

Algoritmisk mønsteridentifikation

Nogle betragtninger omkring computeranvendelse i musikanalytisk øjemed

ANDERS BONDE

Algoritmisk identifikation af *mønstre* i musik indtager nu som før en fremtrædende position i forbindelse med computerstøttet musikanalyse.¹ Der er tale om et velintegreret videnskabsfelt indenfor datalogien, oprindeligt udviklet til tekstanalyse og siden også anvendt indenfor molekylærbiologien med henblik på data-sortering, men hvis applicering i forhold til musikvidenskaben er betydelig mindre påagtet og anerkendt med undtagelse af aktiviteterne ved nogle relativt få interdisciplinære forskningsmiljøer. Og dette til trods for at algoritmisk mønsteridentifikation med henblik på musikanalyse har fundet sted så tidligt som i 1949, hvor Bertrand H. Bronson redegør for en computergenereret klassifikation af folkemelodier på baggrund af et maskinelt læsbart kodesprog.²

At musikforskningen som helhed ikke har 'taget computeren til sig' som research-redskab, kan have flere årsager, der dog næppe vedrører metoden i sig selv, men som vel snarere samler sig omkring en, blandt humanistiske videnskaber, generel uvilje mod at overlade udredningen af komplicerede (menneskeskabte) sammenhænge til teknologien. Det er eksempelvis et velkendt og hyppigt fremført synspunkt, at en computer i virkeligheden ikke kan analysere musik, eftersom musikanalysen nødvendigvis må inddrage *fortolkningen* som sit væsentlige element. Og maskinen er som bekendt 'dum'; forstået på den måde, at den hverken er i stand til at tænke eller føle endsige tænke/føle *musikalsk* – et faktum, som 'de teknologiivrige' ofte implicit beskyldes for at se bort fra. Selvom forsvaret for den menneskelige intuition for så vidt er lige så relevant, som det er sympatisk, aner man næsten heri en irrationel angst for menneskets 'løsrivelse' fra musikken (og herunder musikanalysen), hvor de registrerings- og databearbejdningmæssige fordele, som computeren helt oplagt tilbyder, end ikke diskuteres. Vel kan computeren ikke analysere, men dette er langtfra ensbetydende med, at man ikke kan udføre en musikanalyse med hjælp fra en computer.³

- 1 En algoritme er en entydig og abstrakt beskrivelse af den procedure, som eksempelvis en computer gennemløber i løsningen af en nøjagtigt defineret opgave. Således er algoritmisk mønsteridentifikation den samlede fællesbetegnelse for automatisk eller maskinel aflæsning og sammenligning af data. Betegnelsen omfatter de mere gængse prædikater i den engelsksprogede litteratur, der fortrinsvis dækker området, såsom *pattern discovering*, *pattern recognition* og *pattern comparison*. Alternative betegnelser såsom *pattern matching*, *pattern extraction* eller *pattern induction* forekommer desuden og anvendes, ligesom de tre første, ofte i flæng, alt efter tradition. Dog synes der til en vis grad at have dannet sig almindelig konsensus omkring hovedsagelig to grundlæggende forskellige betydninger (jf. note 23).
- 2 Bertrand H. Bronson, 'Mechanical Help in the Study of Folk Song', *Journal of American Folklore*, 62/244 (1949), 81-86.
- 3 Således er den almindeligt valgte betegnelse, *computer-assisted music analysis* (frem for f.eks. *computer-based music analysis*), næppe helt tilfældig.

At selve analysen langt fra er bragt til ende, når computeren har gjort sit arbejde, er i virkeligheden en ganske banal kendsgerning, der næppe behøvede at blive nævnt, og som i hvert fald ikke i sig selv bør give anledning til at afvise computeren som et værdifuldt teknologisk hjælpemiddel.

Tilbage står imidlertid spørgsmålene: Hvad er det mere præcist, den computerstøttede analyse i almindelighed, og mønsteridentifikation i særdeleshed, kan bidrage med til gavn for musikvidenskaben? Og anfægter en sådan empirisk, nødvendigvis formalistisk og kvantitativ, tilgang ikke musikanalysens almindeligt anerkendte status som humanistisk videnskabsdisciplin med en derpå følgende negligering af musikken som et historisk, æstetisk, kognitivt, perceptionspsykologisk og kultursociologisk anliggende?

PRÆLIMINÆRE DEFINITIONER

Afkræftelsen af det andet af ovenstående to spørgsmål, hvilket for så vidt går forud for det første, er en væsentlig forudsætning for nærværende artikel, og det er mit ønske og min formodning, at de følgende afsnit vil kaste lys over konsekvenserne, explicit såvel som implicit. Indledningsvis kunne man betvivle det betimelige i musikanalysens faste forankring i humaniora og således overveje, om disciplinen i virkeligheden ikke i lige så høj grad hører hjemme indenfor naturvidenskaberne, hvilket musikvidenskaben i øvrigt har gjort indtil for ca. 500 år siden.⁴ Spørgsmålet angående computerens 'gavnlighed' er derimod noget mere kringlet, og det er netop med udgangspunkt heri, jeg efterfølgende skal forsøge at anskueliggøre en række centrale problemstillinger. Lad det være sagt med det samme; man kommer ikke uden om det faktum, at algoritmisk mønsteridentifikation vitterlig er forbundet med en række vanskeligheder, ikke blot af teknisk art, men også rent principielt – forstået på den måde, at mål og midler ikke altid synes at stå i rimeligt indbyrdes forhold (mere herom senere). Som udgangspunkt anlægges imidlertid en nøgtern beskrivende stil, der undertiden tillknyttes nogle personlige kommentarer.

Foreløbig kan sløret over det præsenterede mønsteridentifikationsbegreb lettes ved at fastslå, at der her menes *identifikation af genkomster*, hvilket i en musikvidenskabelig forståelsesramme svarer til opdagelsen og genkendelsen af enten *identiske* eller *beslægtede* strukturer i ét musikstykke eller flere (evt. en samling) musikstykker (i audio-, midi- eller øvrige maskinlæsbare formater).⁵ Dermed er der i princippet tale

- 4 Flere tendenser peger i hvert fald herpå, idet et nyere voksende forsknings- og undervisningsområde, under ét kaldet *musikinformatik*, endnu ikke rigtigt er slået an indenfor de musikvidenskabelige institutioners rammer (på nær få bemærkelsesværdige undtagelser, f.eks. Abteilung Musikinformatik, Musikwissenschaftliches Institut, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz), men derimod studeres ved en række datalogiske og elektroakustiske institutter. I Danmark er musikinformatik eksempelvis repræsenteret ved Datalogisk Institut i København samt medialogiuddannelsen ved Aalborg Universitet Esbjerg.
- 5 Betegnelsen "genkomst" foretrækkes frem for "gentagelse", idet der i praktisk musikalsk sammenhæng ofte er tale om modificerede (beslægtede) gengivelser, snarere end eksakte repetitioner. Alternative betegnelser for samme fænomener forekommer iblandt; f.eks. opererer Fred Lerdahl og Ray Jackendoff i *A Generative Theory of Tonal Music* (Cambridge, 1983) med "parallelism", der inkluderer såvel identiske som beslægtede genkomster, mens Leonard B. Meyer opererer med "conformant relationships" i bogen *Explaining Music* (Chicago, 1973).

om en for musikanalysen helt central aktivitet – nemlig *sammenligningen*, sådan som det eksempelvis anføres i andenudgaven af *The New Grove Dictionary of Music and Musicians*:

Comparison is common to all kinds of musical analysis – feature analysis, formal analysis, functional analysis, Schenkerian analysis, pitch-class set analysis, style analysis and so on: comparison of unit with unit, whether within a single work, or between two works, or between the work and an abstract ‘model’ such as sonata form or arch form. The central act is thus the test for identity. And out of this arises the measurement of amount of difference, or degree of similarity. These two operations serve together to illuminate the three fundamental formbuilding processes: recurrence, contrast and variation.⁶

Det er meget karakteristisk, i hvor høj grad denne fokus på struktur og navnlig sammenligningsaspektets altovervejende betydning i musikanalyse umiddelbart korresponderer med to af computerens væsentligste styrker: registrering og databehandling. Selvom betegnelsen “computer-assisted music analysis” ikke figurerer i ovenstående citat, kan man alligevel ane en vis forbindelse; navnlig når man opholder sig ved bestemte formuleringer såsom “test for identity” og “measurement of amount of difference, or degree of similarity”. I denne forbindelse er det måske oplysende, at begge artiklens forfattere faktisk i større eller mindre omfang har haft computerstøttet musikvidenskab som interesseområde.⁷ Det må dog stadig pointeres, at de i *New Grove* skitserede sammenligningsprocedurer sagtens kan være baseret på en mindre formaliseret systematik, hvor analytikeren mere intuitivt i de enkelte konkrete tilfælde udvælger de musikalske kriterier, som skal ligge til grund for sammenligningen, hvorimod en automatisering af en tilsvarende proces nødvendigvis fordrer en ganske anden systematisk stringens.⁸

Spørgsmålet er imidlertid, hvad det er for elementer i musikken, der kan tænkes at konstituere mønstre; deres beskaffenhed (melodik, rytmik, harmonik, klangfarve, dynamik etc., måske en kombination af to eller flere heraf) eller deres størrelse (et motiv eller en figur, eventuelt blot en enkelt tone/akkord, eller måske en hel formdel såsom ekspositionsdelen i en sonatesatsform). Svaret er for så vidt ja til det hele; “mønsterbegrebet” er i sig selv rummeligt nok til at kunne omfatte *alle* former for genkomment materiale, stort som småt.

6 Ian D. Bent og Anthony Pople, ‘Analysis’, *The New Grove Dictionary of Music and Musicians* (2nd edn.; London, 2001), i. 526-89, her 528.

7 Herom vidner følgende publikationer: Ian D. Bent og John Morehen, ‘Computers in the Analysis of Music’, *Proceedings of the Royal Musical Association*, 104 (1977), 30-46; John Morehen og Ian D. Bent, ‘Computer Applications in Musicology’, *The Musical Times*, 120/1637 (1979), 563-66; samt Alan Marsden og Anthony Pople (eds.), *Computer Representations and Models in Music* (London, 1992).

8 Det er i sidstnævnte tilfælde nærliggende at komme ind på Ruwets og Nattiez’ analysemetoder, der næsten mere end nogen andre svarer til Bents definitioner, og som endvidere har dannet teoretisk grundlag for talrige applikationsprogrammer, udviklet med henblik på automatisk mønsteridentificering (jf. afsnittet ‘Musikanalyse og musikgenerering’).

In the broadest sense ‘patterns’ designate recurring structures that can involve any musical aspect at any level of abstraction. Typical musical aspects include pitch, time, dynamics and timbre dimensions of notes, chords and harmony, contours and motion, tension and so on.⁹

Listen over identificerbare musikalske fænomener er således ganske lang og de maskinlæsbare repræsentationsformer ganske mangfoldige, hvilket vil fremgå mere eksplicit i afsnittet ‘Repræsentationsformer’.

