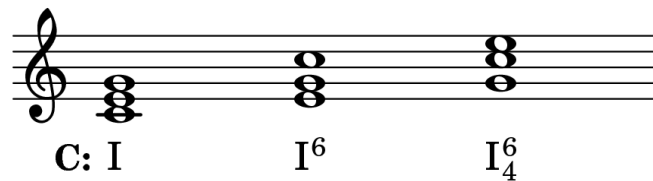
³Een verminderde drieklank bestaat uit een kleine terts en een verminderde kwint.

kleine Romeinse cijfers, met een ° als aanduiding dat de drieklank verminderd is. In figuur 1 is de trappenbecijfering voor C-groot weergegeven. Op elke toon uit deze toonladder is een drieklank gebouwd en deze is becijferd.



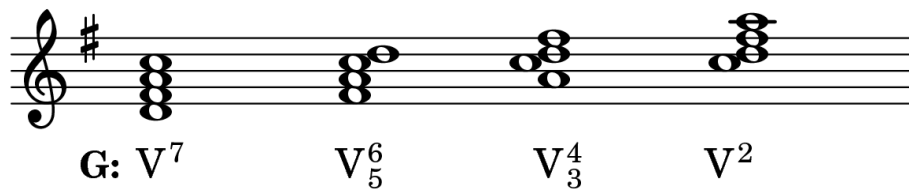
Figuur 1: Romeinse trappenbecijfering voor C-groot

Het is ook mogelijk om de als laagste toon de terts of kwint van het akkoord te nemen. Indien de laagste toon de terts is, wordt er gesproken van een sextligging. Indien de laagste toon de kwint is, wordt dat een kwart-sextligging genoemd. In Romeinse trappenbecijfering worden omkeringen aangeduid met cijfers, zoals getoond wordt in figuur 2.



Figuur 2: Romeinse trappenbecijfering voor I, I in sextligging en I in kwart-sextligging

Ook vierklanken⁴ kunnen met de Romeinse trappenbecijfering weergegeven worden. Om aan te duiden dat er een septiem toegevoegd wordt, wordt er ⁷ toegevoegd aan de becijfering (V⁷). Ook vierklanken kunnen omgekeerd worden. In Romeinse trappenbecijfering worden deze omkeringen weergegeven zoals in figuur 3.



Figuur 3: Trappenbecijfering van V-septiem in G-groot. Van links naar rechts: V-septiem, V kwint-sextligging, V terts-kwartligging en V-secundeligging

De Romeinse trappenbecijfering wordt altijd gebaseerd op de toonsoort waarin een stuk staat. Staat een stuk in F-groot, dan is I het akkoord F-A-C en staat een stuk in B-groot dan is I het akkoord B-D#-F#. De toonsoort wordt altijd voor een reeks Romeinse cijfers vermeld. Merk

⁴Een vierklank is een drieklank met een toegevoegd septiem.

ook op dat alleen de basnoot bepaald om welke drieklank of welke omkering het gaat. Het akkoord C-E-G in C-groot in sextligging wil zeggen dat de laagste noot de E is, maar dat zegt nog niets over de andere stemmen die het akkoord invullen. De akkoorden E-C-G (van bas naar alt) en E-G-C worden dus beide beschreven met I⁶.

Aparte gevallen van de Romeinse becijfering komt voor bij de verminderde sextakkoorden⁵: het Napolitaans en Italiaanse sextakkoord, het Germaans kwint-sextakkoord en het Franse tertskwartakkoord. Deze akkoorden zijn gealtereerd en hebben daarom een aparte aanduiding. Deze worden respectievelijk met N⁶, It⁶, Ger⁶₅ en Fr⁴₃ beschreven.

De Romeinse trappenbecijfering kan gebruikt worden om akkoordprogressies te analyseren en overzichtelijk te maken. Door een muziekstuk van Romeinse trappenbecijfering te voorzien, krijgt het meer structuur. In figuur 4 is een koorstukje van J.S. Bach voorzien van trappenbecijfering.

The image shows a musical score for two staves (treble and bass clef) in D major and common time. The score consists of eight measures. Below the staves, Roman numerals indicate the chord progression for each measure: D: I, IV, I⁶, ii⁷, vii^{o6}, I, V, 7, and I with a fermata.

Figuur 4: J.S. Bach, “*Wie schön leuchtet der Morgenstern*”, voorzien van Romeinse trappenbecijfering

⁵Verminderde sextakkoorden zijn gealtereerde akkoorden. In deze scriptie wordt alleen het Germaans kwintsext-akkoord gebruikt. Dit akkoord bestaat uit de verlaagde zesde trap, de eerste trap, de verlaagde derde trap en de verhoogde vierde trap van de toonsoort. In C-groot is dit dus het akkoord A^b-C-E^b-F[#]. Het Germaanse akkoord wordt enkel in kwintsext-licging gebruikt. Merk op dat dit akkoord niet laddereigen is: het is gealtereerd en komt dus niet van nature in een toonsoort voor. Toch is gekozen voor de implementatie ervan om kortere modulatiepaden te stimuleren.

2.2 Akkoordfuncties

Om onderliggende akkoordstructuren te genereren, is het van belang om te weten welke functies akkoorden in een muziekstuk hebben en waarvoor die functies dienen. Niet elke combinatie van akkoorden blijkt even krachtig en vloeiend te verlopen. In het genereren van een akkoordstructuur dient de MALS-machine hier rekening mee te houden.

Akkoorden hebben altijd een functie in de akkoordprogressie van een stuk. Met behulp van een reeks drie- en vierklanken kan een componist spanning opbouwen of emotie opbouwen. Er zijn grofweg drie akkoordfuncties te onderscheiden: de tonica, de predominant en de dominant.

De *tonica* (T) is de veilige thuishaven van een muziekstuk: het is gebouwd op de grondtoon van een toonsoort en een stuk begint en eindigt vaak op dit akkoord. Het akkoord op de eerste trap van de toonsoort (I of i) is de tonica van de toonsoort.

De *predominant* (PD) bouwt lichte spanning op en kan zowel oplossen in een dominant als een tonica. Onder predominanten vallen ii^(o), IV en de verminderde sextakkoorden. In mineurtoonsoorten wordt ii^o vrijwel altijd in sextligging gebruikt. Predominanten hebben de neiging om in dominanten op te lossen.

De *dominant* (D) creëert instabiliteit en spanning in een muziekstuk en heeft de neiging om op te lossen in de tonica. Onder dominanten vallen V⁽⁷⁾ en vii^o. Een belangrijke notitie is dat de vijfde trap als dominant altijd groot is en de zevende trap altijd verminderd. Dit, terwijl deze akkoorden niet laddereigen voorkomen in mineurtoonsoorten. Dat betekent dat de vijfde trap in een mineurtoonsoort een accidentie (verhoging op de tert) krijgt om een groot akkoord te creëren. De zevende trap krijgt in mineur een accidentie (verhoging op de grondtoon) om deze verminderd te maken. Het is cruciaal dat deze akkoorden groot en verminderd zijn, omdat zij anders hun dominantfunctie verliezen. Daarnaast wordt de zevende trap vrijwel alleen maar in sextligging gebruikt.

De bovenstaande functies zijn van groot belang bij het schrijven van een muziekstuk en het vaststellen van de toonsoort. Door combinaties van akkoorden tot muzikale zinnen en cadensen te verwerken, kan een componist een gevoel van stabiliteit of afronding geven. De vaste volgorde van een muzikale zin is tonica – predominant – dominant – tonica ($T - PD - D - T$). Afhankelijk van welke akkoorden een componist gebruikt, wordt een zin sterker of zwakker. Tevens komen de combinaties $T - PD - T$ en $T - D - T$ voor.

Een deel van een muzikale zin wordt een *cadens* genoemd, als een opeenvolging van minimaal twee akkoorden een duidelijk einde biedt aan deze muzikale zin. De zogenoemde authentieke cadensen bestaan uit de combinatie V⁽⁷⁾-I (of V⁽⁷⁾-i) en worden het meest gebruikt om de toonsoort van een stuk vast te stellen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een *Perfekte Authentieke Cadens* (PAC) en *Imperfekte Authentieke Cadens* (IAC). Bij een PAC zijn de akkoorden V en

I/i in grondligging en de sopraan verdubbelt in het laatste akkoord de grondtoon. Bij een IAC is dit niet het geval. Een PAC is de sterkste cadens als het gaat om het vaststellen van de toonsoort.

Merk op dat de eerder genoemde muzikale zinnen niet specifiek één akkoord aanduiden. Een combinatie van verschillende akkoorden met predominantfunctie achter elkaar, wordt in zijn geheel aangeduid als PD. Sterker nog, de tonica kan dermate uitgebreid worden dat deze zelfs akkoorden met andere functies kan bevatten. Door zwakke muzikale zinnen te schrijven, met zwakke cadensen (IACs), kan een componist de tonica uitbreiden met kleinere $T - PD - D - T$ onderverdelingen. De akkoorden worden vaak omgekeerd om hun functies te verzwakken. Deze onderverdelingen worden *embedded phrase models* (EPMs) genoemd en dragen bij aan de finaliteit van de slotcadens en de emotie in een stuk. Zij worden niet gezien als aparte muzikale zinnen, maar als uitbreiding van de tonica. Het uitbreiden van de tonica, predominant of dominant wordt ook wel *prolongatie* genoemd.

De derde en zesde trap zijn qua akkoordfunctie aparte gevallen. Dit zijn zogenoemde medianten en dienen als uitbreiding van de tonica. De zesde trap (VI in mineur, vi in majeur), of submediant, heeft echter een aantal andere functies. Ten eerste kan de submediant gebruikt worden als uitbreiding van de tonica, zoals eerder genoemd. Ten tweede kan de submediant gebruikt worden om een bedrieglijk slot te maken (de progressie V-vi, waarna een PD volgt). Als derde en laatste functie kan de zesde trap gebruikt worden als PD.

De derde trap, ofwel de *mediant*, kent meerdere functies en uitzonderingsgevallen. In deze scriptie zal deze trap buiten beschouwing worden gelaten om de complexiteit in te perken. Hetzelfde geldt voor de zevende trap in mineurtoonladders (VII).

2.3 Moduleren

Als laatste muziektheoretische onderdeel in deze scriptie wordt besproken hoe er gemoduleerd kan worden. Deze sectie bespreekt niet alle mogelijke manieren van moduleren, maar beperkt zich tot het moduleren via (enharmonische) laddereigen spilakkoorden. Omdat de MALS-machine modulaties dient te generen, is de achterliggende theorie van het moduleren uiteraard onmisbaar.

Als een componist van zijn oorspronkelijke toonsoort naar een andere toonsoort over wil gaan, dan moet hij moduleren. Omdat de twee toonsoorten soms zodanig van elkaar verschillen, wil de componist dit op een zo vloeiend mogelijke manier doen. Dit doet hij door akkoorden uit de nieuwe toonsoort te gebruiken en de cadens af te ronden in deze nieuwe toonsoort. De toonsoort waarvanuit gemoduleerd wordt, is de *hoofdtonsoort*. De toonsoort waar naar toe gemoduleerd wordt, heet de *doeltonsoort*.

2.3.1 Manieren om te moduleren

Er zijn meerdere manieren om te moduleren, waarvan er twee van belang zijn voor deze scriptie:

Moduleren met behulp laddereigen spilakkoorden:

Een toonsoort die dicht bij de oorspronkelijke toonsoort ligt, kan bereikt worden met een spilakkoord. Een spilakkoord is een akkoord dat zowel in de hoofdtoonsoort als in de doeltonsoort zit. In C-groot is V (G-B-D) bijvoorbeeld I voor G-groot. Veel toonsoorten hebben een akkoord gemeen, maar in de praktijk zal niet elk spilakkoord even goed werken.

Moduleren met behulp van enharmonisch gelijke akkoorden:

Enharmonisch gelijke akkoorden klinken hetzelfde als andere akkoorden, maar worden anders genoteerd. Omdat twee akkoorden hetzelfde klinken, beschouwt een componist ze als hetzelfde akkoord en gebruikt hij dit akkoord als spilakkoord. Deze manier van moduleren kan alleen gebruikt worden bij gealtereerde akkoorden. Een voorbeeld hiervan is het Germaanse kwintsextakkoord (in D \flat -groot: B $\flat\flat$ -D \flat -F \flat -G), wat enharmonisch gelijk is aan het dominant septiemakkoord van een doeltonsoort die een halve toon hoger ligt (D-groot: A-C \sharp -E-G, dit is enharmonisch equivalent aan Ger $\frac{6}{5}$ in D \flat -groot).

2.3.2 Modulaties schrijven

Door middel van (enharmonische) spilakkoorden kunnen componisten zich een weg door de toonsoorten banen. Als er gemoduleerd wordt van C-groot naar D-groot, kan dat met het C-E-G-akkoord (C: I = D: IV). Over het algemeen gaat moduleren met spilakkoorden maximaal twee stappen verder in de kwintencirkel. Indien er nog verder gemoduleerd moet worden, bijvoorbeeld van C-groot naar A-groot, dan zal dat via een andere toonsoort moeten gebeuren: van C-groot naar D-groot via C: I = D: IV, en vervolgens naar A-groot via D: V = A: I.

De beste keuze voor een spilakkoord is een akkoord dat als predominant fungeert in de doeltonsoort, maar in principe zijn alle combinaties mogelijk.

Het is mogelijk om voor een toonsoort een tabel te maken van alle spilakkoorden die de noten uit die toonladder kunnen vormen, en naar welke toonsoort(en) dit akkoord kan moduleren. In tabel 1 is deze tabel voor C-groot weergegeven. In deze tabel is de derde trap voor de hoofdtoonsoort weggelaten. De akkoorden VII en v zijn rood gekleurd in de tabel: deze akkoorden komen wel laddereigen voor in de betreffende doeltoonsoort, maar worden zelden gebruikt in akkoordstructuren. Zoals eerder besproken is, is het gebruikelijk om in mineur de verminderde zevende trap en de grote vijfde trap te gebruiken. Om deze reden zijn VII en v uitgesloten als spilakkoord.

