

Harmonisches Produktdesign mit Metriken der Musiktheorie

Tobias P. Ring¹, Petia Krasteva², Christian N. Klüver³, Thomas Vietor⁴, Sabine C. Langer⁵

¹ Institut für Akustik, 38106 Braunschweig, E-Mail: t.ring@tu-braunschweig.de

² Institut für Konstruktionstechnik, 38106 Braunschweig, E-Mail: p.krasteva@tu-braunschweig.de

³ TU Braunschweig, 38106 Braunschweig, E-Mail: c.kluever@tu-braunschweig.de

⁴ Institut für Konstruktionstechnik, 38106 Braunschweig, E-Mail: t.vietor@tu-braunschweig.de

⁵ Institut für Akustik, 38106 Braunschweig, E-Mail: s.langer@tu-braunschweig.de

Einleitung

Das Design bzw. das äußere Erscheinungsbild technischer Produkte vermittelt wichtige Informationen (bspw. über den Markenwert), löst Gefühle und Emotionen aus und spielt neben Eigenschaften wie Funktionalität und Sicherheit eine besonders wichtige Rolle beim Kaufentscheid [1]. Ein gut durchdachtes Produktdesign ist *harmonisch*, es bringt Mehrwert und ist ein strategisches Mittel zur Differenzierung am Markt. Es entsteht üblicherweise als Ergebnis eines Produktentwicklungsprozesses in dem, ausgehend von einer individuellen Aufgabenstellung, schrittweise verschiedene formal-ästhetische und technisch-funktionale Modelle erarbeitet, bewertet, zusammengeführt und weiter detailliert werden, bis ein optimales Gesamtprodukt, bspw. ein Gesamtfahrzeug, erhalten wird [2]. Eine wesentliche Herausforderung dabei ist die Kommunikation zwischen den Entwicklungsdisziplinen Design und Technik und im Einzelnen die Übersetzung „weicher“ Design-Eigenschaften wie Schönheit und Harmonie in „harte“ technische Anforderungen [3]. Das Produktdesign lässt sich schwer quantitativ beschreiben und die angewendeten Designregeln zur Gewährleistung einer gewünschten Harmonie bleiben oft ein Rätsel für Ingenieure. Sie bleiben daher in einer interdisziplinären Zusammenarbeit häufig unberücksichtigt [4].

Während die Harmonie im Produktdesign schwer definierbar ist, kennt die Musiktheorie einen mathematisch beschriebenen Harmoniebegriff. Dieser bietet eine Metrik zur Quantifizierung des Grades der Harmonie mehrerer Töne und der beteiligten Intervalle, bzw. der zugehörigen Frequenzverhältnisse. Mithilfe der elliptischen Fourier-Transformation kann eine 2D-Objektkontur in harmonische Komponenten zerlegt und diese mittels musikalischer Metriken hinsichtlich der Harmonie bewertet werden. Im Rahmen dieses Beitrages wird daher die Annahme untersucht, ob die musikalische Metrik der Harmonie auf die äußere Geometrie von Produkten angewendet werden kann.

Harmonie im Produktdesign

Die visuell-wahrnehmbare Harmonie materieller Gegenstände, bezeichnet oft als „Übereinstimmung“ oder „Einklang“, wird im Produktdesign als ästhetische Eigenschaft betrachtet, die während des Produktentwicklungsprozesses mithilfe der visuellen Sprache definiert wird. Es werden Gestaltmerkmale bzw. *Gestaltelemente* und *Gestaltordnungen* festgelegt, die die harmonische Wirkung

des Gesamtproduktes bestimmen, vgl. Abb. 1 oben. Dabei sind die visuellen Gestaltelemente wie Punkte, Linien, Flächen und Räume das „Alphabet“ der gestaltbildenden Sprache [5]. Unabhängig von der Gestalt haben die Gestaltelemente, ähnlich wie die einzelnen Töne in der Musik oder die einzelnen Buchstaben in der Linguistik, wenig Bedeutung. Diese entsteht erst durch die kreative Auswahl, Kombination und Anordnung durch Produktdesigner, die für das Erscheinungsbild technischer Produkte zuständig sind [1].