PERSPEKTIVERENDE BAGGRUND

Trods det, at Bronsons eksperimenter dateres så tidligt som 1949, var det egentlig først fra midten af 60’erne, at der rigtig kom gang i udforskningen af computerens anvendelsesmuligheder inden for musikvidenskaben. Herom vidner især tre publikationer fra denne periode med samlinger af artikler og konferencerapporter, der hver for sig beretter om computerapplikationer indenfor musikhistoriske, stil- og værkanalytiske, kompositoriske samt musiketnologiske emneområder.¹⁰ Karakteristisk for forskningen på området – såvel i denne tidlige periode som årtier senere – er, at den overvejende har fundet sted ved amerikanske universiteter, hvilket falder ganske godt i tråd med den empiriske, nypositivistiske og strukturelle analyses traditionelt stærke fodfæste i USA.¹¹ På det tidspunkt, hvor interessen for den computerstøttede musikanalyse endnu var i sin vorden, var det en almindelig antagelse, at man via computerkraft kunne praktisere eksisterende analysemetoder på en betydelig mere effektiv måde end hidtil muligt.

Centralt står især to forestillinger, der i en vis forstand stadig har gyldighed den dag i dag, men som på den anden side også påkalder sig nogle få supplerende og modificerende kommentarer. Et hyppigt fremført synspunkt er eksempelvis, at computeren arbejder *hurtigere*; at den meget effektivt kan håndtere store datamængder, hvilket fritager analytikeren for en række trivielle og tidskrævende, men absolut nødvendige, arbejdsrutiner. Således forekommer det logisk at Fortes toneklassesængdeteorier¹² hurtigt blev det primære udgangspunkt for en række computerapplikationer

9 Pierre-Yves Rolland og Jean-Gabriel Ganascia, ‘Musical Pattern Extraction and Similarity Assessment’, i Eduardo Reck Miranda (ed.), *Readings in Music and Artificial Intelligence* (Amsterdam, 2000), 115.

10 Harald Heckmann (ed.), *Elektronische Datenverarbeitung in der Musikwissenschaft* (Regensburg, 1967); Barry S. Brook (ed.), *Musicology and the Computer. Musicology 1966-2000: A Practical Program. Three Symposia* (New York, 1970); Harry B. Lincoln (ed.), *The Computer and Music* (Ithaca, 1970).

11 Et af de fremmeste eksempler på en sådan formalisme er Allen Fortes *toneklassesængdeteorier*, formuleret i *The Structure of Atonal Music* (New Haven, 1973), der – på baggrund af Milton Babbitts og George Perles kompositionsteoretiske arbejder inden for den dodekafone og serielle musik – anviser en generel metode til at analysere, i princippet, *al* musik (tonal eller atonal, kunstmusik eller populærmusik, musik fra den vestlige kulturkreds eller fra andre kulturer) ud fra ‘objektive’ kriterier. Toneklassesængdeteorierens ‘talformalisme’, kombineret med en ekstrem reduktionisme, er skræddersyet til maskinelle optællings- og sorteringsprocedurer, hvilke Forte da også selv allerede forinden havde implementeret og redegjort for i artiklen ‘The Structure of Atonal Music: Practical Aspects of a Computer-Oriented Research Project’, i Brook, *Musicology and the Computer*, 10-18.

12 Jf. note 11.

med henblik på analyse af atonal musik, da identifikationen af musikkens centrale toneklasseintervalliske konstellationer (mængdeklasser eller *set classes*) normalt fordrer en omstændelig *trial-and-error*-proces, som synes oplagt at automatisere.

Tidsbesparelse er ligeledes et hovedtema i Lewis Lockwoods stilistiske undersøgelse af Josquin Desprez' messer, hvor det bl.a. erklæres, at siden Knud Jeppesens velrenommerede og omfattende dokumentation af regelbundetheden i Palestrinas musik, "no one has attempted to match his labors in the detailed examination of the extant works of any other pre-tonal composer – yet there is no reason why a computer could not produce a parallel investigation of any works submitted to it, in a tiny fraction of the time and in a more flexible, more exhaustive, and more reliable manner".¹³ Modstillingen mellem henholdsvis et højt og lavt tidsforbrug før og efter teknologiens indtog i musikvidenskaben er imidlertid først og fremmest hypotetisk og kompliceres desuden af det faktum, at computeranvendelsen også har givet mulighed for at udvikle nye analyseteknikker samt påvirket valget af videnskabelige problemstillinger og metoder, hvorfor det i praksis kan være vanskeligt helt præcist at vurdere den tidsbesparende effekt. Maskinen kan med andre ord "besvare en masse spørgsmål man ellers må afstå fra at stille, da evigheden ikke ville være lang nok til at få dem besvaret med papir og blyant".¹⁴

En anden almindelig forestilling er, at computeren angiveligt skulle være særdeles velegnet til at sikre objektive rammer og metoder i analysearbejdet, bl.a. i kraft af statistik, – hvilket ikke mindst har appelleret til musiketnologer, der traditionelt bestræber sig på at undgå etnocentriske påvirkninger i analyser af fremmede kulturers musik.

Statistics have the advantage ... of objectivity; and since ethnomusicologists frequently deal with musical cultures as external observers rather than as native practitioners, objective techniques are welcome safeguards against unconscious superimposition of alien values, which seldom apply.¹⁵

I Nicholas Cooks introducerende gennemgang af forskellige analyseteknikker understøttes ovenstående udsagn for så vidt, idet forfatteren hævder, at især formale (strukturelle) tilgange til musikanalyse (herunder Fortes toneklasse-mængdetektori samt semiotisk-strukturelle analysetaksonomier à la Nicolas Ruwet og Jean-Jacques Nattiez) har haft størst succes i forbindelse med studier af bl.a. ikke-vestlige kulturers musik, hvor Heinrich Schenkers teorier samt andre psykologiske og fænomenologiske indfaldsvinkler med kulturetnocentriske slagside (repræsenteret ved eksempelvis Leonard B. Meyer og Rudolph Réti) modsat ikke rigtigt har vist sig brugbare.¹⁶ Ordvalget "objective" i ovenstående citat er imidlertid problematisk, for ét er, at en

13 Lewis Lockwood, 'A Stylistic Investigation of the Masses of Josquin Desprez with the Aid of the Computer: a Progress Report', i Brook, *Musicology and the Computer*, 24.

14 Karl Aage Rasmussen, 'Spejlet i spejlet – scener fra et computer-samliv', *Dansk Musik Tidsskrift* 65/4 (1990/91), 130.

15 Fredric Lieberman, 'Computer-Aided Analysis of Javanese Music', i Lincoln, *The Computer and Music*, 187.

16 Nicholas Cook, *A Guide to Musical Analysis* (2nd edn.; London, 1992), 123.

statistisk, kvantitativ metode nok i sig selv kan betegnes som objektiv; noget andet er selve valget af søgekriterier, som altid i en eller anden grad vil være hæmmet af subjektets (analytikerens) forforståelse.

Mere almengyldigt er det nok at hæfte sig ved den metodiske stringens, hvormed et givet applikationsprogram opererer; en stringens, der er højt skattet blandt de fleste, som er involveret i computerstøttet musikvidenskab i 60'erne og 70'erne. Det ekspliciteres hyppigt – hvilket er ganske betegnende for en tid, hvor computere og deres anvendelsesfunktion var forbeholdt specialister ved større institutioner og således ikke genstand for almindelig viden – at maskinen netop ikke kan tænke, at den ikke pludselig får nogle 'ideer' af sig selv, og at enhver form for subjektiv påvirkning fra analytikerens musikalske intuition undervejs i processen derfor helt kan udelukkes. Dermed opnås den, ifølge Lockwood, positive virkning, at analytikeren tvinges til fra begyndelsen at formulere sit formål meget præcist.

... the logical organization of computer investigation not only invites us but compels us to frame our small-scale questions in precisely defined terms, and thus to formulate our large-scale problems in ways more exact than seems likely to be the case if we were merely making tentative steps towards answers that in large measure appeared to be hopelessly beyond reach.¹⁷

At metodisk stringens umiddelbart er at betragte som en kvalitet i sig selv, kan skyldes bestræbelsen mod en højere grad af videnskabelig validitet samt videnskabsteoretisk forankring, hvilket i manges øjne generelt har manglet i musikforskningen. Begejstringen over computerens indtog har dog i begyndelsen været til at overse blandt majoriteten af musikforskere, konfronteret med 'bagsiden af medaljen', – nemlig det temmelig begrænsede anvendelsespotentiale, som kendetegner tidens applikationer.

At present the range of interesting and relevant musical problems that are directly accessible to computer investigation is still remarkably limited. We have theories of musical structure that far surpass in power and explanatory scope any that have yet been formulated computationally.¹⁸

Fra anden side er det blevet påpeget, at det vel ret beset kun var ganske få og nøje specificerede analytiske opgaver, hvor det reelt har kunnet betale sig at anvende computere, ikke mindst på grund af de økonomiske og tidsmæssige omkostninger, der ofte var forbundet med anskaffelsen og anvendelsen af udstyret.¹⁹ Men i takt med computerens (herunder pc'ens) eksplosionsagtige udbredelse i de seneste årtier – bl.a. som følge af stadig større maskinkraft, parret med stadig lavere anskaffelsespriser – synes nogle grundlæggende forudsætninger at have ændret sig til fordel for den maskinelle automatik. En tidlig målsætning, såsom at ekstrahere musikalsk in-

17 Lockwood, 'A Stylistic Investigation', 23.

18 John Rothgeb, 'Musical Research by Computer: Some Current Limitations', *Computers and the Humanities*, 5/3 (1971), 178-82.