	C	F	G	Bb	D	a	d	e	g	b	c	f	bb	Cb
C-E-G	I	V	IV	-	-	III	VII	VI	-	-	-	V	-	-
D-F-A	ii	vi	-	iii	-	iv	i	-	v	-	-	-	-	-
F-A-C	IV	I	-	V	-	VI	III	-	VII	-	-	-	V	-
G-B-D	V	-	I	-	IV	VII	-	III	-	VI	V	-	-	-
A-C-E	vi	iii	ii	-	-	i	v	iv	-	-	-	-	-	-
B-D-F	vii ^o	-	-	-	-	ii ^o	-	-	-	-	vii ^o	-	-	-
G-B-D-F	V ⁷	-	I ⁷	-	IV ⁷	VII ⁷	-	III ⁷	-	VI ⁷	V ⁷	-	-	Ger ₅ ⁶

Tabel 1: Spilakkoorden voor C-groot

Ook voor een mineurladder, bijvoorbeeld a-klein, kan een dergelijke tabel gemaakt worden. Zie tabel 2. Merk op dat in mineurtoonladders de tertsen in de vijfde trap en de grondtoon in de zevende trap verhoogd worden. Door deze toevoegingen (de G# in het geval van V en vii^o a-klein) biedt een mineurtoonsoort een stuk meer mogelijkheden tot het vormen van spilakkoorden dan een majeuretoonsoort. Wederom zijn VII en v geen mogelijkheden als spilakkoord.

	a	e	d	g	C	F	G	Bb	E	A	B	f#	g#	c#	Ab
A-C-E	i	iv	v	-	vi	iii	ii	-	-	-	-	-	-	-	-
B-D-F	ii ^o	-	-	-	vii ^o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D-F-A	iv	-	i	v	ii	vi	-	iii	-	-	-	-	-	-	-
E-G#-B	V	-	-	-	-	-	-	-	I	V	IV	VII	VI	III	-
F-A-C	VI	-	III	VII	IV	I	-	V	-	-	-	-	-	-	-
G#-B-D	vii ^o	-	-	-	-	-	-	-	-	vii ^o	-	ii ^o	-	-	-
E-G#-B-D	V ⁷	-	-	-	-	-	-	-	I ⁷	V ⁷	IV ⁷	VII ⁷	VI ⁷	III ⁷	Ger ₅ ⁶

Tabel 2: Spilakkoorden voor a-klein

De tabellen zijn specifiek ingevuld voor de toonsoorten C-groot en a-klein, maar merk op dat deze te generaliseren zijn naar elke willekeurige majeure- of mineurtoonsoort. Zo geldt voor elke majeuretoonsoort dat er via het V-akkoord gemoduleerd kan worden naar het I-akkoord van de toonsoort die een kwint verder in de kwintencirkel ligt, en voor elke mineurtoonsoort dat er via

het iv-akkoord gemoduleerd kan worden naar het vi-akkoord van de majeuretoonsoort die een kwint teruggaat ten opzichte van de parallelle majeuretoonsoort van de hoofdtoonsoort.

Met behulp van dit soort tabellen kan er een pad worden uitgestippeld tussen twee toonsoorten. Echter, om modulaties vloeiend te laten verlopen, is er meer nodig dan een opeenvolging van diverse spilakkoorden. De doeltaonsoort moet langzaamaan geïntroduceerd en vervolgens bevestigd worden. Na het spilakkoord volgt dus idealiter niet direct een perfecte authentieke cadens. Door middel van zwakke EPMS kan de nieuwe toonsoort geïntroduceerd worden, tot de cadens bereikt wordt en de toonsoort bevestigd wordt. Vanaf daar kan dan verder gewerkt worden naar een eventueel nieuw spilakkoord, of het einde van een stuk.

Bij het schrijven van modulaties gaan uiteraard ook de standaard stemvoerings- en verdubbelingsregels op.

3 Technische achtergrond

Om een computer een modulatie te laten genereren, zijn er een aantal algoritmes nodig die de volgende problemen aanpakken:

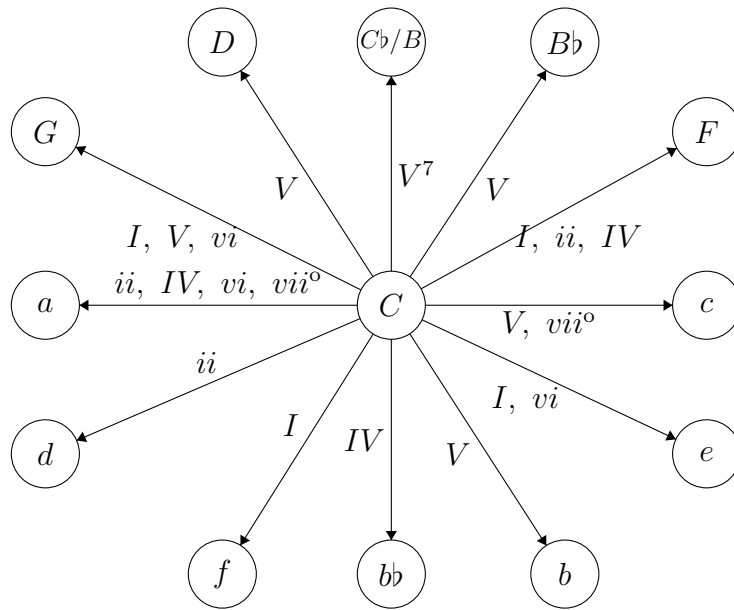
1. Er moet een modulatiepad gegenereerd worden. Dat wil zeggen, via welke toonsoorten en spilakkoorden komt het algoritme uiteindelijk van de hoofdtoonsoort naar de doeltoonsoort?
2. Een gegenereerd pad van spilakkoorden moet ingevuld worden met een logische akkoordprogressie. Dit moet gebeuren met aandacht voor de akkoordfuncties.
3. Deze akkoordprogressie moet ingevuld worden met daadwerkelijke notenpartijen, die de stemvoerings- en verdubbelingsregels respecteren.

Idealiter zou de uitkomst van het systeem uiteindelijk ook in melodisch en ritmisch opzicht moeten lijken op muziekstukken waarvoor modulaties gegenereerd worden. Dit is een bijkomend probleem voor de punten 2 en 3.

3.1 Het modulatiepad genereren

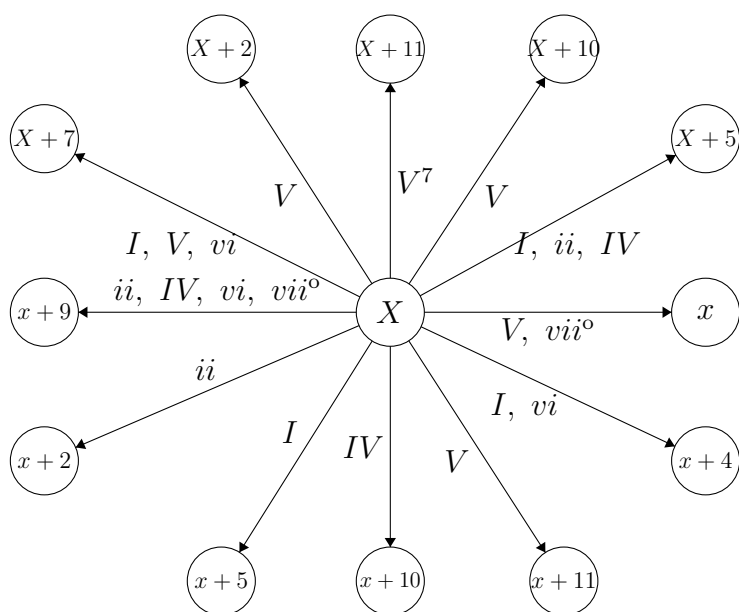
Moduleren kan gezien worden als een graafprobleem. Elke toonsoort wordt gerepresenteerd met een knoop, die aan andere toonsoorten verbonden is via zijdes die spilakkoorden representeren. Deze graaf is ongericht in de zin dat het mogelijk is om via hetzelfde spilakkoord weer terug te keren naar de oorspronkelijke hoofdtoonsoort.

De knoop voor de toonsoort C-groot ziet eruit zoals in afbeelding 5 weergegeven. In deze en de volgende weergaven zijn de derde trappen en de modulaties via de spilakkoorden VII en v in de doeltoonsoort weggelaten. Alleen de uitgaande pijlen zijn gegeven.



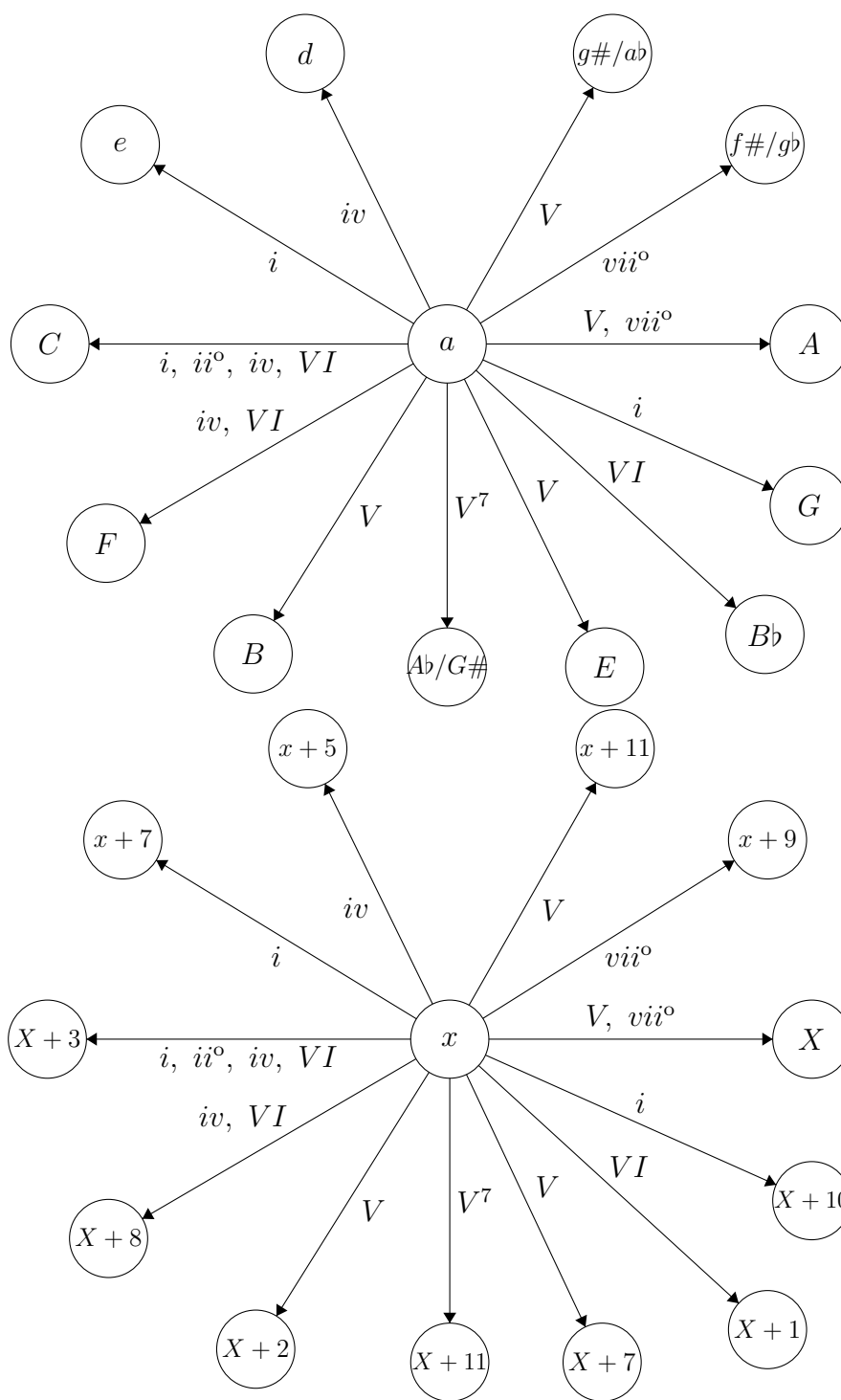
Figuur 5: Knoopweergave van C-groot

Deze weergave kan gegeneraliseerd worden naar de toonsoort X, waarbij X in ieder geval majeur is. Dit is te zien in afbeelding 6. De getallen representeren halve tonen. Een hoofdletter X representeert een majeurtoonsoort en een kleine letter x een mineurtoonsoort.



Figuur 6: Gegeneraliseerde knoopweergave voor majeure toonsoorten. Bij wijze van voorbeeld kan de toonsoort G-groot genomen worden. Via de akkoorden V en vii° in G-groot kan de knoop g-klein (x) bereikt worden, of via ii de toonsoort a-klein ($x + 2$).

