Technische Universität Berlin
Fakultät I
Institut für Sprache und Kommunikation
Fachgebiet Audiokommunikation

Magisterarbeit

Zur Klangfarbe historischer und moderner Orchesterinstrumente

Eine Analyse anhand signalbezogener, akustischer Deskriptoren

Sebastian Günther
[redacted]

Erstgutachter: Prof. Dr. Weinzierl
Zweitgutachter: Dr. Lepa
Abgabedatum: 6.8.2012

Eidesstattliche Erklärung

Die selbstständige und eigenhändige Anfertigung versichere ich an Eides statt.

Sebastian Günther Berlin, den 6.8.2012

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **3**

2. Zur Klangfarbe **4**

3. Theorie **6**
3.1. Der Frequenzbereich . . . 6
3.1.1. Das Spektrum . . . 6
3.1.1.1. Harmonische Reihe und die Wirkung einzelner Teiltöne 7
3.1.1.2. Formanten . . . 8
3.1.1.3. Geräuschanteile . . . 8
3.2. Der Zeitbereich . . . 9
3.2.1. Der Einschwingvorgang . . . 10
3.2.2. Der quasistationäre Zustand . . . 10
3.2.3. Der Ausklingvorgang . . . 10
3.3. Die Streichinstrumente . . . 11
3.3.1. Violinen . . . 11
3.3.2. Violen . . . 12
3.3.3. Violoncelli . . . 13
3.3.4. Kontrabässe . . . 13
3.4. Die Blechblasinstrumente . . . 14
3.4.1. Posaunen . . . 14
3.4.2. Hörner . . . 15
3.4.3. Trompeten . . . 15
3.5. Die Holzblasinstrumente . . . 16
3.5.1. Flöten . . . 16
3.5.2. Oboen . . . 17
3.5.3. Klarinetten . . . 18
3.5.4. Fagotte . . . 18

4. Methodik **19**
4.1. Zu den Aufnahmen . . . 19
4.1.1. Zu den Instrumenten und Instrumentalisten . . . 19
4.2. Analyse . . . 20
4.2.1. Veränderungen der Timbre Toolbox . . . 22
4.2.2. Darstellung der Ergebnisse . . . 23

5. Ergebnisse **24**
5.1. Die Streichinstrumente . . . 25
5.2. Die Blechblasinstrumente . . . 34

5.3. Die Holzblasinstrumente 43

6. Diskussion **53**

7. Zusammenfassung **58**

Literaturverzeichnis **58**

A. Anhang **66**

1. Einleitung

Die Instrumente, wie wir sie heute aus dem klassisch-romantischen Sinfonieorchester kennen, unterlagen in ihrer Entwicklung teilweise starken Veränderungen. Verschiedene Materialien, Formen und technische Innovation bewirkten eine Variation im Klang und erweiterten den Tonumfang eines Instruments. Die unterschiedlichen klanglichen Eigenschaften von Musikinstrumenten der verschiedenen Epochen sind ein wesentliches Element der historisch informierten, musikalischen Aufführungspraxis. Auch für Komponisten, Tonmeister und Sounddesigner sind die klanglichen Unterschiede von historischen Instrumenten gegenüber den Instrumenten moderner Bauweisen von Bedeutung.

Das charakteristische Klangspektrum (Kap. 3.1.1) eines Instruments entsteht im Wesentlichen durch das Zusammenwirken eines Anregungs- und Resonanzsystems. Dieses gibt sowohl Auskunft über die energetische Verteilung und Lage der Obertöne, als auch über das Gemisch aus Grundton, Obertönen und Geräuschanteilen. Damit ist das Klangspektrum eines Klanges neben dem zeitlichen Verlauf der Signalamplitude wichtigster Bestandteil zur physikalischen Beschreibung der Klangfarbe. Die Auswertung der spektralen und zeitlichen Merkmale durch das auditive System des Menschen ermöglicht uns im musikalischen Kontext sowohl die Identifikation eines Instruments ("Klingt wie eine Violine") als auch eine Unterscheidung der Qualität ("Violine 1 klingt anders als Violine 2").

Ziel der Arbeit ist es, Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung der historischen und modernen Orchesterinstrumente zu identifizieren. Dabei folgt sie der von J. Krämer in seiner Arbeit zur Schallleistung von historischen und modernen Streichinstrumenten [Krä11] aufgestellten Vermutungen der unterschiedlichen Intensitätsverteilung des Grundtons und der hohen Teiltöne zwischen den Instrumenten. Dazu wurden die am Fachgebiet der Audiokommunikation der Technischen Universität Berlin entstandenen Aufnahmen (Kap. 4.1) von Instrumenten verschiedener Epochen mit Hilfe von signalbezogenen Deskriptoren untersucht.

2. Zur Klangfarbe

Hermann von Helmholtz veröffentlichte im Jahre 1870 das für die musikalische Akustik maßgebende Buch „Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage der Musik“. Darin unterscheidet Helmholtz erstmals zwischen Ton und Klang, wobei der Ton für ihn eine einfache Schwingung und der Klang eine Zusammensetzung dieser einfachen Schwingungen ist [Hel70]. Er untersucht in seinem Werk unter anderem die Frage, „(...) in wie fern die Unterschiede der Klangfarbe etwa auf verschiedenartige Verbindungen des Grundtons mit verschieden starken Obertönen beruhen.“ [Hel70, S.39]. Auch wenn Helmholtz schon Geräuschanteile, An- und Abklingphasen diskutiert, so möchte er doch „(...) vom Ansetzen und Abklingen des Schalles absehen, und nur auf den eigentlich musikalischen Theil des Klanges, welcher einer gleichmässig anhaltenden, regelmässig periodischen Luftbewegung entspricht, Rücksicht nehmen, und die Beziehungen zu ermitteln suchen zwischen dessen Zusammensetzung aus einzelnen Tönen und der Klangfarbe.“ [Hel70, S.118]. Eben die Zusammensetzung der Obertöne ist für Helmholtz dann auch bestimmend für die Empfindung der Klangfarbe [Hel70]. So war es Carl Stumpf, [Stu90][Stu26] der neben der Teiltonstruktur auch die Bedeutung der Nebengeräusche und der Zeitstrukturen eines Klangs hervorhob und damit den Begriff der Klangfarbe erweiterte. Die Klangfarbe als etwas zu verstehen, was sowohl spektrale als auch zeitliche Strukturen beinhaltet, hat sich als weitestgehend grundlegend erwiesen [Reu98]. 1929 veröffentlichte Erich Schumann das Buch „Die Physik der Klangfarben“ [Sch29] und zeigte mit seinen Untersuchungen die Bedeutung der Formanten, also Frequenzbereiche mit besonders starker Intensität, welche die Klangspektren von Musikinstrumenten charakterisieren. E. Schumann stellte die vier folgenden Klangfarbengesetze auf:

- „Formantstreckengesetz

  Die Klangfarbe der Musikinstrumententöne wird -unabhängig von der Höhe des Grundtons – von an feste Tonhöhen gebundenen Frequenzbereichen, den „Formantstrecken“ oder „Formantregionen“, bestimmt. Diese Zonen sind durch stärkere Partialtöne ausgezeichnet. Daß es sich dabei um feste, d.h. an bestimmte Tonhöhen gebundene Formantstrecken handelt, geht aus folgendem hervor: Mit steigendem Grundton und bei gleichbleibender Stärke eines Instrumentalklangees verharrt das Maximum innerhalb der Formantstrecke so lange auf dem Teilton gleicher Ordnungszahl, bis dieser die obere Grenze der Formantstrecke erreicht. Dann, d.h. bei weiterem Ansteigen des Grundtones, rückt das Maximum auf einen in der gleichen Formantstrecke befindlichen, oder von unten gerade in sie eintretenden Partialton niederer Ordnungszahl herab.

- Akustisches Verschiebungsgesetz

  Bei Steigerung der Intensität eines Klanges verlagert sich das Maximum auf Partialtöne höherer Ordnungszahlen. Die oberen Komponenten des Partialtongerüstes werden dann im allgemeinen stärker, die unteren schwächer. Neben dieser allgemeinen Intensitäts-Verlagerungstendenz zeichnet sich innerhalb der Formantstrecken im besonderen noch ein Stärkerwerden der höher gelegenen Klangkomponenten ab.

- Akustisches Sprunggesetz

  Bei Klängen mit zwei Formantstrecken überspringt bei sehr starker Tongebung das in p-Klängen im unteren Formantbereich liegende Maximum die zwischen den Formantstrecken gelegenen Partialtöne, um einen Partialton der oberen Formantstrecke auszuzeichnen.

- Formant-Intervallgesetz

  Neben der absoluten Höhe der Formantstrecken und neben der (sich aus den Intensitäten der Partialtöne ergebenden) Klangstärke ist für die Färbung des Klanges noch das Intervall entscheidend, das, unabhängig von der Höhe des Grundtons, der stärkste Partialton der anderen Formantstrecke bildet. Die für die einzelnen Orchesterinstrumente charakteristischen festen Frequenzverhältnisse sind z.B. für die Oboe 1:2, für das Englishhorn 2:5, für das Fagott, 3:8.“ [Mer75, S.30 f]

Während die Unterscheidung der Klangfarbengesetze E. Schumanns erst wieder in den letzten Jahren mehr Beachtung fanden [Reu98], so ist doch die Bedeutung der Formanten für die Charakteristika von Musikinstrumenten unumstritten. Da die subjektive Empfindung von Laut- und Tonheit im Laufe der Zeit durch phon-, db-, sone-, sowie durch mel- und bark-Skalen gehörsadäquat beschrieben werden konnte, zeigte sich nun ein verstärktes Bedürfnis, auch die Klangfarbe zu definieren [Reu98]. So veröffentlichte die American Standard Association 1960 die wohl bekannteste Definition der Klangfarbe. Sie definiert die Klangfarbe "(...) als das Merkmal, welches es dem Hörer ermöglicht, zwei Schallereignisse die unter gleichen Umständen mit gleicher Lautheit und Tonhöhe erklingen, zu unterscheiden" [ASA60]. Diese Definition ist allerdings aus zweierlei Gründen immer wieder kritisiert worden. Erstens impliziert sie, dass Klangfarbe nur für Klänge mit einer Tonhöhe existiert [Set05] und zweitens definiert sie als Negativdefinition nicht die Klangfarbe selbst, sondern vielmehr das was übrig bleibt, wenn man von einem Klang die Tonhöhe und die Lautheit abzieht [Reu98]. Und es zeigte sich in den folgenden Jahren, dass dies kaum ausreichte, um die Klangfarbe vollständig zu beschreiben, sondern die Klangfarbe vielmehr eine multidimensionale Größe ist [Plo70]. Um die Anzahl und Eigenschaften der die Klangfarbe beschreibenden Dimensionen zu untersuchen, wurden die Verfahren des semantischen Differentials oder der multidimensionalen Skalierung genutzt [Bis74][Gre77] [IK93] [Lak00] [MCMW03]. Dabei wurden verschiedene, die Klangfarbe beschreibende Wahrnehmungsdimensionen detektiert . Ihnen ist jedoch gemein, dass sie mit Merkmalen des Zeit- und Frequenzbereichs korrelieren [Bis74][Gre77] [IK93] [Lak00] [MCMW03].

3. Theorie

3.1. Der Frequenzbereich

Alle in der Akustik vorkommenden Schwingungsverläufe lassen sich im Zeit-, sowie im Frequenzbereich darstellen. Diese Tatsache geht auf den französischen Mathematiker J. B. Joseph Fourier zurück, der zeigen konnte, dass jede periodische Schwingung in eine Menge von Sinusschwingungen zerlegt werden kann, deren Summe wieder den ursprünglichen Schwingungsverlauf ergeben. Für zeitkontinuierliche Signale x(t) erfolgt die Darstellung im Frequenzbereich mit Hilfe der Analysegleichung (3.1),

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\, e^{-j\omega t} dt \tag{3.1}$$

für zeitdiskrete Signale x(n) gilt (3.2).

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(\Omega)\, e^{j\Omega n} d\Omega \tag{3.2}$$

3.1.1. Das Spektrum

Die Darstellung eines Audiosignals als Summe von Sinusschwingungen mit bestimmter Frequenz und Amplitude wird Klangspektrum, Teiltonspektrum oder kurz Spektrum genannt. Aus ihm lassen sich schon ohne größere Anstrengungen viele Informationen über das Signal ableiten. Untersucht man beispielsweise das Spektrum des Kammertons eines auf 443 Hz gestimmten beliebigen Instruments, so wird die untere Grenze des Teiltonspektrums durch diesen Grundton bestimmt und unterhalb werden nur nichtharmonische Signalanteile auftreten, hervorgerufen durch geräuschartige oder unstetige Schwingungskomponenten [Mey95]. So ist es schnell möglich, eine Aussage über die Tonhöhe und den Geräuschanteil im Signal zu machen. Dem etwas geschulterem Betrachter wird es aber auch möglich sein, Aussagen über das Instrument bzw. der Instrumenten-Familie zu machen. Denn ausgehend von der Grundfrequenz treten im Spektrum ganzzahlige Vielfache, die sogenannten Teiltöne, Harmonischen oder Obertöne auf. Diese Teiltöne können in ihrer Anzahl schwach oder ausgeprägt sein, es kann Frequenzgebiete mit besonders starken Teiltönen geben (Kap. 3.1.1.2) und es können Teiltöne fehlen oder hervortreten [Dic87]. Dies alles lässt Rückschlüsse auf die Charakteristika der Instrumente und damit letztendlich auch auf die Klangfarbe zu.

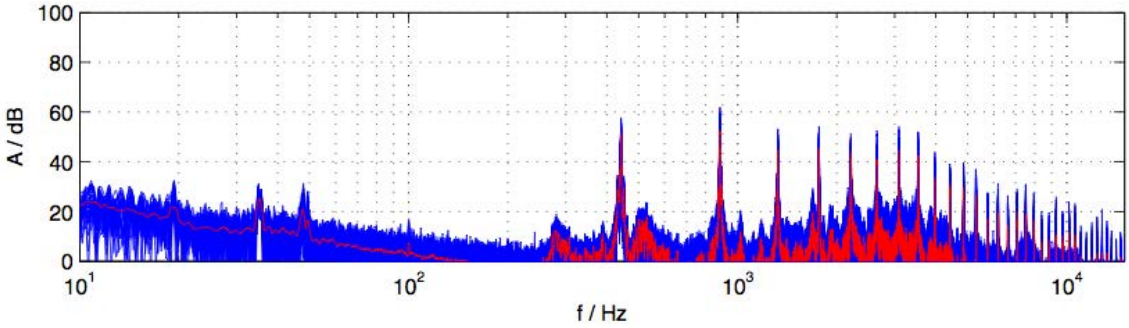

Abbildung 3.1.: Spektrum einer Violine im Fortissimo des Kammertons A4

3.1.1.1. Harmonische Reihe und die Wirkung einzelner Teiltöne

Der Grundton bildet zusammen mit seinen ganzzahligen Vielfachen die sogenannte harmonische Reihe. Für die nummerische Benennung der einzelnen Schwingungsanteile beginnt man für die Teiltöne und Harmonischen beim Grundton mit eins, für die Obertöne beim zweiten Teilton, so dass der zweite Teilton als erster Oberton bezeichnet wird. Jede Verdopplung der Grundfrequenz führt zu seiner Oktave, dessen Verdopplung wiederum zur Oktave führt usw.. Betrachtet man ein Teiltonspektrum mit 16 Teiltönen, so sind der 2., 4., 8. und 16. Teilton Oktaven. Die Verdreifachung der Grundfrequenz, also der dritte Teilton führt zur Quinte über der Oktave, ebenso der 6. und 12. Teilton. Der 5. und 10. Teilton wird als große Terz zum Grundton bezeichnet. Der 9. und 15. sind bereits die Quinte bzw. große Terz zu den höheren Oktaven des dritten Teiltons. Neben den reinen Intervallbeziehungen Oktave, Quinte und große Terz, decken sich die Frequenzen der Teiltöne 7, 11, 13 und 14 nicht mit denjenigen der normalen Tonleiter. So liegen der 7.,11. und 14. Teilton etwas tiefer als im Notenbild notiert und der 13. etwas höher [Mey95][Dic87]. Ist es dem geschulten Ohr noch möglich die ersten 6 bis 8 Teiltöne herauszuhören, so verschmelzen die höheren Teiltöne zu einem klangfarblichen Eindruck [Mey95]. Die Anzahl und Stärke der höheren Teiltöne ist in erster Linie davon abhängig, ob ein Instrument im Pianissimo oder im Fortissimo gespielt wurde. So enthält ein im Fortissimo gespielter Ton immer mehr Obertöne, als ein auf dem gleichen Instrument gespielter Ton im Pianissimo. Allgemein kann man sagen, dass ein Klang umso heller gegebenenfalls schärfer wirkt, je obertonreicher er hinsichtlich des Frequenzumfangs und der Intensität der hohen Anteile ist [Mey95]. Dabei kann ein tiefer Ton mit obertonreichem Klang einen rauhen Klangcharakter haben, da seine Teiltöne im hohen Frequenzbereich sehr dicht beieinander liegen. Während die Teiltöne höherer Noten einen größeren Abstand in demselben Frequenzbereich aufweisen und dadurch als reinerer Klang empfunden wird. Obertonarme Klänge tendieren mehr zu einem dunklen und weichen Timbre [Mey95]. Von Bedeutung ist aber auch , ob eher die geradzahligen oder die ungeradzahligen Teiltöne dominieren. Sind es die ungeradzahligen Teiltöne, führt dies zu einem gedeckten, teilweise auch hohlen Klang, während ein Dominieren der geradzahligen, vor allem der Oktavteiltöne, zu einem offenem und hellem Klangfarbeneindruck führen. Sind die Teiltöne gleichmäßig stark verteilt, so kann der Klang als hart empfunden werden[Mey95].

3.1.1.2. Formanten

Als Formant bezeichnet man ein Frequenzgebiet mit ausgeprägten Teiltönen, welche für Musikinstrumente und Stimmen vorkommen. Sie entstehen durch charakteristische Resonanzen eines Instruments oder im Vokaltrakt des Menschen. Der Frequenzbereich in dem die erhöhte Energie der Teilschwingungen liegt, bleibt dabei weitestgehend unabhängig von dem gespielten Grundton und ist damit charakteristisch. So werden auch Instrumente, deren Hauptformanten an der gleichen Stelle liegen, häufig verwechselt [Reu98]. Für die Sprache und den Gesang sind die Formanten Grundlage für die Vokalfarben. Singt ein Sänger eine Tonleiter auf einem bestimmten Vokal, so bleibt auch hier im Spektrum der charakteristische Frequenzbereich mit den verstärkten Teiltönen gleich, d.h. unabhängig von dem Grundton [Reu98]. Formanthaltige Klänge von Instrumenten werden auf Grund ihrer Nähe zur menschlichen Stimme als besonders wohlklingend empfunden [MW08]. Abbildung 3.2 zeigt die Formantlage der Vokale für die deutsche Sprache. Dabei repräsentieren die jeweiligen Maxima der Abbildung das Frequenzgebiet der stärksten Teiltöne und die Bereiche dazwischen die Übergangsfarben [Mey95].

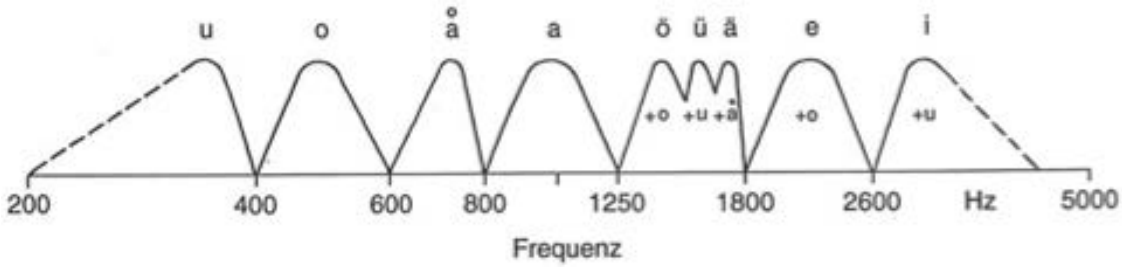

Abbildung 3.2.: Vokalformanten nach [Mey95]

Für die verschiedenen Lagen und Ausprägungen der Formanten von Instrumenten lassen sich mit Hilfe des klangfarblichen Empfindens der Vokale auch Rückschlüsse auf die Klangfarbe von Musikinstrumenten bilden. So sind für die Fülle und Sonorität eines Klangs, starke Komponenten im Bereich des u-Formanten (200-400 Hz) und vor allem des o-Formanten (400-600 Hz) maßgebend. Ein ausgeprägter a-Formant (800-1250 Hz) ruft einen kraftvollen Eindruck hervor, wobei besonders ein starker Anteil zwischen 1000 und 1250 Hz für eine markante Klangwirkung verantwortlich ist [Mey95]. Für die Helligkeit und Brillianz sind starke Anteile in den Bereichen des e-Formanten (1800-2600 Hz) und i-Formanten (2600- 4000 Hz) verantwortlich. Tritt eine Verstärkung des Bereichs der Umlaute (1250-1800 Hz) auf und ist gleichzeitig wenig Energie im Grundton und dem hohen Frequenzbereich, kann dies einem Klang einen näselnden Charakter verleihen [Mey95].

3.1.1.3. Geräuschanteile

Betrachtet man das Klangspektrum eines Musikinstruments, so wird man neben den Teiltönen auch einen Geräuschhintertergrund erkennen von dem sich die Teiltöne abheben. Der Geräuschanteil entsteht hauptsächlich durch die Tonerzeugung

des jeweiligen Instruments und ist damit für die unterschiedlichen Instrumentengruppen charakteristisch. So entsteht der Geräuschanteil für die Streichinstrumente durch Unregelmäßigkeiten der Bogenhaftung und für die Blasinstrumente durch das Anblasgeräusch. Bei einem plötzlichen Anstossen eines Resonanzsystems werden zunächst alle Resonanzen des Instruments angeregt und wenn dessen Frequenzen nicht auf die Frequenzen der Teiltöne fallen, erscheinen sie als unharmonischer Klanganteil [Mey95]. So ist der Geräuschanteil für die verschiedenen Instrumente charakteristisch, trägt zum Erkennen des Instruments bei und verleiht ihm einen natürlichen Charakter. Durch alleiniges, bspw. elektronisches Nachbilden des Teiltonspektrums, wird der Klang als künstlich und steril empfunden [Dic87].

3.2. Der Zeitbereich

Betrachten wir den Zeitverlauf x(t) eines Klanges, so sehen wir eine Aneinanderreihung von Zuständen zu einem bestimmten Zeitpunkt t. Der Zeitverlauf des Signals ist dabei das Ergebnis des Anregungs- und Resonanzsystems des jeweiligen Instruments. Da ein Resonanzsystem nicht abrupt auf eine Anregung reagieren kann, sondern sich die einzelnen Schwingungen erst „aufbauen“ müssen, kommt es immer zu einem mehr oder weniger ausgeprägten Einschwingvorgang. Der Grund ist, dass ein Teil der in das Resonanzsystem gesteckten Energie wieder abgestrahlt wird, solange aber mehr Energie nachgeliefert als abgegeben wird, steigt die Amplitude [Mey95]. Man spricht vom Einschwingvorgang. Anschließend stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der hineingesteckten und der abgestrahlten Energie ein und man spricht von einem quasistationären Zustand. Auch in diesem Zustand gibt es kleinere Schwankungen, allerdings wird der Klang als relativ unverändert betrachtet [Dic08]. Wird das Instrument nicht mehr angeregt, also dem Resonanzsystem keine Energie mehr zugeführt, so entsteht ein Ausgleichsvorgang. Es ist der entgegengesetzte Prozess zum Einschwingvorgang, d.h. einzelne Schwingungen werden langsamer als andere gedämpft und klingen so langsamer aus. Eine schematische Darstellung der zeitlichen Abschnitte eines Klangs ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Die Bedeutung der einzelnen Vorgänge wird im Folgenden beschrieben.

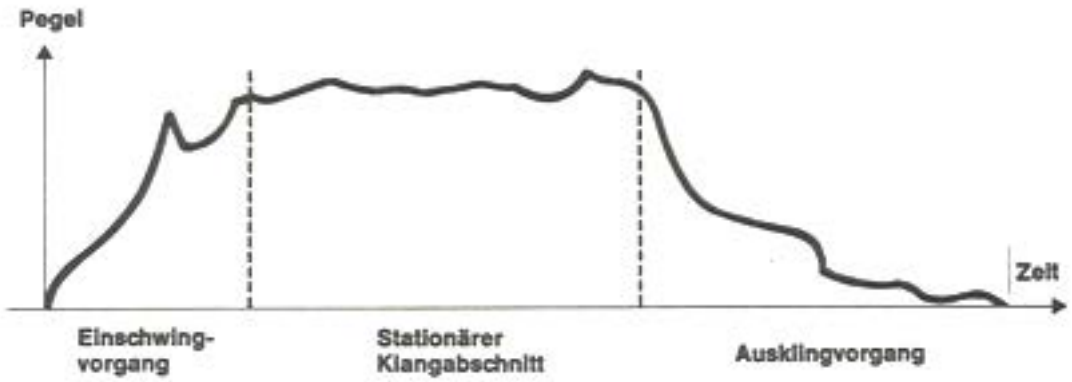

Abbildung 3.3.: Zeitbereich eines Klangs [Dic87]

3.2.1. Der Einschwingvorgang

Der Klangeinsatz ist ein kurzer, einmaliger Vorgang, der jedoch charakteristische Eigenschaften des jeweiligen Instruments beinhaltet und es unter anderem dem Hörer ermöglicht, einzelne Instrumente zu unterscheiden und zu identifizieren. Oft kommen dabei sogar Komponenten vor, die schon während des Einschwingvorgangs wieder abklingen und damit im späteren Klangbild nicht mehr vorkommen [Mey95]. Die Länge des Einschwingvorgangs ist stark von dem Resonanzsystem des jeweiligen Instruments abhängig, da die Resonanzen eines Instruments stark frequenzabhängig sind. Aus dieser Tatsache folgt, dass sich erstens die Dauer des Einschwingvorgangs über den Tonumfang eines Instruments ändert und zweitens, dass sich die einzelnen Teiltöne im Klangaufbau verschieden schnell entwickeln [Mey95]. Die Dauer des Einschwingvorgangs ist auch davon abhängig, ob ein Ton vom Spieler hart oder weich angesetzt wird. Wird der Ton hart angesetzt, schwingen die hohen Klanganteile schneller ein, wird er weich angesetzt gestaltet sich der Einschwingvorgang langsamer [Mey95]. Schnelle Einschwingvorgänge dauern 10 ms oder kürzer, langsame 200 bis 500 ms. Die Einschwingdauer der meisten Instrumente liegt bei 20 bis 50 ms [Dic87].

3.2.2. Der quasistationäre Zustand

Von einem quasistationären Zustand spricht man, da es auch im stationären Klangabschnitt immer zu geringfügigen Schwankungen im Schwingungsverlauf kommt. Diese Modulationen der Frequenz kann bewusst vom Spieler durch bestimmte Spieltechniken (bspw. Vibrato) hervorgerufen werden oder sie resultiert aus der Überlagerung von Geräusch- mit den harmonischen Komponenten [Dic08]. Da sich das Resonanzsystem im quasistationären Klangabschnitt in einem eingeschwungenen Zustand befindet, ist er maßgebend für die Teiltonstruktur und die Charakteristik des Instruments.

3.2.3. Der Ausklingvorgang

Der letzte Teilbereich eines Klangs ist der Zeitabschnitt, in dem das Instrument nach Beendigung der Anregung abklingt und zur völligen Ruhe kommt. Hier werden keine neuen Klang- oder Geräuschanteile angeregt, sondern es wird die restliche, im Instrument gespeicherte Energie abgegeben. Je nach Dämpfung geschieht dies für die unterschiedlichen Resonanzen schneller oder langsamer [Mey95]. Meist sind dabei die hohen Teiltöne stärker bedämpft, so dass sich beim Ausklingen die Klangfarbe dunkler und weicher färbt [Dic08].

3.3. Die Streichinstrumente

Die Familie der modernen Streichinstrumente besteht aus der Violine, der Viola, dem Violoncello und dem Kontrabaß. Die Instrumente unterscheiden sich durch ihre Größe, und den damit verbundenen unterschiedlichen Resonanzeigenschaften des Korpus. Daneben spielt das beim Bau des Instruments verwendete Holz eine entscheidende Rolle. Der Bogen ist dem jeweiligen Instrument von der Größe und Dicke her angepasst. Die Violine, die Viola und das Violoncello haben 4, der Kontrabass hat als Orchesterinstrument 5 Saiten. Die Saitenspannung, die am Wirbel eingestellt wird, bestimmt die Tonhöhe der leeren Saite. Die dazwischen liegenden Tonhöhen entstehen, in dem der Spieler den frei schwingenden Teil der Saite auf dem Griffbrett verkürzt. Bei allen Streichinstrumenten gibt es verschiedene Möglichkeiten der Klangerzeugung. Man kann die Instrumente mit dem Bogen zwischen dem Saitenhalter und dem Griffbrett streichen, man kann die Saiten mit dem Finger zupfen oder mit der Bogenstange schlagen. Die Form des Spiels bietet dem Musiker einen großen Spielraum bei der Gestaltung des Tons. So kann er beispielsweise mit dem Bogen ein Tremolo (Zitterbewegung mit dem Bogen) erzeugen, kann Flageolett-Töne spielen (Finger nur leicht auf das Griffbrett legen, so dass nur einzelne Teiltöne zum Schwingen gebracht werden) oder er kann mit einem Dämpfer spielen. Durch das Vibrato beeinflusst der Spieler die gespielte Frequenz geringfügig, wodurch dem Spiel Lebendigkeit und Intensität gegeben werden. Beim Tremolo wird die Klangstärke beeinflusst. Außerdem ist es möglich, mit dem Bogen gleichzeitig über 2 Saiten zu streichen und dadurch Doppelgriffe oder Drei- und Vierklänge zu erzeugen. Die Streichgeschwindigkeit bestimmt dabei vor allem die Intensität des Klangs, der Bogendruck und die Anstrichstelle auf der Saite die Klangfarbe. Je näher die Bogenkontaktstelle zum Steg liegt, desto klarer und lauter wird der Klang. Hingegen entstehen leise, verhaltene Klänge am Griffbrett. Die entstehenden Saitenschwingungen werden über den Steg auf den gesamten Resonanzkörper übertragen und wieder abgestrahlt. Viele Einzelresonanzen charakterisieren dabei den Klang des jeweiligen Instruments ebenso, wie der vergleichsweise starke Geräuschhintergrund, der für alle Streichinstrumente beim Streichen der Saite entsteht und durch den Resonanzkörper verstärkt wird. Die Einschwingzeit ist abhängig vom Druck und der Schnelligkeit der Bogenführung. Weiterhin spielen die Saitendicke, die Kolophoniumverteilung auf den Bogenhaaren und die Dämpfung der Decke eine Rolle. Die kürzeste Einschwingzeit bei Streichinstrumenten wird durch das Pizzicato erreicht. Sie beträgt 10 ms, unabhängig von der Tonlage. Die Ausklingzeit ist auch davon abhängig, ob der Bogen am Ende des Tones auf der Saite liegen bleibt oder ob er angehoben wird, wodurch die Saite länger nachschwingt.