19 Finn Egeland Hansen, 'Det gregorianske repertoire i Codex H 159 Montpellier', *Dansk aarboeg for musikforskning*, 5 (1966-67), 182.

formation i kraft af maskinel læsning af partiturer, kaldet *Music Information Retrieval* (MIR), har således siden slutningen af 90'erne udviklet sig til at være et væsentligt forskningsområde, der rækker betydeligt ud over den traditionelle musikvidenskabs sfære.²⁰ Dette har bl.a. udmøntet sig i en række nyligt oprettede institutionaliserede, interdisciplinære forskningsgrupper (der primært kombinerer musikvidenskab og datalogi)²¹ samt en årlig international konference (ISMIR) siden 2000.²²

DISTINKTIONER OG AFGRÆNSNINGER

Algoritmisk mønsteridentifikation, herunder maskinel repræsentation af musikalsk indhold samt bestemmelse af lighed og slægtskab på den ene side overfor kontrast på den anden, udgør ryggraden i MIR-forskningen og er samlingspunkt for en række forskellige interesseområder. Hvor mønstre som tidligere nævnt betragtes som strukturelle grundelementer i kompositioner og improvisationer indenfor en traditionel musikanalytisk kontekst, danner de tillige basis for 'koder' i forbindelse med indholdsbasert musikalsk indeksering, herunder som abstrakte (reduktive) repræsentanter for musikværker og i videre konsekvens heraf som indikatorer vedrørende stil og forfatterskab i rettighedsindehaverøjemed. Desuden har de fundet anvendelse som 'byggesten' i generering af musik, herunder algoritmisk komposition, improvisation og akkompagnement. Dette aftvinger uvilkårligt en nærmere afgrænsning af emneområdet i nærværende artikel, og således giver det mening at sondre mellem føl-

20 MIR er oprindeligt et programmeringssprog, udviklet ved Princeton University med det sigte at omdanne ethvert notationssymbol i et partitur (f.eks. noder, pauser, metriske anvisninger, nøgler etc.) samt alle tænkelige afledninger heraf (f.eks. rytme, melodik, harmonik etc.) til et maskinlæsbart kodesprog, på baggrund af hvilket man automatisk kan 'udtrække' information omkring selve musikens indhold; dvs. uafhængig af komponist og titel. I dag er MIR, navnlig på grund af udbredelsen af internettet, blevet et større interdisciplinært videnskabsområde, der overordnet beskæftiger sig med at uddrage indholdsbasert musikalsk information fra partiturer, midi-filer og senest også audio-filer. Centralt står spørgsmålet: "Hvad konstituerer musikalsk information?": Svaret herpå kan ikke gives enkelt og entydigt, eftersom én vil lægge vægt på musikens eventuelle lyrik (tekstindholdet), en anden på sammensætningen af toner og rytmer (f.eks. melodisk kontur), mens en tredje måske tillægger *timbre* (klangfarve) stor betydning, idet en sunget melodi eksempelvis kan lyde anderledes end spillet på et instrument. Endvidere spiller aspekter som tekstur (f.eks. homofoni contra polyfoni), genre og stil en vis rolle. De mest almindelige identificeringsmetoder kan sammenfattes i den rækkebaserede model (jf. afsnittet 'Repræsentationsformer'). Væsentlige delaspekter omfatter bl.a. indeksering, organisering og visualisering af digitaliserede musikalske arkiver, samt klassifikation af musikalske stilarter og generer.

21 F.eks. ved Gerhard Widmer (ÖFAI/Austrian Research Institute for Artificial Intelligence, Wien), ved Gérard Assayag (IRCAM, Centre Pompidou, Paris), ved Walter B. Hewlett (Center for Computer Research in Music and Acoustics, Stanford University), ved Kjell Lemström (Department of Computer Science, University of Helsinki) og ved Geraint Wiggins (Department of Computing, School of Informatics, City University, London).

22 ISMIR er forkortelsen for *International Conference on Music Information Retrieval*. Af andre tilbagevendende konferencer eller symposier med tilsvarende eller tilgrænsende fokus på musikinformatikområdet kan nævnes *International Computer Music Conference* (ICMC), *Journées d'Informatique Musicale* (JIM) og *Triennial Conference of the European Society for the Cognitive Sciences of Music* (ESCOM).

gende: 1) mønstergenkendelse og mønsteropdagelse, 2) musikanalyse og musikgenerering samt 3) produkt- og procesorienteret mønsteridentifikation.

Mønstergenkendelse og mønsteropdagelse

Under betegnelsen mønsteridentifikation sorterer almindeligvis to forskellige applikationstyper, nemlig mønstergenkendelse og mønsteropdagelse, hvis indbyrdes forskel skal søges i den grundlæggende procedure, der anlægges i et givet applikationsprogram.²³ Hvor mønstergenkendelse er beregnet på at finde samtlige forekomster af en prædefineret struktur, dvs. hvor det i kraft af brugerspecificerede inputs er givet, hvad algoritmen skal søge efter, går mønsteropdagelse et spadestik dybere, idet en række identiske eller beslægtede forekomster søges identificeret uafhængig af analytikerens eventuelle forhåndsviden om (eller blot instinktive fornemmelse for) bestemte genkomster.²⁴

Kongstanken i de fleste mønsteropdagelsesapplikationer er ydermere at frasortere alle de musikalsk *uinteressante* genkomster – dem, det hverken perceptuelt, kognitivt og derfor ej heller musikanalytisk giver mening at ofre nogen opmærksomhed. I Eksempel 1 ses tre uddrag af overstemmen i et klaverstykke af Debussy, hvor åbningsmotivet (en brudt molseptim-firklang) fremtræder. De tre systemer repræsenterer hver især matchende strukturer på hhv. 4, 5 og 6 toner, og som det signaleres i tegnsætningen til venstre for systemerne, må den sidste af de tre skitserede resultatmuligheder umiddelbart være at foretrække. Dette begrundes ud fra, at større melodiske mønstre rent musikalsk må betragtes som mere signifikante end mindre mønstre, hvorfor det i høj grad drejer sig om at identificere strukturelle kombinationer med flest mulige successive enheder (toner eller intervaller), som forekommer mindst

Eksempel 1. Uddrag fra Claude Debussy, 'La fille aux cheveux de lin', *Prélude pour piano*, nr. 8.

- 23 I nærværende artikel er mønstergenkendelse direkte oversat fra 'pattern *recognition*', mens mønsteropdagelse dækker over betegnelserne 'pattern *discovering*', 'pattern *detection*', 'pattern *matching*', 'pattern *extraction*' og 'pattern *induction*'. Denne specifikation af betydningsforskellen foretrækkes i de fleste oversigtsartikler omkring emnet, men skal ikke tages for givet.
- 24 Af denne grund defineres i en mønsteropdagelsesalgoritme almindeligvis en ramme (fra et minimum til et maksimum antal elementer), inden for hvilken identifikationsprocessen forløber.

to (men gerne endnu flere) gange. En sådan disposition synes navnlig logisk i nærværende eksempel, isoleret betragtet, hvor en specifik søgen efter fir- eller femtone-segmenter tydeligvis er utilstrækkelig. Imidlertid er det en kendsgerning, at jo mindre segmenter man opererer med, des større er chancen for mange genkomster af bestemte tone- eller intervalkombinationer. Derfor bliver mønsteridentifikation også et spørgsmål om den rette segmentering.

At udvælge de 'rigtige' mønstre kan eksempelvis ske på heuristisk (erfaringsmæssig) basis, hvor programmet så at sige 'lærer af sig selv' på baggrund af registrerede regelmæssigheder i musikken, eller ved simulation af perceptuelle og kognitive processer, hvor programmet opererer efter 'almindelige musikalske principper'; begge efterstræbte modeller inden for forskning i kunstig intelligens (computersimulationer af det biologiske neurale netværk og hjernens egenskaber). Sidstnævnte kræver imidlertid under alle omstændigheder nogle velovervejede præformaliserede beslutninger vedrørende 1) repræsentationsform, dvs. valg af beskrivelsesmodel indenfor parametrene, tonehøjde, varighed, dynamik m.fl.; 2) segmentering, dvs. maksimalt antal tilladte noder (*events*) eller intervaller (mellem noder/*events*) per mønster; 3) forskellen mellem identiske, beslægtede og kontrasterende elementer.

Musikanalyse og musikgenerering

Til trods for, at analyse af eksisterende musik og generering af ny musik i sagens natur repræsenterer to grundlæggende forskellige discipliner, er de ofte tæt sammenknyttede i praksis, da det sidste for så vidt ligger i forlængelse af det første. Hvor musikanalysen typisk identificerer mønstre med det formål at påvise bestemte sammenhænge og karakteristika i et givet musikstykke, kan selv samme mønstre benyttes som grundmateriale i en algoritmisk styret, kreativ proces (komposition, improvisation eller akkompagnement). Selvom sidstnævnte musikskreative aspekter i princippet falder uden for denne artikels interessefelt, er det ikke ensbetydende med, at alle musikgenereringssystemer *per se* også gør det, eftersom disse i princippet er forbundet med samme relevante problematikker vedrørende repræsentationsformer og sammenligningsprocedurer, som forefindes i de rent analytiske applikationer. Et oplagt eksempel herpå er David Copes EMI-system (*Experiments in Musical Intelligence*), der er designet til at analysere en præinkodet database med maskinlæsbare repræsentationer af værker af en bestemt komponist, herunder at identificere, hvad Cope kalder *signaturer*, dvs. motiver, som går igen i flere værker af samme komponist. På baggrund heraf opnås information omkring stil på et rent empirisk grundlag, hvilken efterfølgende kan danne basis for computersimulationer heraf.²⁵

25 David Cope redegør minutøst for EMI i publikationerne *Computers and Musical Style* (Oxford, 1991) og *Experiments in Musical Intelligence* (Madison, 1996). Ideen om algoritmisk baseret stil-simulation kan spores tilbage til Lejaren Hillers og Leonard Isaacsons eksperimentelle samarbejde i slutningen af 50'erne.

Copes interesse for algoritmisk mønsteridentifikation i stilanalytisk øjemed deles af mange andre, bl.a. af makkerparret Pierre-Yves Rolland og Jean-Gabriel Ganascia,²⁶ hvis oprindelige fokuspunkt dog ikke er kunstmusikken, men jazzimprovisationer, navnlig computerimplementering af Thomas Owens' undersøgelse af det melodiske materiale i 250 Charlie Parker-soli.²⁷ Lignende bestræbelser spores blandt en lang række forskere og forskergrupper, der tager udgangspunkt i den strukturalistisk orienterede semiotik med Nicolas Ruwet og Jean-Jacques Nattiez som de to fremmeste teoretikere. Der er her tale om en metode, der kort beskrevet går ud på at inddеле et musikstykke i mindre komponenter, klassificere disse og derpå finde identiske eller beslægtede elementer, for på denne baggrund at kunne identificere en musikalsk syntaks.

Classification within a piece of music involves the splitting of the piece into segments and the categorization of these segments according to similarity-based criteria. In music analysis, this method is also known as *Paradigmatic Analysis* (PA) ... PA is a widely used method that provides an objective first step to most further formal musicological study, such as stylistic, comparative and motivic analysis.²⁸

Ideen bag Ruwets og Nattiez' 'paradigmatiske' analysemodeller er angiveligt at formulere et 'neutralt' beskrivelsesniveau, der i princippet kan overføres til et hvilket som helst musikalsk materiale (uafhængig af stil, genre, kulturel kontekst etc.), og som hverken baserer sig på komponistens/udøverens intention (*poiēsis*) eller tilhørers perception (*aesthēsis*).²⁹ Alligevel kommer man næppe udenom, at metoden uvægerligt implicerer et væsentligt element af menneskelig (subjektiv) intuition, idet analytikeren nødvendigvis må fortolke, når han skelner mellem beslægtede og kontrasterende segmenter; et forhold der ikke i sig selv bør give anledning til at miskreditere metoden i almindelighed,³⁰ men som uvilkårligt må vanskeliggøre en vellykket

26 Udover publikationen 'Musical Pattern Extraction and Similarity Assessment' (jf. note 9) beskriver Rolland og Ganascia deres resultater i 'Pattern Detection and Discovery: The Case of Music Data Mining', i David J. Hand, Niall M. Adams og Richard J. Bolton (eds.), *Pattern Detection and Discovery: Proceedings of the ESF Exploratory Workshop, London* (Berlin og Heidelberg, 2002), 190-98.