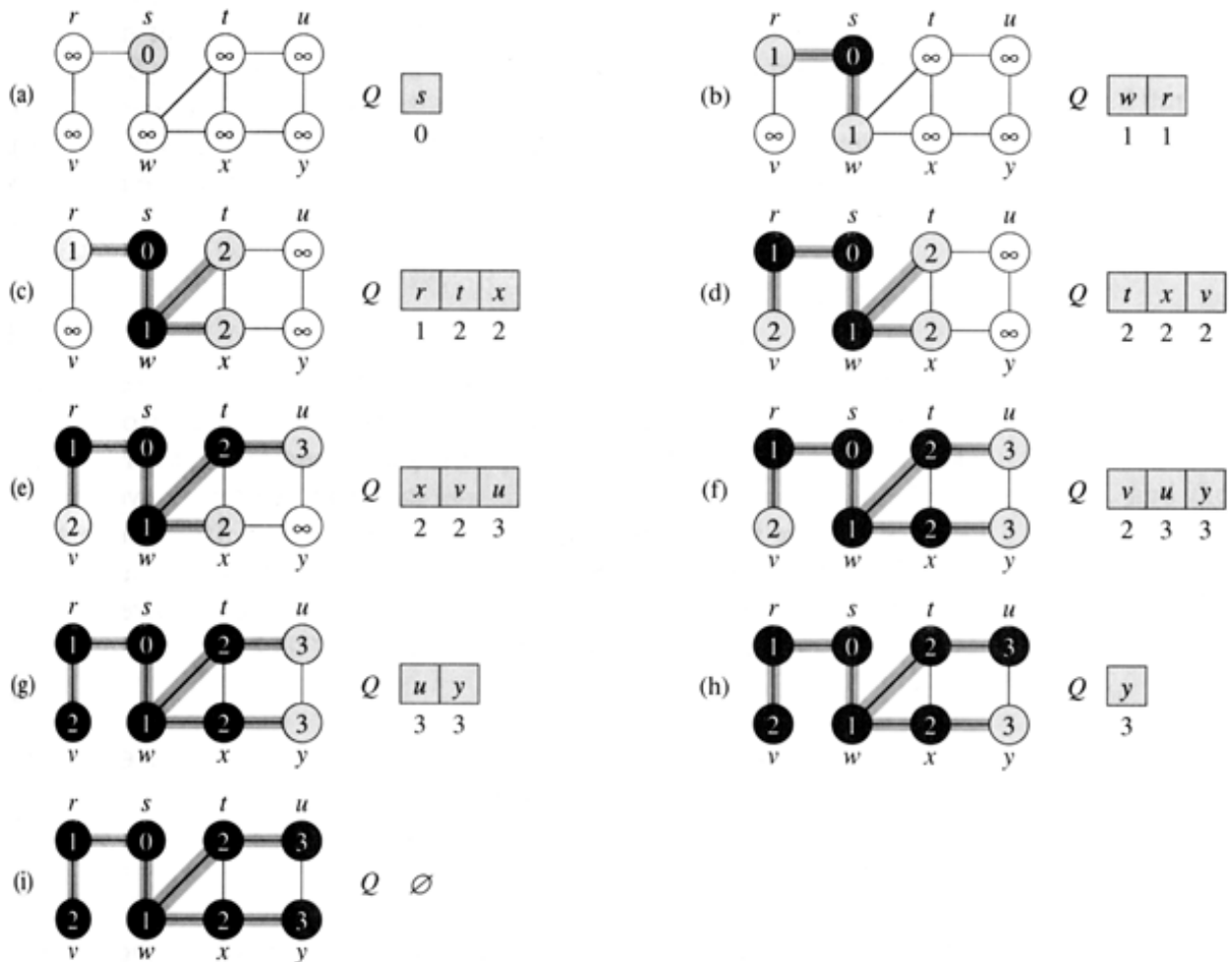
Voor mineurtoonsoorten kan ook een dergelijke weergave gemaakt worden. De specifieke knoop voor a-klein en de gegeneraliseerde weergave is te zien in afbeelding 7.



Figuur 7: Knoopweergave van a-klein (boven) en generaliseerde knoopweergave van mineurtoonsoorten (onder)

De gehele graaf bestaat dus uit mineurknopen en majeurknopen, die onderling met elkaar verbonden zijn. Door toonsoorten te representeren als getallen, wordt ambiguïteit weggewerkt. Toonsoorten zoals $g\#$ -klein en ab -klein zijn enharmonisch gelijk aan elkaar en in een modulatie naar één van deze toonsoorten, is de doeltoonsoort al bereikt als het algoritme in de enharmonisch gelijke tegenhanger terecht komt. Door deze twee toonsoorten onder één getal te scharen, wordt dit onderscheid weggewerkt. Door toonsoorten met getallen aan te duiden (waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen majeur en mineur) kan er met behulp van de bovenstaande informatie een graaf opgesteld worden, waar een zoekalgoritme makkelijk doorheen navigeert.

Gegeven deze graaf is het gemakkelijk om het kortste pad te berekenen van X_h naar X_d waarin X_h de hoofdtoonsoort is en X_d de doeltoonsoort. Omdat de graaf cyclisch en ongewogen is, kan dit bereikt worden met een breadth-first search, om er zeker van te zijn dat het algoritme uiteindelijk een optimale uitkomst teruggeeft. *Breadth-first search* (BFS) neemt een beginknoop en een doelknoop. Vanaf de beginknoop worden vervolgens alle verbonden knopen bekeken. Als de doelknoop hier bij zit, is er een oplossing gevonden en stopt het zoeken. Indien dat niet het geval is, worden alle verbonden knopen van deze laag met knopen bekeken. Dit gaat door totdat er een oplossing gevonden is. Op deze manier wordt de hele graaf doorlopen totdat de doelknoop gevonden is. Omdat het zoeken in lagen verloopt, is de oplossing gegarandeerd het kortste pad van de beginknoop naar de doelknoop. Afbeelding 8 toont een schematische weergave van BFS.



Figuur 8: Schematische weergave van een breadth-first search. De knopen worden in de weergegeven volgorde van a tot i afgegaan en de afstand tot alle knopen wordt berekend. De letters achter Q staan voor de knopen die op dat moment in de wachtrij (queue) staan. Er is duidelijk te zien hoe de kinderen van de betreffende knopen telkens aan de wachtrij toegevoegd worden. Afbeelding uit *Introduction to Algorithms* (Cormen, Leiserson, Rivest & Stein, 2001).

3.2 Akkoordprogressies genereren

Als er een nieuwe toonsoort bereikt is, moet er vanaf het spilakkoord eerst een cadens volgen in deze nieuwe toonsoort, voordat er verder gemoduleerd kan worden. Er moet dus een muzikale zin gegenereerd worden die vanaf het spilakkoord naar de slotcadens leidt. Zoals eerder beschreven dient eerst de nieuwe toonsoort via EPMs geïntroduceerd te worden, alvorens de tonica benadrukt wordt door de cadens. Vanaf de cadens moet ook een akkoordstructuur naar het volgende spilakkoord leiden. Merk op dat deze spilakkoorden elke akkoordfunctie kunnen hebben en dus dynamisch zijn.

Om muzikale zinnen te kunnen genereren, kan er een generatieve *contextvrije grammatica* (CFG) gebruikt worden. CFGs bestaan uit een verzameling herschrijfgeregels, die samen leiden tot een bepaalde taal, bijvoorbeeld de ‘taal’ die alle mogelijke akkoordprogressies beschrijft. Deze regels worden beschreven door terminals en non-terminals. *Non-terminals* zitten niet in de taal en dienen door middel van de herschrijfgeregels van de CFG verder uitgewerkt te worden tot terminals. *Terminals* zijn de letterlijke eindsymbolen in de taal.

Een voorbeeld van een simpele CFG is:

$$S \rightarrow a \quad (1)$$

$$S \rightarrow SS \quad (2)$$

Regel (1) stelt dat de non-terminal S herschreven kan worden naar de terminal a . Regel (2) stelt dat de non-terminal S ook herschreven kan worden naar twee non-terminals S achter elkaar. Beginnend bij het startsymbool S , beschrijft deze CFG dus een taal van woorden (uitkomsten) die uit minimaal één enkele a bestaan.

Het is mogelijk om een CFG te geven die akkoordprogressies genereert. Dat wil zeggen, de regels van deze CFG zijn zodanig, dat deze samen een taal genereren die akkoordprogressies beschrijft. Een invulling van zo’n grammatica wordt gegeven door Rohrmeier (Rohrmeier, 2007). Deze grammatica ziet er als volgt uit:

$$t \rightarrow t_{key=x} \quad (1) \qquad tp \rightarrow \begin{cases} \text{VI} & \text{if key is major} \\ \{\text{VI}, \text{III}\} & \text{if key is minor} \end{cases} \quad (8)$$

$$t \rightarrow tt \quad (2) \qquad d \rightarrow \begin{cases} \{\text{V}, \text{VII}\} & \text{if key is major} \\ \{\text{V}, \flat\text{VII}\} & \text{if key is minor} \end{cases} \quad (9)$$

$$t \rightarrow t_{_}d \quad (3) \qquad s \rightarrow \{\text{IV}, \text{II}, \text{VI}, \flat\text{II} \text{ (in minor)}\} \quad (10)$$

$$t \rightarrow d_{_}t \quad (4) \qquad \text{I} \rightarrow \text{I IV I} \quad (11)$$

$$d \rightarrow s_{_}d \quad (5) \qquad x \rightarrow V(x)_{_}x \quad (12)$$

$$t \rightarrow \text{I} \quad (6) \qquad x \rightarrow x_{_}V(x) \quad (13)$$

$$t \rightarrow tp \quad (7) \qquad \text{IV} \rightarrow \text{III}_{_}\text{IV} \quad (14)$$

De non-terminals in deze grammatica staan voor tonica (t), dominant (d), subdominant (s) en ‘tonic parallels’ (tp). De terminals zijn akkoorden in Romeinse trappenbecijfering. De aanduiding is groot, maar bedoeld wordt het betreffende laddereigen akkoord.

Deze grammatica is voor dit onderzoek uitgebreider dan nodig: naast dat het het III-akkoord en Napolitaans akkoord bevat, neemt het ook tonicization⁶ en zelfs modulatie in acht. Deze functies zal het algoritme wat in deze scriptie voorgesteld wordt, niet nodig hebben. Op basis hiervan vervallen de regels (1) (modulatie), (12) en (13) (tonicization) en (14) (derde trap). Regels (8) en (10) worden aangepast om de derde trap en het Napolitaans akkoord te vermijden. Omdat regel (8) nu enkel VI kan genereren, onafhankelijk van de toonsoort, kunnen regel (6), (7) en (8) gevat worden in één nieuwe regel. Omdat tonicization geen rol speelt, zijn ook de haakjes onderaan bepaalde non-terminals overbodig. De verhoogde zevende trap in mineur en de grote vijfde trap in mineur worden in deze scriptie beschouwd als laddereigen, waardoor ook de distinctie in regel (9) vervalt. Als predominant wordt het Germaanse akkoord toegevoegd. Regel (11) wordt een afleidregel voor de tonica, omdat de constructie $I - IV - I$ in feite een prolongatie van de tonica is.

De aangepaste grammatica ziet er als volgt uit:

$$\begin{array}{ll}
 t \rightarrow tt & (1) & t \rightarrow \{I, VI\} & (5) \\
 t \rightarrow td & (2) & d \rightarrow \{V, VII\} & (6) \\
 t \rightarrow dt & (3) & s \rightarrow \{II, IV, VI, Ger\} & (7) \\
 d \rightarrow sd & (4) & t \rightarrow I IV I & (8)
 \end{array}$$

Met deze grammatica is echter nog één cruciaal probleem: het is in staat om akkoordprogressies te genereren die een $D - PD - D$ structuur hebben⁷. Dit is uit den boze en moet verholpen worden. Om deze reden vervalt ook regel (4) en is het nodig om een nieuwe regel toe te voegen:

$$t \rightarrow tsdt \quad (4)$$

Regel (2) wordt aangepast naar:

$$t \rightarrow tdt \quad (2)$$

Deze aanpassingen voorkomen de generatie van $D - PD - D$ structuren.

⁶Het gebruik van laddervreemde akkoorden. Akkoorden worden uit (bijvoorbeeld) de dominanttoonsoort (V) geleend om de komst van V te benadrukken. Vaak wordt de vijfde trap van V gebruikt. In C-groot is dit dus de vijfde trap van G-groot (G-B-D = V in C-groot), dus D-F#-A.

⁷Met startsymbool t : regel (2) geeft td , nogmaals regel (2) geeft ttd , regel (6) op de eerste dominant, geeft $ttdV$, regel (4) geeft nu $ttdVsd$, waarbij V nu dus noodzakelijk moet gaan oplossen in een predominant.

Idealiter wordt er een een muzikale zin gevormd, die begint met één of meerdere EPMs en eindigt in een slotcadens in PAC. Dit is echter met deze grammatica nog niet het geval. Daarom is het nodig om de grammatica nog iets te nuanceren. Als startsymbool wordt nu c gekozen, die afsplitst in EPMs en de slotcadens. Vanaf daar worden er zwakkere en sterkere muzikale zinnen gegenereerd, op basis van de aangepaste grammatica.

$$c \rightarrow epm cad epm \quad (9)$$

$$epm \rightarrow t \quad (10)$$

$$cad \rightarrow s sd I \quad (11)$$

$$sd \rightarrow \{V^7, V_4^6 V^7\} \quad (12)$$

Omdat in het eindresultaat een muzikale zin gemaakt moet worden, beginnend op een bepaald spilakkoord en eindigend op een bepaald spilakkoord, komt de cadens tussen twee epm-regels in te staan. Er kunnen nu vanaf een bepaald akkoord EPMs gegenereerd worden, die gevolgd worden door een sterke cadens, die gevolgd wordt door een aantal EPMs naar het nieuwe spilakkoord toe.

Als laatste is het nodig om voor de predominant twee structuren toe te voegen om prolongatie hiervan mogelijk te maken. Dit gaat om het $IV - ii$ -complex⁸ en de veelvoorkomende combinatie $ii - ii^6$ en $ii^6 - ii$. Deze regel wordt toegevoegd aan de herschrijfgeregels voor predominanten. Merk op dat de enige mineur/majeur-nuance nu wordt dat de tweede trap in mineur enkel in sextligging voorkomt. Bij de herschrijfgregel voor dominanten is V^7 toegevoegd. Deze moet gegenereerd kunnen worden als er via het Germaanse akkoord gemoduleerd gaat worden. De volledige, uiteindelijke versie van de grammatica wordt nu:

$$t \rightarrow t t \quad (1) \qquad t \rightarrow I IV I \quad (8)$$

$$t \rightarrow t d \quad (2) \qquad c \rightarrow epm cad epm \quad (9)$$

$$t \rightarrow d t \quad (3) \qquad epm \rightarrow t \quad (10)$$

$$d \rightarrow s d \quad (4) \qquad cad \rightarrow s sd I \quad (11)$$

$$t \rightarrow \{I, I^6, VI\} \quad (5) \qquad sd \rightarrow \{V^7, V_4^6 V^7\} \quad (12)$$

$$d \rightarrow \{V, V^6, V^7, VII^{o6}\} \quad (6)$$

$$s \rightarrow \begin{cases} \{IV, IV^6, II, II^6, VI, Ger_5^6, II II^6, II^6 II, IV II\} & \text{in majeur} \\ \{IV, IV^6, II^6, VI, Ger_5^6, IV II\} & \text{in mineur} \end{cases} \quad (7)$$

⁸Veelvoorkomende akkoordprogressie van de vierde trap naar de tweede trap.