3.3.1. Violinen

Die Violine, wie wir sie heute kennen, entwickelte sich aus der Gambe. Die Gambe hatte im Gegensatz zu der Violine noch Bünde auf dem Griffbrett. Insgesamt sind auch dadurch die Klanggestaltungsmöglichkeiten bei der Geige höher. Mit der Herausbildung der Barockmusik und deren sinnlichem, ausdrucksstarkem Spiel traten die erweiterten Klangmöglichkeiten der Geige in den Vordergrund. Das Klangide-

al des 17. und 18. Jahrhunderts war ein heller und schlanker Klang, während im 19. und 20. Jahrhundert ein größerer, abgerundeter Klang angestrebt wurde, da die Violine von einem Kammerinstrument zu einem Konzertinstrument wurde [Dic87]. Die geforderte größere Klangfülle konnte durch verschiedene instrumentenbauliche Veränderungen realisiert werden. Durch Verlängerung und Schrägstellung des Violinenhalses war eine Verlängerung der frei schwingenden Saiten und eine größere Spannung der Saiten möglich. In dem man den Steg und den Stimmstock verstärkte, konnte man einen größeren Druck auf die Saiten und den Resonanzkörper zulassen. Die Saiten mussten deswegen auch dicker werden, später wurden sie meist durch Stahlsaiten ersetzt. Auch der Bogen hat sich den klanglichen Veränderungen angepasst. Zu den heller und feiner klingenden Instrumenten wurden leichtere Bögen mit weniger Haaren verwendet. Ihre konvexe Biegung ließen die Töne beim Streichen auf- und abschwellen. Das brauchte man durch die Möglichkeit des Vibrato-Spiels nicht mehr. Außerdem sind die Böden der Geigen gewölbt, während die der Gamben flach waren. Dies steigerte die Intensität und Lautstärke.

Bei den tieferen Tönen der Violinen liegen die Formantlagen um die 400 Hz. Verglichen mit einem dunklen »o« geben sie den Tönen eine gewisse Sonorität. Für alt-italienische Violinen des Stradivarius-Typs liegen diese bereits bei 300 bis 350 Hz. Das zweite Formantgebiet liegt im Bereich zwischen 800 und 1000 Hz. Das ist der Bereich der Vokalfarbe »a«. Dieser Bereich ist der typische Klangbereich für die Violine. Er bildet die Grundlage des Violinenklangs und gibt ihr die spezielle Substanz und Vitalität. Diese Frequenzlage ist entscheidend für die individuellen Züge im Klangbild der verschiedenen Geigenbauer. Für die Leuchtkraft und Brillanz bei den hohen Tönen der Violine sind die Formantgebiete im Bereich zwischen 2000 Hz und 2600 Hz, dem Vokalbereich »e« und zwischen zwischen 3000 und 4000 Hz, dem Vokalbereich »i« verantwortlich. Die Hohlraumresonanz der Violine liegt bei etwa 270 Hz, die des Steges bei 3000 Hz [Mey]. Auf der G-Saite ist die Einschwingzeit mit 60 ms relativ lang. Sie verkürzt sich bei den höheren Tonbereichen in den Mittellagen auf 40 und 50 ms, auf der E-Saite bis auf 30 ms. Ein sehr abgerundetes Klangbild entsteht, wenn man die Töne weich ansetzt, was die Zeit des Einschwingvorgangs auf 200 – 300 ms verlängert [Mey95].

3.3.2. Violen

Die Viola entwickelte sich wie die Violine auch aus der Gambe und ähnlich wie bei der Geige veränderte sich auch die Viola, um die verschiedenen Gambeninstrumente den erweiterten Erfordernissen der Kompositionen anzupassen. Die Klangeigenschaften der Viola ähneln denen der Geige, nur ist sie ein wenig obertonärmer und damit im Klang nicht so strahlend wie die Violine. Genau wie bei der Violine sind auch bei der Viola die Resonanzeigenschaften des Körpers sowie der Bogendruck und die Anstrichstelle für den Klang verantwortlich [Dic87]. Da die Abmessung der Viola um einen Faktor von 1,15 bis 1,20 größer ist, ist die Stimmung der Viola um eine Quinte tiefer als die der Violine, wodurch sich der untere Tonbereich bis zum C3 (130 Hz) erweitert. Die Hohlraumresonanz der Viola liegt bei 220 Hz. Gerade für die tieferen Töne befindet sich bei der Hohlraumresonanz und bei 350 Hz die meiste Energie in den Teiltönen und verleiht dem Klang der Viola damit die Substanz des u-Vokals.

Nebenformanten liegen bei 600 und 1600 Hz und sind vor allem in der Mittellage und für die hohen Töne von Bedeutung. Das Formantgebiet bei 1600 Hz, also im Bereich der Umlaute, ruft den zuweilen näselnden Klangfarbeneindruck der Viola hervor. Trotz der im Gegensatz zur Violine größeren Abmessung der Viola liegt die Einschwingzeit wie bei der Violine zwischen 30 und 60 ms [Mey95].

3.3.3. Violoncelli

Auch das Cello entwickelte sich wie die Violine und die Viola aus der Gambe, in diesem Fall aus der Tenor-Alt-Gambe, da sich eine Klangvorstellung entwickelte, die durch die Tenorgambe nicht mehr abgedeckt werden konnte. Das heutige Violoncello galt als Baßinstrument. Die klassische Mensur des Violoncellos fand Stradivari um 1710 mit 75-76 cm Korpuslänge und 11,5 cm Zargenhöhe. Zugleich wurde der gerade Hals in einen schrägen umgebaut. Der Gebrauch des Stachels wurde um 1860 üblich [Dic87].

Der untere Tonbereich des Violoncellos geht bis C2 (65 Hz) und liegt damit eine Oktave unter der Viola. Diesem Unterschied entspricht auch die Lage der Hauptresonanzen. So liegt die Hohlraumresonanz bei etwa 110 Hz. Die Formanten liegen für die unteren beiden Saiten um 240 Hz, sowie zwischen 300 und 500 Hz und verleihen dem Violoncello Fülle und Sonorität. Eine weitere Teiltongruppe zwischen 600 und 900 Hz gewinnt für die höheren Lagen an Bedeutung. Die für den Klang des Violoncellos typische Senke befindet sich im Bereich des hellen a-Formanten zwischen 1000 und 1200 Hz [Mey95]. Laut Dickreiter [Dic08] haben einige Violoncelli zwischen 2000 und 3000 Hz ein weiters Formantgebiet, welches den Klang hell färbt, andere beim Spiel auf der A-Saite um 1500 Hz, welcher dem Instrument einen näselnden Charakter verleiht. Der Einschwingvorgang des Violoncellos liegt bei 60 bis 100 ms und ist wie bei allen Streichern dadurch geprägt, dass sich die tiefen Teilschwingungen langsamer aufbauen [Mey95].

3.3.4. Kontrabässe

Der Kontrabass, der sich durch die tiefe Lage und einen fülligen Klang auszeichnet, ist eigentlich ein Instrument der Gambenfamilie, das von der Familie der Geigen aufgenommen wurde. Im Unterschied zu den drei anderen Instrumenten wird bei ihm der Bogen von unten gehalten. Durch seine doppelte Verwandtschaft zu Violinen und Gamben änderte sich Form und Größe immer wieder. Es gab z.B. Formen bis zu 4,80 m Höhe, die man nur mit Hilfe einer Leiter spielen konnte. Im 17. Jahrhundert wurde der Kontrabaß in Deutschland und Italien zur oktavierenden Verstärkung der Baßstimme eingesetzt [Dic87].

Die untere Grenze des vier-saitigen Kontrabasses liegt bei E1, fünf-saitige reichen sogar je nach Stimmung bis B0. Damit ist der Kontrabass eines der tiefsten Instrumente des Orchesters. Die Hohlraumresonanz liegt je nach Bauart zwischen 57 und 70 Hz. Die dunkle Farbe und Fülle erhält der Kontrabass durch seine Komponenten zwischen 70 und 350 Hz und ein Nebenformant bei 500 Hz rundet den Klang zu einem dunklen »o« ab. Für die höheren Tonlagen kann ein Nebenformant im Bereich von 800 Hz entstehen. Der Geräuschanteil kann vielfach bis in Frequenz-

bereiche über den höchsten Teiltönen liegen, was zu einem als Sirren bezeichneten Höreindruck führen kann [Mey95]. Bedingt durch seine Größe und die tiefe Lage ist die Einschwingzeit des Kontrabasses mit 100 bis 200 ms länger, als die der anderen Streichinstrumente. Da die hohen Klanganteile schneller einschwingen als die tiefen, kann der Kontrabass bei schnellen Tonfolgen oftmals nicht seine Klangfülle entwickeln [Mey95].

3.4. Die Blechblasinstrumente

Die Gruppe der Blechblasinstrumente besteht aus Trompete, Horn, Posaune und Tuba. Alle Blechblasinstrumente besitzen einen langen Resonanzkörper aus Blech. Die Unterschiede der einzelnen Instrumente bestehen in der Form, Länge und Mensur der Resonanzröhre, der Form und Größe des Mundstücks und in der Art der Rohraufwicklung. Der Klang der Instrumente entsteht hauptsächlich durch verschiedene Lippenspannungen des Spielers, wodurch die Luftröhre im Rohr in unterschiedliche Schwingungszustände gebracht wird und somit auch verschiedene Tonhöhen erzeugt werden können. Bei den so erzeugten Tönen spricht man von der Naturtonreihe. Alle zwischen der Naturtonreihe liegenden Töne der Tonleiter werden durch Verlängerung der Resonanzröhre erzeugt. Das Mundstück beeinflusst die Schwingung der Lippen des Spielers und hat damit auch einen Einfluss auf den Klang. Neben diesem Einfluss ist die Form der Röhre für die Klangfarbe des Instruments wichtig. So machen konische Röhren den Klang eher weich und dunkel, als hell und strahlend wird der Klang bei zylindrischen Röhren empfunden [Dic87]. Bei allen Blechblasinstrumenten lassen sich die Spektren in zwei Gruppen aufteilen. Während sich im tiefen Tonbereich ein formantähnliches Maximum bildet, ist im oberen Tonbereich der Grundton am stärksten. Der Geräuschanteil ist bei den Blechblasinstrumenten besonders schwach ausgeprägt [Mey95].

3.4.1. Posaunen

Das Mundstück der Posaune ist kesselförmig, die Weite der Röhre (Mensur) relativ eng. Sie ist das einzige Instrument der Blechbläser, bei dem ein Teil der Röhre herausgezogen oder eingeschoben werden kann. Man spricht dabei von einem Zug. Während heute fast ausschließlich die Tenor- und Bassposaune Verwendung findet, wurde die Posaune ursprünglich in verschiedenen Größen gespielt. In der Entwicklung der Posaune ist die Mensur weiter geworden und das Schallstück hat eine deutlich größere und ausladendere Formgebung. Man unterscheidet zwischen der Diskant-, Alt-, Tenor- und Baßposaune. Bei der Baßposaune wird der Tonbereich nach unten hin durch ein zusätzliches Ventil und einer etwas weiteren Mensur erweitert [Dic87].

Der Hauptformant der Posaune liegt zwischen 480 und 600 Hz. In den tiefen Lagen liegt das Maximum bei 480 Hz und verschiebt sich zu den hohen Lagen bis zu 600 Hz. Dadurch hat die Posaune in den tiefen Lagen eine sonore Klangfülle und wandelt sich zu den hohen zu einer offeneren und kraftvolleren Klangfarbe [Mey95]. Nebenformanten im a-Bereich (800-1250 Hz) geben der Posaune die markante, kraftvolle Klangfarbe, die schwächeren Nebenformanten im Bereich der i- und e-Vokale, machen sie heller [Mey95]. Da die Posaune mit zunehmender Spielstärke einen sehr

obertonreichen Klang entwickelt, kann sie für die Töne der tiefen Lage einen metallischen Klangcharakter haben, da die Teiltöne im hohen Frequenzbereich dann sehr nah beieinander liegen. Hingegen kann die Klangfarbe der Posaune bei einer Abschwächung der Obertöne matt und konturlos werden [Mey95]. Die Einschwingzeit beträgt bei der Posaune für die tiefen Lagen etwa 20 ms, für die höheren Lagen 40 ms und bei einem weichen Klangansatz etwa 70 ms [Mey95][Dic08].

3.4.2. Hörner

Die Anfänge der Hörner liegen im Tierhorn. Diese konnten meist nur einen oder wenige Töne spielen und dienten als Signalinstrument. Aus dem Jägerhorn entwickelt sich Mitte des 17. Jahrhunderts das kreisrunde Horn, welches den Einzug in die Kunstmusik fand. Es hat eine lange, eng mensurierte, kreisrund gebogene Schallröhre und das kesselförmige Mundstück der Trompete. Nach 1700 wird das kesselförmige durch ein trichterförmiges Mundstück ersetzt und gerade oder kreisrunde Zwischenstücke, welche zwischen Mundstück und Horn gesteckt werden, ermöglichen es, die Hörner in verschiedenen Tonarten zu verwenden. Dadurch konnte die Naturtonreihe in die Haupttonart des Musikstücks gelegt werden. Mitte des 17. Jahrhunderts entwickelte sich die sogenannte Stopftechnik. Durch Einführen der Hand in die Stürze, also dem Schallstück des Horns, werden die Töne niedriger und dem Spieler standen neben der Naturtonreihe weitere Töne zur Verfügung. 1814 wird das Ventilhorn erfunden und ermöglicht das Spielen einer lückenlosen chromatischen Tonleiter, durch Hinzuschalten von zwei, später drei verschieden langen Rohrstücken mit Hilfe der Ventile. Heute findet das Horn in F und vor allem das Doppelhorn in F/B Anwendung. Auch beim Doppelhorn kann durch ein Ventil die Schallröhre verkürzt werden. So wird aus einem Horn in F ein Horn in B, wodurch höhere Töne sicherer gespielt werden können [Dic87].

Für das Horn ist im unteren Tonbereich ein Formant um 340 Hz kennzeichnend. Er liegt im Bereich des u-Vokals und ist damit für den runden und sonoren Klang des Horns verantwortlich [Mey95]. Nebenformanten finden sich bei 750 und 1225 Hz im Bereich des a-Vokals und ein weiterer bei 2000 Hz. Für das F-Horn ensteht noch ein Nebenformant bei 3000 Hz. Durch die Nebenformanten wird der Klangeindruck des Hauptformanten etwas geschwächt und ist heller, nicht so dunkel wie das gesungene oder gesprochene »u«. Die Nebenformanten gewinnen mit zunehmender Lautstärke an Bedeutung. Der Hauptformant historischer Hörner liegt etwas höher als der, der heutigen Hörner, im Bereich der Vokalfarben eines helleren »u« oder dunkleren »o« [Mey95]. Die Einschwingzeit des Horns beträgt für die hohe und mittlere Tonlage 30 bis 40 ms und steigt in den tieferen Tonlagen auf Werte zwischen 40 und 80 ms[Mey95].

3.4.3. Trompeten

Die Trompete hat im Gegensatz zum Horn eine bügelartig gebogene, zylindrische Schallröhre, welche erst vor der Stütze eine konische Erweiterung besitzt. Das Mundstück der Trompete ist kesselförmig. Die Form der Trompete bleibt zwischen dem 16. und 19. Jahrhundert im Grunde gleich und es wird fast kein Mittel gefunden, die Be-

grenzung der Naturtonreihe zu überwinden. Lediglich das Clarin-Spiel ermöglicht es dem geübten Spieler, durch den Ansatz die gegenüber des Tonsystems „verstimmten“ Naturtöne in die richtige Tonhöhe zu zwingen und einige Halbtöne dazuzugewinnen. Die Veränderungen des Horns, wie einsetzbare Zusatzstücke oder die Stopftechnik, werden auch für die Trompete ausprobiert, es ist aber die Erfindung des Ventils, die auch das Spiel und die Größe der Trompete am stärksten verändert. So ist es mit Hilfe der Ventile möglich, eine lückenlose Tonreihe zu spielen. Die heute meist verbreitetste Trompete, ist die Trompete in B [Dic87].

Die Trompete ist im Orchester eines der Instrumente mit den meisten Obertönen. So reichen die Teiltöne der Trompete schon bei ruhiger Spielweise bis 5000 Hz, in den hohen Lagen dann bis 8000 Hz. Der Hauptformant liegt vergleichsweise hoch zwischen 1200 bis 1500 Hz und liegt damit im Vokalbereich des hohen »a« für den größten Teil des Tonumfangs und für den kleineren Teil im Bereich der Umlaute. Die Nebenformanten liegen bei 2000 und 3000 Hz und verleihen der Trompete einen hellen Klang. Außerdem verhindern sie, dass in den höheren Lagen, wenn der Hauptformant in den Bereich der Umlaute wandert, der Klang zu nasal wird und seinen Glanz verliert. Auch der schwache Geräuschanteil trägt dazu bei, dass die Trompete im Grunde über ihren ganzen Tonumfang hell, strahlend und brillant klingt. Die Trompete hat eine relativ kurze Einschwingzeit von 20- 30 ms, bei weichen Ansatz bis ca. 180 ms [Mey95].

3.5. Die Holzblasinstrumente

Nicht alle Holzblasinstrumente werden aus Holz gefertigt. Vielmehr folgt die Einteilung der Blasinstrumente in Holz- und Blechblasinstrumente durch Unterschiede in der Erzeugung der Töne. So werden die Flöten, Oboen, Klarinetten, Saxophone und Fagotte, einschließlich ihrer Sonderformen, als Holzblasinstrumente verstanden. Bei allen Holzblasinstrumenten gibt es sogenannte Tonlöcher, die es dem Spieler ermöglichen durch Öffnen und Schließen selbiger eine Längenänderung der schwingenden Luftsäule und damit verschiedener Tonhöhen zu realisieren. Das Schließen und Öffnen der Tonlöcher erfolgt durch die Finger oder mit Hilfe von Klappen. Die Schwingungen der Luftsäule im Resonator sind Ergebnis eines am Mundstück erzeugten gleichmäßigen Luftstroms des Bläsers. Durch das Mundstück wird dieser Luftstrom allerdings immer wieder unterbrochen. Dies geschieht entweder durch eine Schneide gegen die der Luftstrom geblasen wird, oder durch ein einfaches oder doppeltes Rohrblatt, welches den Luftzutritt zum Resonator periodisch sperrt oder öffnet. Die Schallröhre, welche als Resonator dient, nimmt auch bei den Holzblasinstrumenten verschiedene Formen an. Sie kann konisch mit größtem Durchmesser am Schallbecher, konisch mit größtem Durchmesser am Mundstück oder zylindrisch sein [Dic87].

3.5.1. Flöten

Bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts waren die Blockflöten die wichtigsten Blasinstrumente. Erst nach 1750 wird die Querflöte, zunächst Pfeife genannt, zum wichtigsten Flöteninstrument. Die Blockflöte, auch deswegen so beliebt, weil das Spiel darauf

leicht zu erlernen ist, war im 16. Jahrhundert auf viele Instrumente in allen Tonlagen angewachsen, während die modernen Blockflöten barocker Bauart die Sopran-, Alt-, Tenor- und Baßflöte umfassen. Zu den meisten historischen Instrumenten gibt es ein verändertes neues Instrument, bei den Blockflöten gibt es kaum Unterschiede in dem Bau von alten und neuen Instrumenten. Die Querflöten werden in ihrer historischen Bauart meist Traversflöten genannt. Die Renaissance-Traversflöte ist ein leises Instrument mit einem kleinen Anblasloch und einem grundständigen Ton. Die Barock-Traversflöte ist in drei Teile zerlegbar. Um 1800 bekommt die Querflöte zusätzlich Klappen für einige Halbtöne. Zwischen 1800 und 1830 wird die Querflöte neu konstruiert. Es werden Klappen, Ringe und Hebel eingeführt. Bei den Flöten wird der durch den Spieler erzeugte Luftstrom in einer schmalen Spalte gebündelt und trifft auf die Schneide. Bei den Querflöten bilden die Lippen des Bläsers den Spalt, das Anblasloch bildet die Schneide. Die Klangfarbe der Flöte unterliegt stark der Spielweise des Instrumentalisten. Er kann die Ausströmgeschwindigkeit des Luftstroms, den Abstand zur Anblaskante, die Abdeckung des Mundlochs und die Anblasrichtung variieren [Dic87].

Charakteristisch für den Klang der Flöte ist ein sehr gleichmäßiger Teiltonaufbau, wobei bis auf wenige Ausnahmen der Grundton am stärksten ausgeprägt ist. Die Teiltöne nehmen mit steigender Ordnungszahl in ihrer Amplitude ab. Die Flöte hat dadurch auch kaum Haupt- oder Nebenformanten und wenn sie vorkommen, so sind sie nicht für den Klangcharakter der Flöte sondern vielmehr für die Eigenschaft des einzelnen Instruments typisch [Dic08, Mey95]. Für die Querflöte beschreibt Reuter [Reu02] einen Formanten zwischen 800 und 1000 Hz, also im Bereich des a-Vokals. Die Einschwingzeit der Flöte ist von allen Blasinstrumenten am längsten [Mey95].

3.5.2. Oboen

Die Barockoboe und letztlich die moderne Oboe entwickelte sich ab 1650 aus der Schalmei. Die entscheidende Neuerung neben der Zerlegung des Instruments in drei Teilstücke, der Anbringung zweier Klappen und einer engeren Mensur, ist die Anblastechnik. Das Rohrblatt wird jetzt zwischen die Lippen genommen. Dadurch wird eine größere Gestaltungsmöglichkeit für den Bläser möglich. Eine Besonderheit ist die Wiener Oboe. Sie hat eine unregelmäßige Bohrung und erlangt damit eine größere Dynamik [Dic87].

Der Hauptformant der Oboe liegt bei 1100 Hz und wird damit durch den Vokalklang des »a« geprägt. Nebenformanten liegen bei 2700 und 4500 Hz und verleihen dem Klang der Oboe, auch durch ein obertonreiches Spektrum, eine ausgeprägte Helligkeit. Für die tiefsten Töne enstehen weitere Nebenformanten zwischen 550 und 600 Hz, welche die Klangfarbe der Oboe auf ein helles »o« verändern können. Außerdem sind in den tiefen Lagen die geradzahligen Teiltöne gegenüber den ungeradzahligen in ihrer Intensität überlegen. In den hohen Lagen sind die Formanten nicht mehr so ausgeprägt, wodurch die Oboe ihren vokalartigen Charakter verliert und einen etwas härteren und weniger ausdrucksvollen Klangfarbeneindruck bekommt [Mey95]. Geräuschanteile sind bei der Oboe kaum vorhanden und die Einschwingzeit ist, mit weniger als 40 ms für die tiefen und 20 ms für die höheren Lagen, sehr kurz [Mey95].

3.5.3. Klarinetten

Die Klarinette ist das jüngste Blasinstrument in der klassischen Musik. Sie entwickelte sich auch aus der Schalmei wie die Oboe. Der Tonumfang wurde durch zwei weitere Tonlöcher, die durch Klappen abgedeckt sind, erweitert. Durch das Überblasen wird das hohe Register, Clarino genannt, hinzugewonnen. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts werden weitere 13 Klappen dazu konstruiert. Dadurch wird ein Spiel in allen Tonlagen möglich. Die historische Klarinette wird, da sie viele Unzulänglichkeiten hat, sehr selten in der alten Form verwendet.

Bei den Klarinetten ändert sich der Klang über den Tonumfang charakteristisch, weswegen man bei ihnen von verschiedenen Registern spricht. Ihnen ist jedoch gemeinsam, dass es eine Dominanz des Grundtons gegenüber den anderen Teiltönen gibt. Im Tonbereich von D3 bis D4 sind die ungeradzahligen Teiltöne stärker ausgeprägt und klangbestimmend. Die Klangfarbe wird dadurch dunkel und hohl. Im mittleren Register, von DK4 bis G5 ist der zweite Teilton relativ schwach, die oberen Teiltöne allerdings sind in ihrer Intensität gleichmäßig. Oberhalb von G5 ist der Grundton noch stärker, die anderen Teiltöne fallen stetig. Es ist das einzige Register, in dem sich für die Klarinette ein Formant im Vokalbereich »i«, zwischen 3000 und 4000 Hz bildet. Der über den gesamten Tonbereich geringe Geräuschanteil der Klarinetten führt vor allem in diesem Register in Kombination mit dem Formanten zu einer Klarheit und Helligkeit des Klarinetten-Klangs [Dic87, Mey95]. Die Einschwingzeit ist mit 15 bis 20 ms sehr kurz und prägnant. Auch der Grundton erreicht innerhalb weniger Schwingungsperioden seine endgültige Stärke, wodurch der Einsatz nicht so spitz wirkt [Mey95].

3.5.4. Fagotte

Das Barockfagott hat sich aus dem Dulzian entwickelt. Auch der Dulzian war, wie die meisten ursprünglichen Holzblasinstrumente, aus einem Stück gebohrt. Das Barockfagott setzt sich dann aus mehreren Teilen zusammen, die parallelen Röhren liegen nebeneinander. Nach 1780 wird auch das Fagott mit zusätzlichen Tonlöchern und Klappen erweitert.

Der Hauptformant des Fagotts liegt bei 500 Hz und ist nicht nur sehr ausgeprägt, sondern entspricht in seiner Breite fast den gesamten Bereich des o-Vokals. Dadurch ist die Klangfarbe des Fagotts dem des »o« sehr ähnlich. Charakterisierend für das Fagott ist auch die hohe Anzahl an Teiltönen. Die Nebenformanten liegen bei 1150, 2000 und 3500 Hz. Ersterer befindet sich im Bereich des a-Vokals und verleiht dem Klang eine kräftige Klangfarbe. Allerdings verschiebt er sich in den hohen Lagen in den Bereich der Umlaute, wodurch der Klang nicht mehr so offen wirkt. Die beiden Nebenformanten im Bereich des Vokals »e« und »i« wirken klangaufhellend und verhindern, dass die Klangfarbe in den hohen Lagen des Tonbereichs matt und stumpf wird. Der Einschwingvorgang des Fagotts ist sehr klar, prägnant und ohne starke Geräuschanteile. Die Einschwingzeit liegt zwischen 50 und 80 ms [Mey95].

4. Methodik

4.1. Zu den Aufnahmen

Grundlage für die Untersuchung der klangfarblichen Unterschiede von historischen und modernen Orchesterinstrumenten sind die am Fachgebiet Audiokommunikation der Technischen Universität Berlin entstandenen, umfangreichen Aufnahmen von Instrumenten des klassisch-romantischen Sinfonieorchesters für verschiedene Stadien der instrumentenbaulichen Entwicklung. Für die Aufnahmen wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Akustik (ITA) der RWTH Aachen ein 32-kanaliges, sphärisches Mikrofonarray im reflexionsarmen Raum der Technischen Universität Berlin aufgebaut. Der reflexionsarme Raum hat ein Gesamtvolumen von 1070 m^3 und ist für Frequenzen oberhalb von 63 Hz nachhallfrei. Das schalldruckkallibrierte Mikrofonarray hatte die Form eines abgestumpften Ikosaeders mit einem Durchmesser von ungefähr 4,20 m. In der Mitte der Anordnung saßen die Musiker auf einem verstellbaren Stuhl, wodurch das akustische Zentrum des aufzunehmenden Instruments in der geometrischen Mitte positioniert werden konnte. Damit war es möglich eine Aufnahme zu realisieren, die den verschiedenen Abstrahlrichtungen eines Instruments gerecht wird. In der Mitte jeder Fläche des abgestumpften Ikosaeders wurde ein Mikrofon platziert, so dass sich eine Gesamtanzahl von 32 Mikrofonen ergab. Es wurden elekret-Kondensatormikrofone von Sennheiser des Typs KE4-211-2 verwendet. Alle Mikrofone wurden von insgesamt vier 8-Kanal Vorverstärkern des Typs RME OctaMic, mit einer 48 Volt Phantomspeisung versorgt. Drei der Vorverstärker waren mittels einer optischen ADAT-Verbindung mit einem Audio-Interface des Typs RME Digiface verbunden, ein weiterer mit einem RME Multiface. Beide waren mit einem Desktop PC verbunden, auf welchem unter Nutzung der Steinberg Software Nuendo die Instrumente mit 24 bit und 44,1 kHz nacheinander aufgezeichnet wurden.[PBM09, PBS10]

4.1.1. Zu den Instrumenten und Instrumentalisten

Um den hohen Anforderungen der Untersuchung gerecht zu werden, wurden nur professionell ausgebildete und erfahrene Musiker zu den Aufnahmen eingeladen. So wurden die historischen Instrumente von dem renommierten und auf die historisch informierte Aufführungspraxis spezialisierte Akademie für alte Musik Berlin eingespielt. Das moderne Instrumentarium wurde von Mitgliedern des Deutschen Sinfonieorchesters Berlin oder Mitgliedern anderer professioneller Orchester in Berlin eingespielt.