27 Thomas Owens, *Charlie Parker: Techniques of Improvisation* (Ph.D.-diss.; University of California, 1974).

28 Karin Höthker, Dominik Hörnel og Christina Anagnostopoulou, 'Investigating the Influence of Representations and Algorithms in Music Classification', *Computers and the Humanities*, 35/1 (2001), 65.

29 I sin bog, *Fondements d'une Sémiologie de la musique* (Paris, 1975), adopterer Nattiez bl.a. Ruwets semiotisk-analytiske taksonomier, men opererer med 'det neutrale niveau' i en anderledes empiristisk og positivistisk forstand, der skulle befri analysen fra enhver forforståelse. Således foreskriver Nattiez en strengt formaliseret metodeanvendelse uden hensyntagen til resultaterne.

30 En ofte fremført kritik af såvel Ruwets som Nattiez' analysemetoders inkonsistens – på grund af deres undvigelse af nøjagtigt specificerede sammenligningskriterier og heraf følgende afhængighed af individuel intuition – forekommer i nogen grad at ramme ved siden af, dersom man altså kan tilslutte sig det hermeneutisk funderede synspunkt, at musikanalyse altid indbefatter et større eller mindre element af fortolkning; at den netop er at betragte som et personligt bidrag til en mulig musikforståelse. Vanskeligere afviseligt er imidlertid det problematiske forhold, at Nattiez' ambitioner om en stærkere empirisk fundering, og heraf følgende 'mekanisk' videnskabeliggørelse af en analysepraksis (jf. note 29), i værste fald fører til en 'dissekering' af musikken, som er blottet for musikalsk mening.

computerimplementering. Der er forsket meget i løsningen på dette problem, navnlig siden begyndelsen af 90'erne, og således forefindes en række mere eller mindre vellykkede forsøg på at formalisere denne metode.³¹ Andre tager modsat ikke udgangspunkt i nogen bestemt eksisterende analysemetode, men holder sig blot til dette, at mønstre i form af genkomment materiale må betragtes som alment formdannende faktorer, i musik såvel som i andre kunstformer.³²

Produkt- og procesorienteret mønsteridentifikation

Sondringen mellem analytiske og generative applikationsprogrammer, der som nævnt bundet i selve mønsteridentifikationens formål, bringer yderligere et aspekt frem i lyset, som vedrører beskaffenheden af det materiale, hvorpå processen gennemføres. Således forekommer en ganske distinkt afgrænsning mellem de såkaldte *offline*- og *online*-systemer, dvs. hvor identifikationen pågår henholdsvis uden for og i realtid – eller sagt mere præcist: Der er forskel på, om en given algoritme er designet til at identificere mønstre i et musikstykke, der foreligger som et på forhånd fastlagt objekt (i form af nodebilledets konvertering til maskinlæsbare symboler) og således fuldt tilgængeligt i alle udvalgte detaljer, inden den algoritmiske identifikationsproces iværksættes – eller om den er beregnet på 'realtidsekstraktion'; dvs. hvor selv samme proces finder sted i takt med musikkens fortløbende udvikling.³³ Således kan der relativt let skelnes mellem, hvad man kunne kalde produktorienterede og procesorienterede applikationer, og hvor den første type primært (men ikke kun) kan adresseres til *analytiske* formål, benytter den anden blot mønsteridentifikationen som middel i musikantisk interaktivt øjemed, hvor mønstrene genbruges improvisatorisk (sammensættes på ny), eventuelt som realtidsakkompagnement til andre musikere.

Da nærværende artikel primært fokuserer på computeranvendelse i forbindelse med *værkanalyse*, forekommer det umiddelbart ganske rimeligt at koncentrere opmærksomheden om produktorienteret mønsteridentifikation. Dette begrundes med, at realtidsbaseret mønsterekstraktion på ethvert givet tidspunkt i processen alene må baseres på, hvad som allerede er passeret og dermed ikke det samlede materiale, og dette synes ikke særlig formålstjenligt i en værkanalytisk kontekst, hvor identifikatio-

31 Foruden Höthker, Hörnel og Anagnostopoulou, 'Investigating the Influence', se f.eks. Christina Anagnostopoulou og Gert Westermann, 'Classification in Music: A Computational Model for Paradigmatic Analysis', *ICMC Proceedings* (Thessaloniki, 1997); Emiliós Cambouropoulos, *Towards a General Computational Theory of Musical Structure* (Ph.D.-diss.; University of Edinburgh, 1998); Olivier Lartillot, 'Musical Analysis by Computer Following Cognitive Model of Induction of Analogies', *ICMC Proceedings* (Göteborg, 2002).

32 Foruden Rolland og Ganascia 'Musical Pattern Extraction and Similarity Assessment' samt 'Pattern Detection and Discovery', se f.eks. Herbert A. Simon og Richard K. Sumner, 'Pattern in Music', i Benjamin Kleinmuntz (ed.), *Formal Representation of Human Judgement* (New York, 1968), 219-50; Ilya Shmulevich et al., 'Perceptual Issues in Music Pattern Recognition: Complexity of Rhythm and Key Finding', *Computers and the Humanities* 35/1 (2001), 23-35.

33 Som et eksempel herpå kan nævnes *Cypher*, som er udviklet og beskrevet af Robert Rowe i bogen *Interactive Music Systems* (Cambridge, Mass., 1993).

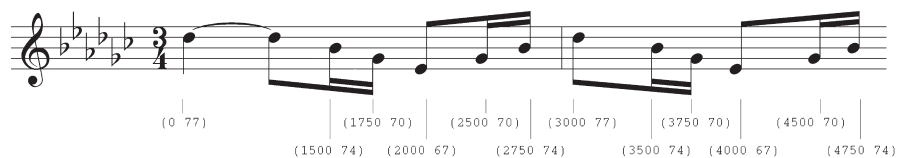
nen af musikkens væsentlige strukturelle elementer (mønstre) nødvendigvis afhænger af en helhedsbetragtning. Når Olivier Lartillot (i bl.a. 'Musical Analysis by Computer') i så høj grad betoner relevansen af en *heuristisk* (erfaringsbaseret) identifikationsalgoritme, hvilken angiveligt 'scanner' et computerrepræsenteret partitur kronologisk, svarende til en lytters musikoplevelse i realtid, forekommer det derfor ikke relevant i nærværende henseende. Ideen er angiveligt ellers at minimere antallet af 'musikalsk uinteressante' mønsteridentifikationer, men rent bortset fra det faktum, at en og samme 'musikalske arkitektur' kan opleves forskelligt (afhængig af kulturel baggrund, uddannelse eller blot situationen), forekommer det efter undertegnede synspunkt at være et tvivlsomt musik-analytisk anliggende at tage udgangspunkt i, hvilke sammenhænge en 'gennemsnitlig tilhører' sandsynligvis vil percipere. Det centrale må vel snarere være at afkode musikkens mere eller mindre latente kohærente strukturer, hvilke ideelt kan bidrage til en dybere forståelse og en heraf rigere musikalsk oplevelse. Ikke fordi sådanne kohærensstrukturer nødvendigvis opleves ved første lytning, men fordi de kan opleves, hvis man vel at mærke indstiller sin lytning herefter. Musikanalysen må og skal være et løsningsforslag (blandt mange andre mulige) på én (subjektiv, men argumenteret) tolkning.

CENTRALE PROBLEMSTILLINGER

Spørgsmålet om mønstres beskaffenhed – og den eventuelle favorisering af visse musikalske parametre frem for andre – relaterer til to overordnede problematikker, der er forbundet med den algoritmiske identifikationsproces; nemlig følgende: Med hvilken kodificering (beskrivelsesform og -symbolik) repræsenterer man musikken bedst, og hvorledes garderer man sig mod 'smuthuller', hvor visse musikalsk signifikante elementer får lov at passere ubemærket gennem processen? Mens førstnævnte helt afhænger af det analytiske formål (hvad man vil undersøge) og derfor nødvendigvis ikke kan besvares generelt, har sidstnævnte foreløbig vist sig temmelig vanskeligt til trods for en stadig nyudvikling af algoritmiske modeller. De to problematikker behandles begge i nedenstående afsnit vedrørende maskinlæsbare repræsentationsformer. Dertil kommer en række spørgsmål omkring de kriterier, der opstilles med henblik på sammenligningsproceduren. Udover de helt fundamentale vanskeligheder ved at definere nøjagtigt, hvad der gør to segmenter beslægtede og ikke kontrasterende, er det værd at hæfte sig ved de konkrete sammenligningsmetoder, vægtningen repræsentationsformerne imellem samt den referenceramme, inden for hvilken to eller flere segmenter sammenlignes. Alle disse spørgsmål adresseres til afsnittet vedrørende evalueringsprocedurer.

REPRÆSENTATIONSFORMER

En grundlæggende forudsætning for en identifikationsalgoritmes duelighed er naturligvis, at det musikalske materiale omdannes til en samling af data i form af tal eller anden maskinlæsbar symbolik. Et typisk eksempel herpå er, at en melodisk passage beskrives som en række af midi-tonenumre, evt. med information om ansatstidspunkt (se Eks. 2).



Eksempel 2. Meloditonerne i 'La fille aux cheveux de lin' (takt 1-2) med information om ansatstidspunkt og midi-tonenummer.

Af egnede repræsentations- eller beskrivelsesformer samt kombinationer heraf findes imidlertid, om end ikke et uendeligt antal, så i hvert fald betydeligt flere end i ovenstående eksempel, og egentlig er det først og fremmest musikanalytikerens iderigdom og forestillingsevne, der sætter grænsen.³⁴ Alligevel skulle en eller anden form for kategorisering nok være umagen værd, ikke mindst af hensyn til overskueligheden i nærværende artikel, og således differentieres foreløbig på to niveauer, nemlig 1) initiale og afledte repræsentationsformer samt 2) enkeltrækker og multidimensionale vektorer.

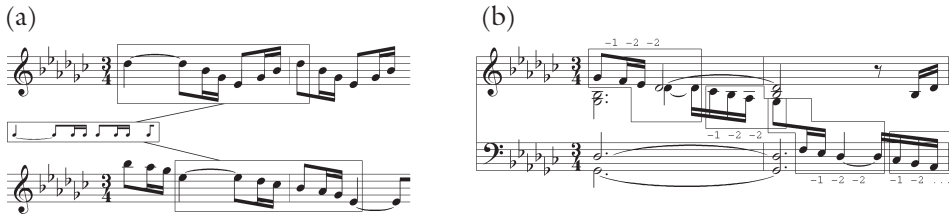
Initiale og afledte repræsentationsformer

Der eksisterer mange bud på, hvorledes musikstykker kan konverteres til data,³⁵ og de foreslåede repræsentationsformer varierer mellem *initiale* repræsentationsformer, såsom hver enkelt nodes ansatstidspunkt og tonehøjde (jf. Eks. 2), – til mere komplicerede (afledte) informationstyper som eksempelvis betoningsforhold samt konsonerings- og dissoneringsgrad.³⁶ At selve måden, hvorpå man beskriver en given musikalsk passage, spiller en afgørende rolle for resultatet i identifikationsprocessen, virker ganske logisk; to rytmisk identiske segmenter kan forekomme temmelig uens på grund af melodisk og kontekstuel differens (se Eks. 3a), mens to segmenter med samme følge af melodiske intervaller omvendt kan variere betydeligt, alt efter rytmiske og betoningsmæssige forhold (se Eks. 3b).