Een voorbeeld van een akkoordprogressie die deze grammatica kan genereren, is:

IV - I⁶ - vii^{o6} - I - vii^{o6} - vi - V - I⁶ - I - Ger₅⁶ - V⁷ - I - I⁶ - ii - ii⁶ - vii^{o6} - I⁶ - I - V
 PD - T - D - T - D - T - D - T - T - PD - D - T - T - PD - PD - D - T - T - D

Het rode gedeelte van deze progressie is gegenereerd door het eerste voorkomen van epm, het blauwe door cad en het groene door het tweede voorkomen van epm. De progressie loopt van IV naar V en kan dus gebruikt worden om van a-klein (C-groot: IV = a-klein: VI) via C-groot naar c-klein (C-groot: V = c-klein: V) te moduleren.

Hoewel deze grammatica niet in staat is om complexere cadensen en muzikale zinnen te genereren, is deze wel correct en voldoet deze om akkoordprogressies voor modulaties te genereren.

Door het modulatiepadalgoritme te koppelen aan de cadensgrammatica, kan er een gehele akkoordstructuur gegenereerd worden, inclusief de modulaties via spilakkoorden. Als er gemoduleerd moet worden van C-groot naar G-klein, is het kortste pad:

$C - major (I, V, vi) \implies G - major (V, vii^o) \implies G - minor$

Van C-groot zal een EPM gegenereerd moeten worden naar I, V of vi, bijvoorbeeld:

I - vii^{o6} - I - IV - I - IV⁶ - V⁶ - V

De vijfde trap in C-groot is de eerste trap in G-groot. Er moet nu een muzikale zin gegenereerd worden, met EPMS en cadens in G-groot, vanaf I, naar V of vii^o, bijvoorbeeld:

I - V⁶ - vii^{o6} - I - IV - I - vi - V⁷ - I - I - IV - I - V - vii^{o6}

De cadens is blauw gekleurd in het bovenstaande voorbeeld. De laatste stap is om vanaf G-groot vii^o = g-klein vii^o via een EPM naar een slotcadens te gaan. Hierna is er volledig gemoduleerd. Als laatste zou de volgende muzikale zin gegenereerd kunnen worden:

vii^{o6} - VI - V - i⁶ - VI - V - i - iv⁶ - V₄⁶ - V⁷ - i

Wederom is de cadens blauw gekleurd. De volledige akkoordstructuur van de modulatie wordt dus:

C-groot	I - vii ^{o6} - [...] - V ⁶ - V
G-groot	I - V ⁶ - vii ^{o6} - [...] - I - V - vii ^{o6}
g-klein	vii ^{o6} - VI - [...] - V ₄ ⁶ - V ⁷ - i

De spilakkoorden kunnen willekeurig gekozen worden, of er kan een beste keuze gemaakt worden op basis van de akkoordfunctie van het spilakkoord in de nieuwe toonsoort. Om variatie toe te brengen in de akkoordstructuur en deterministische spilakkoorden te voorkomen, is er gekozen voor de willekeurige keuze.

3.3 Akkoordprogressies harmoniseren

De akkoordprogressies die door de eerdere algoritmes gegenereerd zijn, moeten nu ingevuld worden met daadwerkelijke muzieknoten. Dit is een complex probleem, omdat er oneindig veel manieren zijn om dit te doen en deze manieren allemaal anders zijn in ritmisch en melodisch aspect. Dezelfde cadensen worden door vrijwel alle componisten gebruikt, maar telkens uniek ingevuld. Zie voor een voorbeeld afbeelding 9.

(1)

C: I - - - - - V - - - - etc.

(1)

C: I V etc.

Figuur 9: Dezelfde onderliggende akkoordstructuur (I - V), kan op verschillende manieren ingevuld worden. Links: W.A. Mozart, “Die Zauberflöte”. Rechts: J.S. Bach, “Ach Gott und Herr”.

Componisten zijn ontzettend creatieve geesten, die vaak onvoorspelbaar zijn in de muziek die zij schrijven. Toch zijn er door de tijd heen een aantal richtlijnen ontstaan waar de meeste (klassieke) componisten zich aan houden. Deze richtlijnen uiten zich in de stemvoerings- en verdubbelsregels, beschrijven hoe tonen in akkoorden zich tot elkaar dienen te verhouden en welke tonen verdubbeld dienen te worden voor het beste resultaat. Ook zijn er een aantal bekende technieken om muziekstukken te versieren en op die manier op te fleuren.

Het volgens de regels componeren van muziek is dus een eerste probleem. Het tweede probleem schuilt in het feit dat een modulatie pas vloeiend verloopt indien er elementen uit ofwel het deel in de hoofdtoonsoort, ofwel het deel in de doeltonsoort gebruikt worden. Afbeelding 9 toont weliswaar twee invullingen van de progressie $I - V$, maar in de context van een popnummer zouden zij ongepast of vreemd in de oren klinken. Om een deel van een muziekstuk te kunnen componeren, is dus een context nodig.

Samenvattend zijn er dus twee problemen die opgelost dienen te worden:

1. Tonen in akkoorden dienen volgens de regels achter elkaar gezet te worden;
2. Tonen dienen in ritmisch en melodisch opzicht aan te sluiten bij de gegeven context.

In dit hoofdstuk wordt enkel een oplossing voor probleem 1 besproken. Probleem 2 vraagt om diepere analyse van ingevoerde muzikale contexten. Onderzoek hiernaar is reeds gedaan (Cambouropoulos, 2000), maar deze analyse omzetten naar een generatief systeem is een onderwerp voor de wetenschap op zich.

3.3.1 Akkoorden harmoniseren met aandacht voor de stemvoerings- en verdubbelingsregels

Het harmoniseren van een akkoordstructuur in Romeinse trappenbecijfering is dus een probleem waarvoor handvatten zijn uit de muziektheoretische historie. Omdat er zo veel regels en richtlijnen zijn in de muziektheorie, biedt een *Rule Based System* (RBS) een uitkomst voor dit probleem. In het verleden zijn wetenschappers er reeds in geslaagd om bijvoorbeeld koralen te harmoniseren (Ebcioğlu, 1998) met een dergelijk systeem.

Een RBS is een systeem dat op basis van een database met regels een oplossing probeert te vinden. Deze regels zijn geschreven in als-dan-clausules en vormen samen een beschrijving van hoe een oplossing (bijvoorbeeld een geharmoniseerd muziekstuk, op basis van een gegeven trappenbecijfering) van een probleem eruit moet zien.

Het voordeel van zo'n systeem is de mogelijkheid tot backtracken. Bij het schrijven van muziek kan aan het einde van een stuk wel eens blijken dat er een probleem met de stemvoering ontstaat. Door een akkoord wat eerder geschreven is aan te passen, zou dit probleem opgelost kunnen worden. Een componist kijkt in dit geval terug naar wat hij al geschreven is en verandert dit zodat het probleem opgelost is. Een rule based system doet hetzelfde: als er geen mogelijkheid meer is om volgens de regels verder te gaan, wordt er gebacktrackt ('teruggekeken') om anders uit te komen en zo het probleem op te lossen.

Daarnaast is het mogelijk om makkelijk regels toe te voegen of weg te laten. Waar klassieke muziek veel verschillende regels kent wat betreffend stemvoering en akkoordprogressie, is hedendaagse populaire muziek veel lossier in de regels die gehanteerd worden. In een RBS zou er, op basis van de genres van de ingevoerde muziekstukken, een selectie van regels gemaakt kunnen worden. In jazzmuziek zou het Germaanse akkoord wel gebruikt kunnen worden, terwijl dit in popmuziek niet aan de orde is.

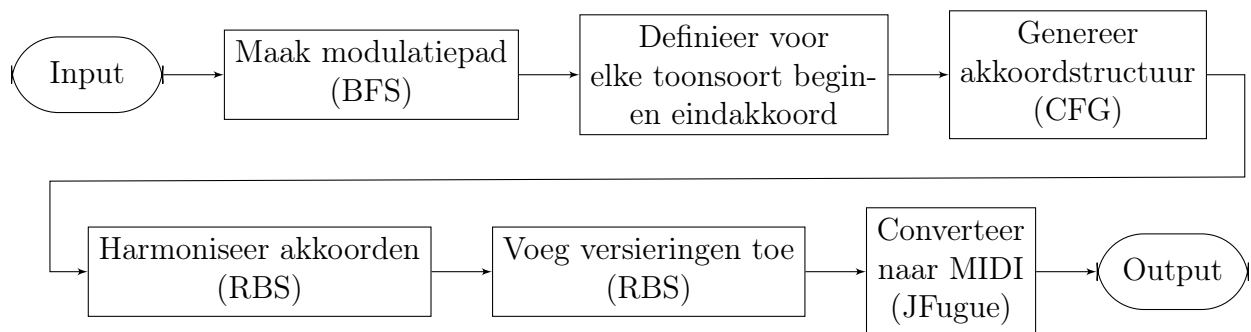
4 Implementatie

Voor het implementeren van de bovenstaande algoritmen in de MALS-machine is een combinatie van de programmeertalen Prolog en Java gebruikt. Prolog is een logische programmeertaal waarin regels gevangen worden in recursieve als-dan-clausules. Door de ingebouwde backtracking leent Prolog zich uitstekend voor het implementeren van een RBS. Door het declaratieve karakter van de programmeertaal is het ook goed te gebruiken bij het implementeren van BFS en generatieve grammatica's.

Het deel van de MALS-machine dat Java gebruikt, dient voor het hoorbaar maken van de output. Hierbij wordt gebruik gemaakt van JFugue (Koelle, 2008), een library die in staat is om op een makkelijke manier muziknoten als getal naar een daadwerkelijk hoorbare versie daarvan in MIDI⁹ om te zetten.

De output die het Prologprogramma genereert (een reeks van getallen en versierende noten) wordt doorgegeven aan een Javaprogramma. Het Javaprogramma zet vervolgens alle muziknoten achter elkaar en genereert een MIDI-bestand, waarin de output te horen en verder in te zien is. De generatie van de muzikale structuur is dus geïmplementeerd in Prolog.

Afbeelding 10 laat een schematische weergave zien van de stappen die de MALS-machine doorloopt van input tot output.



Figuur 10: De stappen die de MALS-machine doorloopt en de algoritmen die daarbij gebruikt worden. De input bestaat uit twee toonsoorten. De output is een MIDI-bestand, een modulatiepad en een akkoordstructuur in Romeinse trappenbecijfering. Alleen de conversie naar MIDI is geïmplementeerd in Java. De rest van het programma is geprogrammeerd in Prolog.

⁹Musical Instrument Digital Interface, een bestandformaat waarin muziek weergegeven wordt als een reeks commando's.

De stemvoerings- en verdubbelingsregels die zijn toegepast in de MALS-machine, zijn:

1. Gebruik geen parallelle primen, kwinten of octaven, ook in tegenbeweging.
2. Los de leidtoon¹⁰ op als deze in de sopraan ligt.
3. Los het septiem in een septiemakkoord stapgewijs dalend op.
4. Laat de afstand tussen tenor en alt, en alt en sopraan niet groter worden dan een rein octaaf.
5. Vermijd stemkruisingen.
6. Gebruik complete akkoorden.
7. Verdubbel bij akkoorden in grondligging de bastoon van het akkoord.
8. Verdubbel nooit de leidtoon.
9. Verdubbel bij akkoorden in sextligging de sopraan, tenzij het om ii^6 , ii^{o6} of vii^{o6} gaat: verdubbel dan de bastoon van het akkoord.

Daarnaast worden alle septiemakkoorden en Germaanse akkoorden verlengd naar een halve tel. Hierdoor wordt spanning opgebouwd en wordt er extra nadruk gegeven op cadensen die de toonsoort vaststellen. Ook wordt na elk dominant septiemakkoord een PAC gemaakt.

Om de akkoorden iets interessanter te maken, zijn er vier soorten versieringsnoten geïmplementeerd: de doorgangsnoot (*pt* - passing tone), de wisselnoot (*nt* - neighbor tone), de chromatisch doorgangsnoot (*cpt* - chromatic passing tone) en de chromatische wisselnoot (*cnt* - chromatic neighbor tone).

De werking van het RBS en de implementatie van een aantal stemvoeringsregels is goed te zien in het onderstaande stukje code (in Prolog). Het predicaat `makeChord/4` neemt een omkering (sext, septiem, of grondligging), een lijst met tonen die een akkoord bevat, het voorafgaande akkoord en het nieuw gemaakt akkoord. Het predicaat wordt recursief aangeroepen op alle akkoorden in een akkoordstructuur. Het onderstaande predicaat is slechts één van de `makeChord`-predicaten, namelijk die voor het geval dat het betreffende akkoord in grondligging is. De andere twee voorkomens dienen voor sext- en kwartsext-liggingen en voor septiemakkoorden en het Germaanse akkoord.

¹⁰De leidtoon is de zevende trap van de ladder.

```

1.  makeChord(0, [G,T,K],Pre,EC) :- [...]
2.                                  getSopranoNote([G,T,K],Ref,Sop),
3.                                  select(Sop,[G,T,K],NL),
4.                                  listElementClosestTo(T0,NL,Ten),
5.                                  select(Ten,NL,NL2),
6.                                  listElementClosestTo(A0,NL2,Alt),
7.                                  C = chord(G,Ten,Alt,Sop),
8.                                  not(hasParallels(Ref,C)),
9.                                  correctPAC(Ref,C),
10.                                 resolveSeventh(Ref,C),
11.                                 not(doubledLeadingTone(C)),
12.                                 resolvedLeadingTone(Ref,C),
13.                                 smoothenChord(Pre,C,EC),
14.                                 maxSkips(Pre,EC).