Insgesamt wurden 41 Instrumente des klassisch-romantischen Sinfonieorchesters für verschiedene Stadien der instrumentenbaulichen Entwicklung aufgezeichnet. Auch bei der Auswahl der Instrumente wurden hohe Anforderungen an das Instrument ge-

stellt. Alle historischen Instrumente waren sehr gut erhaltene Originale aus dem 18. oder 19. Jahrhundert oder wirklichkeitsgetreue Nachbauten. Die modernen Instrumente wurden von den Mitgliedern des Deutschen Sinfonieorchesters Berlin oder anderen professionellen Orchestern in Berlin zur Verfügung gestellt, wodurch von einem hohen Standard der Instrumente ausgegangen werden kann. Die Instrumente wurden für die ihrer Zeit typische Stimmtonhöhe gestimmt. Die Tabellen A.1 - A.3 im Anhang, zeigen eine Übersicht aller 33 für die Untersuchung verwendeten Instrumente, mit zusätzlichen Informationen über deren Herkunft und Zeit der Entstehung, die Stimmhöhe und Name des Instrumentalisten, der sie für die Aufnahmen gespielt hat.

Für die Aufzeichnungen wurden die Musiker gebeten jeden Ton einzeln, über den möglichen Tonumfang des jeweiligen Instruments, im chromatischen Tonabstand zu spielen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass sie ihre Position und Spielhaltung möglichst nicht verändern und dass jeder Ton für mindestens 3 Sekunden ohne Vibrato gespielt wird. Die Aufnahmen wurden in zwei Dynamikstufen realisiert. Zunächst lautete die Anforderung an die Musiker den Ton „so laut wie möglich, ohne dass der Ton unschön klingt“ (ff), anschließend den Ton „so leise wie möglich, ohne dass der Ton abreist“ (pp) zu spielen [KSPW10]. Nachfolgend wurden die Musiker gebeten, mit den gleichen Anforderungen eine Tonleiter über zwei Oktaven im flüssigen Tempo zu spielen. Von jeweils drei eingespielten Tönen für jede Dynamik- und Tonstufe wurden gelungene Varianten manuell vorsortiert [Krä11]. Für diese Untersuchung wurden die kompletten Töne, also Töne mit Ein- und Ausschwingphase, genutzt.

4.2. Analyse

Um die gewonnenen Aufnahmen der Instrumente zu analysieren wurde die Timbre Toolbox [PGS+11] verwendet. Die Timbre Toolbox ist eine vom Ircam-Institut frei zugängliche in der Matlab Programmiersprache geschriebenes Programm, welches eine umfassende Analyse von Audiodaten durch Berechnung von verschiedenen signalbezogenen Deskriptoren ermöglicht. Folgende Deskriptoren wurden für die Analyse der Instrumente genutzt.

- Spectral Centroid

Der Spectral Centroid $\mu_1(t_m)$ markiert den spektralen Schwerpunkt eines Signals und beschreibt damit dessen klangfarbliche Eigenschaften. Er hat einen größeren Wert für Signale, die viele energiereiche Obertöne haben. Hohe Werte deuten auf einen hellen, niedrige auf einen dumpfen Klangcharakter hin. Er wird aus der Kurzzeit-Forurier-Transformation (STFT) des Signals gewonnen. Er errechnet sich in der Timbre Toolbox wie folgt [PGS+11]:

$$\mu_1(t_m) = \sum_{k=1}^{k} f_k \, p_k(t_m) \tag{4.1}$$

mit dem normalisierten Amplitudenwert

$$p_k(t_m) = \frac{[a_k(t_m)]}{\sum_{k=1}^{K} a_h(t_m)}$$

Dabei ist $a_k(t_m)$ der Amplitudenwert am Frequenzbin k und dementsprechend wird die Frequenz (Hz) durch f_k beschrieben.

· Spectral Roll Off

Der Spectral Roll Off beschreibt die Frequenz $f_c(t_m)$, bis zu der 95% der Gesamtenergie des Signals erreicht ist und liefert damit Informationen, in welchem Bereich die signifikante Energie eines Signals liegt und auch über dessen Bandbreite. Der Spectral Roll Off wird, wie der Spectral Centroid, aus der Kurzzeit-Fourier-Transformation gewonnen. In der Timbre Toolbox errechnet er sich wie folgt [PGS+11]:

$$\sum_{f=0}^{f_c(t_m)} a_f^2(t_m) = 0.95 \sum_{f=0}^{sr/2} a_f^2(t_m) \tag{4.2}$$

Dabei ist $sr/2$ die Nyquistfrequenz.

· Tristimulus

Die Tristimulus-Werte [PJ82] beschreiben jeweils ein Energieverhältnis und lassen damit eine genauere Beschreibung des Teiltonspektrums eines Audiosignals zu. Die einzelnen Werte stehen dabei für ihren relativen Anteil zum Gesamtsignal. Der T1-Wert beschreibt den relativen Anteil des Grundtons zur Gesamtenergie des Signals, der T2-Wert die Summe des zweiten, dritten und vierten Teiltons zur Gesamtenergie und der T3-Wert die Summe der restlichen bis zu n zusammengefassten Teiltöne zur Gesamtenergie. Die Summe der drei Tristimulus-Werte ist 1, so dass einer der Tristimulus-Werte redundant ist. Die Tristimulus-Werte sind im Gegensatz zum Spectral Centroid und Spectral Roll Off grundtonunabhängig. Die Werte errechnen sich aus dem Teiltonspektrum des Signals. In der Timbre Toolbox errechnet er sich wie folgt[PGS+11]:

$$T1(t_m) = \frac{a_1(t_m)}{\sum_{h=1}^{H} a_h(t_m)} \tag{4.3}$$

$$T2(t_m) = \frac{a_2(t_m) + a_3(t_m) + a_4(t_m)}{\sum_{h=1}^{H} a_h(t_m)} \tag{4.4}$$

$$T3(t_m) = \frac{\sum_{h=5}^{H} a_h(t_m)}{\sum_{h=1}^{H} a_h(t_m)} \tag{4.5}$$

Allerdings mussten einige Veränderungen, die im nächsten Abschnitt beschrieben werden, an der Timbre Toolbox vorgenommen werden, bevor mit der Analyse begonnen werden konnte.

4.2.1. Veränderungen der Timbre Toolbox

Um eine automatisierte Analyse der Instrumente zu ermöglichen, musste eine Funktion in dem Hauptprogramm (Gtimbredecriptor.m) der Timbre Toolbox implementiert werden, welche es ermöglichte, eine beliebig große Anzahl und in unterschiedlichen Ordnern liegenden wav-Dateien zu finden und zu analysieren. Dazu wurde die Funktion get_Dirs.m (link zum Anhang) implementiert, die ausgehend von einem anzugebenden Wurzelverzeichnis alle Unterverzeichnisse nach wav-Dateien durchsucht und eine Liste aller Pfade zurückgibt, welche dann nacheinander automatisiert abgearbeitet wurden. Die ausgewählten Deskriptoren wurden für jede gefundene wav-Datei berechnet und anschließend in einer Textdatei an dem Ort gespeichert, an dem sie gefunden wurde. Als weitere Änderung wurde eine Funktion implementiert (getNoteName.m), die die Tonhöhe aus dem Namen der wav-Datei abfragt, einen Bereich vorgibt in dem Gtimbredescriptor.m nach der Grundfrequenz suchen soll und die Anzahl der möglichen Teiltöne bis zu einer festgelegten Grenze (hier 16 kHz) übergibt. Letzteres war deshalb nötig, weil die Anzahl der in die Berechnungen einbezogenen Teiltöne in der Timbre Toolbox, nur auf einen festen Wert (bspw. 20) einzustellen ist. Für die Analyse der wav-Dateien sollten aber alle möglichen Teiltöne im Hörbereich mit einbezogen werden. Die Berechnung der möglichen Teiltöne übernahm die Funktion get_number_of_Partials.m, da eine einfache Division der als Grenze festgelegten 16 kHz durch die Grundfrequenz des untersuchten Tons nicht ausreichte, um innerhalb der Timbre Toolbox eine Verletzung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorem zu verhindern. Eine Übersicht über die Anzahl der nach den Änderungen möglichen Teiltöne, zeigt die Abbildung 4.1.

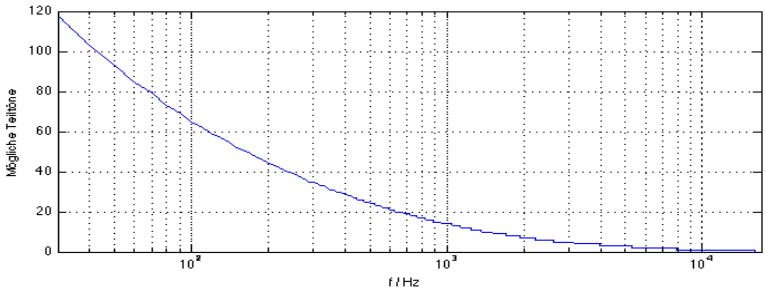

Abbildung 4.1.: Anzahl der möglichen Teiltöne

4.2.2. Darstellung der Ergebnisse

Die Auswertung der durch die Timbre Toolbox gewonnenen Daten, der 33 in zwei Dynamikstufen untersuchten Instrumente, erfolgte in Matlab. Dazu wurde eine Funktion geschrieben, die aus der von der Timbre Toolbox für jede einzelne wav-Datei gespeicherten Textdatei die Grundfrequenz, den Spectral Centroid, den Spectral Roll Off und die Tristimulus-Werte extrahiert und in Matlab grafisch auswertet. Auch wenn sich die vorliegende Arbeit auf einen Vergleich von historischen und modernen Instrumenten konzentriert, werden in den Ergebnissen nur die Datensätze miteinander verglichen, bei denen es ein klar zuzuordnendes Pendant für ein Instrument aus einer anderen Epoche gibt. Dies trifft für 24 der 33 Instrumente zu, so dass im Ergebnis- und Diskussionsteil 12 Instrumentenvergleiche Berücksichtigung finden. Für diese Instrumente werden die Datensätze auf jeweils einer Seite jeweils für Pianissimo und Fortissimo dargestellt. Für die anderen Instrumente erfolgte die Darstellung für Pianissimo und Fortissimo zusammen auf einer Seite. Die grafische Auswertung aller Instrumente befinden sich im Anhang bzw. auf der beiliegenden Daten-CD. Die Auswertung der Grundfrequenz diente lediglich zur Kontrolle der von der Timbre Toolbox errechneten Werte und wird nicht in den Ergebnissen dargestellt, befindet sich aber auf der Daten-CD. Wurde die Grundfrequenz falsch erkannt, wurden die zu dieser wav-Datei ermittelten Werte der anderen Deskriptoren nicht bei der Auswertung berücksichtigt. Dies betraf 64 der insgesamt rund 2500 untersuchten wav-Dateien.

Die zu jedem Instrument gehörenden Einzelwerte der Töne wurden nach Tonhöhe (x-Achse) sortiert. Für den Spectral Centroid und den Spectral Roll Off gibt es pro Ton jeweils einen Datenpunkt. Die Datenpunkte, die zu einem Instrument und einer Spielstärke gehören, wurden zur besseren Sichtbarkeit durch Linien verbunden. Der Spectral Centroid und der Spectral Roll Off werden für jedes Instrument jeweils auf der Seite oben links und oben rechts präsentiert, wobei die Daten der historischen Instrumente jeweils rot und die der modernen blau dargestellt werden. Da es für den Tristimulus für jeden Ton drei Werte gibt, wurden hier die historischen und modernen Daten in zwei verschiedenen Diagrammen dargestellt. Auch die drei Werte des Tristimulus werden jeweils nach steigender Tonhöhe sortiert und durch Linien verbunden. In jedem Tristimulus-Diagramm sind also drei Linien sichtbar, die zur besseren Unterscheidbarkeit in verschiedenen Farben dargestellt werden (T1 blau, T2 rot, T3 grün). Der Tonbereich der x-Achse, wurde durch die niedrigste und die höchste aufgenommene Tonhöhe der beiden im Vergleich dargestellten Instrumente bzw. Spielstärken gewählt. Dies kann in der Darstellung zu fehlenden Werten am Anfang und am Ende des Diagramms führen, wurde aber zum besseren Vergleich gerade der Tristimulus-Werte, bewusst so entschieden. Fehlende Werte innerhalb des Tonbereichs liegen dagegen an fehlenden Aufnahmen oder an den falsch erkannten Grundfrequenzen und damit nicht berücksichtigten Werten der Deskriptoren. Die für die Auswertung und Darstellung geschriebenen Matlab-Funktionen (FileExtract.m, changeTable.m, getNoteName.m und VarRead.m), befinden sich auf der beiliegenden Daten-CD.

5. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die drei Familien der Streich-, Blech- und Holzblasinstrumente dargestellt. 24 Instrumente werden dabei miteinander verglichen. Eine Diskussion der Ergebnisse erfolgt im nächsten Kapitel. Wie bereits ein kurzer Blick auf die Daten zeigt, sind die Werte für die einzelnen Instrumente sehr unterschiedlich, variieren von Ton zu Ton und sind abhängig von der Spielstärke. Entsprechend fluktuierend sind die Linien, die die Datenpunkte verbinden. Hauptaugenmerk der Untersuchung liegt auf dem Unterschied zwischen den historischen und modernen Instrumenten und daher wird in der folgenden Darstellung der Ergebnisse die Betonung auf diese Unterschiede gelegt. Da die Daten eine sehr starke Variabilität zeigen, werden hier auch nur ausgeprägte Unterschiede, die nicht nur einen oder zwei Töne betreffen, betrachtet. Gesucht wurde nach unterschiedlichen Tendenzen, die einen ganzen Bereich von Tönen oder sogar nur die Tristimulus-Mittelwerte von T1, T2 und T3 betreffen. Die Mittelwerte, die sich aus der einfachen Mittellung der Daten über alle vorhandenen Töne ergeben, sind Grundlage der Diskussion und werden im nächsten Kapitel besprochen. Bevor die Ergebnisse der einzelnen Instrumente untersucht werden, soll noch darauf hingewiesen werden, dass die Werte des Spectral Centroids und des Spectral Roll Offs für die meisten Instrumente keine ausgeprägten Unterschiede zwischen modernen und historischen Instrumenten zeigen. Nur in wenigen Ausnahmen zeigt sich ein Unterschied, der als signifikant gewertet werden kann. Anders ist es bei den Tristimulusdaten T1, T2 und T3.

5.1. Die Streichinstrumente

Bei allen Streichinstrumenten (Abb. 5.1 – 5.8) zeigen der Spectral Centroid und der Spectral Roll Off einen ähnlichen Verlauf, mit wachsender Tonhöhe steigt auch der dazugehörige Wert. Auffällige Unterschiede zwischen modernen und historischen Instrumenten gibt es kaum, außer im Fall des Violoncellos im Pianissimo (Abb. 5.6). Hier liegt der Wert des Roll Offs des historischen Instruments im Bereich von A3 bis D5 deutlich über dem Wert des modernen. Das deutet auf einen höheren Anteil von Obertönen hin, was sich ansatzweise auch im Tristimulus-Wert T3 widerspiegelt. Er liegt in diesem Tonbereich für das historische Instrument bei rund 0.25-0.3, während er im gleichen Tonbereich für das modernen Instrument bei 0.2 -0.25 liegt. Bei den anderen Streichinstrumenten liefern der Spectral Centroid und der Spectarl Roll Off keine klaren Hinweise auf Unterschiede. Dagegen zeigen sich beim Tristimulus-Wert T1 Unterschiede bei den Violinen und den Violen, vor allem im Fortissimo (Abb. 5.1 & 5.3). So ist der Anteil des Grundtons von C4 bis D5 für die moderne Violine und von A3 bis G5 für die moderne Viola um einen Betrag von rund 0.1 höher, als bei dem historischen Instrument. Auch dies deutet darauf hin, dass der Anteil der Obertöne bei dem jeweils modernen Instrument geringer ist. Bei den anderen, der hier untersuchten Streichinstrumente, kann ein solches Verhalten nicht ausgemacht werden und beim Kontrabass im Pianissimo (Abb. 5.8) ist es sogar umgekehrt. Hier ist der Anteil des Grundtons im Frequenzbereich zwischen D2 und E3 sogar um den Betrag von 0.12 für das historische Instrument höher. Im Fortissimo ist diese Tendenz etwas später, ab F2 zu erkennen.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass es schwierig ist, für die Streichinstrumente signifikante Unterschiede zwischen modernen und historischen Instrumenten anhand der vorliegenden Daten eindeutig zu identifizieren, da die Streuung der Datenpunkte doch sehr groß ist. Für das moderne Instrument der Violine, der Viola und des Violoncellos gibt es in bestimmten Frequenzbereichen einen erhöhten Wert des Tristimulus-Werts T1. Beim Kontrabass wird jedoch der entgegengesetzte Effekt beobachtet, hier ist T1 für das historische Instrument höher.

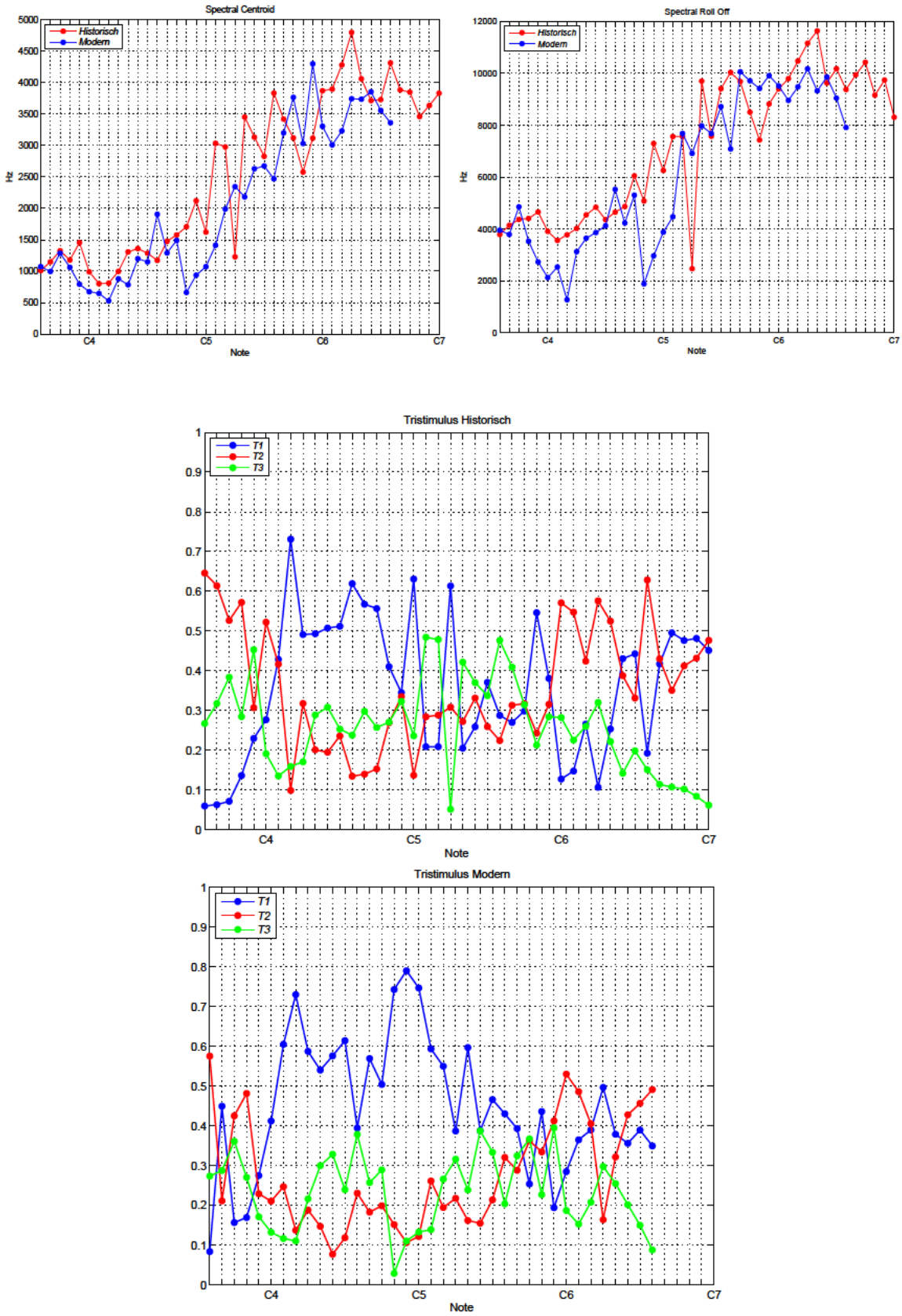

Abbildung 5.1.: Vergleich der Violinen im ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

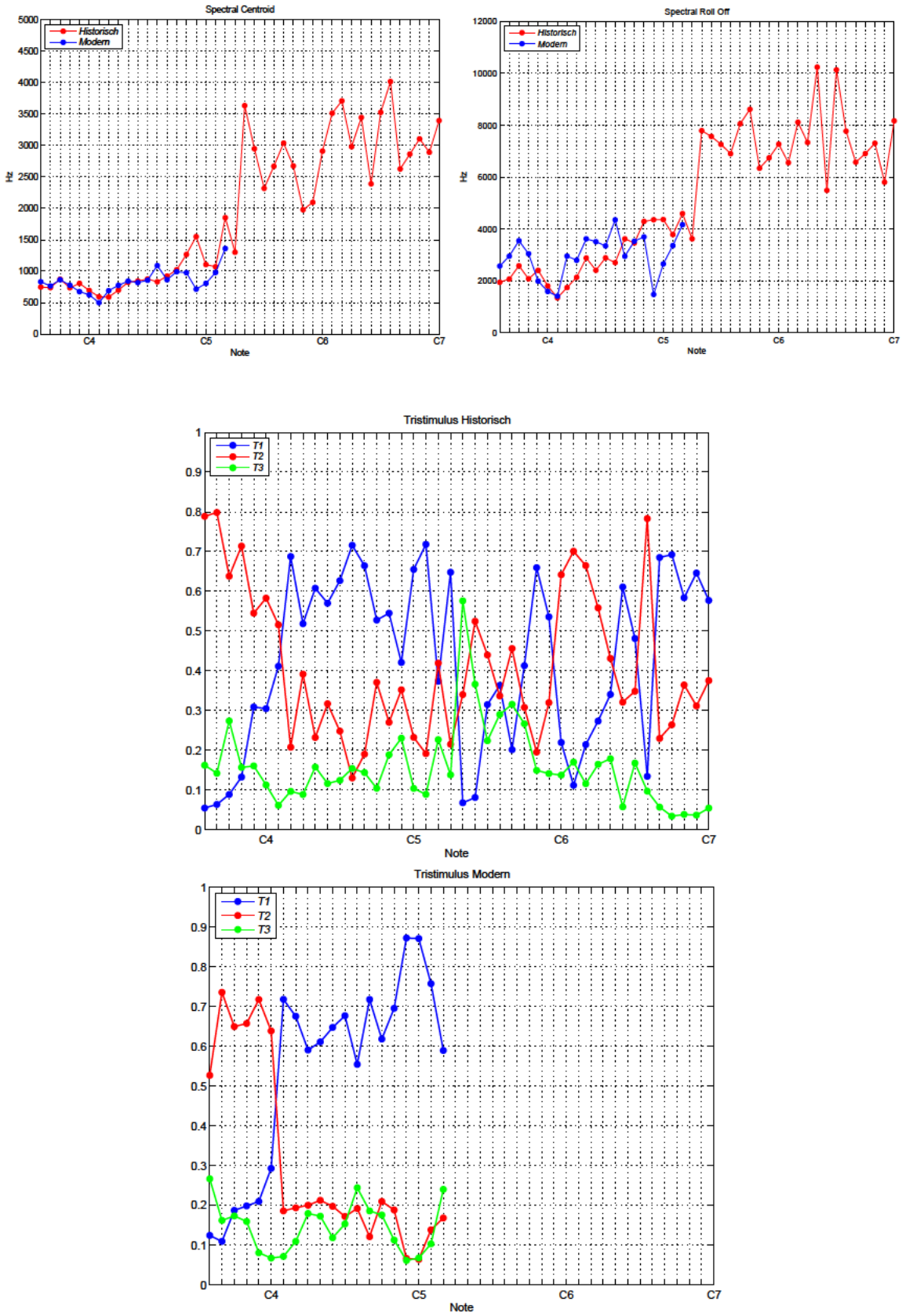

Abbildung 5.2.: Vergleich der Violinen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

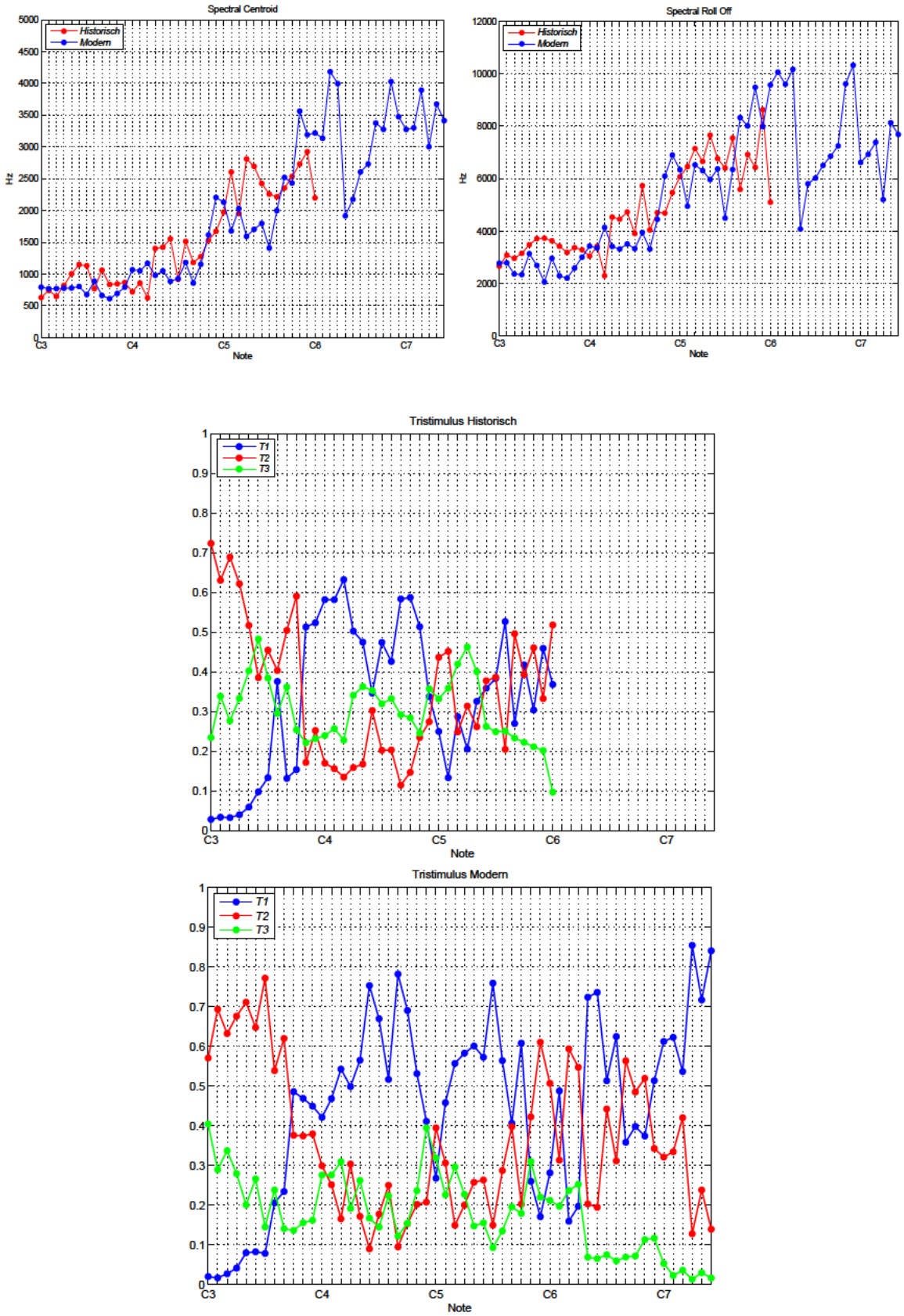

Abbildung 5.3.: Vergleich der Violen ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

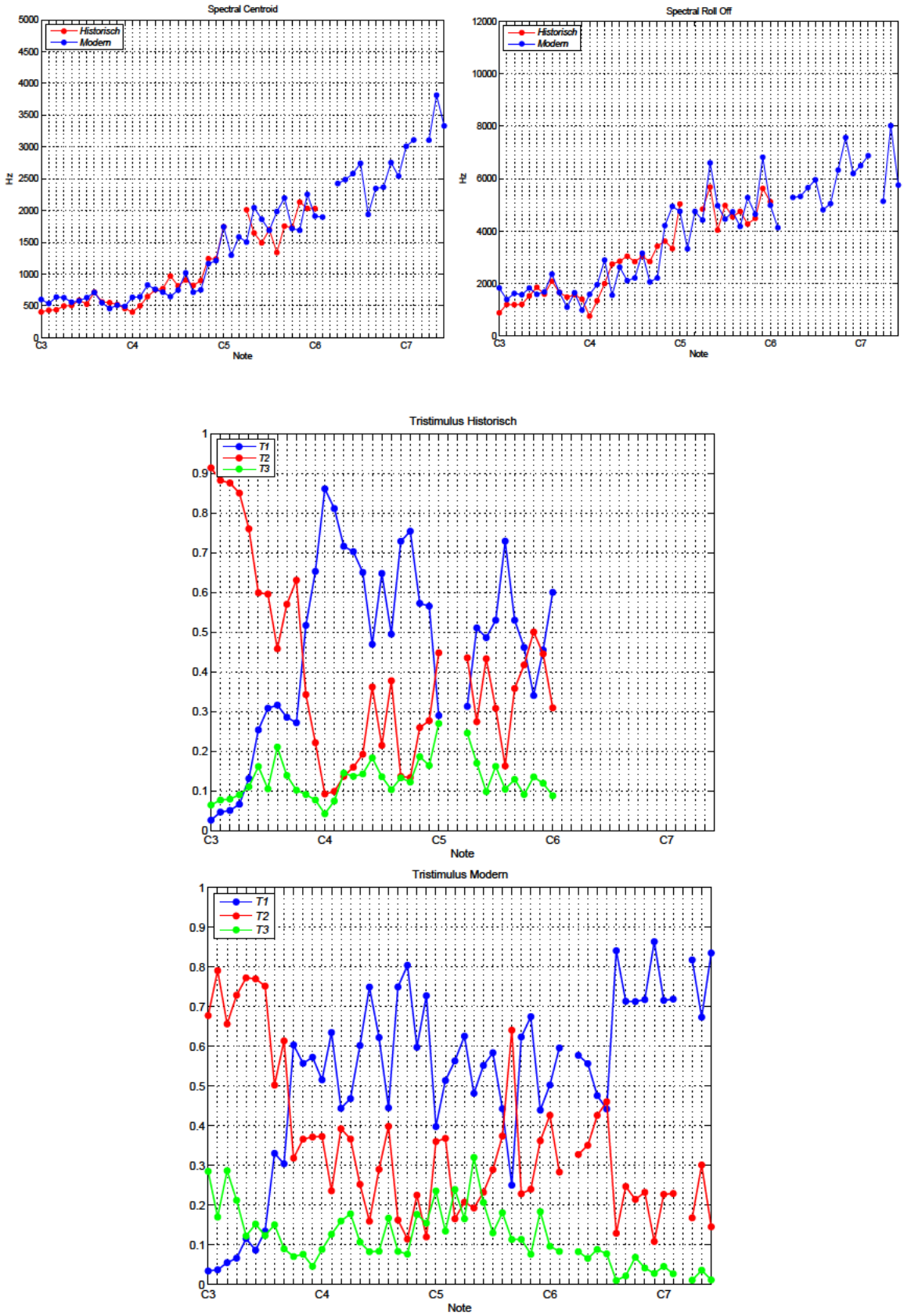

Abbildung 5.4.: Vergleich der Violen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