34 'Music representation' og 'music description' er blot to blandt flere betegnelser, som anvendes i forbindelse med automatisk mønsteridentificering. Af andre kan nævnes *features* (f.eks. Anagnostopoulou og Westermann, 'Classification in Music', 125-28), *viewpoints* (f.eks. Darrel Conklin og Ian H. Witten, 'Multiple viewpoint systems for music prediction', *Journal of New Music Research*, 24/1 (1995), 51-73) eller *dimensions* (f.eks. David Meredith, Kjell Lemström og Geraint A. Wiggins, 'Algorithms for discovering repeated patterns in multidimensional representations of polyphonic music', *Journal of New Music Research*, 31/4 (2002), 321-45).

35 Se f.eks. David Lewin, *Generalized Musical Intervals and Transformations* (New Haven, 1987); Peter Howell, Robert West og Ian Cross (eds.), *Representing Musical Structure* (San Diego, 1991) samt Marsden og Pople (eds.), *Computer Representations*.

36 Distinktionen mellem *initiale* og *afledte* repræsentationsformer er et velbeskrevet anliggende. Eksempler herpå er Rollands og Ganascias dikotomi: *data representation* og *knowledge representation* ('Pattern Detection and Discovery', 193) eller Selfridge-Fields tredelte kategorisering: *representational components*, f.eks. tonehøjde og varighed; *derivable components*, f.eks. tonehøjdeintervaller og accentuering; samt *non-derivable components*, f.eks. fraseringsmæssige og dynamiske anvisninger (jf. Eleanor Selfridge-Field, 'Conceptual and Representational Issues in Melodic Comparison', i Walter B. Hewlett og Eleanor Selfridge-Field (eds.), *Melodic Similarity. Concepts, Procedures, and Applications. Computing in Musicology II* (Stanford University, 1998), 15).



Eksempel 3. (a): Identisk rytmik (jf. figuren i midten); (b): Identisk melodi (jf. intervalcifrene).

Det er derfor væsentligt først og fremmest at tilrettelægge den maskinelle repræsentation efter, hvad det er for en type mønstre, man agter at finde; hvilke musikalske parametre, man vil tillægge størst betydning. Men når dette er gjort, rejser sig en række nye spørgsmål og problemstillinger, som relaterer til selve det antal af repræsentationsformer, der skønnes nødvendige for et tilfredsstillende resultat. Her kan en begrænsning til kun få af slagsen (f.eks. intervaller mellem to tonehøjder og/eller to ansatstidspunkter³⁷) i nogle sammenhænge være en fordel og i andre en ulempe, alt efter hvor bredt eller snævert mønsteridentifikationen tilsigtes. En såkaldt *multiple viewpoint approach* er blevet foreslået, hvilken angiveligt skulle sikre en mere nøjagtig information vedrørende de nærmere omstændigheder, hvormed to (eller flere) segmenter er sammenlignelige (se Eks. 4).³⁸

Fremgangsmåden er at lade en melodi – eller i tilfælde af flerstemmig musik, hver eneste stemme – beskrive på mindst 2-3 (gerne endnu flere) forskellige måder som individuelle informationsstrømme, repræsenteret ved talrækker. Andetsteds fra påpeges det endvidere, at beskrivelsesmodellerne ikke kun bør adresseres til musikkens ‘overflade’.

The representations used in the usual encodings of melodies, viz. musical score notation and MIDI, are only an extremely restricted version of descriptions. In addition to – or instead of – the initial representation of the melodies’ notes (absolute pitch and relative duration, typically), structural information should be taken into account at various abstraction levels, based on the psychology of music (perception, cognition) and on music theory.³⁹

Den initiale beskrivelse må med andre ord ‘beriges’ med en række repræsentationer, som afledes heraf, for netop at kvalificere den algoritmiske identifikationsproces mest muligt, herunder frasortere uinteressante mønstre (jf. Eks. 1). Dette er bl.a. et kardinalpunkt i den såkaldte FExPat-algoritme,⁴⁰ hvor sådanne afledninger (på forhånd indbygget i systemet eller brugerspecificerede) implementeres automatisk, alene ud fra en initial

37 Et interval mellem to ansatstidspunkter benævnes herefter io-intervallet (*inter-onset interval*).

38 Foruden Conklin og Witten, ‘Multiple viewpoint systems’, se Darrell Conklin og Christina Anagnostopoulou, ‘Representation and discovery of multiple viewpoint patterns’, *ICMC Proceedings* (Havana, 2001), 479-85.

39 Pierre-Yves Rolland, ‘Discovering Patterns in Musical Sequences’, *Journal of New Music Research* 28/4 (1999), 336.

40 FExPat (*Flexible Extraction of Patterns*) er implementeret i software-systemet *Imprology* og beskrevet af Pierre-Yves Rolland og Jean-Gabriel Ganascia i konferencerapporten ‘Automated Motive-Oriented Analysis of Musical Corpuses: a Jazz Case Study’, *ICMC Proceedings* (Hongkong, 1996), 240-43.



Ansatsstidspunkt: *tone 1, tone 2, tone 3 etc.*
 0 1500 1750 2000 2500 2750 3000 3500 3750 4000 4500 4750

Midi-tonenummer: *tone 1, tone 2, tone 3 etc.*
 77 74 70 67 70 74 77 74 70 67 70 74

Ansatsdifference (inter-onset interval) og toneintervaller: *tone 2 - tone 1, tone 3 - tone 2 etc.*
 (1500, -3) (250, -4) (250, -3) (500, 3) (250, 4) (250, 3) (500, -3) (250, -4) (250, -3) (500, 3) (250, 4)

Melodisk kontur, trin op el. ned (*u-t*), spring op el. ned (*s/-s*), gentag (*g*), og rytmisk kontur, kortere (*k*), længere (*l*) og lige (*0*): *tone 2 / tone 1, tone 3 / tone 2 etc.*
 (-s, k) (-s, 0) (-s, 1) (s, k) (s, 0) (s, 1) (-s, k) (-s, 0) (-s, 1) (s, k) (s, 0)

Varighedsproportioner (*ioi-ratio*): *tone 2 / tone 1, tone 3 / tone 2 etc.*
 $\frac{5}{4}$ 1 2 $\frac{3}{4}$ 1 2 $\frac{5}{4}$ 1 2 $\frac{5}{4}$

Skalatrin (diatonisk) i forhold til grundtone: *tone 1, tone 2, tone 3 etc.*
 5 3 1 6 1 3 5 3 1 6 1 3

etc.

Eksempel 4.

midi-repræsentation af musikken. Fordelen heri synes åbenbar; brugeren kan hurtigt og effektivt frembringe den information, han finder mest velegnet til sit analyseformål.

Hermed udvides omfanget af repræsentationsformer ganske betragteligt, og kombinationsmulighederne kan umiddelbart synes uendelige. For overskuelighedens skyld skitseres blot et ganske begrænset udvalg af hhv. initiale og afledte former, hvor der fokuseres på parametrene ansatsstidspunkt, tonehøjde og varighed (se Fig. 1).

Af kategoriseringen i Figur 1 fremgår det, at de initiale repræsentationsformers afledning kan foregå på to niveauer (hvortil flere kan tilføjes); dels via *reduktion*, hvor beskrivelserne klassificeres i forhold til et givet system,⁴¹ dels *abstraktionsmæssigt* i kraft af en ændret fokus, væk fra musikkens grundlæggende 'byggesten' (dvs. de kriterier, der er forbundet med hver individuel node i sig selv) til fordel for selve *relationen* mellem samme (her kaldet *distancen*).⁴² Endelig kan man forestille sig en kombination af ovenstående, hvor også de distancebaserede beskrivelser klassificeres. Et oplagt eksempel herpå er *interval class* (ligeledes basisterminologi indenfor *set theory*), hvor antallet af 'intervalklasser' reduceres til blot seks.

41 Bedst kendte eksempel er formentlig begrebet 'tonehøjdeklasse' (*pitch class*) på grund af dets almindelige udbredelse inden for *set theory*, sådan som den er formuleret af Forte i *The Structure of Atonal Music*. Reduktionen til blot tolv forskellige tonehøjdeklasser begrundes såvel ud fra oktav-ækvivalens ($c, c', c'' \dots = o$) samt enharmonisk ækvivalens ($cis = des, f = eis = geses$, etc.)

42 Hermed berøres en velkendt distinktion blandt mønsteridentificeringsapplikationer, hvis gyldighed for så vidt er indiskutabel, men som undertiden savner præcision. Eksempelvis skelner Meredith, Lemström og Wiggins ('Algorithms for discovering repeated patterns', 323f.) mellem *event strings* og *interval strings*, og hvor forstnævnte angiveligt koncentrerer sig om de enkelte musikalske hændelser eller *events* ($e_1, e_2, e_3, \dots e_n$), er sidstnævnte afledt af selve den proces, der omdanner én musikalsk event til en anden; i enkliste tilfælde intervallet mellem to successive toner eller ansatsstidspunkter ($e_2 - e_1, e_3 - e_2, \dots e_n - e_{(n-1)}$) eller forholdet mellem to successive ioi-intervaller, dvs. ioi-ratio ($e_2/e_1, e_3/e_2, \dots e_n/e_{(n-1)}$). Her skal gøres opmærksom på, at modstillingen, 'event' overfor 'interval', er uheldig, idet tonehøjdeintervaller, io-intervaller og ioi-ratio reelt også er 'eventorienterede', der som sådanne blot knytter sig til den *anden* af to successive events i kraft af beskrivelsen af dennes relation eller distance til den foregående. Således foretrækkes i stedet betegnelsen *initial representation*.

Figur 1.

Herunder gives en række eksempler på såvel initiale som afledte repræsentationsformer, hvoraf sidstnævnte yderligere opdeles i tre grupper. Listen er selektiv, idet langt flere i princippet kunne tilføjes. Det væsentlige her er imidlertid at kategorisere de enkelte former inden for tre overordnede parametre (ansatstidspunkt, tonehøjde og varighed) for på denne måde at skabe en vis klarhed over forskelle i beskrivelsesniveauer.

1. INITIALE (ABSOLUTTE) REPRÆSENTATIONSFORMER

Ansatsstidspunkt (*onset time*), målt i

- antal millisekunder fra begyndelsen (o).
- antal mindste rytmiske fællesnævner, fortløbende fra 1-slaget i første takt.

Tonehøjde (*pitch*), angivet som

- nummer efter midi-standarden; f.eks. midi-tone nr. 60 svarer til c' ('nøglehuls-c'et').

Varighed (*duration*), målt i

- antal millisekunder fra ansatsstidspunktet.
- antal mindste rytmiske fællesnævner, f.eks. x ottendedele, x sekstendedelstrioler etc.*

2. AFLEDTE REPRÆSENTATIONSFORMER

a) Klassificerende beskrivelser

Ansatsstidspunkt, målt i

- antal mindste rytmiske fællesnævner, beregnet fra 1-slaget i den pågældende takt.