```

Het weggelaten deel zet het voorafgaande akkoord `Pre` om naar een structuur waar de andere predicaten mee kunnen werken en is verder niet relevant voor de werking van het RBS. De variabelen `Ref`, `T0` en `A0` verwijzen respectievelijk naar het geparseerde voorgaande akkoord, de tenornoot in dat akkoord en de altnoot in dat akkoord. De regels 2 tot en met 6 kiezen een noot uit voor sopraan, tenor en alt: in eerste instantie de noot die het dichtst bij de voorafgaande noot ligt en die nog niet gebruikt is in het akkoord. De gevonden noten worden gebundeld en getoetst: heeft het akkoord parallellen met het voorafgaande akkoord (r. 8), heeft het akkoord een juiste PAC (r. 9), lost een eventuele septiem op (r. 10), wordt de leidtoon niet verdubbeld (r. 11), lost een eventuele leidtoon op (r. 12)? Vervolgens worden de noten in het akkoord ge-octaveerd zodat de afstand tussen noten in individuele stemmen geminimaliseerd wordt (r. 13). Als laatste wordt er gekeken of de noten in de individuele stemmen geen grote sprongen maken (r. 14). In het predicat `smoothenChord/3` wordt ook nog eens gecheckt op stemkruisingen, of de noot binnen het bereik ligt van een bepaalde stem en of de noten in tenor, alt en sopraan niet meer dan een rein octaaf interval van elkaar liggen.

Faalt het programma op één van de voorwaarden, dan wordt er gebacktrackt naar de predicaten die noten toekennen aan bepaalde stemmen. De stemmen worden dan anders ingedeeld om te kijken of er daarmee wel een correct akkoord gemaakt kan worden. Is dit in geen geval mogelijk, dan wordt er gebacktrackt naar het voorafgaande akkoord, totdat er wel een mogelijkheid is om verder te harmoniseren, of de gehele harmonisatie faalt. In het laatste geval wordt er een nieuwe akkoordstructuur of zelfs nieuw modulatiepad gegenereerd.

Het is mogelijk om de MALS-machine te parametriseren om bepaalde uitkomsten te stimuleren dan wel te voorkomen. Muzikale regels voor popmuziek liggen anders dan die van klassieke muziek en om ook daar mee om te kunnen gaan, zijn deze parameters geïmplementeerd. Tabel 3 geeft weer welke variabelen er te parametriseren zijn.

Parameter	Omschrijving	Default-waarde
<i>ModPathLen</i>	Minimale lengte van het modulatiepad.	1
<i>ChordSeqLen</i>	Minimaal aantal akkoorden binnen een toonsoort.	1
<i>MaxCalls</i>	Aantal functieaanroepen die er maximaal gedaan mogen worden voor het akkoordharmoniseringsproces.	5000
<i>EmbsMax</i>	Maximale aantal versieringsnoten tussen twee akkoorden.	4
<i>StartChord</i>	Het akkoord wat vooraf gaat aan de modulatie.	<i>chord</i> (27, 31, 38, 43)
<i>VoiceMax</i>	Maximale toonhoogte die een bepaalde stem kan bereiken.	B: 27, T: 31, A: 38, S: 43
<i>VoiceMin</i>	Minimale toonhoogte die een bepaalde stem kan bereiken.	B: 3, T: 9, A: 16, S: 21
<i>VoiceCrossing</i>	Mogelijkheid om stemkruisingen wel of niet te accepteren.	<i>false</i>
<i>VoiceDistances</i>	Mogelijkheid om de afstand tussen tenor en alt en alt en sopraan wel of niet groter te laten worden dan een rein octaaf.	<i>true</i>
<i>SameNotePenalty</i>	Het gewicht dat wordt toegekend aan twee opeenvolgende noten in één stem die hetzelfde zijn, hoe hoger, hoe onwaarschijnlijker dat dezelfde noot behouden blijft in het volgende akkoord, in een stem.	7
<i>Transpose</i>	Aantal halve tonen dat het muziekstuk uiteindelijk omhoog getransponeerd dient te worden, in halve tonen.	36
<i>AcceptParallels</i>	Mogelijkheid om parallele primen, octaven en kwinten wel of niet te accepteren.	<i>false</i>
<i>MaxSkip</i>	Maximale afstand tussen twee noten in dezelfde stem. De baslijn is echter vrij om elke sprong te maken, omdat de noot in deze lijn door de Romeinse becijfering vast staat.	7
<i>EmbChance</i>	De kans op een bepaald type versieringsnoot.	pt: 1, nt: 1, cpt: 0, cnt: 0

Tabel 3: Overzicht van in te stellen parameters in de MALS-machine. Alle waarden die noten representeren zijn gegeven in MIDI-toonhoogte¹¹. Alle waarden die intervallen representeren zijn gegeven in halve tonen.

Tevens zijn er een aantal presets gedefinieerd, die in tabel 4 kort beschreven worden.

Preset	Omschrijving
Default	Standaardpreset die alle klassieke harmonieregels in acht neemt. De stemomvangen komen overeen met de minimale en maximale stemomvangen die in de koormuziek gebruikt worden.
Pop	Accepteert parallellen, stemkruisingen en grote afstanden tussen stemmen. De sopraan heeft een zeer hoog en groot bereik, in tegenstelling tot de andere stemmen. Dit, om begeleiding in B, T en A en een melodielyn in S te simuleren.
Chromatic	Preset die enkel chromatische versieringsnoten accepteert.
Embellish	Preset met een gebalanceerde verdeling tussen chromatische en laddereigen versieringsnoten.

Tabel 4: Overzicht van geïmplementeerde presets in de MALS-machine.

Met behulp van de hiervoor genoemde parameters is het echter voor gebruikers mogelijk om nog vele andere presets te definiëren.

¹¹In deze toonhoogte is 0 de noot C in het subsubcontra-octaaf, en de maximale waarde 127 de G in het zesgestrept octaaf. Het getal staat voor het aantal halve tonen omhoog ten opzichte van de C in het subsubcontra-octaaf.

5 Resultaten

De MALS-machine is in staat om, gegeven twee toonsoorten, een akkoordstructuur te genereren en deze te voorzien van juiste stemvoerings- en verdubbelingsregels. Daarnaast wordt er een suggestie gegeven voor mogelijke versieringsnoten, in de vorm van al dan niet chromatische doorgangs- en wisselnoten. Het programma is in te stellen door bepaalde parameters in te voeren.

Afhankelijk van de ingestelde parameters doet het programma er een seconde tot een uur over om een output te genereren. De meeste tijd zit in het harmoniseren van de akkoorden volgens de ingevoerde regels en hoe lang dit duurt is sterk afhankelijk van de onderliggende akkoordstructuur. In sommige gevallen is een akkoordstructuur niet geschikt om volgens bepaalde regels te harmoniseren. Door de backtrack-functionaliteit in Prolog en de werking van het algoritme, duurt het erg lang voor een bepaalde akkoordstructuur als ongeschikt wordt bestempeld. Als in de overgang tussen twee akkoorden blijkt dat er geen mogelijkheid is om deze twee akkoorden niet volgens de regels kunnen worden geharmoniseerd, dan zullen eerst *alle* mogelijkheden van voorgaande akkoorden geprobeerd worden, voordat blijkt dat deze akkoordconstructie faalt. Verdere optimalisatie is dus, vooral in het akkoordharmonisatie-gedeelte, gewenst.

5.1 Het genereren van het modulatiepad

Het geïmplementeerde BFS-algoritme vindt inderdaad het snelste pad van de hoofdtoonsoort naar de doeltoonsoort. Wat discutabel is, is of dit pad ook in elke situatie een goed pad is, dat leidt tot vloeiende modulaties. Vooral een modulatie via het Germaanse kwint-sextakkoord klinkt vrij ruw in de oren (zie afbeelding 11).

C: I⁶ I IV ii V⁷ I I V⁷
B: = Ger₅⁶ V⁶ vi

V⁷ vi I⁶ I ii⁶ ii V₄⁶ V⁷ I

Figuur 11: Gegeneerde modulatie van C-groot naar B-groot. Het V⁷-akkoord van C-groot wordt als spilakkoord gebruikt (= Ger₅⁶ in B-groot), waardoor er in één keer vijf kruisen worden toegevoegd.

Om dit te voorkomen zou een langer modulatiepad gegeneerd kunnen worden, die de modulatie geleidelijker laat verlopen. Een modulatie verloopt vloeiender naarmate er subtiele veranderingen plaatsvinden in de toonsoort. Idealiter zou er dus slechts één kruis of mol per keer verwijderd dan wel toegevoegd mogen worden om de modulatie vloeiend te laten klinken. Afbeelding 12 toont dit principe. Het enige wat er aan parametrisering veranderd is ten opzichte van de modulatie in afbeelding 11, is dat de lengte van het modulatiepad (*ModPathLen*) naar vijf is gezet.

C: IV I ii ii⁶ V₄⁶ V⁷ I I⁶ vii^{o6} I⁶ V⁶
G: = I⁶ vi vii^{o6} vi I

D: Ger₅⁶ V₄⁶ V⁷ I I⁶ I = IV I IV⁶ V₄⁶ V⁷ I I IV

A: IV I ii ii⁶ V₄⁶ V⁷ I **B:** = IV I IV⁶ V₄⁶ V⁷ I
V

Figuur 12: Gegeneerde modulatie van C-groot naar B-groot, via G-groot, D-groot en A-groot. Het eerste akkoord in maat 5 (Ger₅⁶) is weliswaar niet laddereigen, maar het is ook géén spilakkoord en kan dus gezien worden als versieringsakkoord.

Het verlengen van het modulatiepad is niet in alle gevallen toepasbaar, gezien de volgorde waarin het BFS-algoritme zijn antwoorden teruggeeft. Een modulatie van C-groot naar Es-groot van lengte vijf loopt nog altijd via het Germaanse akkoord en klinkt dus vrij ruw in de oren. Dit komt doordat het eerste pad dat gevonden wordt het pad C-groot - G-groot - D-groot - E-groot - Eb-groot is. De enige optie om te moduleren van E-groot naar Eb-groot is via Ger₅⁶.

Het modulatiepad verlengen is dus niet altijd een oplossing om de ‘stapgrootte’ van het toevoegen of verwijderen van kruisen en mollen te controleren. Merk ook op dat het Germaanse akkoord slechts een voorbeeld is van hoe ruw klinkende modulaties kunnen ontstaan. Een modulatie van C-groot naar Bes-mineur (met C: IV = bes: V) zal net zo grof klinken (Afbeelding 13).

C: IV I ii⁶ V⁷ | I I IV |
bes: = V i⁶ vii^{°6} i | ii^{°6} V₄⁶ V⁷ i

Figuur 13: Gegeneerde modulatie van C-groot naar bes-klein. Er worden vijf mollen toegevoegd.

Een oplossing voor dit probleem zou zijn om een bepaald gewicht toe te kennen aan bepaalde zijden in de graaf. Een zijde die in één akkoord meer mollen of kruisen toevoegt, weegt zwaarder. Op deze manier kan buiten de lengte van het pad, ook de subtiliteit van de onderlinge modulaties worden meegenomen in het bepalen van welk pad uiteindelijk het beste is. Dit is een goede mogelijkheid voor vervolgonderzoek.

5.2 Het genereren van de akkoordstructuur

De voorgestelde grammatica levert over het algemeen goed werk in het genereren van degelijke muzikale zinnen, maar houdt geen rekening met de sterkte van de dominant. Zo kan het bijvoorbeeld voorkomen dat een constructie $V^7 - vii^{°6}$ gegeneerd wordt (afbeelding 14). Dit is uit den boze: V^7 is de sterkste dominant die er is en hoort op te lossen in een tonica of plaatsvervanger daarvan.

C: IV I ii⁶ V₄⁶ V⁷ I vi V⁷ I⁶ vi
 G: = ii

ii⁶ V⁷ vii^{o6} vi V⁷ vi I IV V⁷ I

Figuur 14: Gegeneerde modulatie van C-groot naar G-groot. De progressie V⁷ – vii^{o6} is aangeduid met het rode vierkant. EPs zijn groen gearceerd, cadensen zijn blauw gearceerd.

Hetzelfde komt voor met het Germaanse akkoord, wat hoort op te lossen in de vijfde trap (al dan niet in sext-ligging of met toegevoegd septiem) en niet in de zevende. Hoewel deze onregelmatigheid volgens de klassieke harmonieleer niet acceptabel is, is op gehoor niet direct te horen dat deze akkoorden niet kloppen. Desalniettemin zou dit opgelost kunnen worden door extra regels in de grammatica toe te voegen, die deze gevallen ondervangen.

Een tweede probleem waar de grammatica geen rekening mee houdt, is het stemverloop van de bas. De Romeinse trappenbecijfering is voor alle stemmen vrij, maar maakt de basnoot deterministisch. Soms zorgt dit voor vreemde en dissonante baslijnen. Een voorbeeld hiervan is te zien in afbeelding 15. In het ideale geval verloopt de baslijn, gezien het fundament is van het muziekstuk, stapsgewijs, zonder dissonante sprongen of hele grote sprongen.

De regels betreffende cadensen en EPMS zijn goede toevoegingen. In afbeelding 14 zijn deze muzikale zinnen aangeduid. Na een septiemakkoord dat oplost in de eerste trap in grondligging komt automatisch een PAC om de toonsoort vast te stellen. Ook dit is te zien in afbeelding 14. Het is eventueel mogelijk om de EPMS te verlengen via de parameter ChordSeqLen: hierdoor zal de toonsoort nog vertrouwelijker aanvoelen in de oren van de luisteraar.