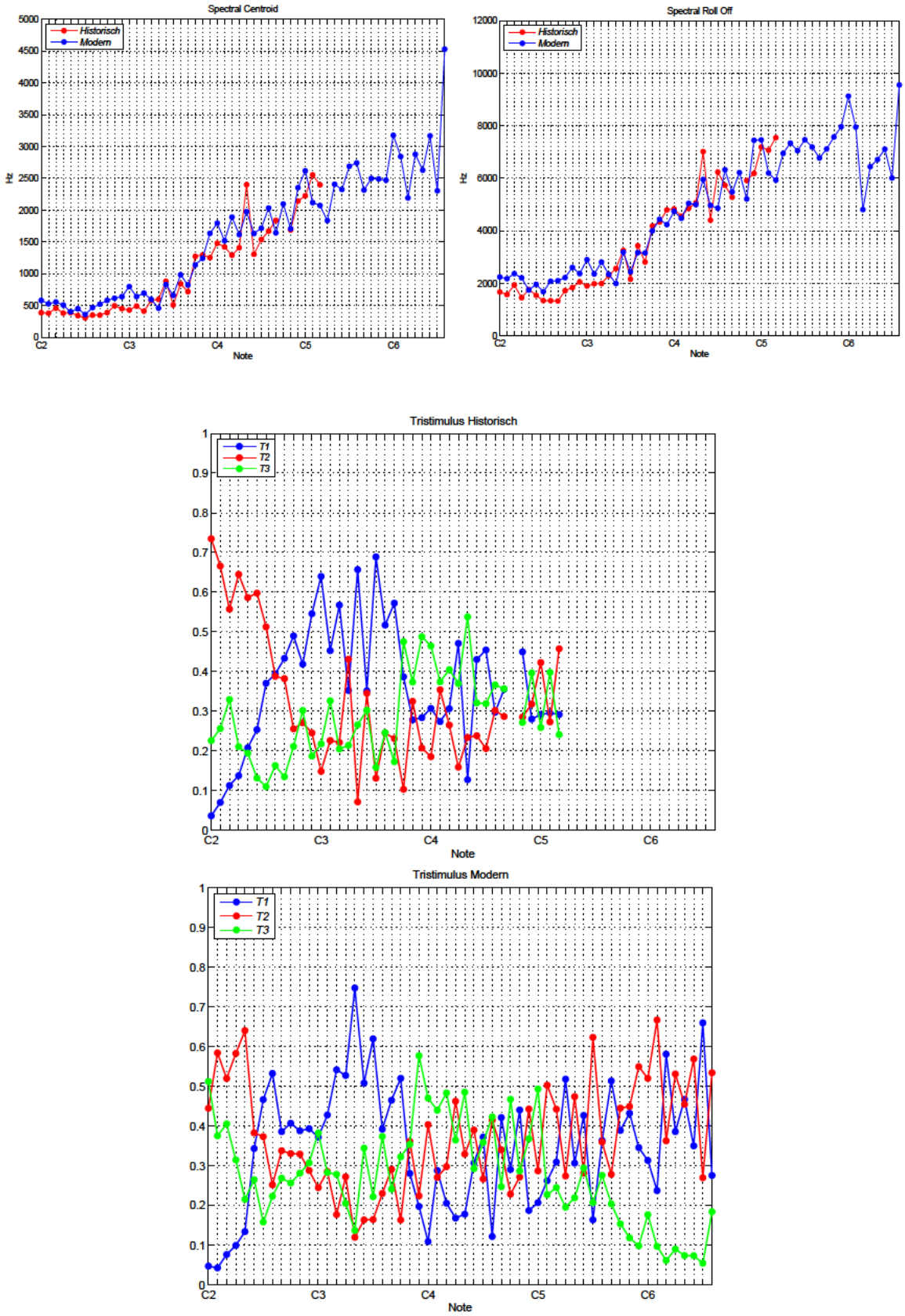

Abbildung 5.5.: Vergleich der Violoncelli ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

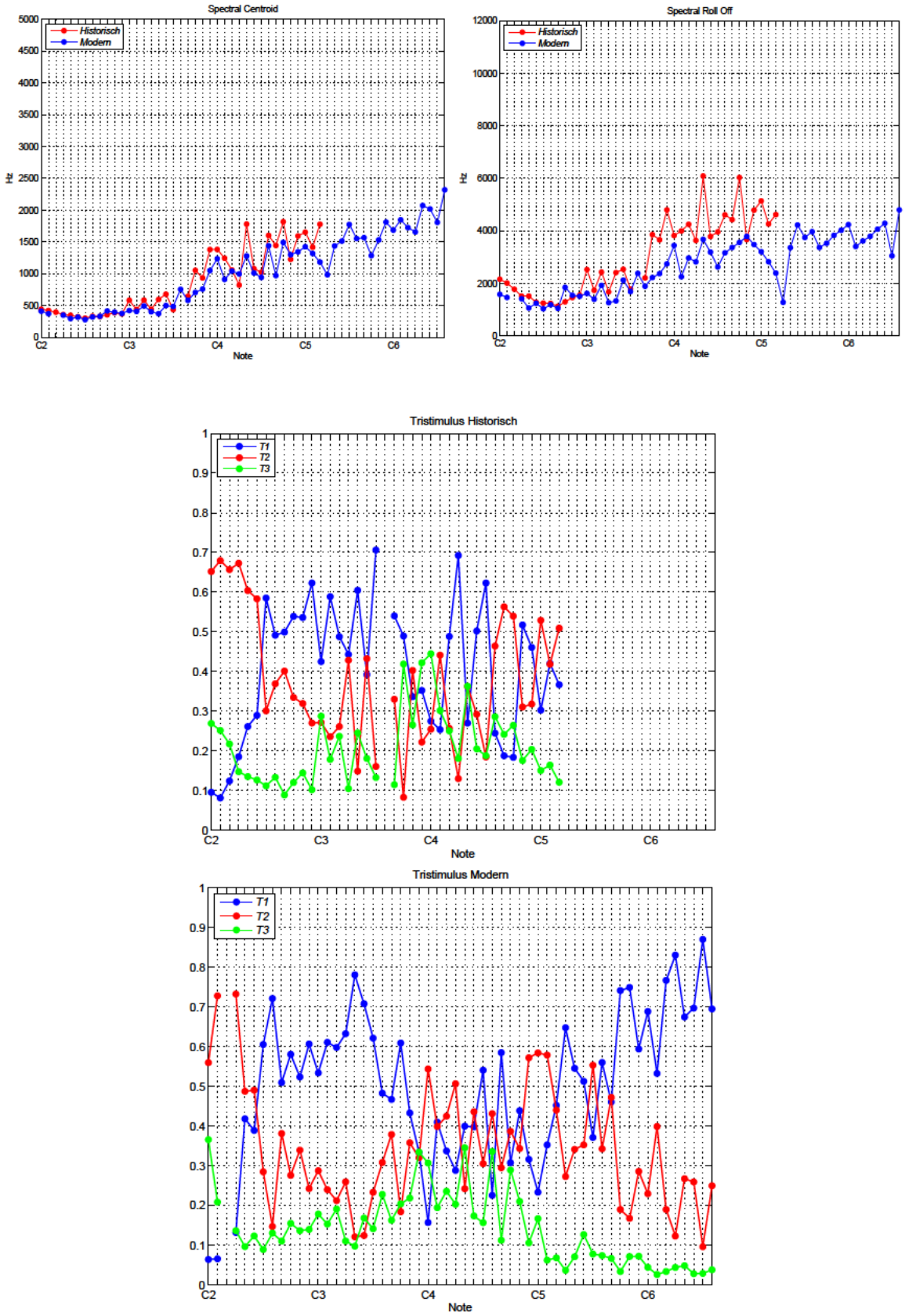

Abbildung 5.6.: Vergleich der Violoncelli pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

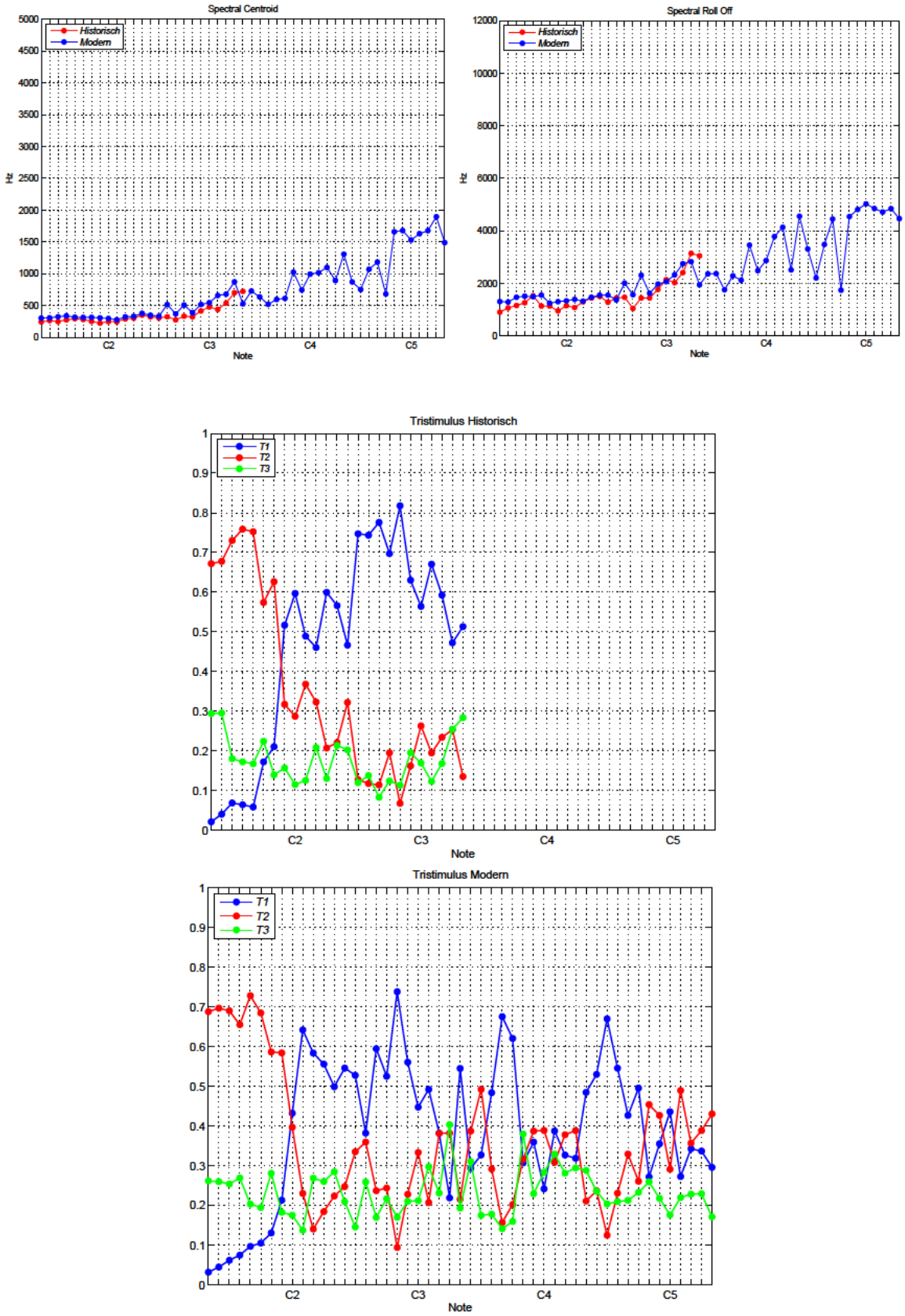

Abbildung 5.7.: Vergleich der Kontrabässe ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

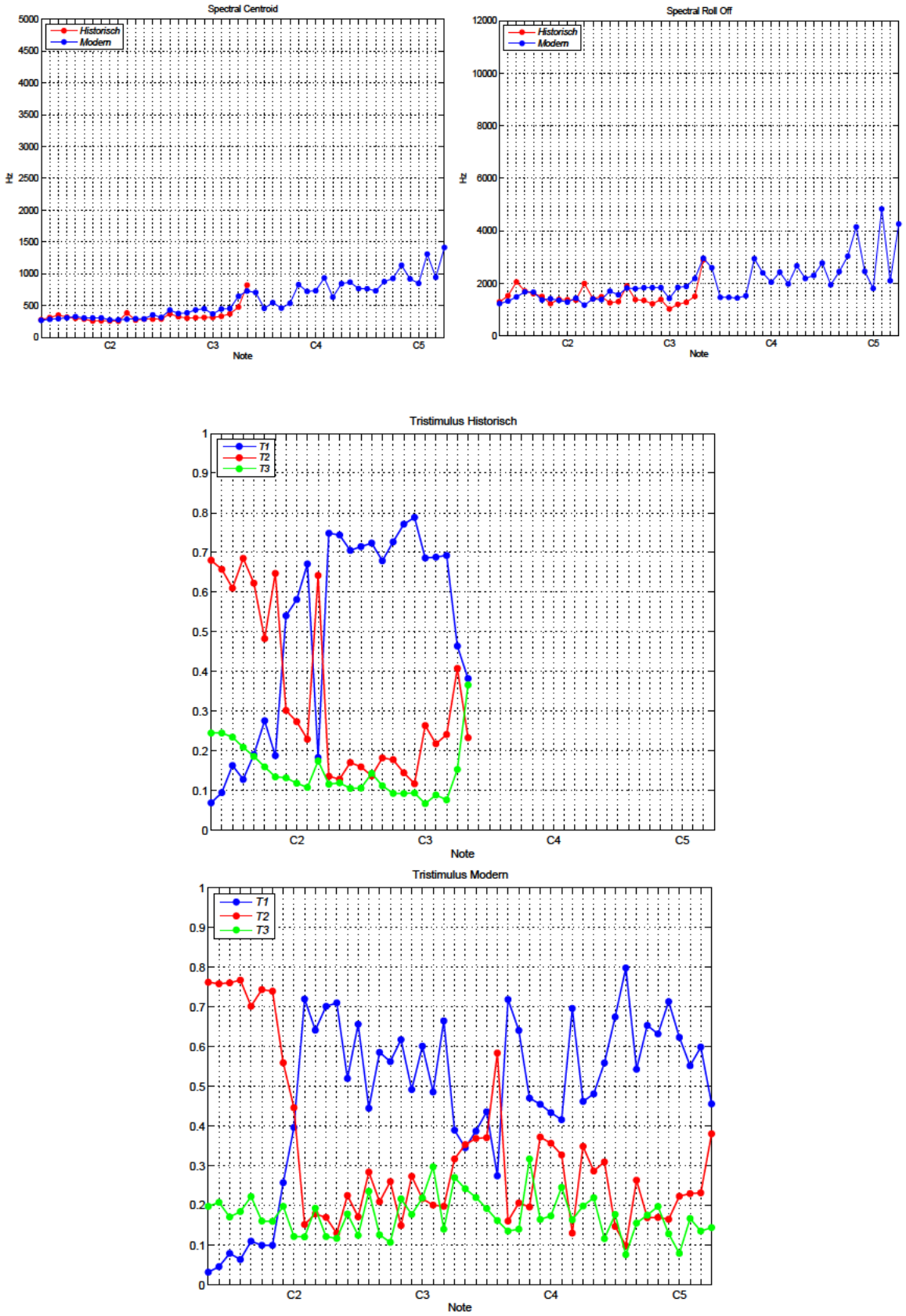

Abbildung 5.8.: Vergleich der Kontrabässe pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

5.2. Die Blechblasinstrumente

Bei den Blechblasinstrumenten (Abb. 5.9 – 5.16) zeigen die Tristimulus-Werte auffällige Unterschiede zwischen der modernen und der historischen Variante. In praktisch allen Fällen sind die Werte T2 und T3 des Tristumulus für die historischen Instrumente erhöht, was einen höheren Anteil der Obertöne anzeigt. Im Fall der Bassposaune im Fortissimo (Abb. 5.9) zeigt der Tristimulus-Wert T2 (rot) vor allem im Bereich von D3 bis F4 eine Erhöhung um den Wert 0.1. Im Pianissimo (Abb. 5.10) ist der Unterschied noch viel größer. Sehr auffällig ist hier die starke Erhöhung des T2-Wertes im Tonbereich von C3 bis F4 für das historische Instrument. Auch für die Posaune (Abb. 5.11 – 5.12) lassen sich ähnlich große Unterschiede ausmachen. Auffällig ist wiederum der hohe Beitrag von T2 im Bereich oberhalb von G3 im Fortissimo und oberhalb von C3 im Pianissimo des historischen Instruments. Auch eine Erhöhung von T1 für die moderne Posaune ist im gesamten Bereich zu erkennen. Weniger stark ausgeprägt ist der Effekt beim Horn (Abb. 5.13 – 5.14). Im Fortissimo zeigt vor allem T3 eine Erhöhung für die Töne oberhalb von D4, währen im Pianissimo der Wert von T2 im Bereich von D3 bis D4 eine Erhöhung um den Wert von rund 0.1 zeigt. Insgesamt ist ein Unterschied zwischen historischen und modernen Instrumenten hier aber weniger stark zu erkennen. Leider liegen für das historische Horn nicht so viele Daten vor, was auch für die historische Trompete gilt. Im Fall der Trompete (Abb. 5.15 – 5.16) ist der Unterschied zwischen dem historischen und dem modernen Instrument schwach ausgeprägt.

Zusammenfassend zeigen die historischen Blechblasinstrumente eine signifikante Tendenz zu einem höheren Anteil von Obertönen, wobei dieser Trend beim Horn und bei der Trompete wesentlich schwächer ausgeprägt ist als bei den Posaunen.

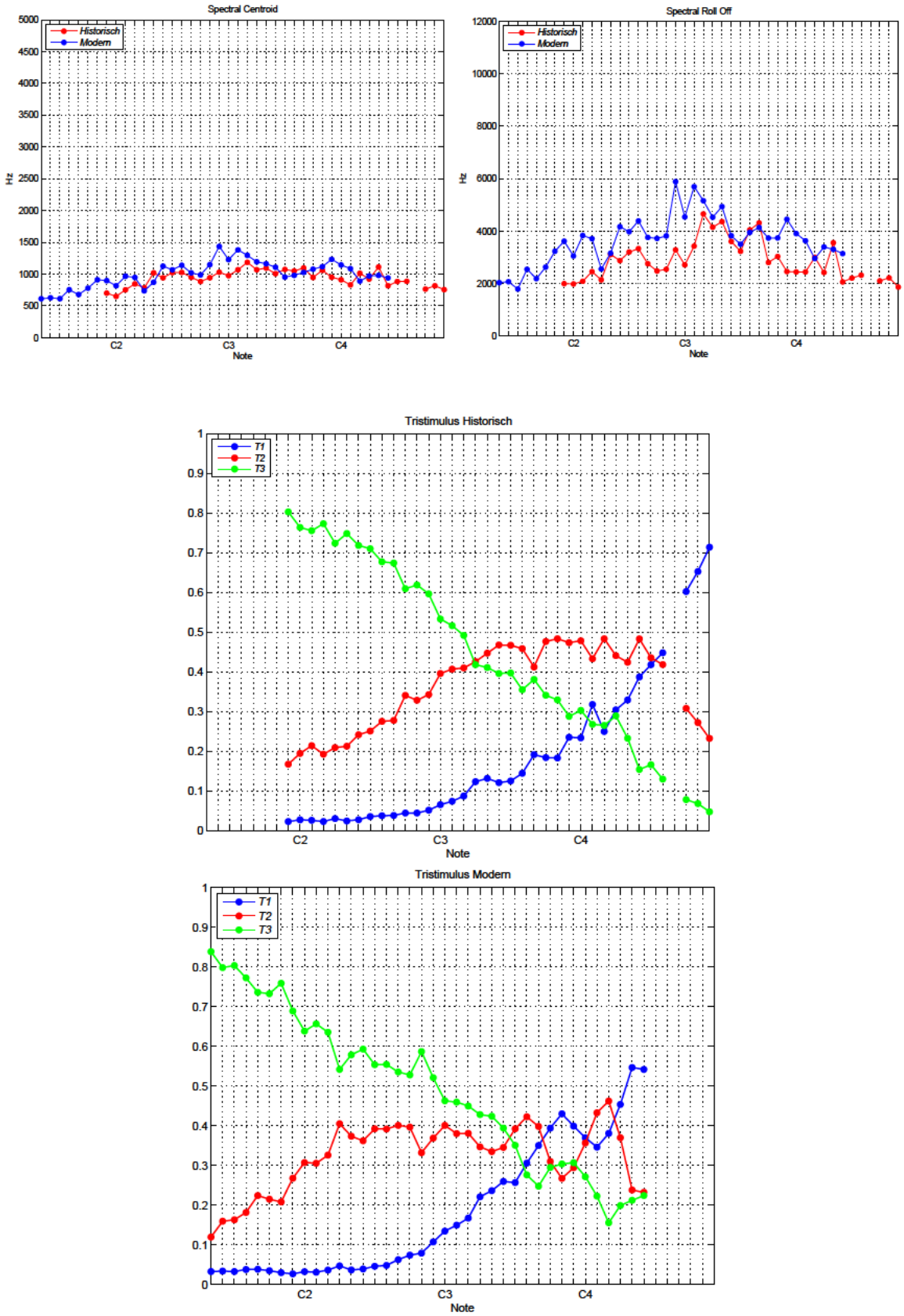

Abbildung 5.9.: Vergleich der Bassposaunen ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

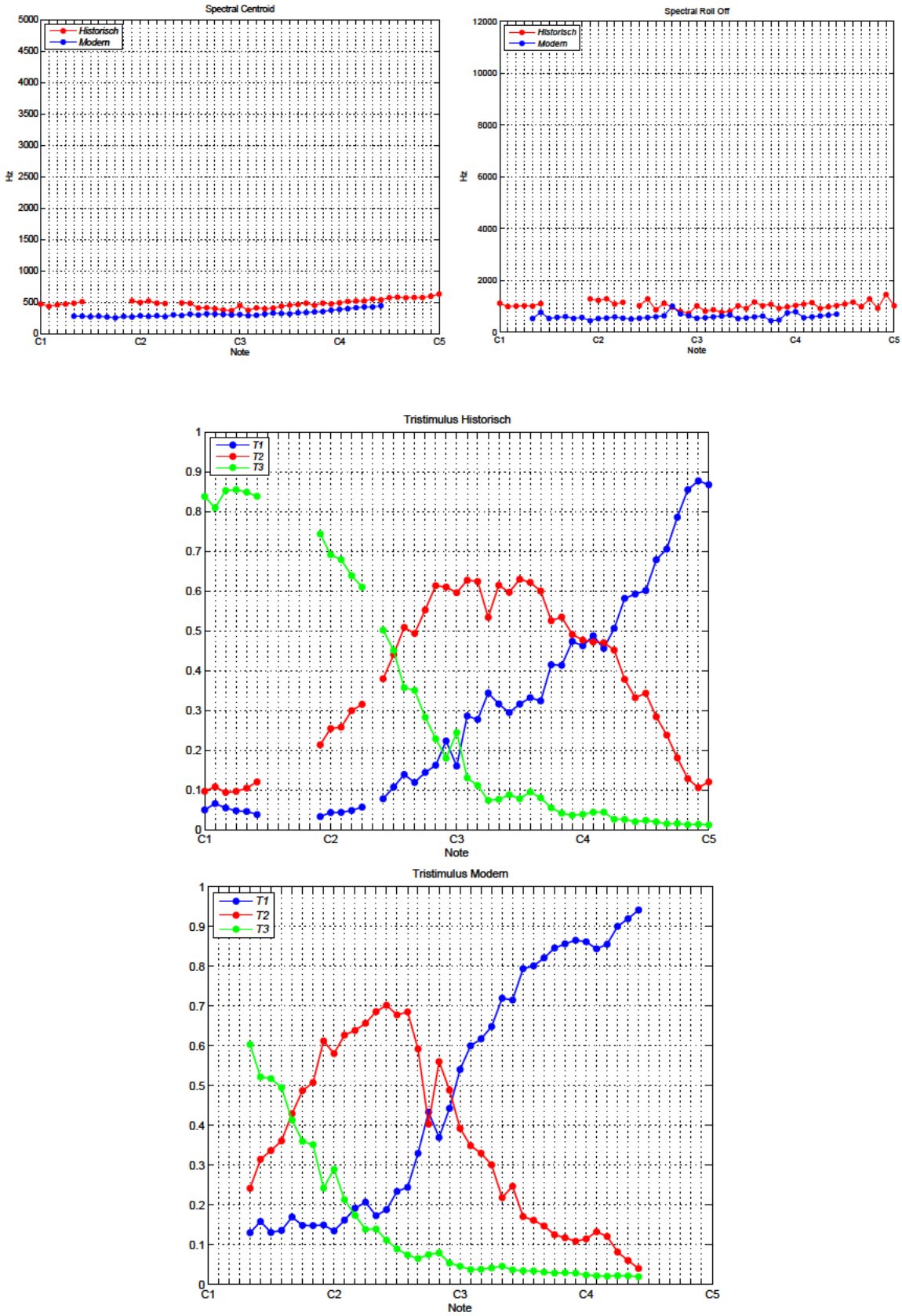

Abbildung 5.10.: Vergleich der Bassposaunen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

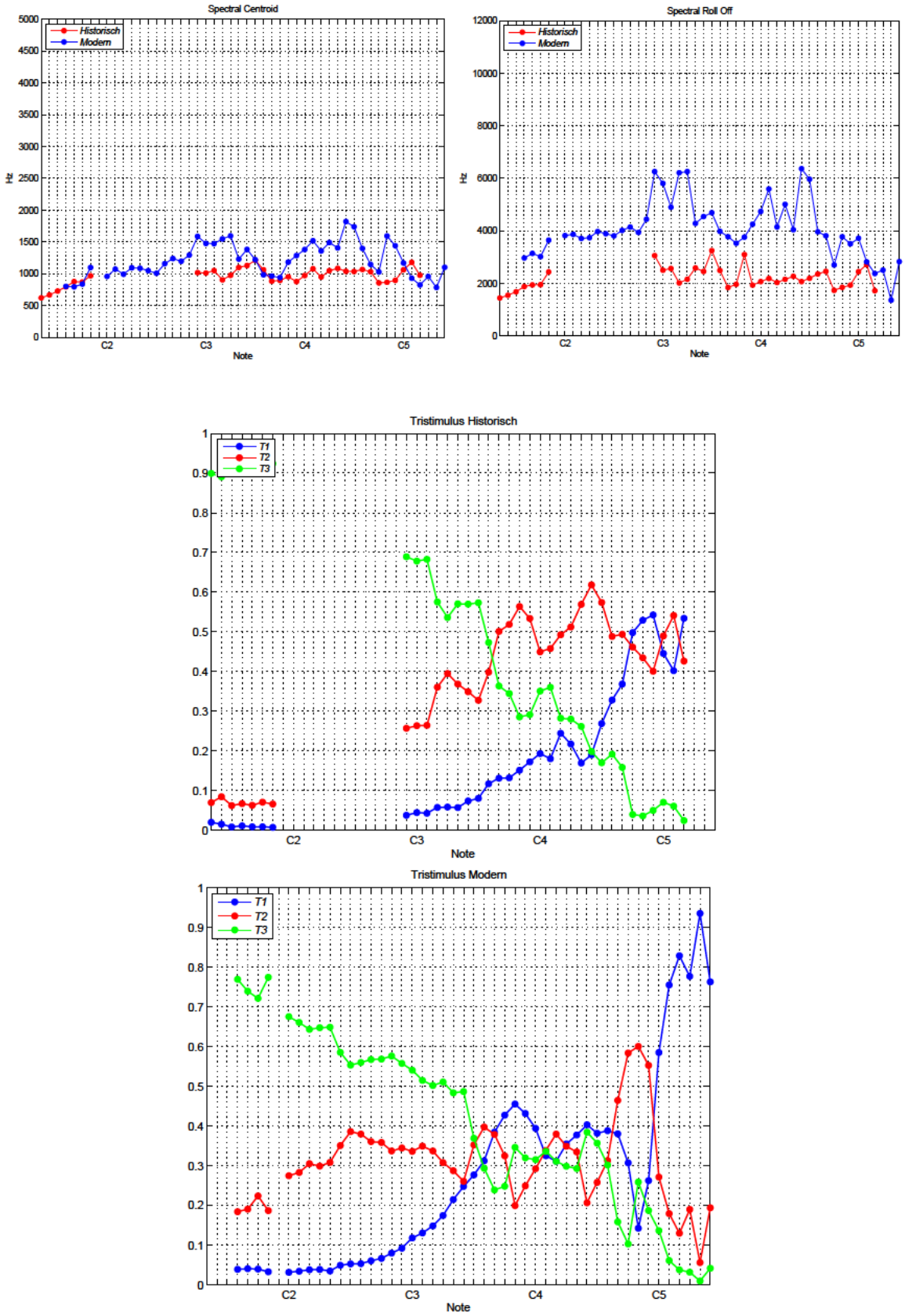

Abbildung 5.11.: Vergleich der Posaunen ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