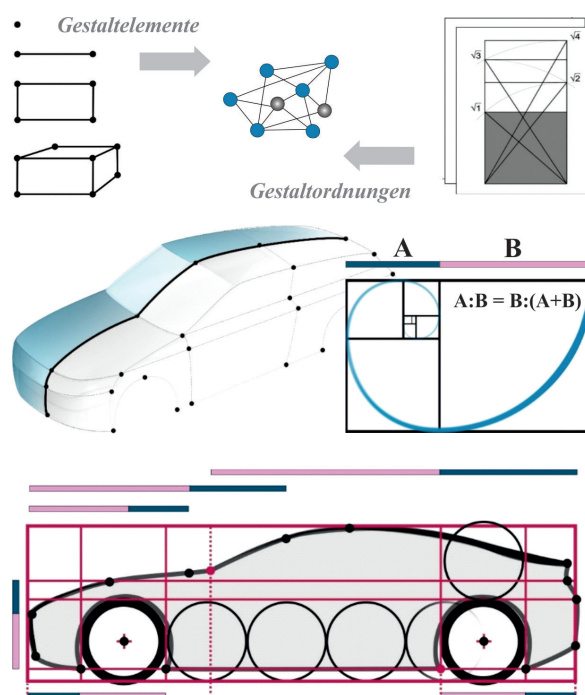


Abbildung 1: Allgemeine Gestaltelemente und -ordnungen (oben); Der Goldene Schnitt (Mitte); Anwendung des Goldenen Schnitts als Leitprinzip bei der Gestaltung der Seitenansicht eines Aston Martin DB 11 (unten).

Optimal genutzt, führt eine systematisch durchdachte Gestaltordnung zu einer guten Gestalt, zu einer hohen Gestaltqualität und zu wahrnehmbarem Wert (bspw. Markenwert). Diese Erkenntnis versuchte Birkhoff 1928 auch mathematisch zu fassen. Er formulierte das „ästhetische Maß“ (M) im Aufbau der Objekte als Verhältnis von „Ordnung“ (O) und „Komplexität“ (C), $M = O/C$. Nach seiner Formulierung ist die Gestalt eines Gegenstandes umso schöner und harmonischer, je einfacher und je höher sie geordnet ist [6].

Um eine hohe Ordnung der visuell-wahrnehmbaren Gestaltelemente in einer Einheit, bspw. einem technischen Produkt, zu gewährleisten, stehen im Design verschiedene allgemeine formal-ästhetische Ordnungsprinzipien zur Verfügung. Eines der bekanntesten Prinzipien ist der „goldene Schnitt“. Er lässt sich mit der Gleichung $A : B = B : (A + B)$ errechnen und bedeutet, dass sich das Kleinere (A) zum Größeren (B) so verhält, wie das Größere zum Ganzen, vgl. Abb. 1 Mitte. Da der goldene Schnitt in der Natur sehr häufig zu finden ist, wird er auch als „göttliche Proportion“ bezeichnet. Er findet Anwendung in der Kunst, in der Architektur und auch im Produktdesign [7]. Beispielsweise im Fahrzeugdesign wird er von einigen Marken wie Aston Martin als Hauptverhältnis zur harmonischen Organisation der Gestaltelemente verwendet, vgl. Abb. 1 unten. Weitere allgemeine Ordnungsprinzipien sind bspw. das Prinzip des Gleichgewichts (Balance), das Prinzip der Proportionalität und das Prinzip der Symmetrie. Darüber hinaus werden in der Gestaltpsychologie „Ordnungshilfen“ definiert, die im Produktdesign als allgemeiner Leitfadens zur Schaffung einer Ordnung angewendet werden. Beispiele dafür sind das „Gesetz der Nähe“, das „Gesetz der Gleichheit und Ähnlichkeit“, das „Gesetz der Geschlossenheit“, das „Gesetz der durchgehenden Kurven“, und das „Gesetz des gemeinsamen Schicksals“ [5]. Alle diese und weitere Prinzipien und Gesetze zur Schaffung von Ordnung und Harmonie werden von den erfahrenen Produktdesignern meistens intuitiv verwendet und kreativ nach einer individuellen Logik zusammengeführt. Mit exakten Zahlen und mathematischen Formeln, die wiederum die Schnittstelle zu der Technik bilden, wird wenig gearbeitet [1, 2, 3, 4].

Harmonie in der Musiktheorie

In der Musiktheorie ist mit der Harmonielehre eine Metrik bekannt, die es erlaubt, den Grad der Harmonie zweier Töne, im Sinne eine Wohlklangs, anhand mathematischer Gesetzmäßigkeiten auf Basis der beteiligten Tonfrequenzen zu ermitteln. Dazu wird das Verhältnis der Frequenzen, das *Intervall*, verwendet. Das Prinzip, durch Schichtung fester Intervalle die Töne einer Tonleiter zu konstruieren, wird Stimmung genannt. Dabei werden in vielen älteren Stimmungssystemen die verwendeten Intervalle als Brüche ganzer Zahlen formuliert, es handelt sich um *konsonante Intervalle* [8]. Allerdings ist nach [9] der Grad der Konsonanz der Intervalle einer so konstruierten Tonleiter unterscheidbar. Besonders konsonante Intervalle weisen dabei eher Zahlenverhältnisse mit kleinen Zahlen im Nenner auf, sie sind dem Grundton „näher“. Weniger konsonante (hier: dissonante) Intervalle weisen große Werte im Nenner des Frequenzverhältnisses auf, sie sind dem Grundton „ferner“. Die Begriffe „näher“ und „ferner“ sind hier im Sinne der Gewöhnung des menschlichen Gehörs an diese Töne, in Verbindung mit dem Grundton, zu verstehen. Wo der Wechsel von konsonant zu dissonant stattfindet, hat sich im Laufe der Zeit mehrfach verändert. Im Rahmen dieses Beitrages werden die Intervalle Oktave (Frequenzverhältnis 2:1), die Terz (5:4), die Quinte (3:2) und die Sexte (5:3) als konsonant definiert. Die Sekunde (9:8) und die Septime (15:8)