5.3 Het harmoniseren van de akkoordstructuur

Het harmoniseren van de akkoordstructuur gebeurt volgens de gewenste parameters. Over het algemeen zijn de geïmplementeerde stemvoeringsregels voldoende om een redelijk resultaat te krijgen als het gaat om een totaalplaatje. Dat wil zeggen, met alle stemvoeringsregels geactiveerd, heeft de output van de MALS-machine iets weg van de koralen die Bach schreef. Echter, bij het bekijken van één specifieke stem, is vaak te zien dat er nogal wat scheelt aan de individuele stemvoering en structuur.

a: V i⁶ V⁶ i VI V⁷ i i iv i i
 e: = iv i

ger₅⁶ V₄⁶ V⁷ i a: = i⁶ iv⁶ VI i VI V₄⁶ V⁷ i

Figuur 15: Gegeneerde modulatie van a-klein naar e-klein, en weer terug naar a-klein. Alleen de bas- en sopraanlijnen zijn te zien. De baslijn verloopt ongestructureerd (zie de verminderde kwint in maat 4 en het algemene stemverloop vanaf maat 5 - dit is een probleem in de akkoordstructuur en de stemvoering) en de sopraanlijn maakt dissonante sprongen (zie de overmatige kwart in maat 2 - dit is een probleem in de stemvoering).

Een deel van de problemen in de stemvoering is te wijten aan de werking van het RBS. Het systeem termineert namelijk op het moment dat er *een* oplossing gevonden is, maar dat hoeft niet per se *de ideale* oplossing te zijn. Ook dit is te zien in afbeelding 15: de grote sprong in de baslijn in maat 6 (f naar a), had verholpen kunnen worden door de a een octaaf hoger te

plaatsen. Echter, bij deze uitkomst heeft de sopraanlijn precies die a, zodat er geen ruimte meer over zou blijven voor de tenor en de alt - dit zou tot stemkruising leiden. De oplossing van het systeem is dus om de basnoot te octaveren.

Een vreemde stemvoering kan vele redenen hebben en een samenloop van omstandigheden zijn. Het zou mogelijk zijn om nog meer regels in te bouwen om het systeem te optimaliseren: dit zal echter ten koste gaan van de efficiëntie en uniciteit. Een voorbeeld van een dergelijke regel zou het afwijzen van dissonante sprongen in een stem zijn.

5.4 Resultaten van proefpersonen

Om te testen of de modulaties die de MALS-machine genereert als vloeiend ervaren worden, is er aan proefpersonen gevraagd om te luisteren naar een aantal gegenereerde fragmenten. Participanten moesten van elk van de zeven fragmenten zeggen hoeveel modulaties ze hoorden. Elk fragment mocht slechts één keer beluisterd worden. Vooraf werd een inschatting gemaakt van de kennis van muziektheorie van de participant. Na het beluisteren van de fragmenten werd aan proefpersonen gevraagd om een kwaliteitsoordeel te geven over het geluisterde fragmenten. De antwoorden op deze open vraag zijn opgenomen in Appendix B. Merk op dat dit onderzoek niet bedoeld is om uitgebreide, op statistiek gebaseerde conclusies te trekken over de waarneming van gegenereerde modulaties. Hiervoor zijn de beschikbare data niet toereikend genoeg en de proefpersonen te divers.

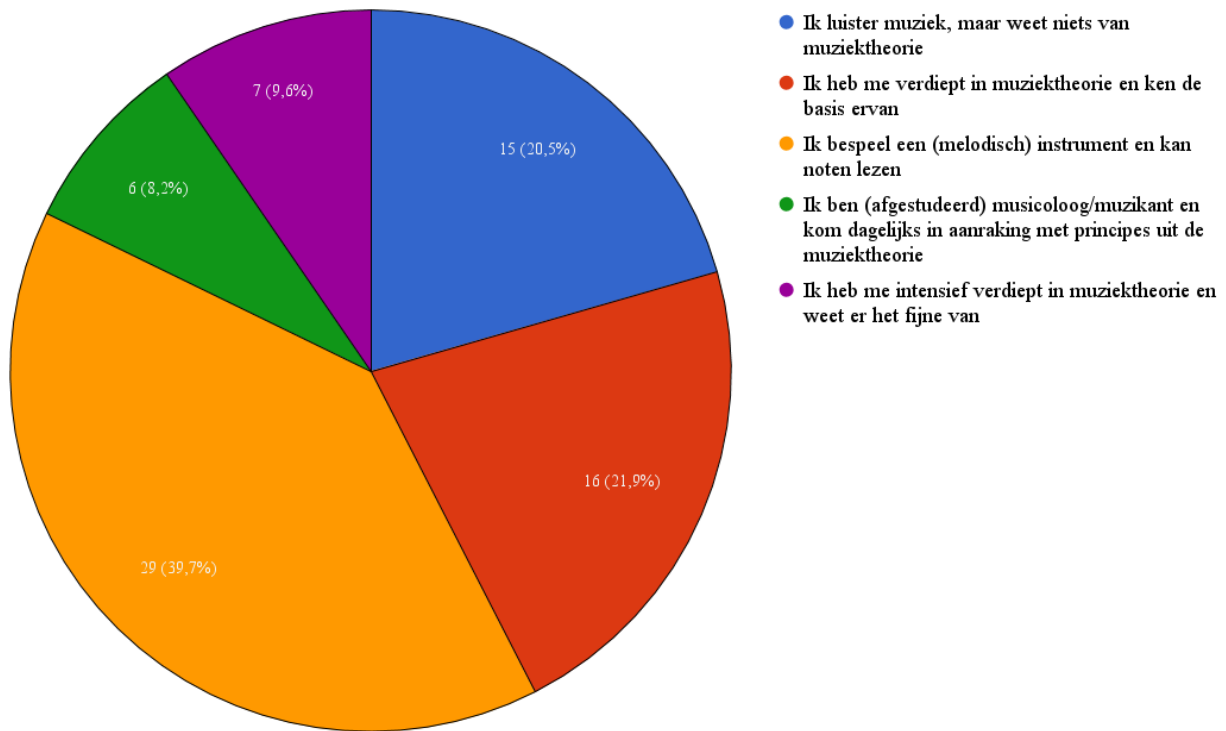
De modulaties in de fragmenten gaan van majeur naar majeur, van mineur naar mineur, van mineur naar majeur, en van majeur naar mineur. De parameters *ModPathLen* en *ChordSeqLen* zijn variabel ingesteld. Voor de overige parameters zijn de waarden uit de default preset gebruikt. In tabel 5 is een overzicht te zien van hoe de gebruikte fragmenten moduleren en de manier waarop de parameters bij elk fragment zijn ingesteld.

Fragment	Modulatiepad	ModPathLen	ChordSeqLen
Fragment 1	C - B	1	1
Fragment 2	E \flat - B \flat - C	1	1
Fragment 3	G - D - A - B - b	5	1
Fragment 4	c \sharp - D \flat - b \flat	3	30
Fragment 5	E \flat - B \flat - A - B	4	30
Fragment 6	f - c - g - f \sharp - c \sharp	5	1
Fragment 7	C - G	1	40

Tabel 5: Overzicht van gebruikte fragmenten, hoe die moduleren en ingevoerde parameters.

De bladmuziek van de gebruikte fragmenten is opgenomen in Appendix A.

Het experiment¹² werd uitgevoerd door 73 proefpersonen, die de vragenlijst van achter hun eigen computer invulden. De expertise op het gebied van muziektheorie van de participanten was divers en is weergegeven in afbeelding 16.



Figuur 16: Muzikale achtergrond van de participanten.

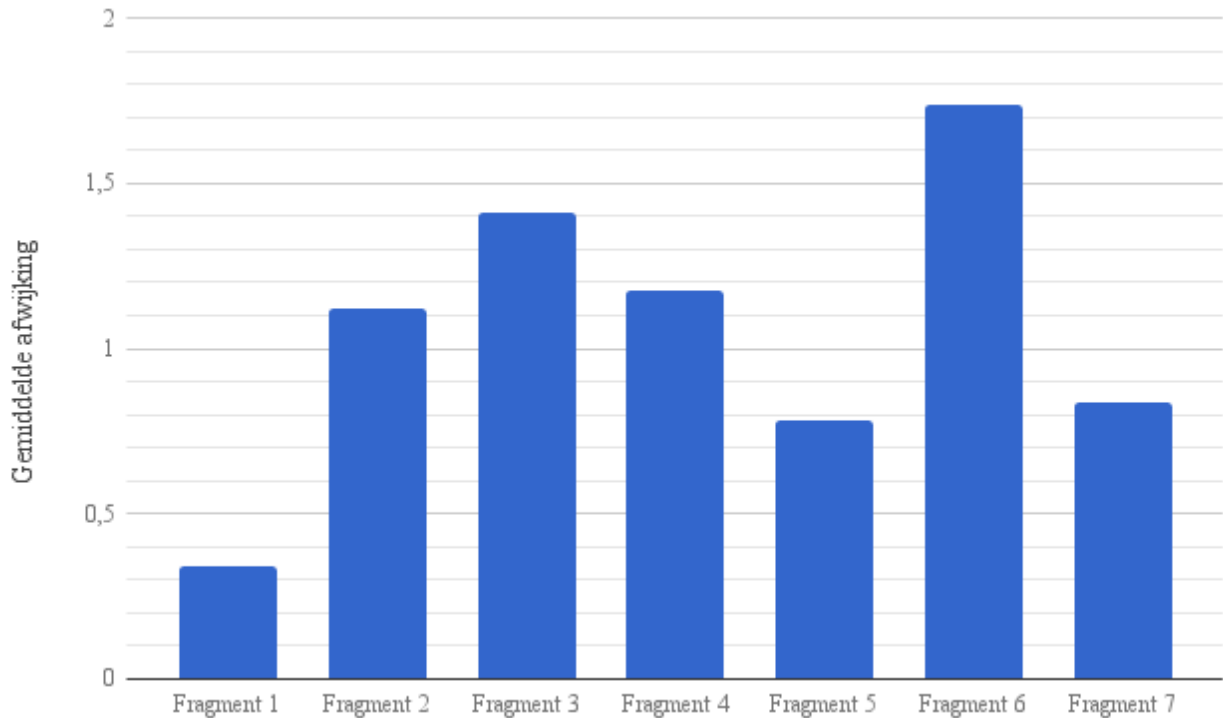
Als het gemiddelde genomen wordt van de hoeveelheid modulaties die de participanten hebben gehoord, blijkt dat zij in de meeste gevallen het aantal modulaties in een fragment onderschatten. Bij de fragmenten 1, 4 en 5 wordt het aantal modulaties gemiddeld overschat. De gemiddelden en varianties zijn weergegeven in tabel 6.

¹²De test is nog steeds online uit te voeren. Zie voor een link Appendix A.

Fragment	# Mod	Gemiddelde	Variantie
Fragment 1	1	1,342	0,534
Fragment 2	2	1,562	1,972
Fragment 3	4	2,945	2,108
Fragment 4	2	2,329	2,752
Fragment 5	3	3,068	1,315
Fragment 6	4	2,342	1,228
Fragment 7	1	0,712	1,208

Tabel 6: Overzicht van gemiddeld aantal gehoorde modulaties en de variantie daarvan. # *Mod* staat voor het aantal modulaties dat het fragment heeft.

Van de antwoorden die de participanten hebben gegeven, is de gemiddelde absolute afwijking¹³ genomen. Afbeelding 17 toont deze gemiddelde afwijking voor elk fragment.



Figuur 17: Gemiddelde absolute afwijking per fragment.

¹³De gemiddelde absolute afwijking is het gemiddelde van de absolute waarden van de afwijking van het daadwerkelijke aantal modulaties.

Deze waarden op zichzelf zeggen niet veel, maar sommige zaken zijn te verklaren aan de hand van de verklaringen die eerder besproken zijn en de gemiddelde waarden. In fragment 1 is de modulatie via Ger_3^{\flat} te horen. Het eerder beschreven principe wat betreft deze specifieke modulatie lijkt te kloppen: veel mensen hebben deze modulatie gehoord en de gemiddelde absolute afwijking is klein. Dit suggereert dat deze modulatie inderdaad niet vloeiend is. Ook bij fragment 5 speelt Ger_3^{\flat} een dubieuze rol: één keer als spilakkoord en één keer als onderdeel van de akkoordstructuur.

Fragment 4 heeft twee overduidelijke modulaties: eerst van mineur naar majeur, dan van majeur naar mineur. Daarnaast komt in het slot van het stuk (maat 30) het laddervreemde Germaanse akkoord voor. Het zou niet raar zijn als proefpersonen deze verrassende wending in de akkoordstructuur als modulatie hebben aangezien. Dit zou de gemiddelde overschatting in dit fragment kunnen verklaren.

De onenigheid in fragment 3 en fragment 6 en de grote afwijking in gemiddelden, is te verklaren aan de hand van de subtiliteit van de modulaties. In fragment 3 worden in geen enkele modulatie meer dan twee kruisen toegevoegd, afgezien van de modulatie naar de parallelle mineurladder (B-groot naar b-klein). In fragment 6 gaan de modulaties wat dat betreft ook zo geleidelijk.

Proefpersonen geven aan dat ze de fragmenten iets weg vinden hebben van koralen van Bach. Ze vinden de fragmenten over het algemeen eentonig in ritmisch en melodisch opzicht. Modulaties gaan vrij soepel, op wat enkele uitzonderingen na, zo menen zij. Over het algemeen zijn de participanten positief over hoe de fragmenten klinken.

Uiteraard is verdere analyse en een proefopstelling in gecontroleerde omgeving nodig om aan de vragenlijst een waardeoordeel te hechten. De verzamelde data suggereren echter wel dat de modulaties over het algemeen vloeiend zijn en de gegenereerde muziek niet als storend of vreemd ervaren wordt.

6 Discussie en conclusie

De MALS-machine is in staat om goed klinkende modulatie-structuren te generen, die als hulpmiddel kunnen dienen om een logische modulatie tussen twee toonsoorten te verwezenlijken. Tevens geeft het algoritme opties voor versieringsnoten. Hoewel de muziek die het algoritme genereert aan een aantal stemvoerings- en verdubbelingsregels voldoet, is het nog niet in staat om autonoom melodieën en ritmisch interessante structuren te genereren. Vervolgonderzoek zou hiernaar gedaan kunnen worden. Suggesties daarvoor worden in deze sectie gegeven.