Tonehøjde, angivet som

- nummer, dvs. 'tonehøjdeklasse' (*pitch class*); f.eks. $c=0$, $cis=1$, $d=2\dots$, $b=11$.
- placering i forhold til førstetrinsakkordens grundtone; f.eks. $a=2$, hvis tonika er G.
- navn (*name class*), f.eks. c , d , e etc.
- 'høj', 'lav' og 'middel'.

Varighed

- 'kort', 'lang' og 'middel'.

b) Distancebaserede beskrivelser

Difference i forhold til forrige ansatsstidspunkt (også kaldet io-interval, *inter-onset interval*),** målt i

- antal millisekunder.
- antal mindste rytmiske enheder.

Interval (evt. også retning) i forhold til forrige eller første tonehøjde i passagen, angivet som

- antal halvtonetrin (eventuelt med retningsangivelse foran, + eller -).

Forholdet mellem to successive varigheder eller bedre: to successive io-intervaller (ioi-ratio), beregnet som

- andet io-interval over første io-interval (ioi_2/ioi_1).

c) Distancebaserede og klassificerende beskrivelser

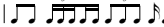
Interval (evt. også retning) i forhold til forrige tonehøjdeklasse i passagen, angivet som



- den retningsbestemte difference mellem to toneklasser i et *modulus 12*-system; f.eks. er afstanden fra b til g otte halvtoner, mens afstanden fra g og b er fire halvtoner.***
- den ikke-retningsbestemte difference mellem to toneklasser i et *modulus 12*-system, hvor differencen mellem b og g altid er 4.***

- nummer (fra 1 til 6), dvs. 'intervalklasse' (*interval class*); f.eks. stor septim og lille sekund = 1, kvart og kvint = 5 etc.
- retning i forhold til forrige tone (melodisk kontur), f.eks. 'op', 'ned' og 'lige'.
- samme med differentieret afstand, f.eks. 'trin' (+/-), 'spring' (+/-) og 'gentag'.

Overordnet distinktion mellem to successive io-intervaller, angivet som

- 'kortere', 'længere' og 'lige lange' (rytmisk kontur).

* Dvs. hver enkelt tones varighed beskrives som multiplikationer af den rytmiske enhed, som udgør nærmeste fællesnævner i det musikstykke, som analyseres, således at eksempelvis passagen |  | svarer til (6 6 2 2 2 3 3 4 4 4 3 9), hvor 1 ($\frac{1}{3}$) er fælles rytmisk enhed.

** Begrebet *inter-onset interval* (ioi) adskiller sig fra *duration*, idet eventuelle pauser i eksempelvis en melodi henføres til den forudgående tones samlede varighed (f.eks.  ~ 3 1 2 2 og  ~ 3 1 2 2). Eftersom de to figurer er rytmisk identiske (til trods for første nodes ændrede varighed), står det klart, at ioi-repræsentationen i mange tilfælde er den mest hensigtsmæssige at operere med.

*** Forskellen mellem retningsbestemte og ikke-retningsbestemte toneklassedifferencer svarer til sondringen mellem *ordered pitch-class interval* og *unordered pitch-class interval*, sådan som den bl.a. fremstår i Allen Fortes *The Structure of Atonal Music* (New Haven, 1973).

Principielt er det umuligt at afgøre i hvilken af de fire basiskategorier, man finder de mest anvendelige repræsentationsformer, og det må i hvert eneste konkrete tilfælde bero på et skøn, alt afhængig af det analytiske formål. Såfremt man ønsker at identificere flest mulige *melodiske* repetitioner inden for en given musikalsk passage, forekommer de distancebaserede repræsentationsformer (kategori 2b og 2c) umiddelbart som de mest brugbare, for hermed opfanges automatisk alle eventuelle transpositioner samt rytmiske augmentationer og diminutioner, hvilke i bund og grund må betragtes som melodisk identiske til trods for de individuelle noders forskellighed. Helt så enkelt forholder det sig imidlertid ikke, når man ønsker at identificere – hvilket i musikanalyse er helt afgørende – melodiske genkomster, der ikke er nøjagtig ens, men varierer lokalt i kraft af udskiftede, alternativt indskudte eller udeladte toner. Såfremt to melodiske passager med lige mange toner repræsenteres ved talrækker, bestående af midi-tonenumre (se Eks. 5a-b), kan konsekvensen af et alternativt nummer hist og her kontrolleres i kraft af distancebaserede sammenligningsmodeller (se endvidere afsnittet 'Evalueringsprocedurer').

Hvis de samme to passager derimod repræsenteres af tonehøjdeintervaller, vil variationen talrækkerne imellem fremstå som dobbelt så stor, eftersom hver enkelt toneændring nødvendigvis forårsager dobbelt så mange alternative intervaller. Her er det ikke det forøgede antal varierede numre, der vanskeliggør genkendelsesprocessen, men simpelthen det forhold, at to alternative successive intervalnumre midt i rækken lige så vel kan forvandle passagen til uigenkendelighed (sammenlign Eks. 5c med Eks. 5a), som de kan udligne hinanden (sammenlign Eks. 5b med Eks. 5a). Meget afhænger for så vidt af de pågældende alternative intervalnumres sammenlægning; dvs. om summen af to intervalnumre er ændret i forhold til den modsvarende intervalsum i sammenligningsgrundlaget eller ej, og hvor meget denne

Eksempel 5. Tre beslægtede melodiske passager med angivelse af midi-tonenumre (nederst) og halvtoneintervaller (øverst). De indrammede cifre i (b) og (c) repræsenterer tone- og intervalændringerne i forhold til (a).

Eksempel 6. Samme tre melodiske passager med angivelse af to alternative intervalsumationer (hhv. øverst og nederst), svarende til intervallerne mellem hver anden tone. De indrammede cifre afslører ligheden mellem (a) og (b).

sum i givet fald er ændret. Således bemærkes det, at summen af den intervalliske ændring i Eks. 5b ($3 + (-7) = -4$) er identisk med den modsvarende intervalsum i Eks. 5a ($-2 + (-2) = -4$). Samme forhold gør sig ikke gældende mellem Eks. 5c ($-5 + (-2) = -7$) og Eks. 5a ($-2 + 2 = 0$). Ovenstående kunne muligvis anspore til også at lade melodiske passager beskrive ved summen af to (eller evt. flere) successive intervaller. Dette vil i givet fald fordrer et tilsvarende antal alternative repræsentationer (fra to og opefter). Således genererer de tre melodiske passager hver især to forskellige rækker med sammentalte intervalcifre, eftersom hvert interval kan parres med såvel forløberen som efterfølgeren (se Eks. 6). Det er imidlertid kun den ene af disse rækker, der kan afsløre Eks. 6a og Eks. 6b som eksakt matchende (jf. de indrammede cifre).

Den overordnede ide med en sådan repræsentationsmodel er netop at generalisere (til forskel fra at klassificere); dvs. reducere beskrivelsen i en sådan grad, at detailmæssige variationer udjævnes og beslægtede segmenter automatisk opfattes som identiske i den maskinelle aflæsning, og således tegnes her konturerne af endnu et afledningsniveau, som rækker ud over kategoriseringen i Figur 1. Det er imidlertid en ulempe, at en sådan type generalisering risikerer at medføre alt for mange resultater, der i bedste fald er irrelevante og i værste fald direkte misvisende, dvs. musikalsk meningsløse. Ét specifikt løsningsforslag fra makkerparret Emilios Cambourpoulos og Gerhard Widmer er derfor, som supplement til en beskrivelse af den egentlige melodiske overfladestruktur, at operere med op til flere rytmiske reduktioner af denne, hvor også eksempelvis metrisk centrale toner (og navnlig de melodiske og

rytmiske intervaller herimellem) indgår i beskrivelsen.⁴³ Med denne ‘både-og-tilgang’ fremlægger de dermed i virkeligheden en metodisk tilgang, som også kendetegner den tidligere nævnte *multiple viewpoint approach*,⁴⁴ hvor en algoritmisk identifikationsproces appliceres i forhold til en vifte af datamængder, svarende til enhver tænkelig beskrivelsesform. Her er problemet imidlertid dels, at hver eneste alternative beskrivelsesform i praksis ofte kræver større eller mindre justeringer i den algoritmiske identifikationsproces; dels at det er besværligt at operere med mange separate datamængder.

Enkeltrækker eller multidimensionale datamængder

De fleste identifikationsalgoritmer er møntet på ‘enkeltrækker’ (*strings*), eftersom det umiddelbart er det mest simple; altså en slags ‘monofon database’,⁴⁵ hvor selve rækkefølgen symbolerne imellem spiller en afgørende rolle. Således opfattes *a b c d* som forskellig fra *c a b d* og *b d a c* til trods for, at samme fire karakterer optræder i alle tre rækker. I praksis er sådanne rækkebaserede modellers applicering i forhold til musikanalytiske formål dog forbundet med visse uhensigtsmæssige begrænsninger, hvilket bl.a. udspringer af det faktum, at de sammenligningsmetoder, som algoritmerne betjener sig af, oprindeligt er møntet på tekstdata og ikke musikalske data, og sidstnævnte er per natur mere komplicerede. Dette skyldes ifølge Anna Pienimäki især tre forhold: 1) *polyfoni* (flere sideløbende individuelle informationsstrømme); 2) *mangedimensionering* (mange forskellige beskrivelsesmodeller per informationsstrøm, *multiple viewpoints*); samt 3) *transpositionsinvarians* (overordnet melodisk/rytmisk lighed trods individuelle forskelle i tonehøjde eller varighed).⁴⁶ Mens sidstnævnte forhold synes relativt let overkommeligt via distancebaserede repræsentationsformer (såsom tonehøjdeintervaller og ioi-ratio), forekommer de to første punkter noget mere problematiske.

To find all the interesting repetitions in a musical passage using a string based approach, one has to run various algorithms on a multitude of different representations of the passage. Moreover, when the music to be analysed is polyphonic, there are certain types of repetition that cannot be discovered if the music is represented using strings.⁴⁷

Dersom den rækkebaserede tilgang fordrer forskellige algoritmer, afhængig af den valgte beskrivelsesmodel, besværliggøres identifikationsprocessen; ikke mindst når

43 Emiliós Cambouropoulos og Gerhard Widmer, ‘Automated Motivic Analysis via Melodic Clustering’, *Journal of New Music Research*, 29/4 (2000), 304-6. Metoden afprøves efterfølgende på melodiske segmenter fra Schumanns klaverstykke ‘Träumerei’ (*Kinderszenen*, op. 15, nr. 7), og Debussys *Syrinx*, på hvilken baggrund tidligere publicerede studier af henholdsvis Bruno Repp og Jean-Jacques Nattiez diskuteres.

44 Jf. note 38.

45 David Meredith, Geraint A. Wiggins og Kjell Lemström, ‘Pattern induction and matching in polyphonic music and other multidimensional datasets’, i N. Callaos et al. (eds.), *Proceedings of the 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics* (Orlando, Fla., 2001), 62.

46 Anna Pienimäki, ‘Indexing Music Databases Using Automatic Extraction of Frequent Phrases’, *ISMIR Proceedings* (2002), 25.