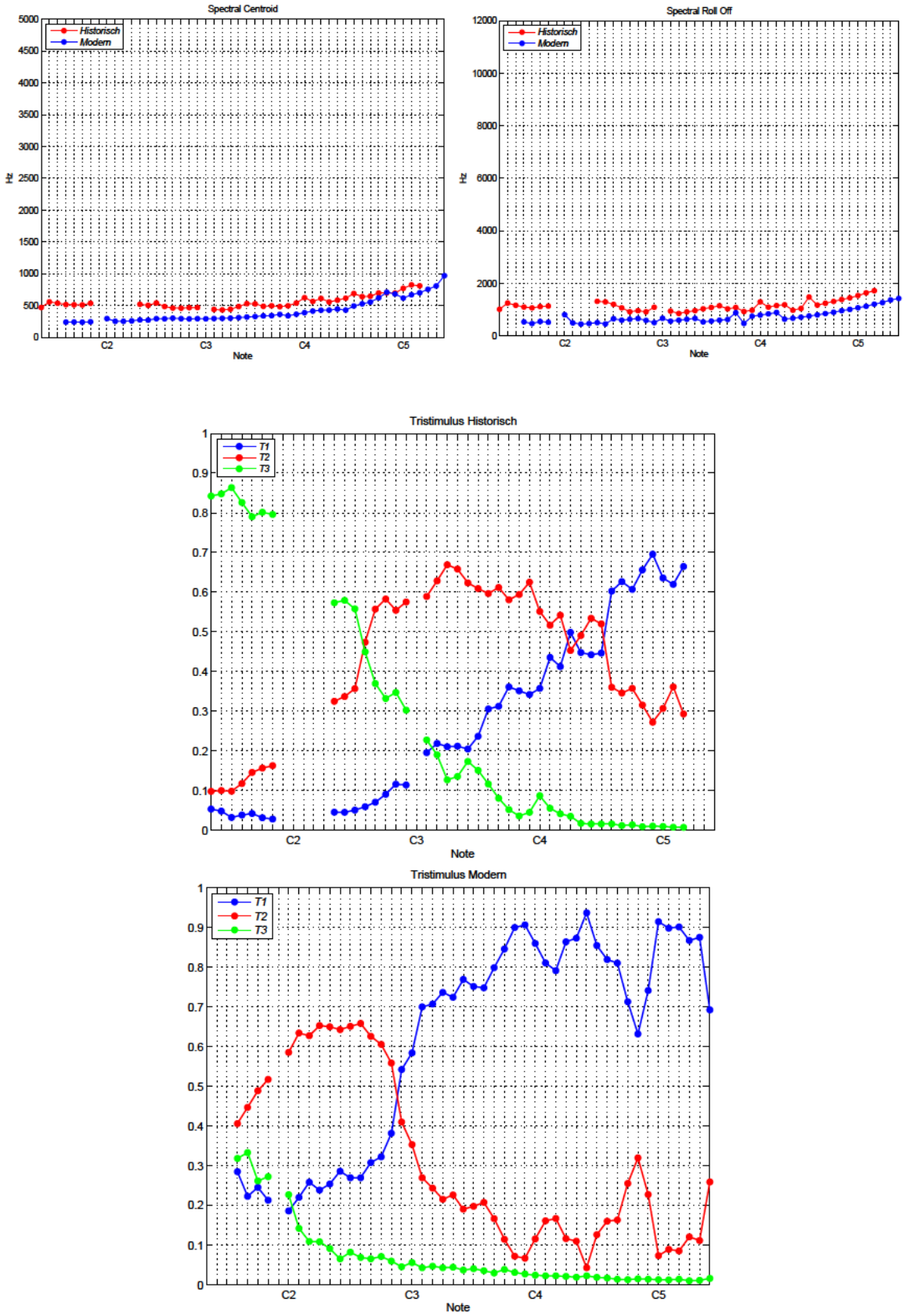

Abbildung 5.12.: Vergleich der Posaunen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

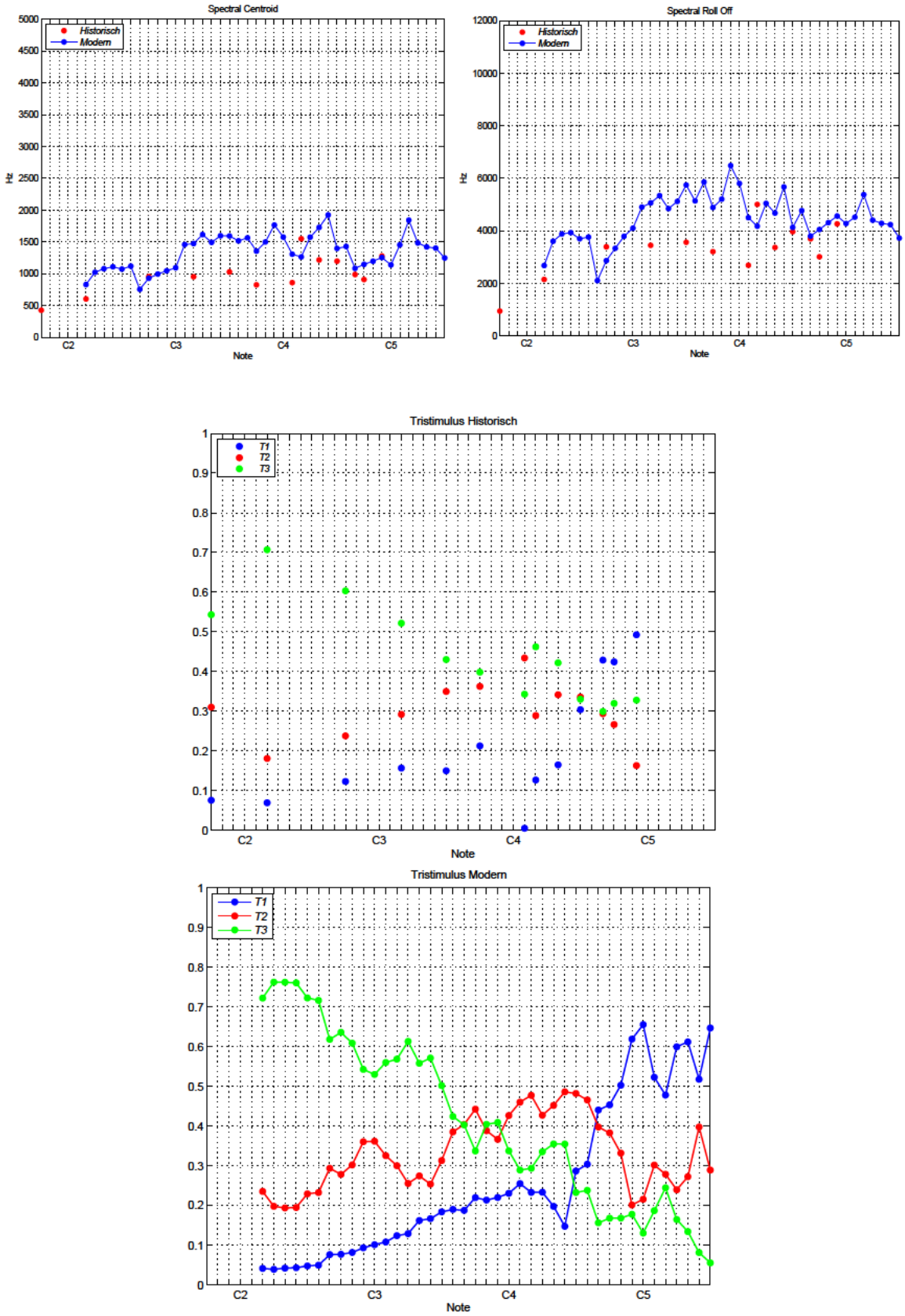

Abbildung 5.13.: Vergleich der Hörner ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

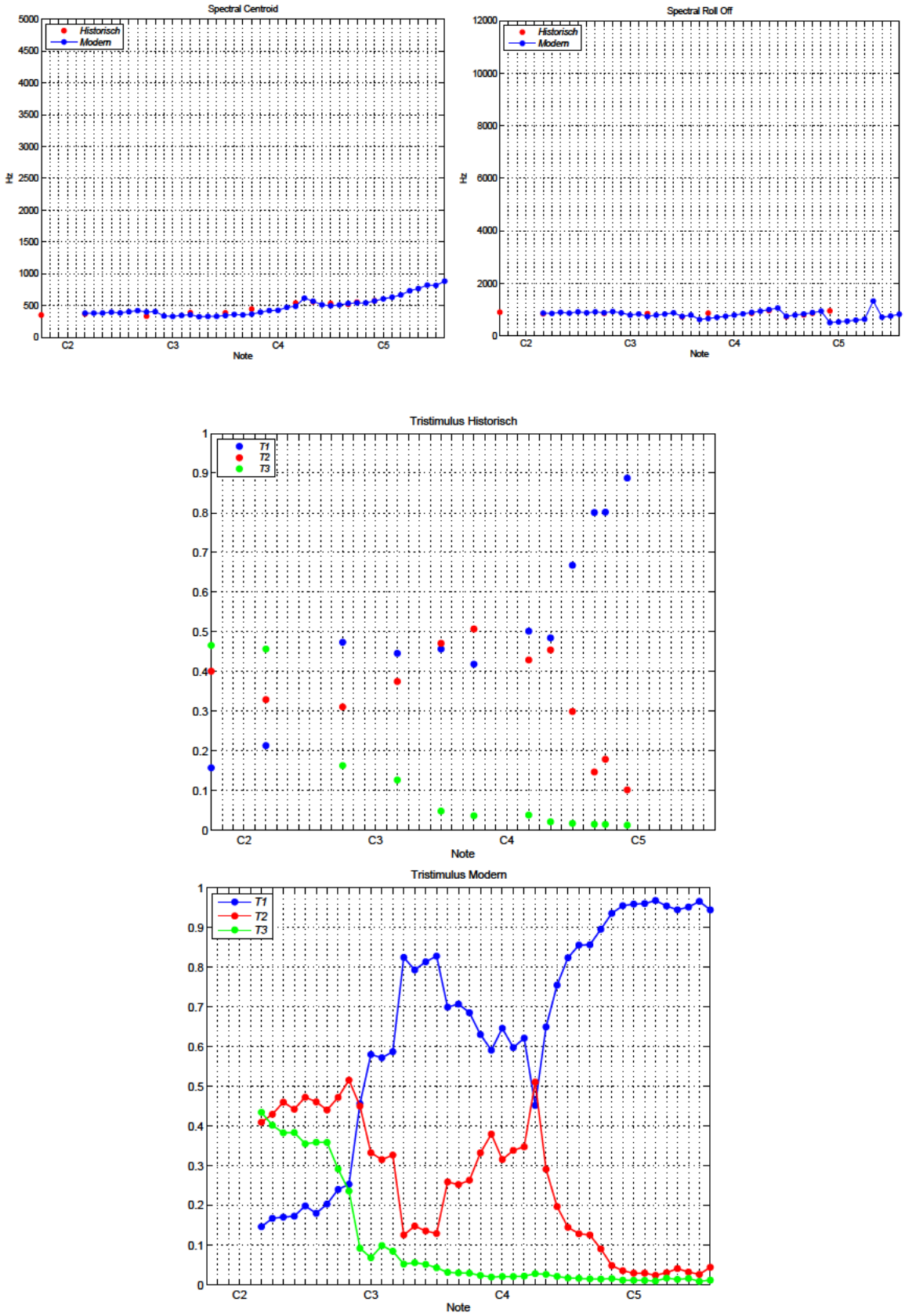

Abbildung 5.14.: Vergleich der Hörner pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

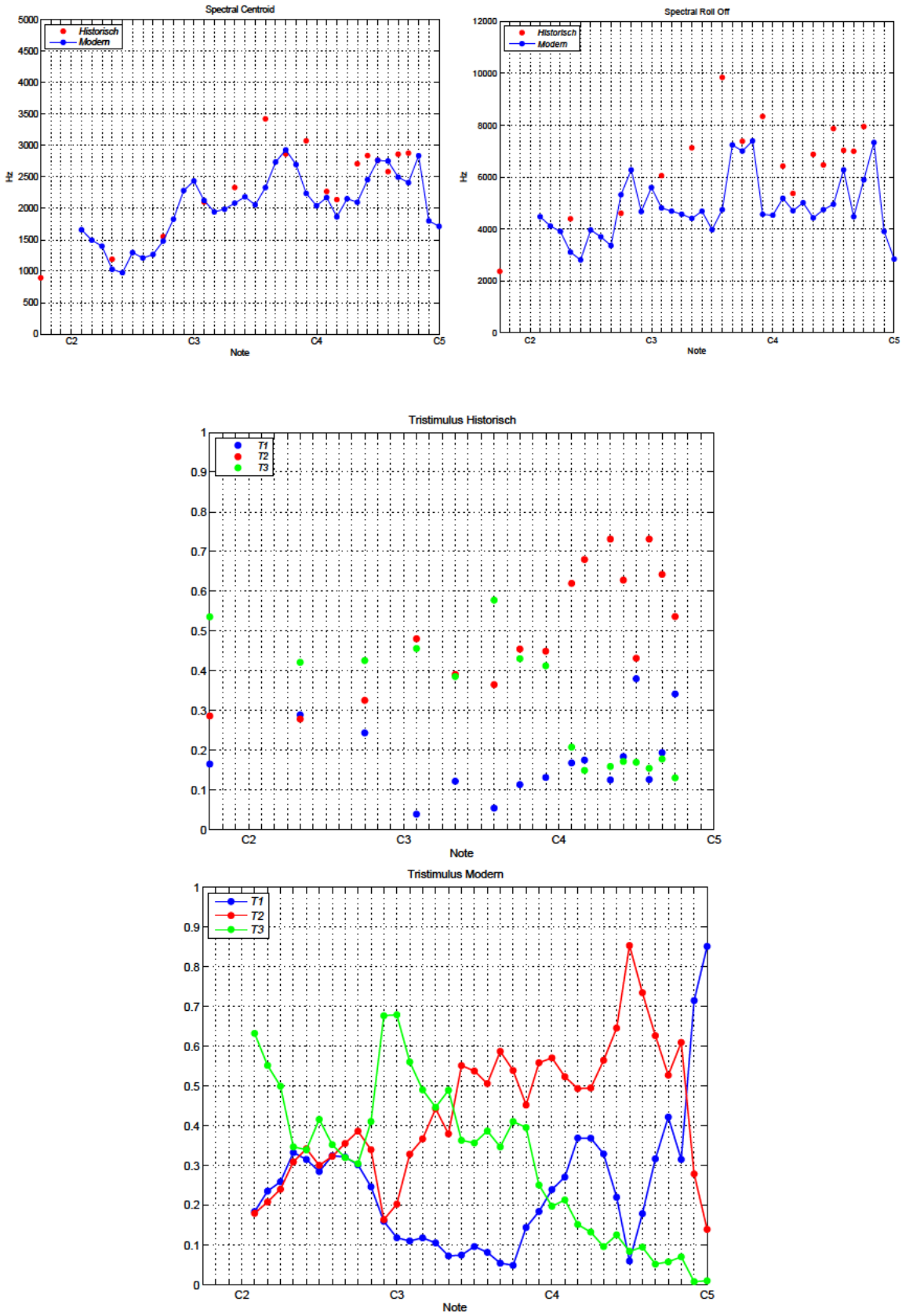

Abbildung 5.15.: Vergleich der Trompeten ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

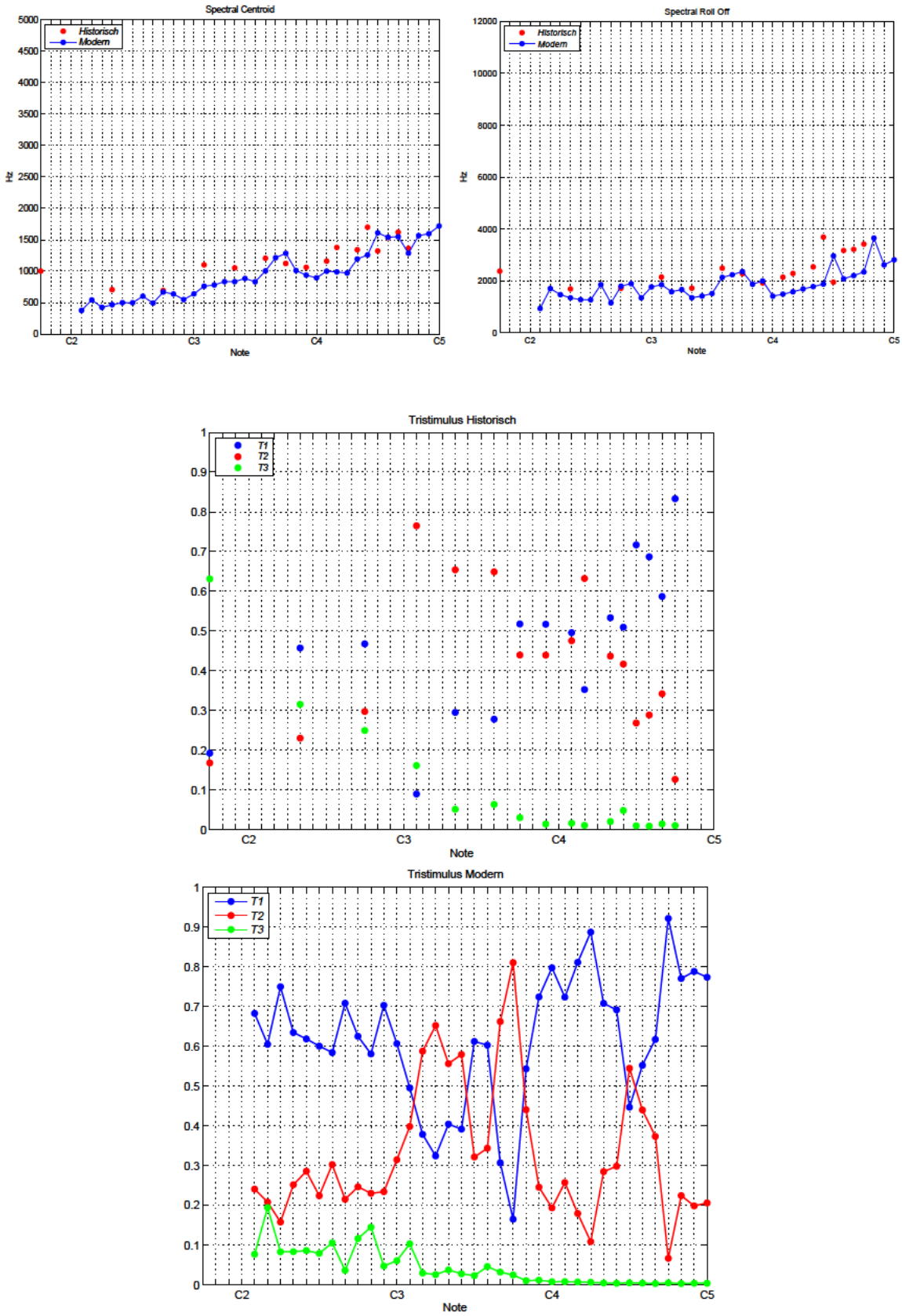

Abbildung 5.16.: Vergleich der Trompeten pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

5.3. Die Holzblasinstrumente

Im Fall der Holzblasinstrumente (Abb. 5.17 – 5.24) ist es schwieriger, einen Trend im Unterschied zwischen den historischen und modernen Instrumenten auszumachen. Die Daten der Oboe (Abb. 5.17 – 5.18) laufen sogar der zentralen These der vorliegenden Arbeit entgegen. In einem weiten Tonbereich zwischen E4 und A5 liegt der historische Wert des Roll Off im Fortissimo deutlich unterhalb des modernen Werts, während im Pianissimo kein Unterschied auszumachen ist. Für beide Spielstärken zeigt der Tristimulus-Wert T2 für die moderne Oboe eine starke Überhöhung im Bereich D5 bis B5. Auch im Fall der Klarinette (Abb. 5.19 – 5.20) sind kaum Unterschiede auszumachen und die wenigen Differenzen deuten eine Tendenz erhöhter Werte des Spectral Roll Off und des Tristimulus-Werts T2 für das moderne Instrument an. So ist im Fortissimo der Roll Off praktisch im gesamten Tonbereich deutlich erhöht. Der Tristimuluswert T2 zeigt eine Erhöhung um den Betrag von 0.1 – 0.15 im Bereich oberhalb von A5. Im Pianissimo ist eine eindeutige Tendenz kaum auszumachen. Die Bassklarinette (Abb. 5.21 – 5.22) zeigt auch nur geringe Unterschiede zwischen der modernen und der historischen Version. Die wenigen Differenzen, die erkennbar sind, wiesen hier allerdings in die erwartete Richtung erhöhter Spectral Roll Off und Tristimulus-Werte T2 und T3 für die historische Version. So sind die Tristimulus-Werte T2 und T3 bei der historischen Version im Fortissimo im Tonbereich ab A3 erhöht. Im Pianissimo ist jedoch kaum ein Unterschied auszumachen. Dagegen ist beim Fagott im Fortissimo (Abb. 5.23) eine klare Dominanz des Spectral Roll Offs des historischen Instruments erkennbar. Diese Tendenz zeigt sich auch im Tristimulus-Wert T3, der im Tonbereich ab D4 für das historische Instrument um den Wert von ca. 0.1 erhöht ist. Auch im Pianissimo zeigt sich eine Erhöhung des T3-Werts, wobei allerdings hier entgegen dem Trend, der T2-Wert beim Tristimulus-Verlauf des modernen Instruments um den Wert von etwa 0.1 erhöht ist. Insgesamt lässt sich bei dem Fagott im Pianissimo (Abb. 5.24) kein eindeutiger Trend ausmachen, wogegen man im Fortissimo (Abb. 5.23) eine deutliche Erhöhung des Roll Offs erkennen kann.

Zusammenfassend zeigen also die Holzblasinstrumente kein so einheitliches Bild wie die Blechblasinstrumente. Für die meisten Instrumente sind die Unterschiede wenig ausgeprägt und die Daten der Oboe laufen sogar sehr deutlich dem Trend entgegen. Das Gleiche gilt auch für die Klarinette, wobei hier die Unterschiede weniger strak ausgeprägt sind. Die schwachen Unterschiede bei den anderen Holzblasinstrumenten weisen allerdings eher in die erwartete Richtung höherer Werte für die historischen Instrumente.

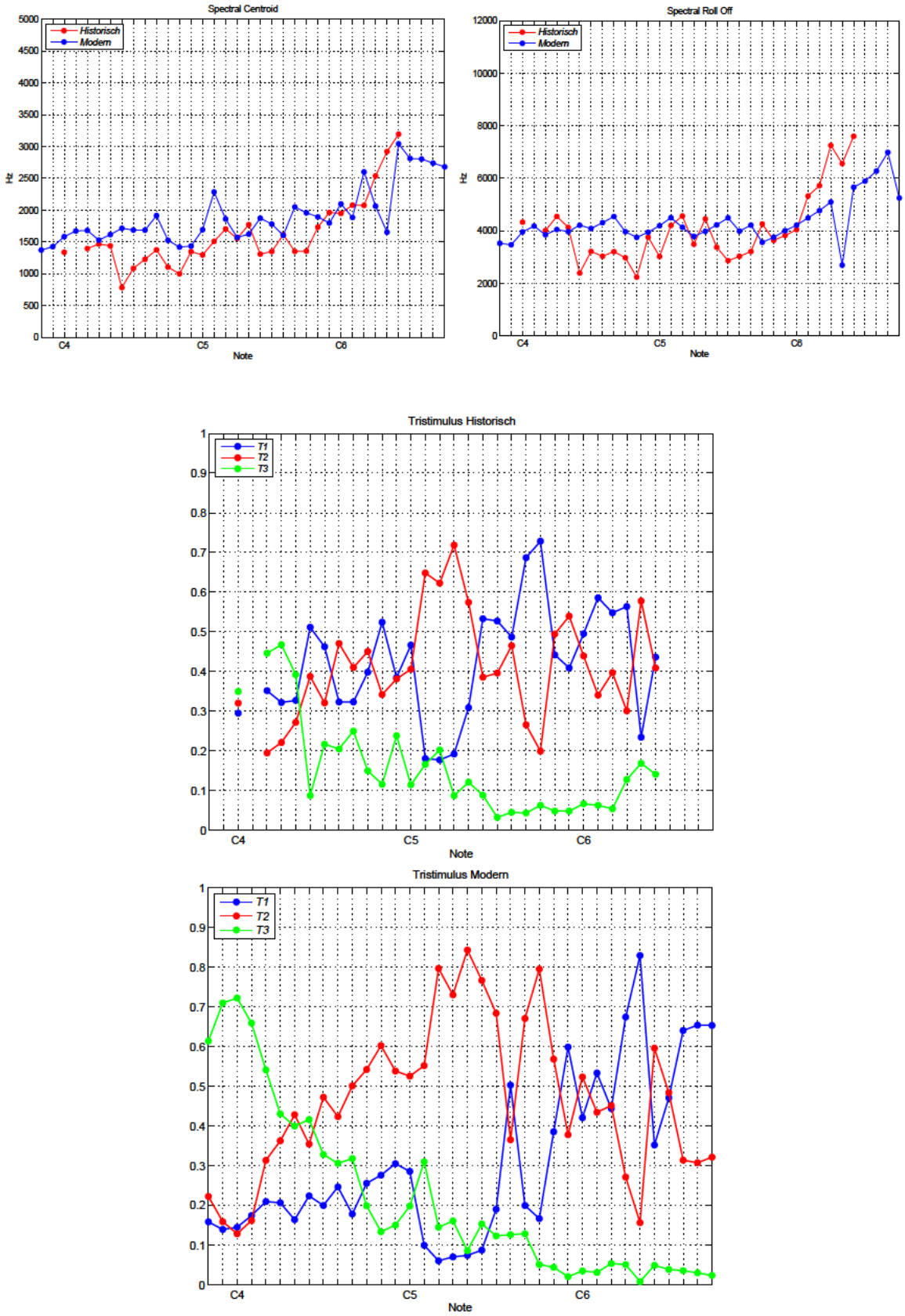

Abbildung 5.17.: Vergleich der Oboen ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

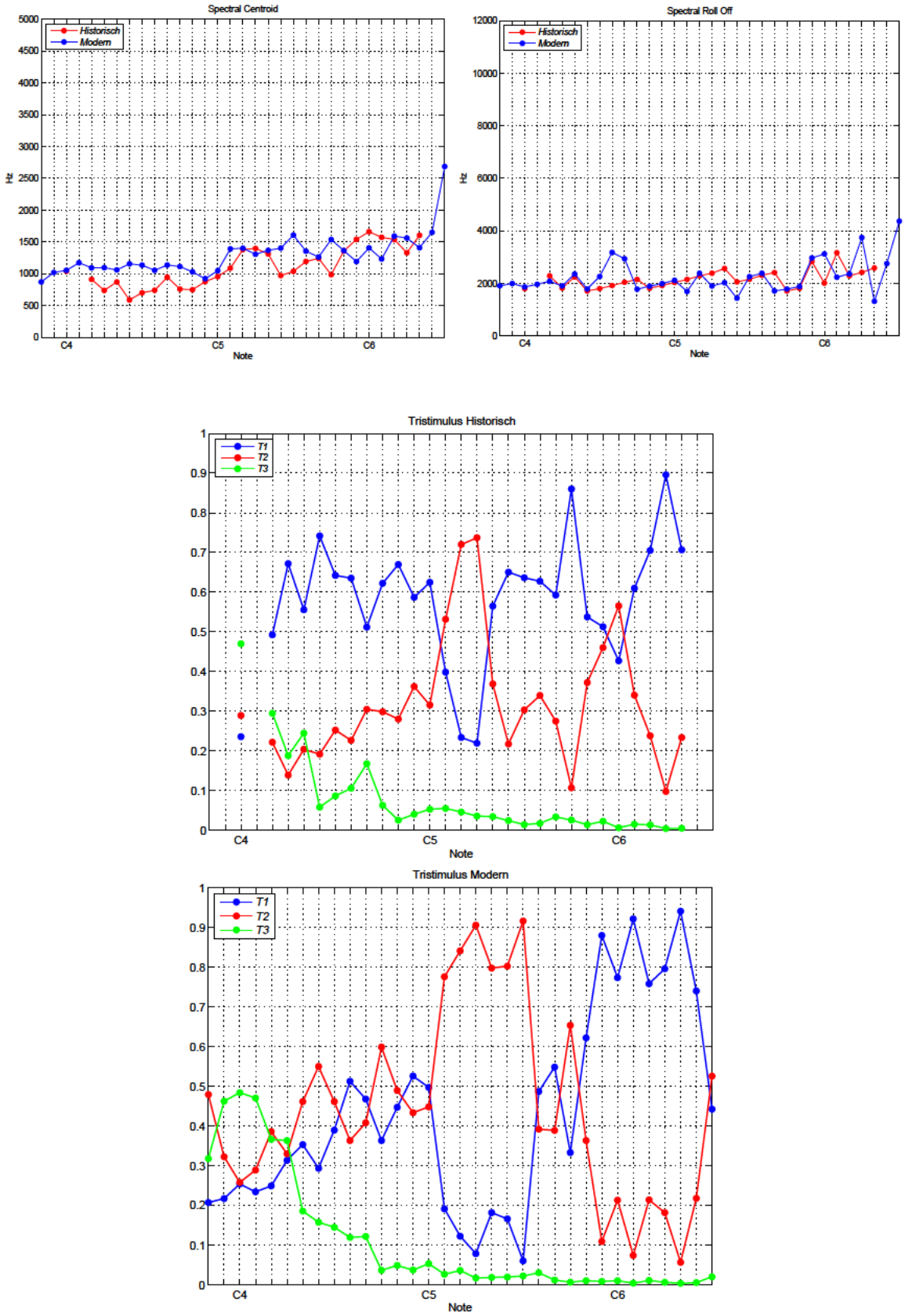

Abbildung 5.18.: Vergleich der Oboen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