Als eerste zou er informatie gehaald kunnen worden uit ingevoerde muziekstukken, om melodische en ritmische aspecten te abstraheren en gebruiken om een in de context passende modulatie te genereren. Hierbij zouden deze muziekstukken geanalyseerd moeten worden, om bijvoorbeeld akkoordduur, ritme en veelvoorkomende progressies te abstraheren. Ook zou er gekeken kunnen worden naar het aantal voorkomens van versieringsnoten en bepaalde akkoorden. Dat laatste zou leiden tot een CFG waarbij herschrijfregels worden gekozen op basis van kansen, in plaats van willekeurig.

Door een context te creëren waarbinnen het algoritme werkt en de parameters binnen het kader van deze context in te stellen, zal de output van de MALS-machine waarschijnlijk verbeteren. Het verkrijgen van deze context op basis van ingevoerde muziek is echter een onderzoek apart.

Ten tweede zou de grammatica, die gebruikt is om akkoordprogressies te genereren, uitgebreid kunnen worden met leenakkoorden om tonicization¹⁴ mogelijk te maken. Hiermee wordt de keuze voor spilakkoorden vergroot: een knoop in de graaf die modulatiepaden representeert zal daardoor meer uitgaande zijden krijgen. Tevens kunnen chromatische spilakkoorden¹⁵ geïmplementeerd worden om de opties nog verder te verrijken.

Een derde verbetering zou zijn om de graaf gewogen te maken om vloeiende modulaties te stimuleren: zijden waarbij weinig mollen of kruisen toegevoegd of verwijderd worden, wegen minder zwaar dan zijden die in één keer meerdere mollen of kruisen toevoegen dan wel verwijderen. Doordat het onderliggende modulatiepad subtieler is, zal de gegenereerde modulatie vloeiender klinken. Er moet in dat geval wel een afweging gemaakt worden tussen de geleidelijkheid van de modulatie en de lengte van het modulatiepad. Het toekennen van gewichten zou gedaan kunnen worden via reinforcement learning (Sutton & Barto, 1998), waarin een leer algoritme waarden geeft aan de zijden van de graaf en daar positieve of negatieve feedback op krijgt .

Als vierde en laatste verbetering zouden er meer manieren van moduleren toegevoegd kunnen worden. Moduleren via (enharmonische) spilakkoorden is slechts één techniek om te moduleren.

¹⁴Zie voetnoot 6 op pagina 20.

¹⁵Manier van moduleren waarbij in een chromatische progressie een gealtereerd spilakkoord gebruikt wordt, dat laddervreemd is voor zowel hoofd- als dooltoonsoort.

De praktijk leert dat componisten vaak afwijken van deze methode en andere manieren gebruiken om van toonsoort te wisselen. Als er eenmaal een context is waarbinnen het algoritme kan functioneren, zou er bijvoorbeeld ook gekeken kunnen worden naar moduleren via sequenzen¹⁶, of via gemeenschappelijke tonen¹⁷.

Hoewel onderliggende context nog niet geanalyseerd wordt door de MALS-machine (en deze context wel hard nodig is voor het componeren van muziek in het algemeen), is het algoritme wel in staat om muziek te genereren die volgens de harmonieleer correct in elkaar steekt. Het zou kunnen dienen om beginnende componisten een houvast te bieden in het moduleren, of gebruikt kunnen worden als real-time muziekgeneratieprogramma dat in videogames gebruikt kan worden om dynamische achtergrondmuziek te verzorgen. Het programma biedt tevens vruchtbare en veelbelovende mogelijkheden tot uitbreiding.

¹⁶Modulatietechniek waarbij met een zelfde ritmisch en melodisch patroon de tonica telkens op een andere noot komt te liggen.

¹⁷Modulatietechniek waarbij er gebruik gemaakt wordt van de noot of noten die twee toonsoorten gemeen hebben.

7 Dankwoord

Speciale dank gaat uit naar de volgende personen: mijn begeleider Jan Broersen voor al zijn hulp, Eric Jas, voor zijn steun bij het muziektheoretische deel van deze scriptie, Lydia Bax, voor het proeflezen van deze scriptie en het invoeren van fragment 5 in Lilypond, en Louise Dits, voor het proeflezen van deze scriptie.

8 Bibliografie

1. Cambouropoulos, E. (2000). *From MIDI to traditional musical notation*. In Proceedings of the AAAI Workshop on Artificial Intelligence and Music: Towards Formal Models for Composition, Performance and Analysis (Vol. 30).
2. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2001). *Introduction to algorithms, second edition*.
3. Ebcioğlu, K. (1990). *An expert system for harmonizing chorales in the style of JS Bach*. The Journal of Logic Programming, 8(1-2), 145-185.
4. Freitas, A., & Guimaraes, F. (2011). *Melody harmonization in evolutionary music using multiobjective genetic algorithms*. In Proceedings of the Sound and Music Computing Conference.
5. Koelle, D. (2008). *The Complete Guide to JFugue: Programming Music in Java*. Web.
6. Laitz, S. G. (2012). *The complete musician: an integrated approach to tonal theory, analysis, and listening*. Oxford University Press.
7. Liang, F. (2016). *BachBot: Automatic composition in the style of Bach chorales*.
8. Mozer, M. C., & Soukup, T. (1991). *Connectionist music composition based on melodic and stylistic constraints*. In Advances in Neural Information Processing Systems (pp. 789-796).
9. Rohrmeier, M. (2007) *A generative grammar approach to diatonic harmonic structure*. Proceedings of the 4th sound and music computing conference.
10. Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction (Vol. 1, No. 1)*. Cambridge: MIT press.
11. Verhagen, L. (2017, 15 juli). *Help! Zijn computers nu ook al creatief?*. V Zomer Magazine.

Appendices

A Fragmenten in vragenlijst

Appendix A bevat bladmuziek van de fragmenten die door proefpersonen beluisterd zijn. De test is te vinden op <https://goo.gl/forms/5jo6eZ1kKUNA7yY12> en kan nog steeds uitgevoerd worden. Op <http://timvvlietproductions.com/Scriptie/antwoorden.html> zijn de muziekstukken en antwoorden direct in te zien.

Fragment 1

1 modulatie

The musical score for Fragment 1 consists of two systems of music. The first system is in C major and contains 11 measures. The second system is in B major and contains 7 measures. The chord progressions are as follows:

System 1 (C major):
C: V I IV V⁷ I I V⁶ I IV I V⁷
B: = Ger₅⁶

System 2 (B major):
V⁷ I⁶ I ii V₄⁶ V⁷ I

Fragment 2

2 modulaties

1

Es: IV I ii⁶ V⁷ I I V⁷ I⁶ vi I

4

Bes: I⁶ I IV vii^{o6} I⁶ vi I⁶ vi = V I IV I ii

7

C: V⁶₄ V⁷ I I IV I IV = V⁶ IV⁶ V⁷ I⁶

10

I⁶ II V⁶ I II II⁶ V⁶₄ V⁷ I

Fragment 3

4 modulations

G: IV I IV ii V₄⁶ V⁷ I vi I V⁷

D:

I IV I ii ii⁶ V⁷ vi
= ii vii^{o6} I ii⁶ ii V⁷ I I⁶

A:

I IV I V IV I IV V₄⁶ V⁷ I I

B:

V⁷ vi I vi I⁶ ii V
= IV V⁶ I ii ii⁶

V⁷ I vi I I⁶ I IV I ii⁶ V⁷

17

vi I IV I I⁶ I = vii^{o6} vii^{o6} i iv V⁷ i

b:

Fragment 4

2 modulations

cis: VI V⁶ i⁶ V VI iv ii^{o6} V VI vii^{o6} V⁶ i

ii^{o6} V⁷ i VI vii^{o6} i VI i iv i iv

i VI i iv i i⁶ i i⁶ V i iv i

iv i iv i i⁶ i iv i VI V VI i

Des: i⁶ ii^{o6} V⁶ = vii^{o6} vii^{o6} V⁶ I IV⁶ V⁷ I V I⁶

16

V⁷ I vi V I⁶ vi I IV I V⁶ I⁶

19

V⁷ I⁶ IV V⁶ I IV I V⁷ vi V

22

vi IV V⁷ vi V⁷ vii^{o6} ii^{o6} VI V i VI

bes: =

25

V⁷ i iv V⁶₄ V⁷ i iv⁶ V⁶₄ V⁷ i ii^{o6} V⁶₄ V⁷

29

i ii^{o6} V⁶₄ V⁷ i Ger⁶₅ V⁷ i ii^o V⁶₄ V⁷ i

Fragment 5

3 modulations

Measures 1-3: Es major (IV), C major (I), D major (IV). Chords: IV, I, IV, V₄⁶, V⁷, I, I, IV, I, IV, I.

Es: IV I IV V₄⁶ V⁷ I I IV I IV I

Measures 4-6: D major (ii⁶), G major (ii), F major (vii^{o6}), D major (V), G major (I), F major (IV), D major (I), G major (IV), D major (I), F major (I⁶), G major (V), F major (vi).

ii⁶ ii vii^{o6} V I IV I IV I I⁶ V vi

Measures 7-9: F major (V), C major (I), D major (IV), F major (V), C major (V⁶), D major (I), C major (IV), D major (I), F major (ii⁶), D major (V⁷), C major (I), F major (I⁶).

Bes: V I IV V V⁶ = I IV I ii⁶ V⁷ I I⁶

Measures 10-12: D major (vi), G major (I), F major (V⁶), D major (V⁷), G major (I), F major (IV), D major (I), F major (V⁶), G major (V), D major (I), F major (vi).

vi I V⁶ V⁷ I IV I V⁶ V I vi

Measures 13-15: F major (I⁶), C major (vi), D major (I), F major (I⁶), D major (I), F major (IV), D major (I), F major (IV), D major (I), F major (V⁷), C major (vii^{o6}).

I⁶ vi I I⁶ I IV I IV I V⁷ vii^{o6}

16

I V vi vii^{o6} I IV I vii^{o6} I ii⁶ ii = V⁷
 Ger⁶₅

A:

19

vii^{o6} I vi V⁷ I V vi V vi V⁶

22

vi I⁶ vi I IV I IV I V I IV V

25

I IV I IV I V⁷ I IV I IV ii

28

V⁶ B: = IV⁶ V I vi V⁷ I IV V⁶₄ V⁷ I IV ii V⁶₄ V⁷

32

I ii⁶ V⁶₄ V⁷ I IV V⁷ I Ger⁶₅

51

35

V₄⁶ V⁷ I vi V⁷ I ii⁶ V⁷ I

Fragment 6

4 modulaties

f: i⁶ VI i VI V₄⁶ V⁷ i i⁶ i i iv⁶
 c: = iv i iv⁶

g: V⁷ i V⁶ VI V⁶ i i fis: = VI i
 = iv i iv ii^{o6} V⁷ i i⁶ V

Ger₅⁶ V⁷ i i iv i V⁷ i⁶ iv ii^{o6} V⁷ VI

dis: iv V⁷ i i⁶ vii^{o6} = ii^{o6} V⁶ i iv⁶ V⁷ i

Fragment 7

1 modulatie

1
c: IV I IV ii V⁷ I I vii^{o6} I IV I

4
V⁶ I IV I IV I IV I V⁶ vi IV⁶ V⁶ I IV I V⁶

8
vi IV⁶ V vi V⁶ I vii^{o6} I IV I vi I = IV I IV V⁷

G:
12
I IV ii V⁷ I IV V⁶₄ V⁷ I ii V⁶₄ V⁷ I

16
ii⁶ ii V⁶₄ V⁷ I ii V⁷ I ii⁶ V⁶₄ V⁷ I IV⁶

20

V₄⁶ V⁷ I IV⁶ V⁷ I IV V₄⁶ V⁷ I

B Reacties van participanten

In deze appendix zijn de kwaliteitsoordelen van participanten te lezen. In het kader van de privacy zijn namen en andere persoonlijke boodschappen uit de reacties verwijderd. De reacties zijn ongeredigeerd en kunnen taal- en typefouten bevatten. Nota bene: niet alle 73 proefpersonen hebben deze vraag ingevuld.

1. “Ik heb het idee dat ik richting het einde begon te begrijpen waar ik naar moest luisteren, en dat mijn antwoorden toen iets accurater werden. De muziek klonk niet bijster natuurlijk; de modulaties kan ik weinig over zeggen.”
2. “Ze leken erg veel op elkaar, ik denk dat ik daadwerkelijk meer modulaties heb gehoord dan er waren, omdat het leek alsof er hier en daar een paar noten soms werden verhoogd/-verlaagd zodat het even leek alsof het naar een andere toonsoort ging. Ik vond verder dat er niet per se modulaties nodig zijn om het stuk interessant te houden.”
3. “Zeker doordat ik maar één keer mocht luisteren twijfelde ik af en toe wel of ik het wel of niet goed hoorde. Verder deden de melodieën me ietwat aan Bach denken. De fragmenten leken wel sterk op elkaar, dus voor mij was het interessanter geweest als er iets meer variatie in had gezeten.”
4. “Af en toe was de modulatie zeer voorspelbaar en erg banaal. Fragmenten leken melodisch op elkaar. Dominantseptiemakkoord erg vaak gebruikt als spil.”
5. “Ik heb nooit meer dan 2 modulaties gehoord in de zeven stukken. Het zou kunnen komen doordat ik alleen de plotse modulaties heb kunnen opmerken, waardoor de ‘vloeiende’ modulaties (die er misschien dus wel waren) inderdaad vloeiend en natuurlijk waren. Ik heb niet zo veel kennis over harmonieleer, dus ik heb mijn oren moeten vertrouwen!”
6. “Ik zie ze wel als een soort van liftmuziek of muziek in een openbaar toilet in een winkelcentrum. Niet heel interessant maar prima omgevingsgeluid. En ik heb dus echt geen verstand van toonsoorten of modulaties dus ik hoop dat dit een beetje goed ging :)”
7. “De fragmenten waren qua modulaties nogal housterig. Het algoritme doet zijn best, maar je hoort heel goed dat er geen muzikant aan te pas komt. De modulaties kunnen naar mijn mening vloeiender en dat komt mede door de grote hoeveelheid informatie die het algoritme in elk fragment stopt, probeer eens iets minder drukke stukken te genereren. Als het geheel rustiger klinkt gaan de modulaties ook beter tot hun recht komen.”
8. “De fragmenten vond ik melodisch best interessant. Wat me opviel was dat ze bijna allemaal dezelfde structuur hadden. De modulaties waren soms niet heel vloeiend, maar waren naar mijn mening vaak nog wel ‘muzikaal’ of ‘mooi’. Een onge oefend oor zou er denk ik zonder op te letten niet veel modulaties uit halen; ik ben ook geen expert wat

muziektheorie en noten betreft, en ik heb volgens mij de eerste 3 of 4 fragmenten helemaal niet goed gedaan. Ik hoorde wel dat het gemoduleerd was, maar het duurde tot het 5e fragment tot ik kon aangeven waar de modulaties zaten. Zeker in de eerste paar fragmenten heb ik daarom meer modulaties gehoord dan er waren.”