47 Meredith, Lemström og Wiggins, ‘Algorithms for discovering repeated patterns’, 328.

man opererer med mange forskellige dimensioner og er nødt til at ændre eller i det mindste tilpasse proceduren hver gang.

Som løsning herpå foreslås i stedet en *vektormodel*, hvor samtlige stemmer i et musikstykke transformeres til multidimensionale datamængder i form af 'events', indeholdende et givet antal parametre, som kendetegner hver node. Denne model er som sådan ikke ny, men har fortilfælde i *EMI*, hvor Cope opererer med følgende fem vektordimensioner (se Eks. 7): *onset time* eller ansatstidspunkt, målt i millisekunder; *pitch* eller absolut tonehøjde efter midi-standarden; *duration* eller varighed, ligeledes målt i millisekunder, *channel number*, dvs. stemmeinformati on angivet som midi-kanal (1-16), samt *dynamic* eller lydstyrke, angivet på en skala fra 0 til 127.⁴⁸

The image shows two musical staves, Alto and Tenor, with notes and rests. To the right of each staff is a list of numerical data representing the 'events' for each note. The Alto staff has three notes and one rest. The Tenor staff has six notes. The data lists are as follows:

Staff	Note/Rest	Event Data
Alto	Rest	(4250 66 250 1 64)
	Note 1	(4500 66 250 1 64)
	Note 2	(4000 63 125 2 64)
	Note 3	(4125 64 125 2 64)
Tenor	Note 1	(4250 66 125 2 64)
	Note 2	(4375 64 125 2 64)
	Note 3	(4500 63 125 2 64)
	Note 4	(4250 66 125 2 64)
	Note 5	(4000 63 125 2 64)
	Note 6	(4125 64 125 2 64)

Eksempel 7. 'Cope-events', appliceret på midtersatsen i J.S. Bachs 'Jesu, meine Freude' (udsnit af t. 3).

Fordelen ved en sådan model skulle angiveligt være, at den som en *flerdimensional initialrepræsentation* rummer alle de væsentlige data, hvorfra alle øvrige klassificerede og distancebaserede data kan beregnes maskinelt, og at man herefter kan nøjes med at gennemføre identifikationsprocessen én gang. Det 'polyfone problem' er dog for så vidt stadig uløst, så længe to (eller flere) polyfone stemmer repræsenteres som individuelle informationsstrømme, for dermed ses der helt bort fra eventuelle relationer og sammenhænge, herunder mønsterforekomster, på tværs af stemmerne; dvs. fænomener som gennembrudt tematisk arbejde, der bl.a. kendes fra wienerklassikken foruden middelalderens *hoquetus*-teknik, samt musikalske 'fikserbilleder', latente i den kontrapunktiske struktur (se Eks. 8).

⁴⁸ Cope, *Experiments in Musical Intelligence*, 57-59 (jf. note 25). Selve antallet af dimensioner er i princippet ubegrænset, og de fem nævnte dimensioner er ikke uomgængelige. I stedet for *dynamic*, som hos Cope, opererer Meredith, Wiggins og Lemström således med begrebet *morphic pitch* ('Algorithms for discovering repeated patterns', 328-29), hvormed menes den position på nodelinjen, hvor nodehovedet er placeret. Således indgår samtlige nodelinjer og mellemrum i et nummereringssystem, hvor eksempelvis *c'* har nummer 23. Herefter følger *d'* og *e'* med henholdsvis 24 og 25 og så fremdeles. Desuden introduceres en *grafisk tilgang*, idet to vilkårlige vektordimensioner (f.eks. *onset time* og *pitch*) afbildes i et koordinatsystem, hvorigennem mønstrene kan aflæses og sammenlignes. En lignende model præsenteres i en konferencerapport af Esko Ukkonen, Kjell Lemström og Veli Mäkinen, 'Geometric Algorithms for Transposition Invariant Content-Based Music Retrieval', *ISMIR Proceedings* (2003), 194.

Eksempel 8. Første- og andenviolinstemmen i åbningen af Tchaikovskys 6. symfoni (*Pathétique*), 4. sats.

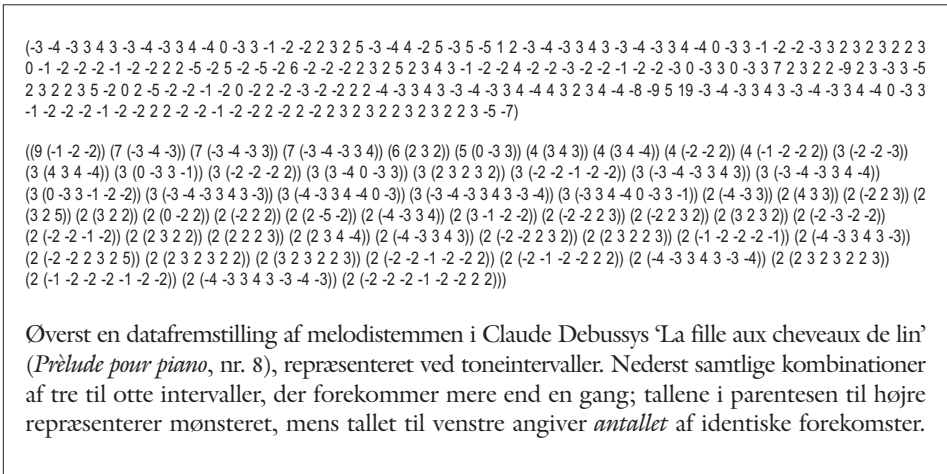
EVALUERINGSPROCEDURER

Som det ekspliciteres af Ian Bent, er sammenligning at betragte som en helt grundlæggende procedure i en hvilken som helst form for musikanalyse;⁴⁹ således også computerstøttet musikanalyse og algoritmisk mønsteridentifikation, hvor kunststykket som bekendt er at få maskinen til at fremkomme med musikalsk meningsfulde resultater gennem en formaliseret proces. Herunder samler sig nogle forhold, der hver for sig kræver en stillingtagen. For det første må selve referencerammen fastlægges, dvs. det grundlag, hvorpå sammenligningen ønskes baseret: Hvad sammenlignes med hvad? Spørgsmålet korresponderer i høj grad med sondringen mellem de forskellige applikationstyper, mønstergenkendelse og mønsteropdagelse. Således er referencerammen ved mønstergenkendelse givet på forhånd i kraft af den brugerdefinerede indlæsning (X), på baggrund af hvilken alle eventuelle identiske og beslægtede mønstre identificeres ($X, X', X'' \text{ etc.} \cong X$). Ved mønsteropdagelse, hvor brugeren (analytikerens) formodentlig indledningsvis er uvidende om analysematerialeets samtlige mønstre (disses struktur, antal og nøjagtige længde), anskues den samlede datamængde under et, og alle successive talkombinationer (inden for en valgt afgrænsning; f.eks. tre til otte tonehøjdeintervaller, angivet med rækker af positive og negative cifre) sammenlignes med alle, uanset hvor i musikstykket disse refererer til (se Fig. 2).⁵⁰

⁴⁹ Bent og Pople, 'Analysis', 528.

⁵⁰ En forskergruppe, under ledelse af Tim Crawford (King's College, London), har arbejdet på at løse en række særlige problemer i form af *gradvis* materialeforvandling, 'the evolutionary chain problem' (jf. Tim Crawford et al., 'Approximate Musical Evolution', *Computers and the Humanities*, 35/1 (1998), 55-64). Således præsenteres algoritmer, der angiveligt skal være i stand til at identificere en sekvens af mønstre (adskilt i tid), der hver især først og fremmest er at betragte som variationer af det foregående mønster og *ikke af hinanden*; f.eks. $X \rightarrow (X)' \rightarrow ((X)')' \rightarrow (((X)')')'$). Ideen er angiveligt at gøre maskinen i stand til at identificere en fortløbende udvikling (f.eks. *metamorfose*), hvor det oprindelige materiale ellers forvandles til uigenkendelighed.

Figur 2.



Selve vurderingsspørgsmålet vedrørende forskellen mellem lighed, slægtskab eller kontrast er derimod det samme uanset applikationstype, og i den henseende er der brug for en slags 'sammenligningsbarometer'; dvs. et måleredskab, der i forlængelse af to mønstres identifikation beregner, i hvor høj grad de pågældende passager ligner hinanden – eller omvendt: hvorvidt de varierer indbyrdes. Dette er især nødvendigt, eftersom grænsen mellem beslægtede og kontrasterende elementer er vanskelig at trække; ikke mindst ordvalget 'musikalsk beslægtet' er i sig selv temmelig unøjagtigt. Således udgør formaliseringen af evalueringsproceduren en væsentlig problemstilling, hvori selve bevidstgørelsen omkring de forhold, vi som musikalsk intelligente lyttere lægger til grund for vor opfattelse af to mønstre som beslægtede, indgår som en ganske værdifuld øvelse.

Kvantitative og kvalitative sammenligningsmodeller

At det er så kompliceret algoritmisk at sammenligne beslægtede musikalske passager (til forskel fra identiske), skyldes naturligvis, at mulighederne, hvormed én passage kan tænkes at variere i forhold til en anden – uden vel at mærke at forandres til uigenkendelighed, – er temmelig alsidige. Selv om det bestemt er muligt indledningsvis i identifikationsprocessen at indføje variable, som er 'tolerante' overfor visse differencetyper (f.eks. forskellen mellem en lille og stor sekund), er der som nævnt behov for efterfølgende at evaluere resultaterne. Her kan det muligvis hjælpe på overskueligheden, hvis man grundlæggende skelner mellem to niveauer, hvormed to passager kan adskille sig fra hinanden og stadig være gensidigt beslægtede; på den ene side et 'globalt' niveau, hvor den samlede passage ændres, mens de interne relationer imellem de enkelte elementer bibeholdes i en eller anden forstand, – og på den anden

side et 'lokalt' niveau, hvor variationen specifikt kan henvises til en eller flere afgrænsede dele indenfor den samlede passage, uden at dennes overordnede struktur dog hermed ændres væsentligt.⁵¹ Mens det globale differenceniveau i alt væsentligt inkluderer transformationerne, *inversion*, *retrograd*, *retrograd inversion* samt disse spejlformers transpositioner,⁵² omfatter det lokale differenceniveau mange forskellige variationstyper i form af ornamenteringer og rytmiske ændringer for blot at nævne nogle få.

Især sidstnævnte repræsenterer en vanskelig, men samtidig helt uomgængelig algoritmisk udfordring. Det kan næppe overraske, at musikalsk variation ofte netop drejer sig om at ændre blot enkelte elementer ud af et samlet hele; en kendsgerning, der umiddelbart har stor betydning for de sammenlignede passagers struktur, når de repræsenteres som eksempelvis talrækker. Tænk blot på, hvorledes få melodiske ornamenteringer (forsiringer mm.) kan afstedkomme et forøget antal data og dermed besværliggøre identifikationsprocessen (se Eks. 9).