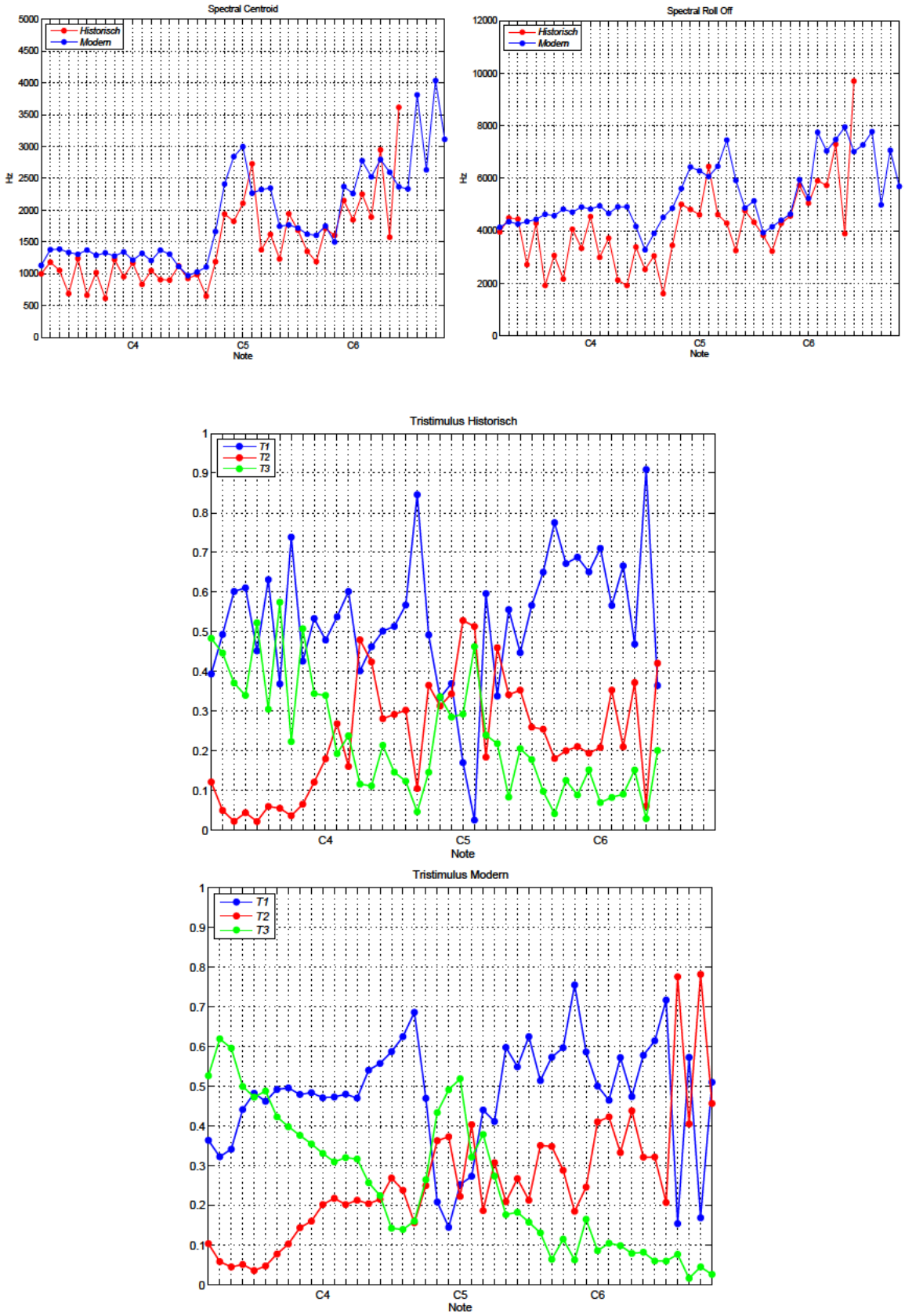

Abbildung 5.19.: Vergleich der Klarinetten ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

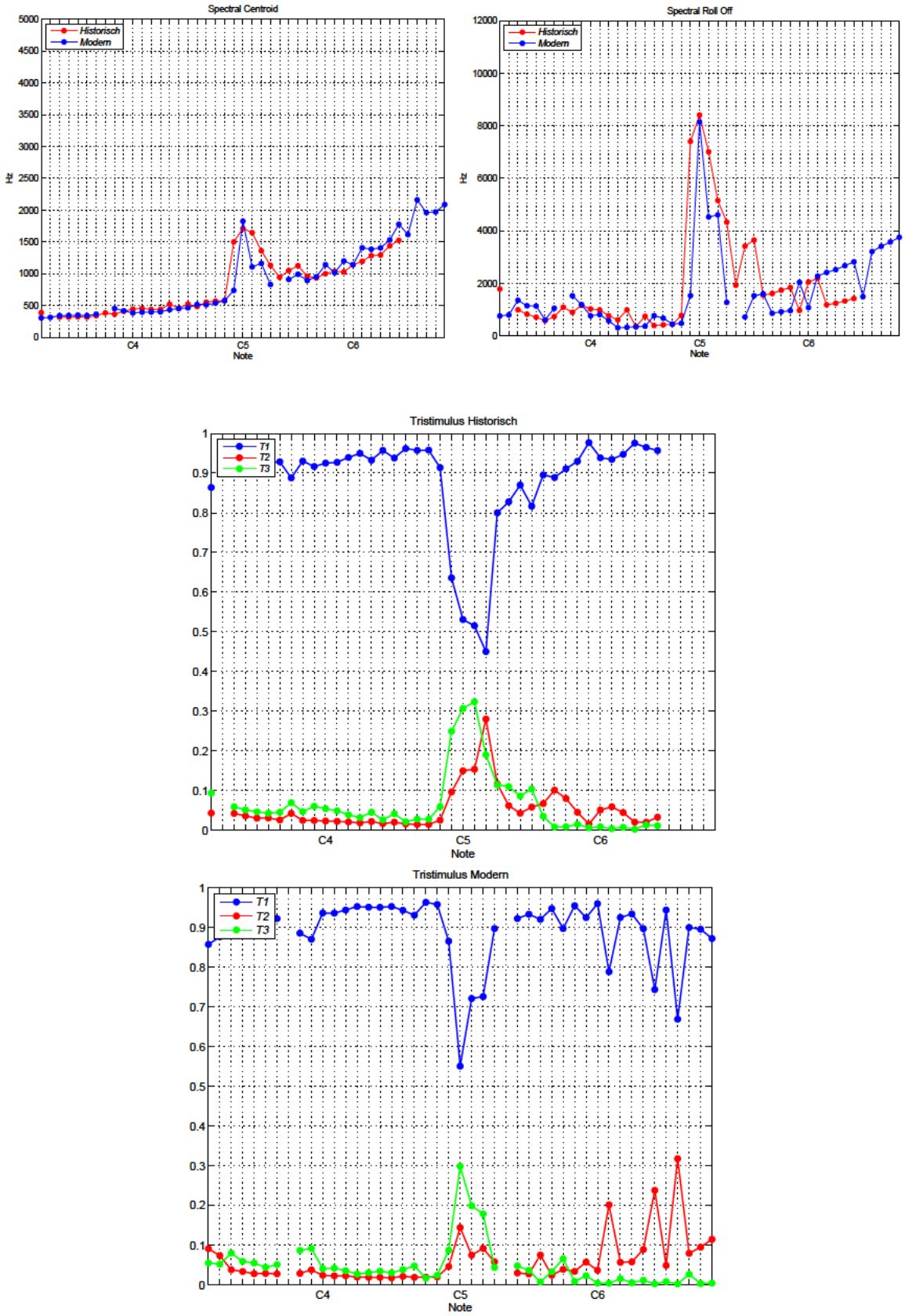

Abbildung 5.20.: Vergleich der Klarinetten pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

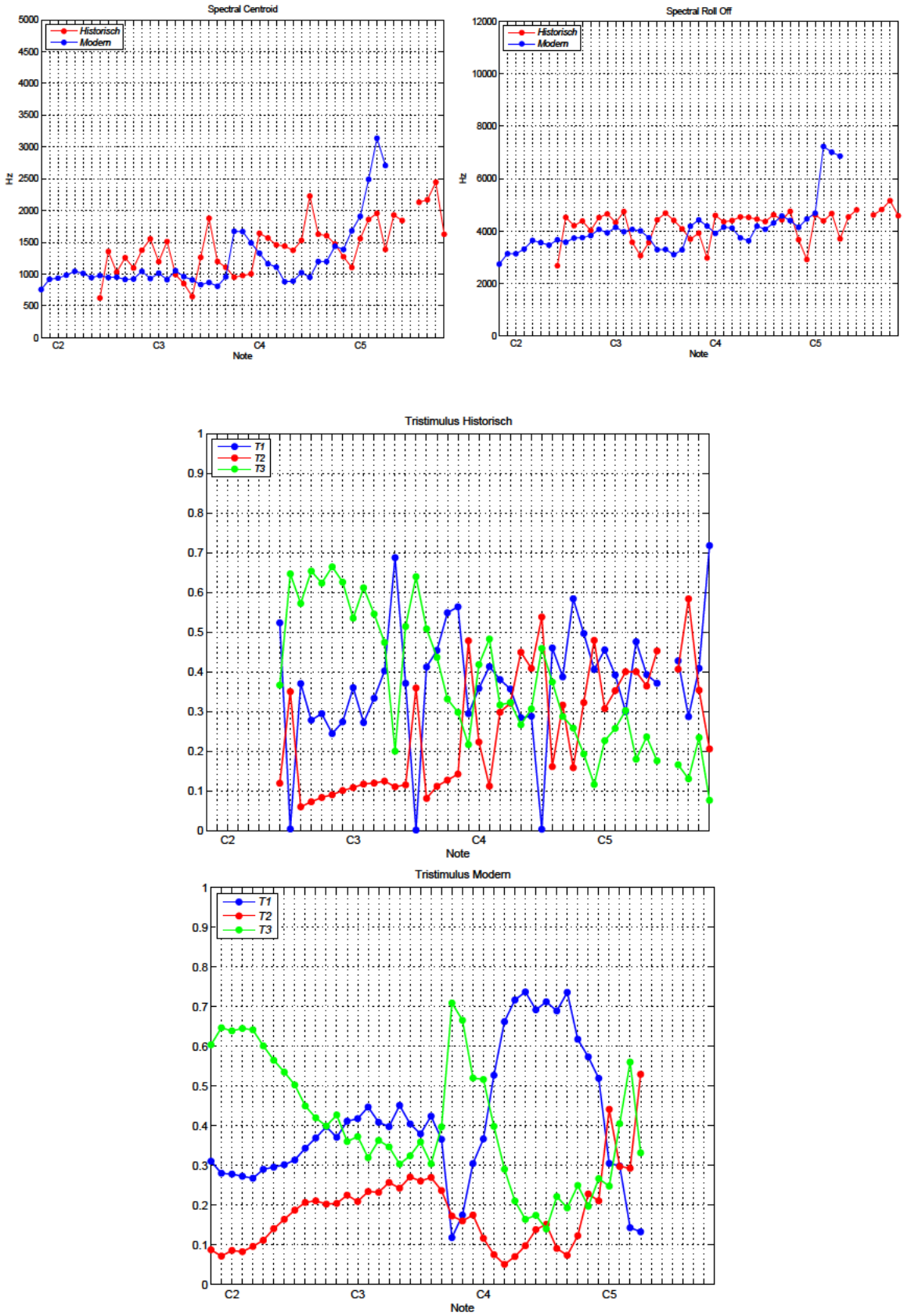

Abbildung 5.21.: Vergleich der Bassklarinetten ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

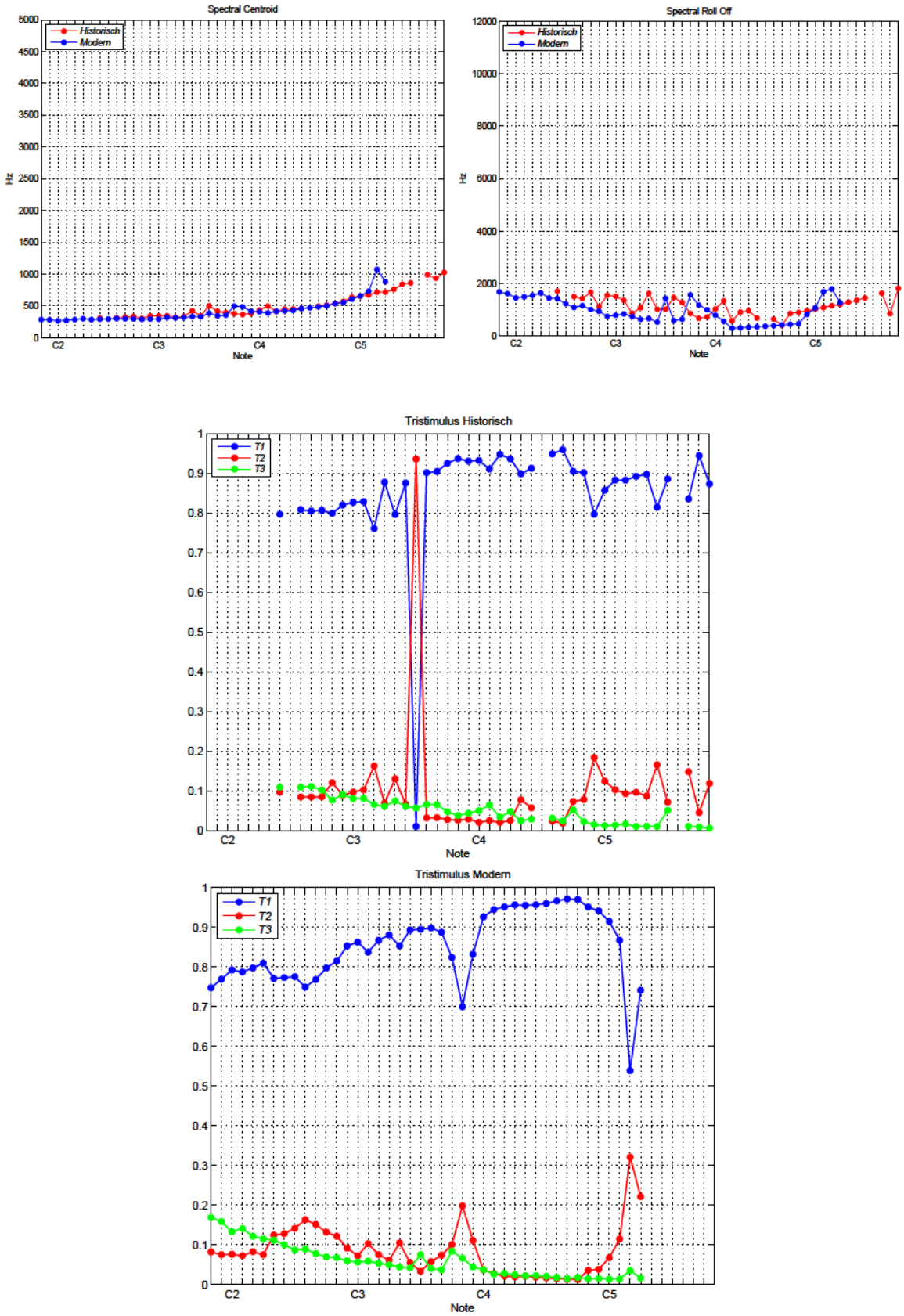

Abbildung 5.22.: Vergleich der Bassklarinetten pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

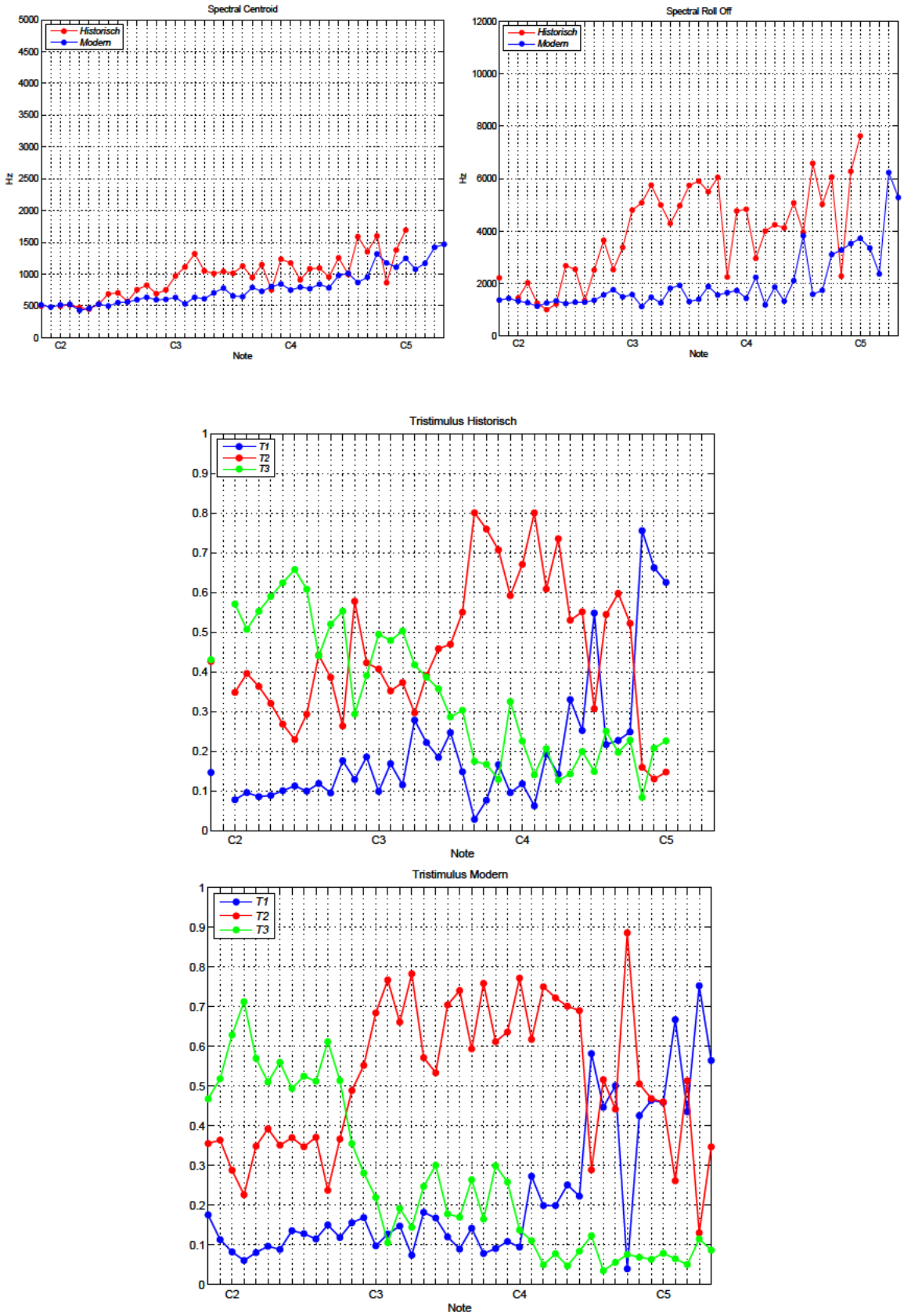

Abbildung 5.23.: Vergleich der Fagotte ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

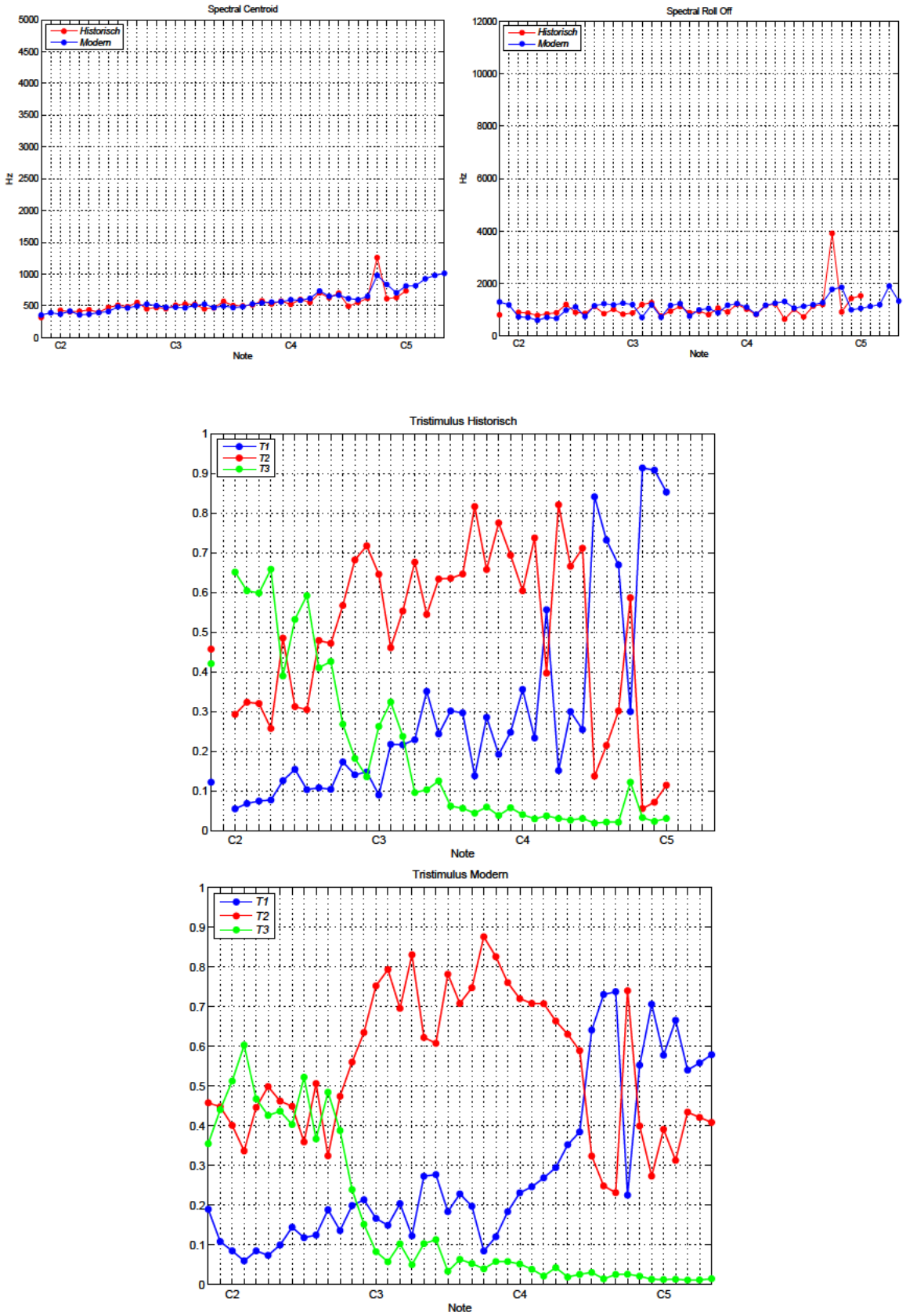

Abbildung 5.24.: Vergleich der Fagotte pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

Insgesamt ergeben sich also tendenziell erhöhte Werte des Roll Off und der Tristimulus Werte T2 und T3 für die meisten historischen Instrumente. Dazu passen die Daten von Violine, Viola und Violoncello, denn hier ist ein erhöhter Wert des Tristimulus-Werts T1 für die modernen Instrumente erkennbar. Auch für einige der Blechbläser, allen voran bei der Posaune und der Bassposaune lassen sich erhöhte Werte für T2 und T3 für die historischen Instrumente erkennen. Für die Holzblasinstrumente ergibt sich kein klares Bild. Die Oboe zeigt genau das umgekehrte Verhalten mit einem klar erhöhten Anteil von Obertönen für das moderne Instrument. Auch bei der Klarinette deutet sich ein inverses Verhalten an. Bei den anderen Holzblasinstrumenten sind die Unterschiede gering, aber passen immerhin wieder in das Verhalten der Mehrheit der hier betrachteten Instrumente. Insgesamt finden sich also in den hier dargestellten Daten Hinweise zu einer mehrheitlichen Abschwächung des Anteils der Obertöne für die modernen Instrumente, wobei es allerdings einige Ausnahmen von diesem Trend gibt. Im nächsten Kapitel werden diese Ergebnisse diskutiert. Insbesondere sollen durch die Bildung von Mittelwerten die Daten vereinfacht werden, um so eine bessere Übersicht zu gewinnen.

6. Diskussion

Wie bereits in den Ergebnissen beschrieben finden auch in der Diskussion nur die 24 Instrumente eine Berücksichtigung, für die es ein klar zuzuordnendes Pendant aus einer anderen Epoche gibt. Die Ergebnisse der restlichen 9 untersuchten Instrumente befinden sich im Anhang. Trotzdem sind es eine Vielzahl von Daten, bei denen sich nur in einigen Fällen leicht erkennbare Unterschiede zwischen den modernen und historischen Instrumenten andeuten. Diese Unterschiede sollen in diesem Kapitel näher herausgearbeitet und diskutiert werden. Dazu werden die Tristimulus-Werte zunächst in einem weiteren Schritt komprimiert und vereinfacht. Im Kapitel Ergebnisse wurden die nach der Tonhöhe sortierten Werte für jeden Ton in einem Liniendiagramm dargestellt. Für die Tristimulus-Werte T1, T2 und T3 lässt sich daraus für jedes Instrument ein Mittelwert errechnen. Die Mittelung erstreckt sich über alle zu einem Instrument vorhandenen Töne und gibt dem Betrachter die Möglichkeit, mit Hilfe von einem Wert Aussagen zu den Instrumenten zu treffen. Allerdings gehen bei der Mittelung Informationen verloren, denn es könnte sein, dass auffällige Unterschiede beispielsweise nur im Bereich hoher Töne auftreten, die dann bei einer Mittelung über alle Tonhöhen nicht mehr auffallen. Falls allerdings die Grundthese in ihrer Einfachheit richtig ist, dass alte Instrumente generell einen höheren relativen Anteil von Obertönen aufweisen und der relative Anteil des Grundtons bei den modernen Instrumenten höher ist, sollte dies auch im Mittelwert erkennbar sein und ist vielleicht sogar einfacher zu erkennen als in den stark streuenden Verläufen der Tristimulus-Werte.

Die Ergebnisse der Mittelwertbildung sind für die 24 Instrumente im Pianissimo und im Fortissimo in Tabelle 6.1 dargestellt. Auch bei dieser vereinfachten Art der Darstellung offenbart sich nicht sofort ein Trend. Daher werden in einem weiteren Schritt die Differenzen der Mittelwerte der modernen und der historischen Instrumente gebildet. Aufgrund der starken Variabilität der Primärdaten, die im vorherigen Kapitel dargestellt sind, erscheint es nicht als sinnvoll, einen geringen Unterschied im Mittelwert bereits als Trend zu interpretieren. Bei den Tristimulus-Werten wird daher hier nur eine Abweichung von mehr als 0,05 als signifikant angesehen. Ein Unterschied um mehr als 0,05 wird demzufolge als Hinweis auf einen echten Trend gewertet.

Instrument	T1 Hist.	T1 Mod.	T2 Hist.	T2 Mod.	T3 Hist.	T3 Mod.
Violine FF	0,3590	0,4496	0,3591	0,2766	0,2610	0,2360
Violinen PP	0,4252	0,5358	0,4113	0,3116	0,1592	0,1450
Viola FF	0,3363	0,4520	0,3535	0,3631	0,3005	0,1802
Viola PP	0,4612	0,5227	0,4064	0,3530	0,1280	0,1186
Violoncello FF	0,3647	0,3483	0,3296	0,3705	0,2893	0,2772
Violoncello PP	0,4073	0,5053	0,3791	0,3448	0,2103	0,1410
Kontrabass FF	0,4625	0,3925	0,3484	0,3608	0,1764	0,2325
Kontrabass PP	0,5043	0,4790	0,3424	0,3295	0,1477	0,1748
Bassposaune FF	0,1873	0,1804	0,3603	0,3229	0,4451	0,4933
Bassposaune PP	0,3233	0,4852	0,3844	0,3635	0,2830	0,1466
Posaune FF	0,1817	0,2777	0,3715	0,3096	0,4454	0,4070
Posaune PP	0,2922	0,6201	0,4307	0,3084	0,2678	0,0673
Horn FF	0,2106	0,2567	0,2970	0,3308	0,4393	0,4104
Horn PP	0,5260	0,6473	0,3340	0,2471	0,1186	0,1002
Trompete FF	0,1787	0,2452	0,5022	0,4351	0,3106	0,3144
Trompete PP	0,4709	0,6148	0,4147	0,3299	0,1040	0,0429
Oboe FF	0,4219	0,3132	0,4124	0,4651	0,1590	0,2174
Oboe PP	0,5776	0,4354	0,3215	0,4456	0,0777	0,1102
Bassklarinette FF	0,3739	0,4104	0,2555	0,1855	0,3718	0,4047
Bassklarinette PP	0,8521	0,8515	0,1006	0,0850	0,0482	0,0594
Klarinette FF	0,5297	0,4796	0,2359	0,2629	0,2312	0,2539
Klarinette PP	0,8798	0,8900	0,0521	0,0614	0,0657	0,0477
Fagott FF	0,2029	0,2249	0,4524	0,5159	0,3457	0,2588
Fagott PP	0,2979	0,2862	0,4953	0,5482	0,2049	0,1629

Table 6.1.: Tristimulus-Mittelwerte T1, T2 und T3 für historische und moderne Instrumente im Pianissimo und Fortissimo

Tabelle 6.2 ist eine Übersicht über die Endergebnisse dieser Arbeit. Zum einen listet sie stichwortartig die bereits im Ergebnisteil identifizierten Abweichungen zwischen den historischen und modernen Instrumenten auf (für die modernen Instrumente), zum anderen sind die Differenzen der Mittelwerte der drei Tristimulus-Werte T1, T2 und T3 dargestellt. Negative Werte bedeuten dabei einen höheren relativen Anteil der modernen, positive Werte einen höheren Anteil für die historischen Instrumente. Zur besseren Übersicht sind alle Daten, die zum erwarteten Trend (erhöhter Grundtonintensität für moderne Instrumente, erhöhte Obertonintensitäten (T2 und T3) für die historischen Instrumente) gehören in der Tabelle grün markiert, während die den Trend entgegenlaufenden Daten rot markiert sind. Bereits ein erster Blick auf die Tabelle zeigt, dass nur drei der zwölf untersuchten Instrumente dem Trend entgegen laufen. Die Oboe, der Kontrabass und zum Teil die Klarinette haben in ihrer modernen Variante einen schwächeren Anteil des Grundtons und verstärkte Anteile der Obertöne. Ansonsten bestätigen aber die Daten aller anderen Instrumente die Erwartung schwächerer Obertöne bei den modernen Varianten. Auch die Werte des Spectral Roll Off bestätigen den Trend in den meisten Fällen, wobei ein erhöhter Roll Off hier vereinfachend als ein erhöhter Anteil von Obertönen angesehen wird. Für das Fagott gibt es zwei Messwerte, die ebenfalls rot markiert sind und dem Trend entgegenlaufen. In beiden Fällen sind es allerdings Werte, die nur geringfügig über der Signifikanzschwelle liegen. Gleichzeitig passen zwei andere Werte, die für das gleiche Instrument erhoben wurden, durchaus in den Trend, so dass zusammenfassend für das Fagott geschlossen werden kann, dass hier keine wirklich signifikanten Unterschiede zwischen der modernen und der historischen Version nachgewiesen werden konnten. Ähnliches gilt auch für die Klarinette. Hier liegt die Mittelwertdifferenz des T1 zwar nur knapp über der Signifikanzschwelle, zeigt aber eine erhöte Grundtonintensität für das historische Instrument. Alle anderen Werte liegen dagegen deutlich unter der Signifikanzschwelle.