9. “Ik vond het muzikale stukken, zeker gezien het feit dat ze door een computer worden gemaakt. Wel vond ik de stukken allemaal wat op elkaar lijken. Ik denk dat ik minder modulaties heb gehoord dan er zijn. De modulaties die ik heb gehoord vond ik vrij opvallend, daardoor zou ik ze niet heel vloeiend noemen. Al verschilde dat ook wel per fragment.”
10. “Leken erg op elkaar. Ik denk dat ik minder modulaties heb gehoord dan er waren. Dit kwam mede door weinig variatie i.d. fragmenten.”
11. “melodisch niet interessant. ik hoor vaak V-I verbindingen of andere cadensen. Alle fragmenten leken op elkaar.”
12. “Ik vond het interessant om naar te luisteren, hoewel ik het gevoel had dat er weinig opbouw in zat. Het was redelijk lineair, zonder dat het naar een soort climax leek te werken.”
13. “De modulaties waren vaak mooi verborgen, echter was de structuur van akkoorden en hoe ze gespeeld werden wel repetitief, hierdoor kan je het nog wel onderscheiden van door mensen gecomponeerde stukken. Verder erg indrukwekkend.”
14. “Alle fragmenten klonken een beetje hetzelfde en ik, vond die modulaties die ik gehoord heb niet echt vloeiend”
15. “Ik zou niet persé zeggen dat deze melodiën door een computer gegenereerd zijn, maar vind alle fragmenten wel op elkaar lijken. Het eerste fragment was daarom nog interessant, daarna begon het saaier te worden. De modulaties waren niet opvallend houderig! Ten slotte denk ik dat ik het qua aantal modulaties wel eens helemaal verprust kan hebben, en dan moet je mijn reactie maar zien als anomalie.. Ondanks mijn 10jaar durige muzieklessen (praktijk en theorie) en eindexamen in muziek (en muziektheorie) ben ik lichtelijk toondoof... Sorry!”
16. “Nou t zal wel irritant lang in je hoofd blijven hangen. Maar die modulaties zijn soepeltjes hoor.”
17. “Het was fijne muziek om naar te luisteren, maar wel veel hetzelfde. Ik hoorde vrij weinig modulaties, als het er meer waren zijn ze dus erg vloeiend en natuurlijk.”
18. “De fragmenten waren erg druk. Na een paar gehoord te hebben, werd ik er een beetje moe van. De modulaties zijn soms wel moeilijk te horen. Ik denk dat er ik dan ook minder heb gehoord dan er eigenlijk waren.”

19. "Echt dik man"
20. "Ik vond de fragmenten niet lijken op muziek die ik al ken, wel leken ze erg op elkaar. Sommige modulaties waren duidelijk herkenbaar."
21. "Het was bij veel fragmenten wel moeilijk te horen waar de modulaties zaten, dus ik zou wel zeggen dat het vloeiend ging. Het zouden er best een stuk meer kunnen zijn dan ik gehoord heb. De fragmenten klinken wel interessant, maar lijken soms nergens naartoe te gaan en een beetje rond te zweven qua melodie."
22. "De fragmenten waren allemaal redelijk hetzelfde qua melodie en ritme, maar toch heel verschillend en dat was interessant. Aangezien mijn muzikale kennis niet heel erg groot is heb ik verder niet echt een idee over de modulaties."
23. "Muziek klonk echt als gecomponeerde muziek, dus dat was leuk. De fragmenten waren alleen wat snel (allemaal hetzelfde tempo) en er zaten wel heel erg veel I-V-I-verbindingen in en soms raakte ik het spoor een beetje bijster daardoor. Ik denk dat ik er daardoor een paar gemist kan hebben. De modulaties die ik hoorde waren heel duidelijk te horen, maar ook vaak nog wat abrupt, de toonsoorten zouden nog wat mooier met elkaar verweven kunnen worden (maar het zou dus kunnen dat ik juist de mooie modulaties heb gemist)"
24. "Mooi werk! Klinkt heel natuurlijk."
25. "Weinig variatie in lengte van de noten, volgen duidelijk een structuur. De fragmenten deden me denken aan een stuk (volgens mij bedoeld voor klavecimbel) maar ik kan even niet bedenken welke. De modulaties die ik herkend heb waren opvallend, maar ik denk wel dat ik er minder gehoord heb dan dat er waren."
26. "Melodisch gaan de fragmenten op den duur vervelen, harmonisch klinkt het soms leuk; zo nu en dan zijn de modulaties erg abrupt en onnatuurlijk, maar vaak ook subtiel. Ik vermoed dat ik enkele gekke akkoordwisselingen voor modulaties heb aangezien en vice versa, maar of ik meer of minder modulaties heb gehoord dan er eigenlijk waren weet ik niet."
27. "Ik vind je definitie van een modulatie niet helemaal duidelijk. In de fragmenten komen regelmatig akkoorden voor die niet in de toonsoort van dat stukje van het fragment horen. Volgens mij bedoel je die echter niet als modulatie te benoemen, maar alleen als voorhouding voor het akkoord erna dat wel weer in de heersende toonsoort past. Maar dat zijn natuurlijk eigenlijk wel (steeds 2) modulaties. Daar kwam ik pas gaandeweg achter en heb met terugwerkende kracht mijn eerste antwoorden op de gok/herinnering aangepast."
28. "Bij twee/drie fragmenten was er op het einde een soort mini-modulatie? En daarna direct weer terug naar de andere toonsoort. Ik heb die half-ish mee laten tellen dus ik denk dat ik eerder te veel dan te weinig modulaties heb ingevuld."

29. “Ik geloof dat ik meer modulatie heb gehoord dan er daadwerkelijk zijn, omdat het erop leek dat ik daar gefocust naar zocht en dus mezelf makkelijk triggerde om te zeggen dat iets een modulatie was. Voor de rest vond ik het op zich best fijne muziek om aan te horen.”
30. “Ik vond de fragmenten mooi en natuurlijk klinken. Ook ’bestaande muziek’ luister ik weleens op midi-achtige manieren (bijv. die filmpjes op youtube waarin je alle noten gevisualiseerd ziet met gekleurde rechthoeken). De muziek klonk dus goed, niet te onderscheiden van echte muziek dus. Modulaties vloeiend, volgens de regels. Ik denk dat ik er minder heb gevonden dan er in zaten.”
31. “Er zitten echt leuke stukjes tussen vind ik! Niet superveel variatie in tempo/dynamiek (maar dat was misschien ook i.v.m. de experimentele opstelling?).”
32. “Ik denk dat ik, vooral aan het begin, dacht dat er veel meer modulaties waren dan er echt waren. Ik had graag twee of drie oefen mogelijkheden (met de juiste antwoorden) om beter te kunnen begrijpen wat een “modulatie” is en hoe het klinkt. Ik was vaak aan het gissen. Ik vond ze meestal interessant en aangenaam. Deed me denken aan Bach’s Kunst der Fuge. Toch af een toe wat houderig door een paar herhalingen. Leuk om te doen! Succes met het onderzoek.”
33. “Ik vond de muziek niet mooi, het leek ook allemaal erg op elkaar. Wel vond ik dat de modulaties vloeiend waren verwerkt. Ik denk dat ik minder modulaties heb gehoord dan dat er eigenlijk waren, bij sommige misschien juist meer.”
34. “Ze lijken best wel op herkenbare muziek, maar weet niet of ik het eerder gehoord heb. Maar melodisch zeker best wel interessant.”
35. “Ze leken allemaal hetzelfde te beginnen en veel gebruik van toonladdertjes... maarja verstand heb ik er niet van dus misschien lul ik uit mn nek.”
36. “Ik denk dat ik er minder heb gehoord dan er waren. kan dus ook niet goed beoordelen of de modulaties vloeiend waren. Ik vond ze niet zo interessant (trouwens)”
37. “Ik ben niet zo van de klassieke muziek, maar mijn opa en oma wel, dus de fragmenten kwamen me vaag bekend voor. Waarschijnlijk heb ik meer modulaties gehoord dan er daadwerkelijk waren. Ook leken de fragmenten voor het grootste deel uit hetzelfde muziekstuk te komen.”
38. “Ik vond fragment 6 een vrij rare toonsoort hebben. Volgens mij zaten daar enkele verminderde intervallen in. In sommige fragmenten waren de modulaties vloeiender dan in andere fragmenten. Ik denk dat ik redelijk goed zit met mijn antwoorden, hoewel er 1 fragment bij was waar ik totaal de tel kwijt was en dus maar iets heb gegokt.”

39. “De fragmenten klonken over het algemeen hetzelfde waardoor de interesse, voornamelijk bij de lange stukken afnam. M.u.v. het eerste fragment vond ik de modulaties vloeiend en natuurlijk; mij zou je wijs kunnen maken dat iemand dit daadwerkelijk gespeeld heeft.
“
40. “Ik wil heel graag weten wat m’n score is...”
41. “Ik vond de muziek niet melodisch interessant, de modulaties niet vloeiend en natuurlijk. Ik heb misschien een aantal modulaties gemist. Fragment 4 vond ik wel mooi.”
42. “Er zat wel een repetitief element in sommige fragmenten – steeds weer op het septime uitkomend. De modulaties waren wisselend, soms nogal abrupt, soms vloeiend en natuurlijk. Maar voor een goed oordeel daarover miste vooral ook de ’context’ van een vollediger muziekstuk – deze fragmenten hadden geen kop en staart, zeg maar.”
43. “de fragmenten leken veel op elkaar qua ritme. de modulaties waren soms heel duidelijk te horen, doordat ze niet heel vloeiend waren, anderen waren moeilijker te horen. Ik vermoed dat ik meer modulaties heb gehoord dan dat er waren.”
44. “Het waren mooie melodieën maar ik weet echt niets van modulaties en hoe ze te herkennen dus ik denk niet dat ik heel accuraat ben geweest. :’D”
45. “Ik vond het extreem lastig om te horen, vooral als er een plotselinge grote afstand tussen noten is en ik denk dat ik er ver naast zit.”
46. “Melodisch vaak niet interessant, want te repetitief. Ik denk dat ik wat I -> IV modulaties heb gemist.”
47. “Heel vaak niet vloeiend, maar soms vraag ik me af of ik er een gemist heb.”
48. “Fragment 4 beviel me het beste, het einde was spannend. De modulaties zijn wel houderig. Sommige fragmenten suggereren steeds een cadens die dan niet komt, dat is wel leuk.”
49. “Beetje saaie fragmenten. Deden me denken aan koralen van Bach. De modulaties waren redelijk vloeiend. Ik volgde de melodiën niet zo goed, waardoor ik moeilijk kan zeggen of de modulaties natuurlijk waren. Ik vond ze in ieder geval vrij random.”
50. “Ik denk dat er meer modulaties waren dan ik gehoord heb. Het klonk muzikaler dan ik had verwacht, modulaties waren in mijn oren voor de helft vloeiend, voor de helft niet. Strak tempo maakt het minder natuurlijk.”
51. “De meeste modulaties vond ik vloeiend, ik was lang niet zeker over al mijn antwoorden, maar sommige waren erg overduidelijk.”

52. “De muziek lijkt vrij doelloos, blijft almaar stuwend doorgaan zonder duidelijk naar een hoogtepunt toe te werken. Soms verrassende harmonische wendingen; in sommige gevallen positief/interessant, in sommige gevallen onlogisch/storend. Lastig om alle modulaties eruit te halen, behalve de hele onlogische.”
53. “Geen idee of wat ik denk te horen als een vloeiende modulatie er ook echt een was. wel een aantal fragmenten met hele duidelijke plotselinge modulaties. ...waardoor ik ging twifelen aan de rest...”
54. “Ik vond de muziek harmonieus en de modulaties vloeiend. Ik denk dat ik te veel modulaties heb gehoord dan er daadwerkelijk waren maar ik vond het moeilijk te horen. De muziek had wel iets Barokkigs en deed me in de verte aan Bach denken.”
55. “Soms twijfelde ik of ik een modulatie hoorde of niet (bijvoorbeeld een spilakkoord dat meteen weer terugsprong).”
56. “Ik moet toegeven dat ik hier en daar heb gegokt, omdat ik niet goed wist waar ik precies naar moest luisteren. In dat opzicht waren de modulaties blijkbaar niet erg goed te horen. De muziek zelf vond ik vrij veel van hetzelfde en relatief oninteressant.”
57. “Sommige modulaties waren wat subtieler, anderen lagen er heel dik bovenop. Een enkele keer kwam er één akkoord dat geenszins in de voorafgaande toonsoort paste, maar dan ging ie direct weer terug naar wat het daarvoor was. Ik wist niet zo goed of ik die mee moest rekenen, want ik vind zulk een uitschieter eigenlijk niet tellen als (twee) modulatie(s). Melodisch was het nogal diffuus, en het ging niet echt ergens heen. Als je tegen me zou zeggen dat het Bach was zou ik je heel misschien geloven, maar denken dat hij die zondag z’n dag niet had. Het is natuurlijk beperkt doordat het simpele midi’s zijn, standaard piano. Misschien klinkt het wat interessanter als het verdeeld is over meerdere partijen? Stop er een hobo in of zo.”



Figuur 18: Een slotnoot.