The image shows two musical staves. The first staff is labeled 'Takt 71' and the second 'Takt 87'. Both are in G major (one sharp) and 4/4 time. The notation includes various ornaments such as grace notes, slurs, and trills, which are used to illustrate how small changes in melody can affect identification.

(0 81) (960 80) (1020 81) (1440 80) (1500 81) (1920 86) (2280 83) (2400 79) (3360 78) (4200 75) (4320 76) (4680 78) (4800 79) (5160 81) (5280 82) (5640 83) (5760 74) (6480 78) (6600 76) (6720 76) (6960 78) (7200 79) (7440 80)

(0 81) (960 80) (1020 81) (1440 80) (1500 81) (1920 86) (2040 85) (2160 83) (2280 81) (2400 79) (3360 78) (3840 76) (4200 78) (4240 76) (4280 76) (4320 76) (4560 78) (4800 79) (5040 79) (5280 81) (5520 83) (5760 78) (6480 79) (6600 78) (6720 76) (6960 78) (7200 79) (7440 80)

Eksempel 9. Sidetemaet i Mozarts symfoni nr. 40, g-mol (K. 550), 4. sats.

I den forbindelse er det værd at overveje en række forskellige sammenligningsmetoder, der hver for sig benyttes til at fastsætte graden af lighed, men som adskiller sig fra hinanden på væsentlige punkter. Den ene metode er rent *kvantitativ*, idet lighedsgraden mellem to passager måles procentuelt uden nogen information omkring, hvori denne lighed består. Hvis vi som i Eksempel 10 eksempelvis opererer med ansatstidspunkt og tonehøjde som dobbeltrepræsentation for hver node i de fire melodiske passager, viser regnestykket, at b, c og d alle er 75% identiske med a, idet der er sammenfald ved seks events ud af i alt otte mulige. Imidlertid vil det være klart for de fleste musikalske mennesker, at b lægger sig tættere op ad a end de øvrige to passager gør det, netop fordi det så at sige er de 'rigtige' toner, der korresponderer med hinanden. Dette fører frem til spørgsmålet vedrørende, hvordan to passager ligner hinanden; der tilstræbes med andre ord en mere *kvalitativ* indfaldsvinkel til mønstersammenligningen.

⁵¹ Rolland og Ganascia, 'Musical Pattern Extraction and Similarity Assessment', 130f.

⁵² I modsætning til Rolland og Ganascia, 'Musical Pattern Extraction and Similarity Assessment', finder nærværende forfatter ingen grund til at indlemme eksakte melodiske transpositioner i gruppen af 'globale differencer', eftersom anvendelsen af tonehøjdeintervaller som repræsentative data medfører, at sådanne automatisk identificeres som melodisk identiske, hvilket de i realiteten også er.

a: (0 81) (900 80) (960 81) (1380 80) (1440 81) (1920 86) (2280 83) (2400 79)

b: **(0 81) (900 80) (960 81) (1440 81) (1920 86)** (2040 85) (2160 83) (2280 81) **(2400 79)**

c: (0 78) (240 79) (480 81) (720 83) **(900 80) (960 81) (1380 80) (1440 81) (1920 86) (2280 83)** (2400 83)

d: **(0 81) (900 80) (960 81) (1380 80) (1440 81)** (1560 83) (1680 85) (1800 86) (1920 83) **(2280 83)** (2400 81)

Eksempel 10.

Udgangspunktet er to distancemodeller, *Hamming-distancen* og *Levenšteins-distancen*,⁵³ begge anvendt indenfor informationsteorien, som her kort skal introduceres. Hamming-distancen angiver kort fortalt antallet af variationer blandt korresponderende enheder i to datamængder af samme længde, eller sagt mere præcist: det laveste antal nødvendige udskiftninger af enkeltelementer, hvormed den ene datamængde transformeres til den anden. Den anden kvalitative model, Levenšteins-distancen, kan betragtes som en raffineret udgave af Hamming-distancen, idet den udover udskiftninger også inkluderer indføjelser og udeladelser, hvilket forekommer ganske væsentligt i musikanalytisk øjemed. Hermed reduceres en i mange tilfælde uhenigtsmæssig stor difference mellem to datamængder, der ud fra et musikalsk perspektiv er nært beslægtede, og desuden – hvilket er af afgørende betydning – bliver det muligt også at sammenligne datamængder af forskellig længde. I den forbindelse ophæves reglen om, at nr. 1, nr. 2, nr. 3 etc. i den ene række nødvendigvis sammenlignes med nr. 1, 2 og 3 i den anden. Forskellen mellem de to distancemodeller er konkretiseret i Figur 3.

Mulighederne for at matche to datamængder af forskellig længde som beslægtede er dog stadig begrænsede selv indenfor Levenšteins-modellens rammer med de tre standardoperationer, indføjelser, udeladelser og udskiftninger; en begrænsning, der forekommer problematisk, set i lyset af de meget mere omfattende variationsmuligheder, der forefindes blandt beslægtede musikalske genkomster. Således kræves ikke

53 Opkaldt efter matematikerne, Richard W. Hamming og Vladimir Levenštejn. Sidstnævnte betegnes også som *edit distance*.

Figur 3.

Forskelle mellem distancemodeller	
<i>Hamming-distancen</i>	<i>Levenstein-distancen</i>
2143896	2143896
2145389	2145389
= 4 (fire sidste cifre udskiftes)	= 2 ("5" indføjes og "6" udelades)
2143896	2143896
21453897	21453897
error	= 2 ("5" indføjes og "6" udskiftes med "7")

mange musikalske 'krumspring', før dataligheden sløres betydeligt (jf. Eks. 9). For at komme dette problem til livs foreslås fra flere hold en udvidelse af distancemodellen i form af en række yderligere differencetyper, der navnlig modsvarer musikanalytiske behov (jf. Figur 4).⁵⁴

Figur 4.

Lokal variation	
Standardoperationer (Levenstein)	Udvidet redigering
<ul style="list-style-type: none"> • Indføjelse: $A B C D \rightarrow A B [X] C D$ • Udeladelse: $A B [X] D \rightarrow A B D$ • Udskiftning: $A B [X] D \rightarrow A B [Y] D$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Rækkefølgeændring: $A B C D \rightarrow A B D C$ • Konsolidering: $A [BBB] C D \rightarrow A B C D$ • Fragmentering: $A B C D \rightarrow A [BBB] C D$ • Masseindføjelse: $A B C D \rightarrow A B [XXX] C D$ • Masseudeladelse: $A [XYZ] B C \rightarrow A B C$ • Masseudskiftning: $A B [XYZ] C D \rightarrow A B [UVW] C D$

Den store gevinst heri består i, at det f.eks. nu blot tæller én redigeringsoperation at matche to melodifragmenter, der har et ornament (i form af et variabelt antal toner) til forskel – i modsætning til Levenstein-distancens *fastlagte* standardoperationer, hvor hver eneste tilføjelse, udeladelse eller udskiftning tæller individuelt (se Eks. 11a-b). De nye typer har imidlertid også en væsentlig begrænsning, idet deres anvendelses-potentiale nødvendigvis afhænger af, at algoritmen på forhånd er udstyret med en

⁵⁴ De to typer, konsolidering og fragmentering, defineres første gang af Marcel Mongeau og David Sankoff i artiklen 'Comparison of Musical Sequences', *Computers and the Humanities*, 24/3 (1990), 165, og adopteres siden af Rolland ('Discovering Patterns in Musical Sequences', 340 f.), der desuden supplerer med de øvrige på listen i Figur 4. Se også Rolland og Ganascia, 'Musical Pattern Extraction and Similarity Assessment', 134-36, og 'Pattern Detection and Discovery', 195-96.

(a) *Standardoperationer (Levenstein).*

①-⑥: indføjelser • ⑦: udeladelse • ⑧-⑩: udskiftninger

(b) *Udvidet redigering.*

①-②: masseindføjelser • ③: konsolidering • ④: udeladelse • ⑤: masseudskiftning

Eksempel II. Mozart: Symfoni nr. 40, g-mol (K. 550), 4. sats. To sidetemaudrag, hvor det sidste holdes op mod det første, hhv. med og uden udvidelserne i forhold til Levenstein-distancemodellens redigeringsoperationer. Bemærk, at (+) står for *toneindføjelse*, (÷) for *toneudeladelse* og at den vertikale kombination af disse står for *toneudskiftning*.

række formaliserede stilmønstre, som den i givet fald vil genkende, således at ornamenter aflæses som sådanne og ikke som et antal selvstændige toner.

AFRUNDENDE BEMÆRKNINGER

Uanset hvor spidsfindige repræsentations- og sammenligningsmodeller, man formår at opstille, og uanset hvor effektive de måtte forekomme, er man formentlig altid nødt til at kontrollere resultaterne manuelt. Dette giver anledning til at stille det helt overordnede spørgsmål vedrørende computerens funktion; om den tænkes anvendt som *imitator* eller *katalysator*. Drejer det sig om at efterligne perceptionspsykologiske og kognitive processer, dvs. gøre applikationsprogrammer i stand til automatisk at identificere de samme fænomener, som man formodentlig ville have fundet ved manuelt arbejde – eller bør succeskriteriet i virkeligheden ikke være et andet, nemlig at maskinens ‘manglende musikalitet’, dens uafhængighed af forudindtagede forestillinger, (musik)kulturelle normer etc., netop sikrer et output, der sommetider nok må forkastes, men som frem for alt kan overraske og dermed åbne nye vinkler i forbindelse med en musikanalytisk tolkning? For undertegnede er der ingen tvivl om, at det er sidstnævnte, hvori det egentlige perspektiv i computer-

anvendelsen rettelig ligger. Karl Aage Rasmussen anskueliggør dette synspunkt meget præcist, skønt hans udgangspunkt er komposition og ikke analyse. Han får hermed det sidste ord:

Computerens omstyrtende potens ligger i den måde omgangen med den, feed-back'et fra den, ændrer vores måder at tænke på, musikalsk og i det hele taget. Den skaber nye tankemodeller, ikke ved at vise dem frem, ikke via mikroprocessorer, men som en katalysator. ... Maskinen får simpelthen en masse telefonråde til at gløde i vores egne hoveder, forbindelser mellem abstraktionsformer og tankebaner, der ellers aldrig var blevet strømførende. Prisen er tvivl og forvirring, i hvert fald i mit private tilfælde. Især tvivl. Men tvivl flytter bjerge.⁵⁵

SUMMARY

Algorithmic Identification of Patterns

Thoughts on computer-assisted music analysis

In the field of computer-assisted music analysis, similarity studies are widely recognized as the main areas of investigation comprising a number of computational tasks such as extraction, recognition, and comparison of musical patterns. A 'musical pattern' refers to any kind of recurring material (melodic, rhythmic, harmonic etc.), which is measurable through symbolic modelling. In this article, several issues associated with automated (algorithmic) procedures of musical analysis are introduced and discussed. First, preliminary historical and epistemological conditions of computational musicology are presented, followed by a few basic distinctions between different methods of application. Second, two central problems are evaluated: 1) the difficult choice of the form of symbolic representation, and 2) the challenge of finding musically adequate methods of comparison.

55 Rasmussen, 'Spejlet i spejlet', 130-31.