Instrumentenpaar	T1	T2	T3	Auswertung aus dem Ergebnisteil für die moderne Variante
Violine FF	-0,0906	0,0825	0,0250	
Violine PP	-0,1106	0,0997	0,0142	stärkerer T1 für niedrige Töne
Viola FF	-0,1157	-0,0096	0,1203	stärkerer T1 für niedrige Töne
Viola PP	-0,6384	0,0534	0,0094	
Violoncello FF	0,0164	-0,0409	0,0121	
Violoncello PP	-0,0980	0,0343	0,0693	schwächerer Roll Off für hohe Töne
Kontrabass FF	0,0700	-0,0124	-0,0561	
Kontrabass PP	0,0253	0,0129	-0,0271	schwächerer T1 für niedrige Töne
Bassposaune FF	0,0069	0,0374	-0,0482	schwächerer T2 von D3 bis F4
Bassposaune PP	-0,1619	0,0209	0,1364	schwächerer T2 von C3 bis F4
Posaune FF	-0,0960	0,0619	0,0384	schwächerer T2 oberhalb von G3
Posaune PP	-0,3279	0,1223	0,2005	stärkerer T1 im gesamten Bereich
Horn FF	-0,0461	-0,0338	0,0289	schwächere T3 ab D4
Horn PP	-0,1213	0,0869	0,0184	schwächere T2 von D3 bis D4
Trompete FF	-0,0665	0,0671	-0,0038	
Trompete PP	-0,1439	0,0848	0,0611	
Oboe FF	0,1087	-0,0527	-0,0584	stärkerer Roll Off, stärkerer T2 von D5 bis B5
Oboe PP	0,1422	-0,1241	-0,0325	stärkerer T2 von D5 bis D5
Bassklarinette FF	-0,0365	0,0700	-0,0329	etwas schwächere T2 , T3 und Roll Off
Bassklarinette PP	0,0006	0,0156	-0,0112	etwas schwächere Roll Off
Klarinette FF	0,0501	-0,0270	-0,0227	stärkerer Roll Off
Klarinette PP	-0,0102	-0,0093	0,0180	
Fagott FF	-0,0220	-0,0635	0,0869	schwächere Roll Off, schwächerer T3 für hohe Töne
Fagott PP	0,0117	-0,0529	0,0420	schwächerer T3, T2 etwas höher

Tabelle 6.2.: Differenzen der Tristimulus-Mittelwerte T1, T2 und T3 für historische und moderne Instrumente im Pianissimo und Fortissimo; negativer Differenz-Wert bedeutet einen höheren Wert für die moderne Variante, ein positiver für die historische Variante; die den Trend bestätigenden Werte sind grün, abweichende rot und die Werte unterhalb der Signifikanzschwelle sind schwarz dargestellt

Abschließend soll an einem Beispiel nochmals ein Verlauf der Tristimulus-Werte diskutiert werden, um die starke Vereinfachung der Mittelwertbildung zu verdeutlichen. Wie aus Tabelle 6.2 ersichtlich, zeigt die Bassposaune im Pianissimo einen relativ ausgeprägten Unterschied zwischen dem modernen und dem historischen Instrument. Um dies an Hand des Verlaufs der Tristimulus-Werte zu veranschaulichen, wurde das ursprüngliche Liniendiagramm stark vereinfacht (Abb. 6.1). Die Linien wurden graphisch aus den Originaldaten (Abb. 5.10) ermittelt und skizzieren den Verlauf der Tristimulus-Werte rein qualitativ. In gestrichelten Linien sind die Verläufe für die moderne Version der Bassposaune eingetragen, während sich die durchgezogenen Linien auf das historische Instrument beziehen. Klar erkennbar ist nun die starke Erhöhung von T2 ab C3, wie es in der Tabelle 6.2 bei der Auswertung der Tristimulus-Verläufe aufgeführt wird. Das Diagramm enthält allerdings noch sehr viel mehr Informationen. Vor allem ab G2 ist der Anteil des Grundtons T1 für die moderne Version erhöht, während der T3-Wert für das historische Instrument vor allem unterhalb von C3 erhöht ist.

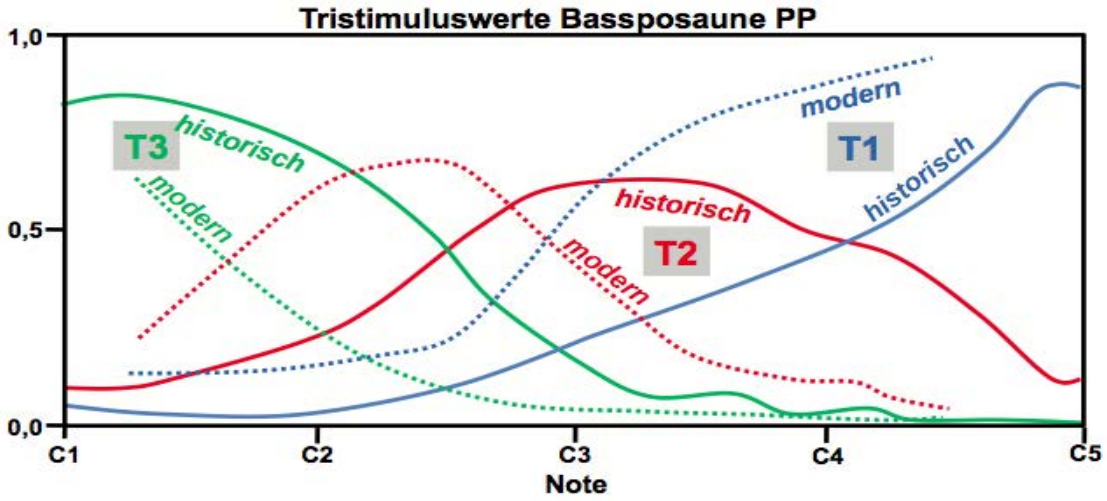

Abbildung 6.1.: Vereinfachter Verlauf der Tristimuluswerte T1, T2 und T3 der Bassposaune im Pianissimo

Eine detaillierte Diskussion der Abhängigkeiten von der Tonhöhe würde für die Vielzahl der hier untersuchten Instrumente den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass für die modernen Instrumente die Intensität des Grundtons im Verhähltnis zum Gesamtsignal höher liegt, als bei historischen Instrumenten. Während der Anteil der höheren Teiltöne, insbesondere des 2. bis 4. Teiltons (T2) bei den historischen höher ist.

7. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, einen systematischen Unterschied in der Klangfarbe verschiedener Orchesterinstrumente mittels signalbezogener Deskriptoren zu identifizieren. Da die Klangfarbe eine multidimensionale Größe und damit von unterschiedlichen Faktoren abhängig ist, wurde sich in dieser Arbeit auf Unterschiede der spektralen Zusammensetzung eines Instrumentenklangs der historischen und modernen Instrumente konzentriert. Grundlage dafür waren die am Fachgebiet Audiokommunikation entstandenen Aufnahmen historischer und moderner Orchesterinstrumente. Für 33 Instrumente wurden der Spectral Centroid, der Spectral Roll Off und die Tristimulus-Werte für die jeweils im Pianissimo und Fortissimo aufgenommenen, kompletten Töne berechnet. 24 der 33 Instrumente wurden in einem direkten Vergleich der historischen und der modernen Variante gegenübergestellt und genauer untersucht. Damit entstanden 12 Instrumentenvergleiche, jeweils im Pianissimo und im Fortissimo. Dabei stellten sich die Tristimulus-Werte als besonders hilfreich heraus, um einen Unterschied von historischen und modernen Orchesterinstrumenten zu identifizieren. Insgesamt zeigen 9 der 12 Instrumentenvergleiche, dass bei den modernen Instrumenten der relative Anteil der Obertöne zur Gesamtenergie des Signals geringer und damit der relative Anteil des Grundtons höher liegt, als bei den historischen Varianten der Instrumente. Nur für den Vergleich der Kontrabässe, der klassischen Oboen und zu Teilen der Klarinetten konnte dieser Trend nicht bestätigt werden. Allerdings sind die gefundenen Unterschiede eher gering im Vergleich zur starken Streuung der Messdaten und weitere Untersuchungen, insbesondere ein Hörversuch, wären sinnvoll, um einen Unterschied in der Klangempfindung zu verifizieren.

Literaturverzeichnis

[ALP01] Agostini, G. ; Longari, M. ; Pollastri, E.: Musical instrument timbres classification with spectral features. In: *Multimedia Signal Processing, 2001 IEEE Fourth Workshop on* IEEE, 2001, S. 97–102

[ASA60] American ; Standard ; Association: *Acoustical Terminnology / American Standard Association (ASA).* 1960

[Bis74] Bismarck, G.: Timbre of steady sounds: A factorial investigation of its verbal attributes. In: *Acustica* 30 (1974), Nr. 3, S. 146–59

[Dic87] Dickreiter, M.: *Musikinstrumente.* Bd. 3287. Deutscher Taschenbuch Verlag, 1987

[Dic08] Dickreiter, M.: *Handbuch der Tonstudiotechnik.* Bd. 6. Saur, 2008

[Eis08] Eisenberg, G.: *Identifikation und Klassifikation von Musikinstrumentenklängen in monophoner und polyphoner Musik.* Cuvillier Verlag, 2008

[Ero01] Eronen, A.: Comparison of features for musical instrument recognition. In: *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001 IEEE Workshop on the* IEEE, 2001, S. 19–22

[Gre77] Grey, J.M.: Multidimensional perceptual scaling of musical timbres. In: *J. Acoust. Soc. Am* 61 (1977), Nr. 5, S. 1270–1277

[Hel70] Helmholtz, H.L.F. von: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik.* F. Vieweg und sohn, 1870

[IK93] Iverson, P. ; Krumhansl, C.L.: Isolating the dynamic attributes of musical timbre. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 94 (1993), Nr. 5, S. 2595–2603

[Jen02] Jensen, K.: The timbre model. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 112 (2002), Nr. 5, S. 2238–2238

[KMW+94] Krimphoff, J. ; McAdams, S. ; Winsberg, S. u. a.: Caractérisation du timbre des sons complexes. II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique. (1994)

[Krä11] Krämer, J.: *Sound Power of modern and historical Orchestral Instruments Part I: String Instruments*, Technische Universität Berlin, Diplomarbeit, 2011

[KSPW10] Krämer, J. ; Schultz, F. ; Pollow, M. ; Weinzierl, S.: Zur Schallleistung von modernen und historischen Orchesterinstrumenten I: Streichinstrumente. In: *Fortschritte der Akustik: Tagungsband d* 36 (2010)

[Lak00] Lakatos, S.: A common perceptual space for harmonic and percussive timbres. In: *Attention, Perception, & Psychophysics* 62 (2000), Nr. 7, S. 1426–1439

[Ler09] Lerch, A.: *Software-based extraction of objective parameters from music performances.* GRIN Verlag, 2009

[MCMW03] Marozeau, J. ; Cheveigné, A. de ; McAdams, S. ; Winsberg, S.: The dependency of timbre on fundamental frequency. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 114 (2003), Nr. 5, S. 2946–2957

[Mer75] Mertens, P.H.: *Die Schumannschen Klangfarbengesetze und ihre Bedeutung für die Übertragung von Sprache und Musik.* Erwin Bochinsky, 1975

[Mey95] Meyer, J.: Akustik und musikalische Aufführungspraxis, 3. erw. In: *Auflage, Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt am Main* (1995)

[MM09] McLoughlin, I. ; MyiLibrary: *Applied speech and audio processing: with Matlab examples.* Cambridge University Press, 2009

[MW08] Meyer, J. ; Weinzierl, S.: Musikalische Akustik. In: *Handbuch der Audiotechnik* (2008), S. 123–180

[MWD+95] McAdams, S. ; Winsberg, S. ; Donnadieu, S. ; Soete, G. ; Krimphoff, J.: Perceptual scaling of synthesized musical timbres: Common dimensions, specificities, and latent subject classes. In: *Psychological research* 58 (1995), Nr. 3, S. 177–192

[PBM09] Pollow, M. ; Behler, G. ; Masiero, B.: Measuring directivities of natural sound sources with a spherical microphone array. In: *Proceedings of the 1st Ambisonics Symposium Graz*, 2009

[PBS10] Pollow, M. ; Behler, G.K. ; Schultz, F.: Musical instrument recording for building a directivity database. In: *Fortschritte der ANustiN: Tagungsband d* 36 (2010)

[Pee04] Peeters, G.: A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. In: *CUIDADO IST Project Report (IRCAM, Paris)* (2004), S. 1–25

[PGS+11] Peeters, G. ; Giordano, B.L. ; Susini, P. ; Misdariis, N. ; McAdams, S.: The Timbre Toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 130 (2011), Nr. 5, S. 2902–2916

[PJ82] Pollard, HF ; Jansson, EV: A tristimulus method for the specification of musical timbre. In: *Acta Acustica united with Acustica* 51 (1982), Nr. 3, S. 162–171

[Plo70] Plomp, R.: Timbre as a multidimensional attribute of complex tones. In: *Frequency analysis and periodicity detection in hearing* (1970), S. 397–414

[Reu98] Reuter, C.: Wie und warum in der Geschichte der Klangfarbenforschung meistenteils am Klang vorbeigeforscht wurde. In: *Niemöller, Klaus Wolfgang/Gätjen, Bram (Hg.): Perspektiven und Methoden einer Systemischen Musikwissenschaft. Bericht über das Kolloquium im Musikwissenschaftlichen Institut der Universität zu Köln*, 1998, S. 293–302

[Reu02] Reuter, C.: *Klangfarbe und Instrumentation.* Lang, 2002

[Rie92] Riemann, H.: *Brockhaus Riemann Musiklexikon.* Bd. 4. Schott, 1992

[Rös72] Rösing, H.: *Die Bedeutung der Klangfarbe in traditioneller und elektronischer Musik: Eine sonagraphische Untersuchung.* Bd. 12. Katzbichler Musikverlag, 1972

[Sch29] Schumann, E.: *Die Physik der Klangfarben*, Diss., 1929

[Set05] Sethares, W.A.: *Tuning, timbre, spectrum, scale.* Springer Verlag, 2005

[Stu90] Stumpf, C.: *Tonpsychologie.* Bd. 2. S. Hirzel, 1890

[Stu26] Stumpf, C.: *Die Sprachlaute.* J. Springer, 1926

[SWT04] Schubert, E. ; Wolfe, J. ; Tarnopolsky, A.: Spectral centroid and timbre in complex, multiple instrumental textures. In: *Proceedings of the international conference on music perception and cognition, North Western University, Illinois*, 2004, S. 112–116

[TSB05] Terasawa, H. ; Slaney, M. ; Berger, J.: The thirteen colors of timbre. In: *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2005. IEEE Workshop on* IEEE, 2005, S. 323–326

[VB74] Von Bismarck, G.: Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds. In: *Acustica* 30 (1974), Nr. 3, S. 159–172

[Wei08a] Weinzierl, S.: Grundlagen. In: *Handbuch der Audiotechnik* (2008), S. 1–39

[Wei08b] Weinzierl, S. (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik.* Berlin and Heidelberg : Springer, 2008 `http://www.worldcat.org/oclc/244008648`. – ISBN 3540343008

[Zöl97] Zölzer, U.: *Digitale Audiosignalverarbeitung.* Teubner, 1997

Abbildungsverzeichnis

3.1. Spektrum einer Violine im Fortissimo des Kammertons A4 7
3.2. Vokalformanten nach [Mey95] 8
3.3. Zeitbereich eines Klangs [Dic87] 9

4.1. Anzahl der möglichen Teiltöne 22

5.1. Vergleich der Violinen im ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 26
5.2. Vergleich der Violinen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 27
5.3. Vergleich der Violen ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 28
5.4. Vergleich der Violen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 29
5.5. Vergleich der Violoncelli ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 30
5.6. Vergleich der Violoncelli pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 31
5.7. Vergleich der Kontrabässe ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 32
5.8. Vergleich der Kontrabässe pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 33
5.9. Vergleich der Bassposaunen ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 35
5.10. Vergleich der Bassposaunen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 36
5.11. Vergleich der Posaunen ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 37

5.12. Vergleich der Posaunen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 38
5.13. Vergleich der Hörner ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 39
5.14. Vergleich der Hörner pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 40
5.15. Vergleich der Trompeten ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 41
5.16. Vergleich der Trompeten pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 42
5.17. Vergleich der Oboen ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 44
5.18. Vergleich der Oboen pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 45
5.19. Vergleich der Klarinetten ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 46
5.20. Vergleich der Klarinetten pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 47
5.21. Vergleich der Bassklarinetten ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 48
5.22. Vergleich der Bassklarinetten pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 49
5.23. Vergleich der Fagotte ff; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 50
5.24. Vergleich der Fagotte pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 51

6.1. Vereinfachter Verlauf der Tristimuluswerte T1, T2 und T3 der Bassposaune im Pianissimo . . . 57

A.1. Vergleich der frühromantischen Posaune ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) . . . 69

A.2. Vergleich der Klappenflöte ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 70
A.3. Vergleich der Traversflöte ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 71
A.4. Vergleich der Querflöte ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 72
A.5. Vergleich der romantischen Oboe ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 73
A.6. Vergleich des Englischhorn ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 74
A.7. Vergleich des Barock-Fagott ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 75
A.8. Vergleich des Dulzian ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 76
A.9. Vergleich des Kontrafagott ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten) 77

Tabellenverzeichnis

6.1. Tristimulus-Mittelwerte T1, T2 und T3 für historische und moderne Instrumente im Pianissimo und Fortissimo 54
6.2. Differenzen der Tristimulus-Mittelwerte T1, T2 und T3 für historische und moderne Instrumente im Pianissimo und Fortissimo; negativer Differenz-Wert bedeutet einen höheren Wert für die moderne Variante, ein positiver für die historische Variante; die den Trend bestätigenden Werte sind grün, abweichende rot und die Werte unterhalb der Signifikanzschwelle sind schwarz dargestellt 56

A.1. Übersicht der Streichinstrumente 66
A.2. Übersicht der Blechblasinstrumente 67
A.3. Übersicht der Holzblasinstrumente 68

A. Anhang

Instrument	Stimmton-frequenz	Instrumen-talist	Instrumentenbauer / Manufaktur
Violine	430 Hz	Daniel Deuter	Guaneri-KopieNeil Kristóv Értz, 1998 E-Saite: Darm, Damian Dlugoleci 0.62mm A-Saite: Darm, 0.74mm D-Saite: Darm +0.25mm Silber, 1.12mm G-Saite: Darm, Silber umsponnen, Durchmesser unbekannt
Violine	443 Hz	Rino Yamamoto	von 1902 aus Mailand Leandro Bisiach da Milano Kopie StradivariBogen Satori
Klassische Viola	430 Hz	Anja Graewel	Christoph Leihdolff Original von 1745
Viola	442 Hz	Julia Rarisch	Felix Scheit, 90er Chalupetzky-Bogen Korpusgröße 41.5cm
Violoncello	430 Hz	Antje Geusen	Kopie von 2007, Tilman Muthesius, Potsdam Original: Matteu Goffreller 1730, Venedig Schafsdarmsaiten (beide tiefsten mit Silber umwickelt) Klassischer Bogen (Original, Dodd) 1820 - 1830
Violoncello	443 Hz	Katharina Jäckle	Roth, 1934
Klassischer Kontrabass	430 Hz	Miriam Wittulski	Italienisches Instrument (Pilat-Schule) von 1880 (Original) Bogen von 1880Darmseiten (3 Blanke, E-Saite umsponnen)
Kontrabass	443 Hz	Micha Kaplan	Deutschland, etwa 100 Jahre alt

Tabelle A.1.: Übersicht der Streichinstrumente

Instrument	Stimmton-frequenz	Instrumen-talist	Instrumentenbauer / Manufaktur
Klassisch frühromantische Posaune (Altposaune)	452 Hz	Sebastian Krause	C. F. Sattler, Original Schallstück (Leipzig, 1830, frühe Romantik) Zug nicht mehr Original (nachgebaut nach Original Sattler (1830), 2008) Mundstück nach barockem Vorbild
Klassische Bassposaune (F)	430 Hz	Clemens Erdmann	Kopie nach Schmied-Pfaffendorf (?) Zug von Ewald Meinl, Geretsried, 2008 Schallstück Gerd Kempkes Mundstück (Kopie Rainer Egger aus Basel, 2004)
Bassposaune (B/F/G)	441 Hz	Daniel Ploeger	Modus (USA)
Klassische Tenorposaune	430 Hz	Clemens Erdmann	Kopie, Jürgen Voigt, Markt Neukirchen (Vogtlang)
Tenorposaune (B/F)	443 Hz	Daniel Ploeger	Bach 42 G
Klassisches Naturhorn	430 Hz	Aki Yamauchi	JungwirthModell Lausmann (Kopie) Orignal von ??? (Zeit von Beethoven, Mozart)
Doppelhorn	443 Hz	Daniel Costello	Mainz, Gebrüder Alexander, Modell 1031994
Naturtrompete (D)	415 Hz	Nenad Markovic	Rainer Egger, 2003 (Nachbildung von 1800)
Trompete (C)	443 Hz	Nenad Markovic	Vincent Bach, Modell 239

Tabelle A.2.: Übersicht der Blechblasinstrumente

Instrument	Stimmton-frequenz	Instrumen-talist	Instrumentenbauer / Manufaktur
Klappenflöte	430 Hz	Emiko Matsuda	Instrumentenbauer unbekannt von 1850 (Original)
Traversflöte	415 Hz	Emiko Matsuda	Tutz, Innsbruck, ca. 2006
Querflöte	443 Hz	Dvorah Gordin	Brannen-Coopergoldenes Rohrsilberne Mechaniksilberne Kamine 2002
Klassische Oboe (historisch)	430 Hz	Xenia Löffler	Jakob Grundmann 2-klappig aus Buchsbaum Kopie von 1780
Oboe	443 Hz	Robert Herden	Ludwig Frank, 2006
Romantische Oboe (französisch, historisch)	438 Hz	Xenia Löffler	Tulou, Paris (70-1851-2) Original von 1851
Englischhorn	443 Hz	Robert Herden	Ludwig Frank, 2007
Klassische Clarinette (B)(Historisch)	430 Hz	Annette Thomas	Erbauer: Peter von der Poel, Utrecht Kopie von Grenser (Dresden) Original von Mitte 18. Jhdt
Klarinette (B)	443 Hz	Bernhard Nusser	Herbert WurlitzerNeustadt (Aisch) Solistenmodell, 1990
Bassklarinette	443 Hz	Bernhard Nusser	Herbert WurlitzerNeustadt (Aisch) bis tief-C, 1993
Basetthorn (F)	430 Hz	Annette Thomas	Gebaut von: Peter von der Poel, Utrecht Kopie eines Originals von Mitte 18. Jhdt (von Herrn Lodtz aus Wien)
Barock Fagott	415 Hz	Adrian Rovatkay	Kopie von Guntram Wolf von dem Original HKICW (ca. 1690) (helleres Holz als klassisches)
Dulzian	440 Hz	Adrian Rovatkay	Bernhard Junghänel (Kopie nach anonymen Modell aus Meran, ca. 1600)
Fagott (hist., klassisch)	430 Hz	Adrian Rovatkay	Finke, Original 1810 deutsches (grenserartiges) Modell
Fagott	443 Hz	Zoltan Kovacs	Püchner (90er) Seriennr.: 12361
Kontrafagott	443 Hz	Zoltan Kovacs	Heckel (90 o. etw. älter)

Tabelle A.3.: Übersicht der Holzblasinstrumente

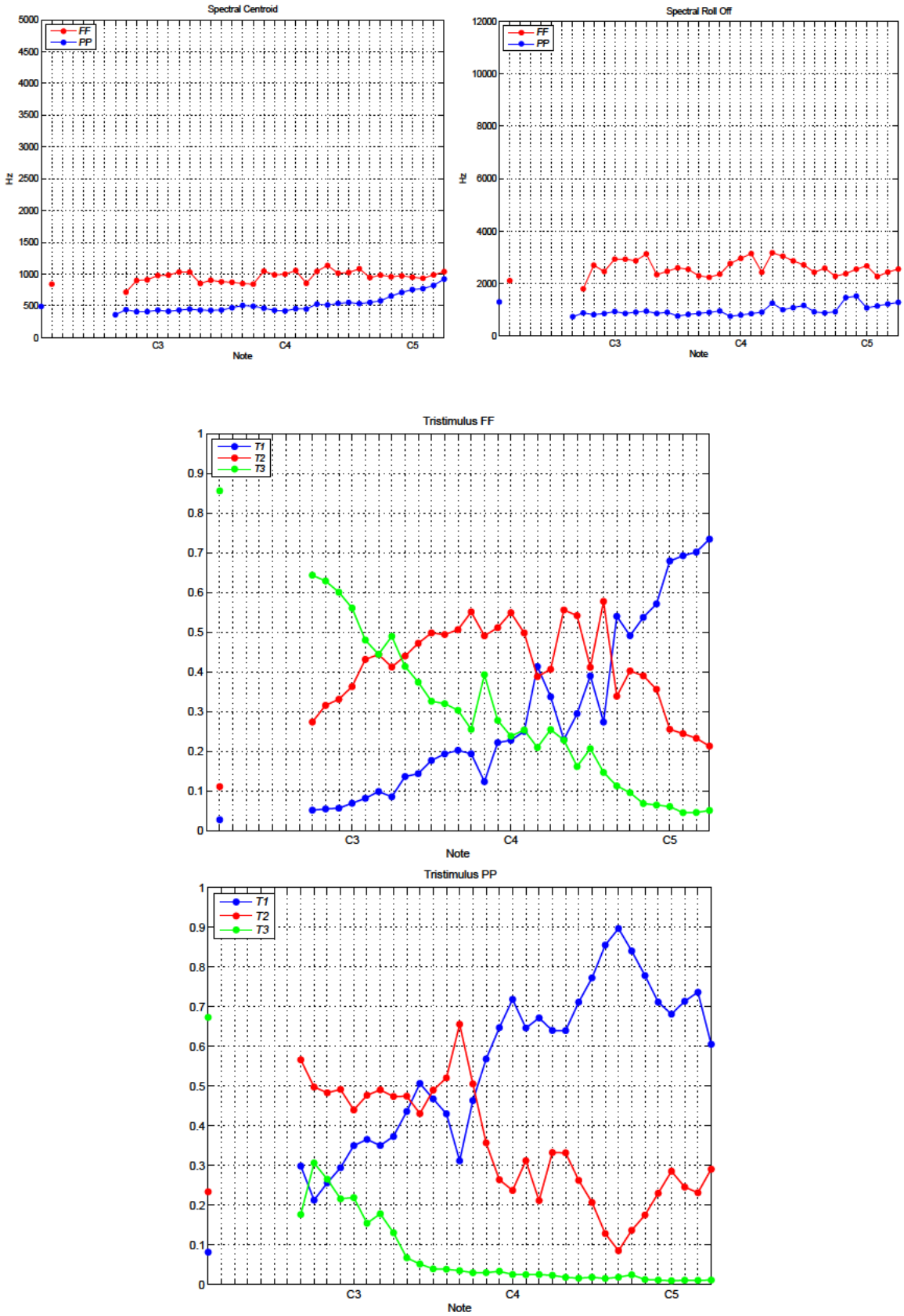

Abbildung A.1.: Vergleich der frühromantischen Posaune ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

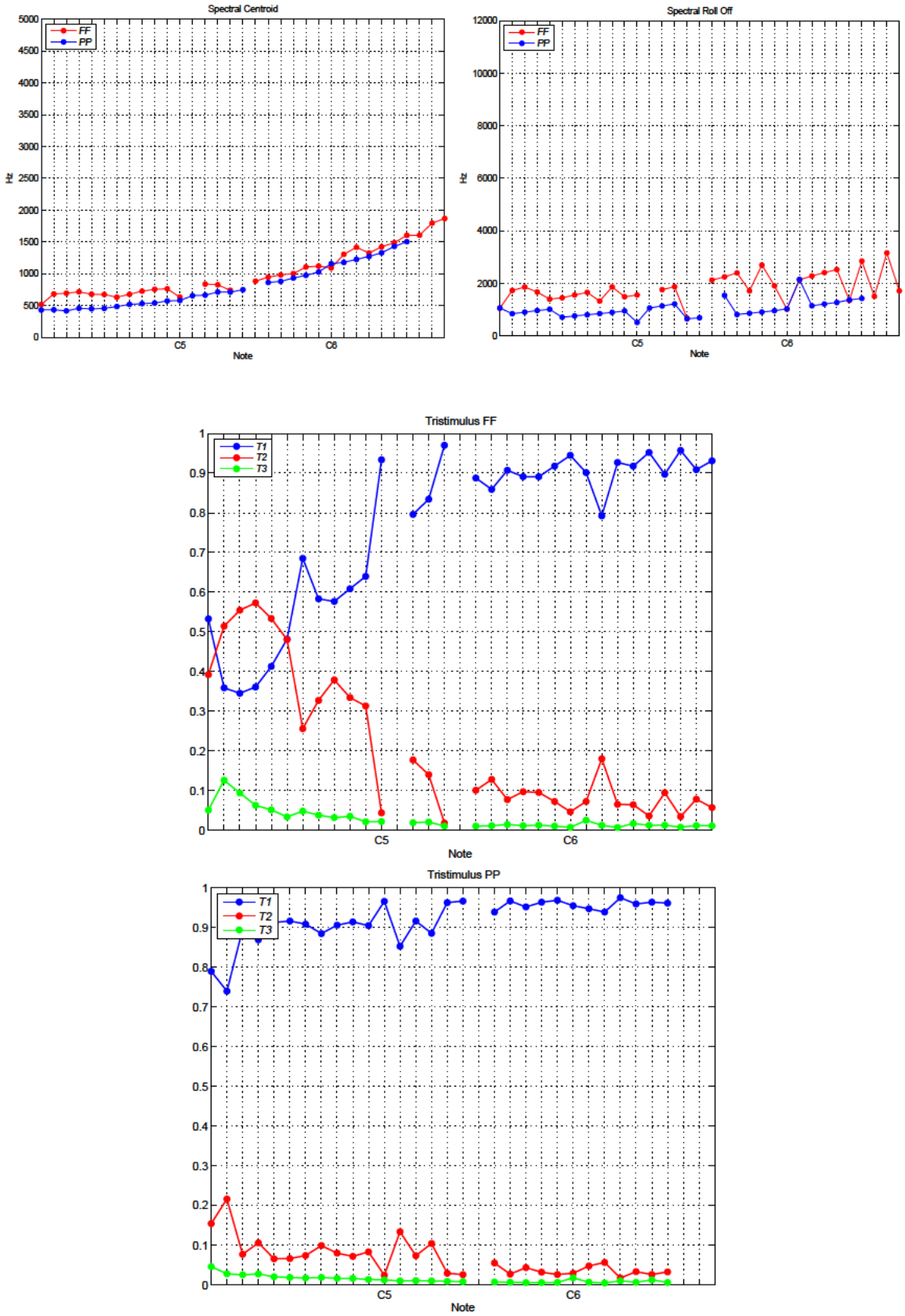

Abbildung A.2.: Vergleich der Klappenflöte ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

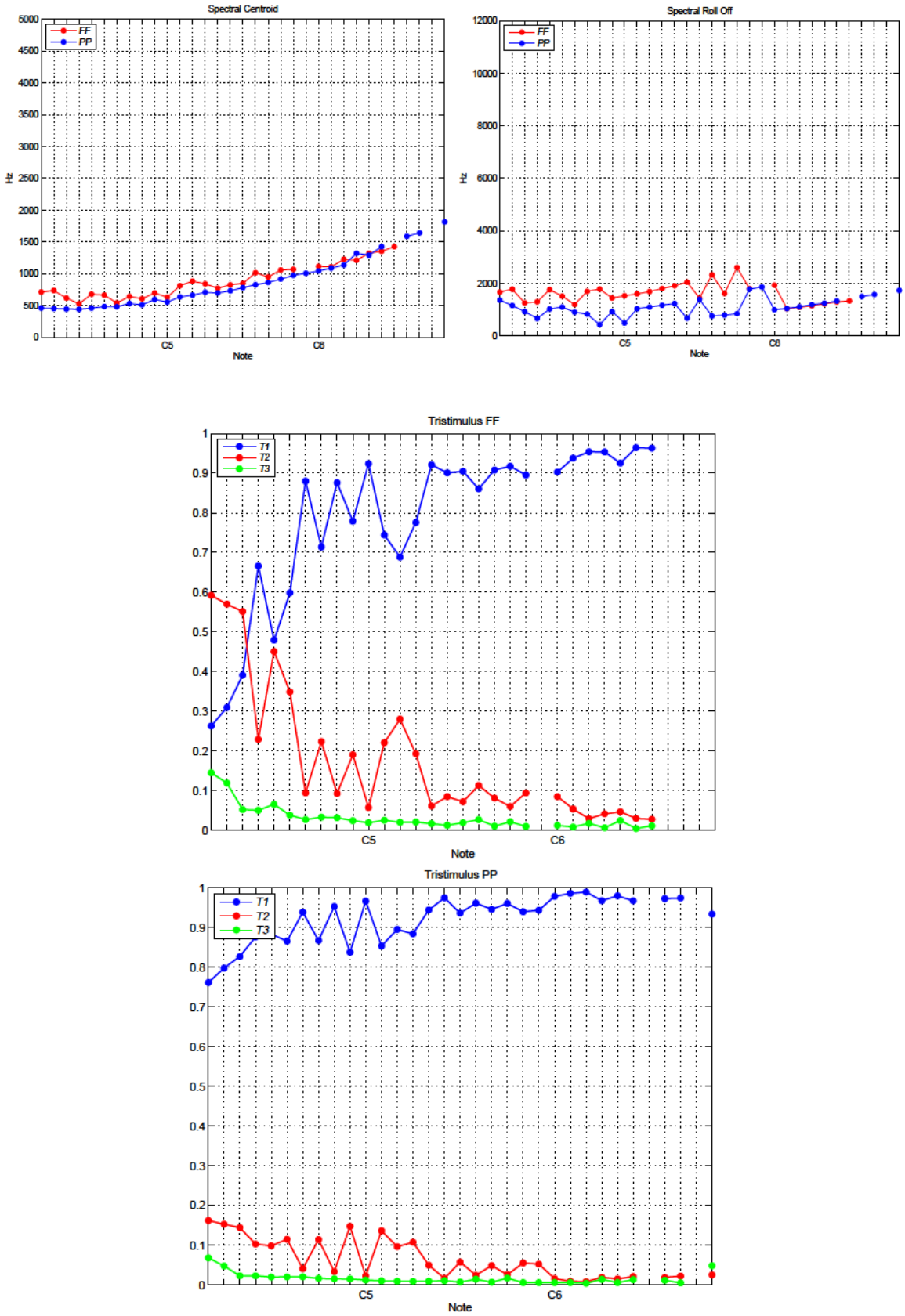

Abbildung A.3.: Vergleich der Traversflöte ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

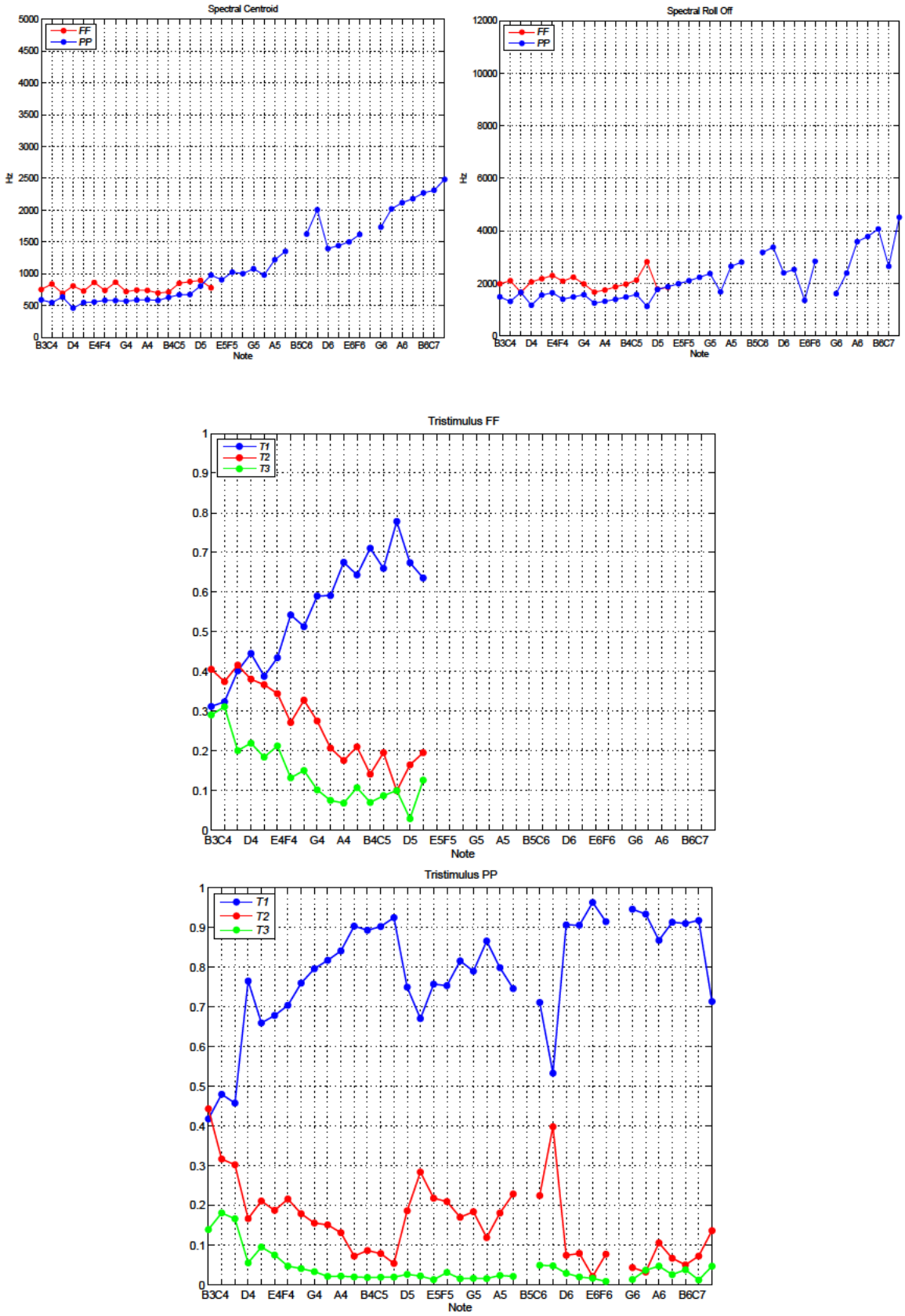

Abbildung A.4.: Vergleich der Querflöte ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

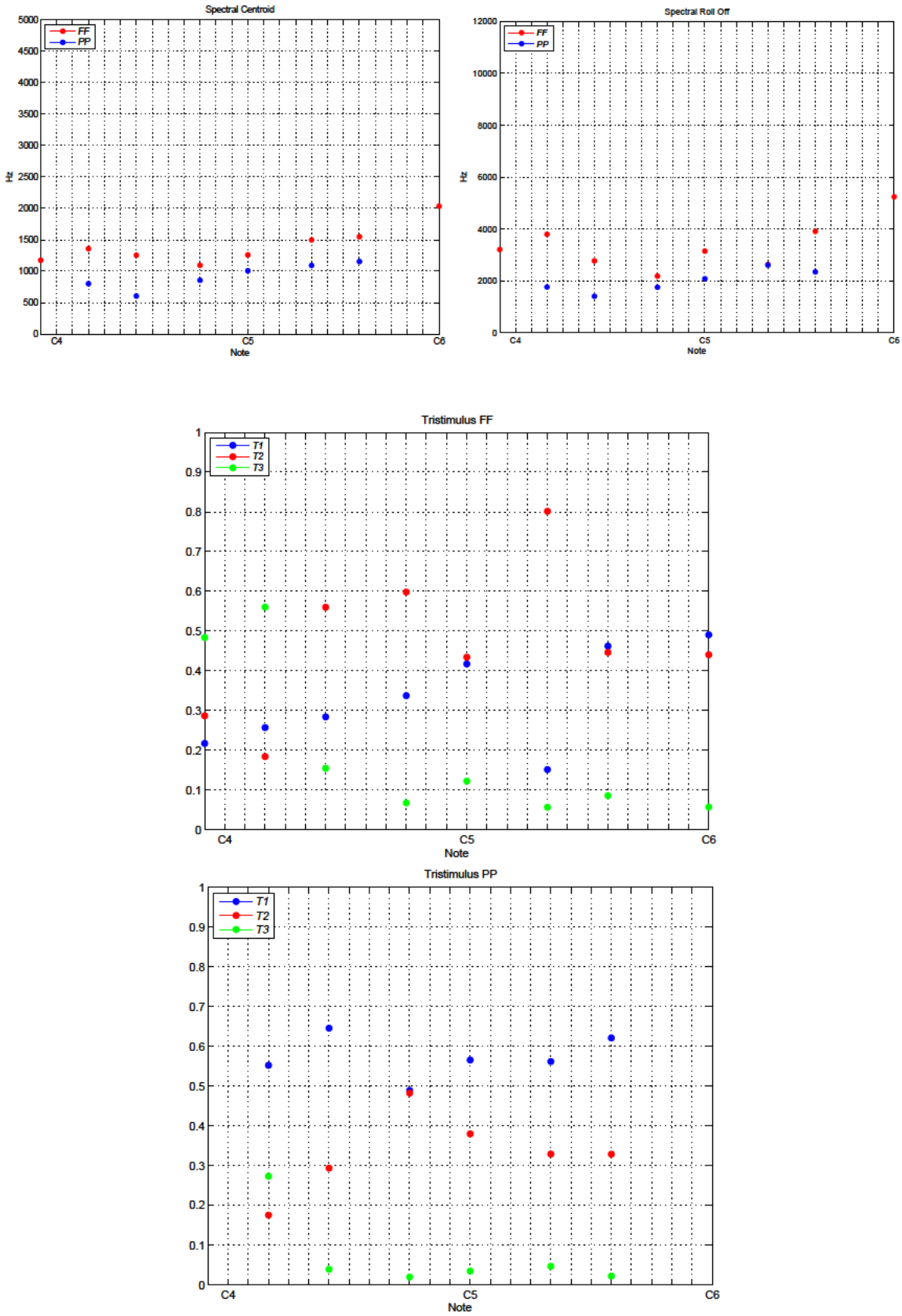

Abbildung A.5.: Vergleich der romantischen Oboe ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

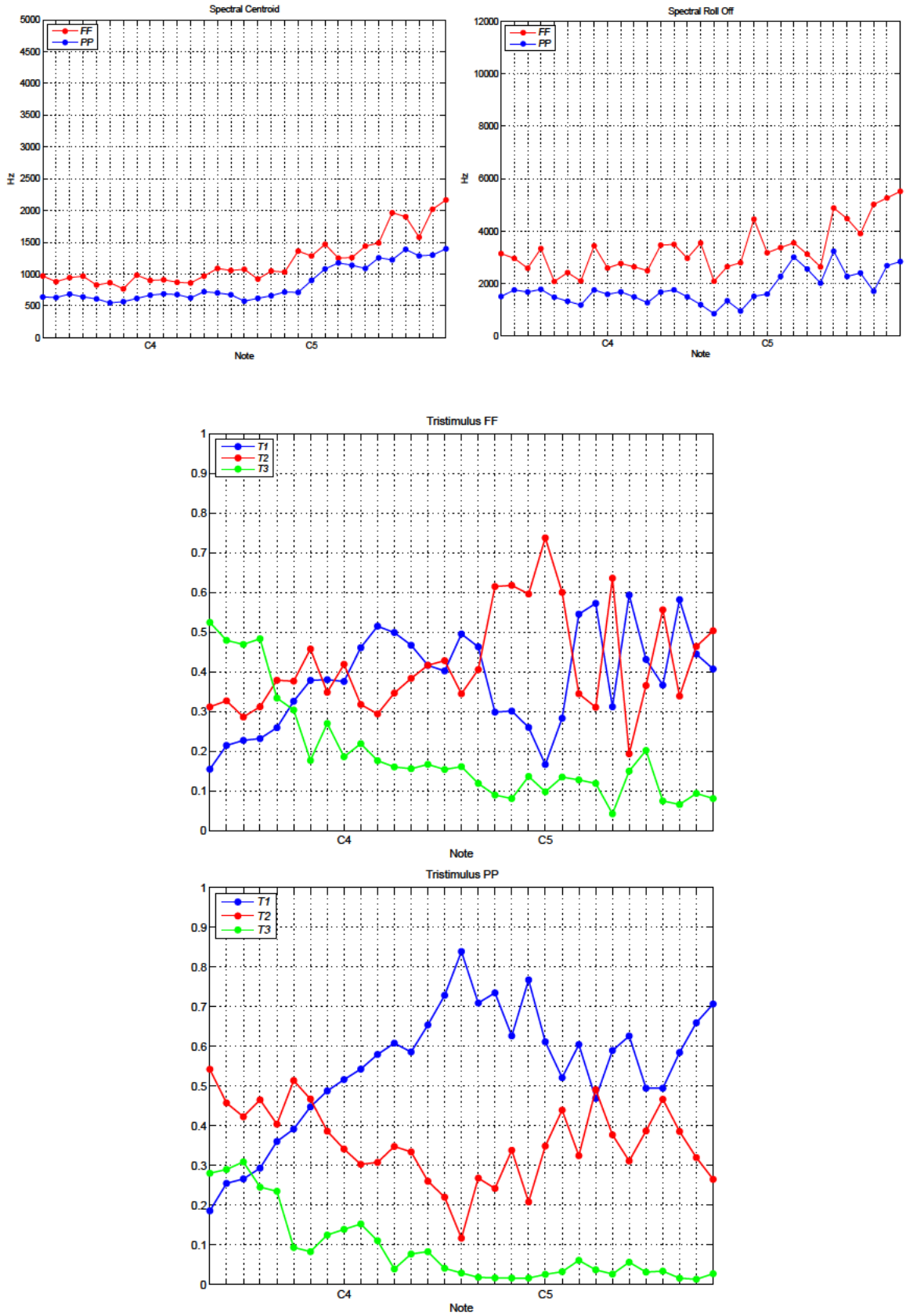

Abbildung A.6.: Vergleich des Englischhorn ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

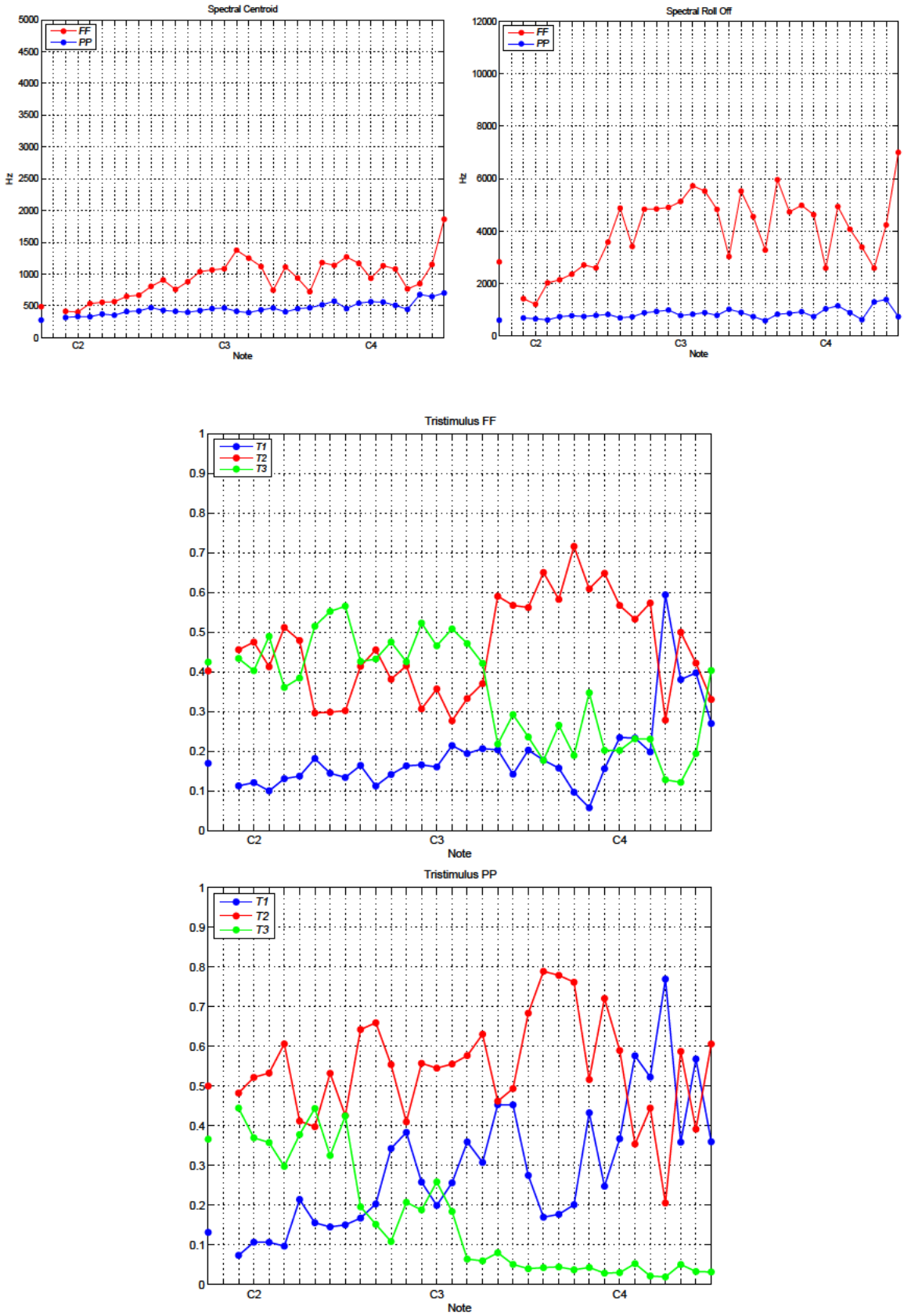

Abbildung A.7.: Vergleich des Barock-Fagott ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

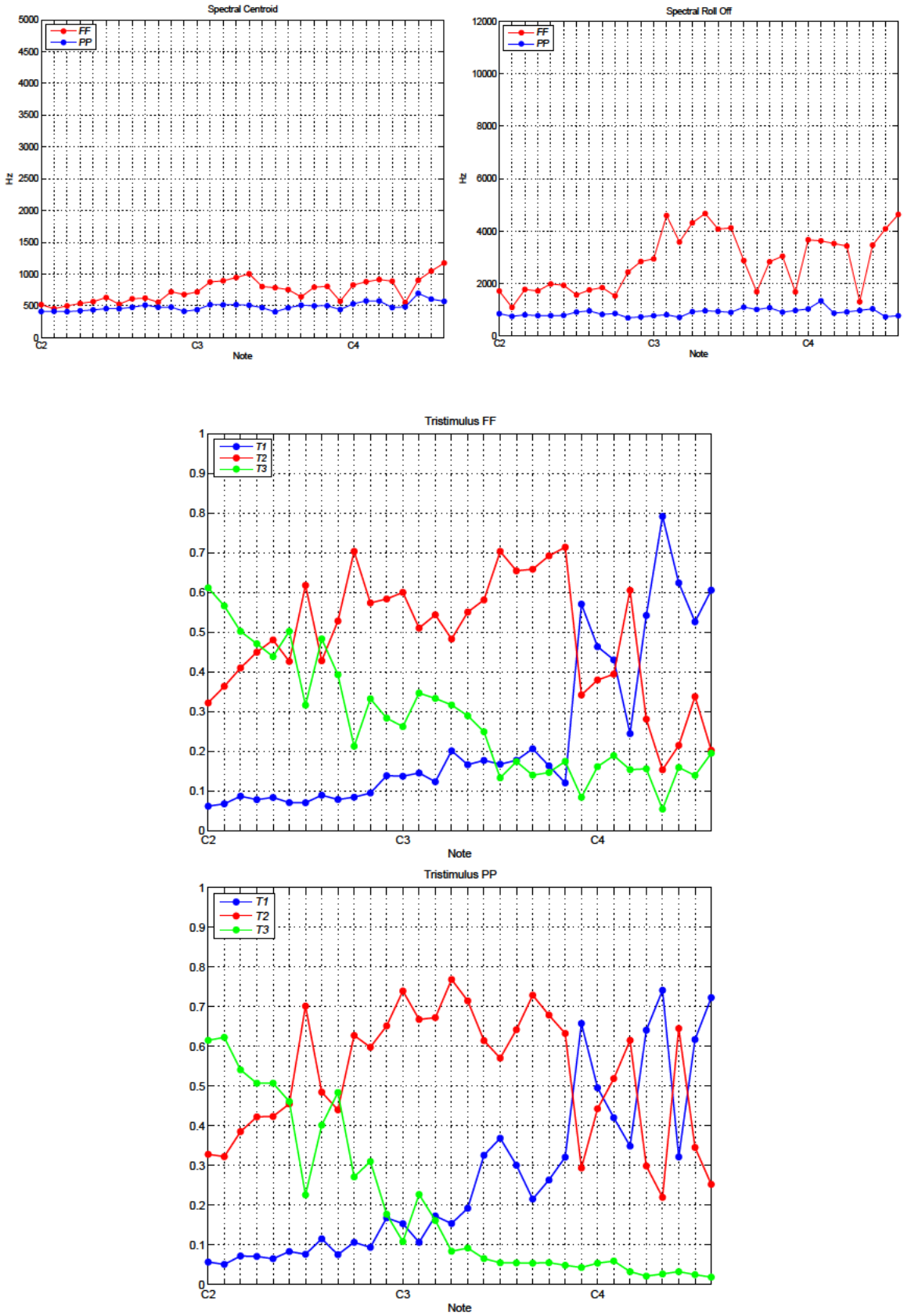

Abbildung A.8.: Vergleich des Dulzian ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)

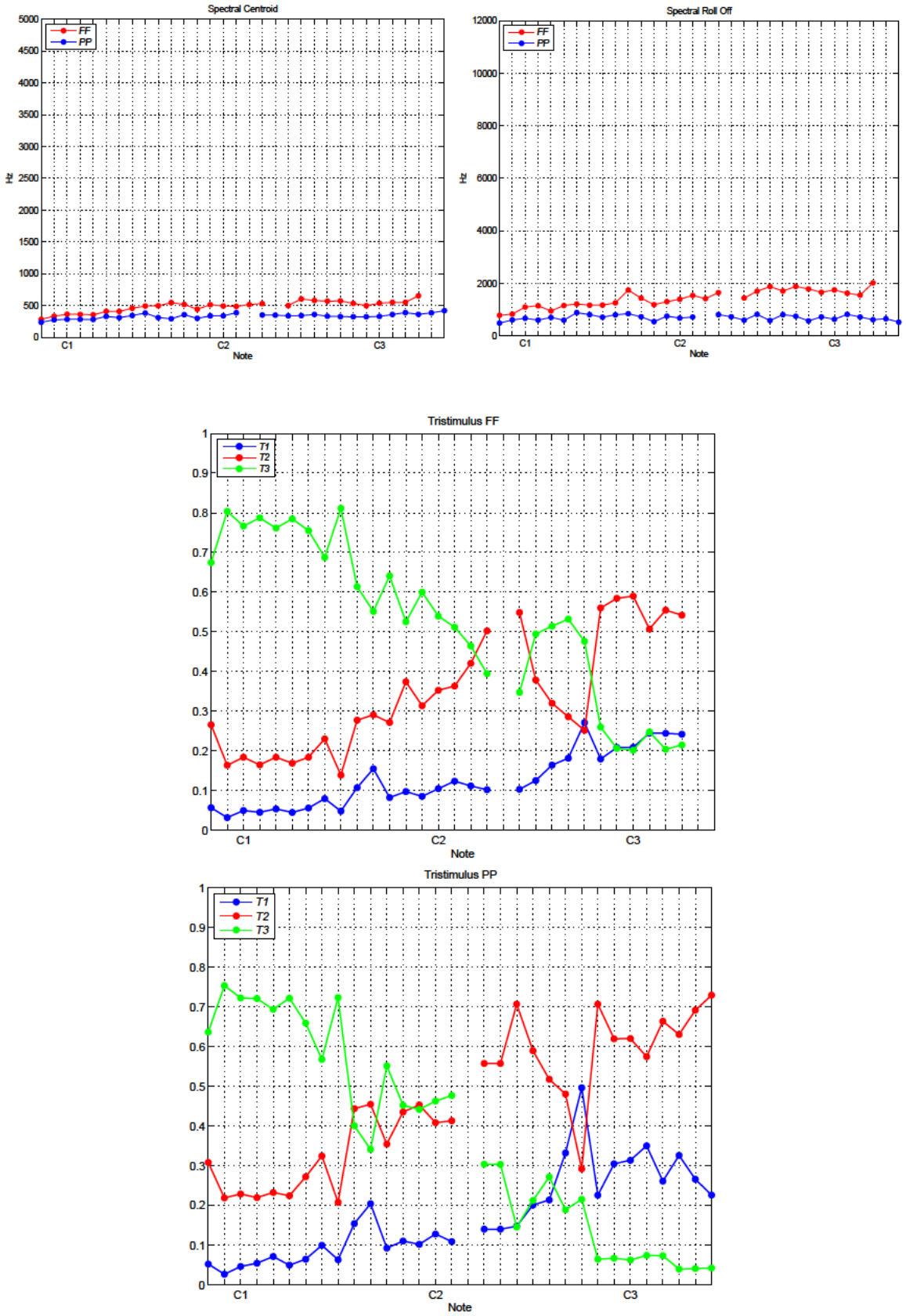

Abbildung A.9.: Vergleich des Kontrafagott ff & pp; Spectral Centroid (oben links), Spectral Roll Off (oben rechts), Tristimulus historisch (Mitte) und Tristimulus modern (unten)