werden als dissonant, die Quarte (4:3) als neutral betrachtet.

Neben der Grundfrequenz eines Tons weisen reale Töne, abgesehen von synthetisch erzeugten Sinustönen, weitere Obertöne mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz auf. Die Menge aller Obertöne zusammen mit dem Grundton wird Teiltonreihe genannt. Die Obertöne lassen sich durch (ggf. mehrfache) Oktavierung in einen Frequenzbereich transponieren, der innerhalb der ersten Oktave des Grundtons liegt. Abhängig von ihrer Lage weisen die Obertöne verschiedene Intervalle zum Grundton auf. Dabei entspricht der erste Oberton der Oktave, der zweite Oberton entspricht der Quinte, gefolgt wieder von der Oktave. Alle weiteren Obertöne folgen analog. Alle Obertöne lassen sich somit prinzipiell hinsichtlich des Grades ihrer Konsonanz, bezogen auf den Grundton, bewerten. Tabelle 1 zeigt die Frequenzverhältnisse f/f_0 der ersten 15 Obertöne bezogen auf den (willkürlich gewählten) Grundton C (Ton Nr. 0) mit der Frequenz f_0 , die Tonbezeichnungen orientieren sich an der chromatischen Tonleiter nach Loy [10]. Von den insgesamt 16 Teiltönen sind somit 10 konsonant (fett dargestellt), sechs Töne sind dissonant.

Tabelle 1: Frequenzverhältnisse und Tonbezeichnungen der Teiltonreihe, konsonante Intervalle (bzgl. Ton Nr. 0) fett.

Nr.	0	1	2	3	4	5	6	7
f/f_0	1:1	2:1	3:2	2:1	5:4	3:2	7:4	2:1
Name	C	C	G	C	E	G	A#	C
Nr.	8	9	10	11	12	13	14	15
f/f_0	9:8	5:4	11:8	3:2	13:8	7:4	15:8	2:1
Name	D	E	F/F#	G	G#	A#	B	C

An dieser Stelle sei erwähnt, dass es Abweichungen zwischen dem Frequenzverhältnis des Obertons zum Grundton und den in gängigen Stimmungssystemen verwendeten Intervallen gibt. Die Abweichungen nehmen mit steigender Ordnung des Obertons zu. Oberhalb des 15. Obertons werden die Abweichungen so groß, dass eine eindeutige Zuordnung zwischen Oberton und zugehörigem Intervall nicht mehr möglich ist. Daher wird hier die Obertonreihe nur bis zum 15. Oberton betrachtet.

Analyse der Harmonie im Produktdesign mit Metriken der Musiktheorie

Die Musiktheorie liefert mit der Harmonielehre eine Metrik zur Quantifizierung von Konsonanz und Dissonanz zweier Töne. Dies kann auf die Analyse der Obertonreihe angewendet werden. Die Obertonreihe tritt im mathematischen Werkzeug der Fourier-Reihe (vgl. Gl. (1)) direkt auf, da die summierten Fourier-Komponenten jeweils Signale mit ganzzahligem Vielfachen k der Grundfrequenz sind:

$$f(t) \sim \frac{a_0}{2} \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k t - \varphi_k) \quad (1)$$

Die Fourier-Reihe ermöglicht die Approximation eines bekannten $f(t)$ Signals durch Superposition harmonischer Komponenten A_k , deren Frequenzen jeweils viel-

fache der Grundfrequenz des Signals sind. Dabei nimmt die Güte der Approximation mit zunehmender Anzahl Fourier-Komponenten zu. Mittels der Fourier-Reihe und der Kenntnis der Harmonik der Obertöne lässt sich somit die empfundene Konsonanz/ Dissonanz eines zugehörigen Signals ermitteln.

Die Fourier-Reihe kann auf den zweidimensionalen Fall erweitert werden und wird dann als Elliptische Fourier-Transformation (EFA) bezeichnet [11]. Dabei wird prinzipiell die Projektion einer Kontur in x- und y-Richtung jeweils mit einer Fourier-Reihe approximiert. Ein Beispiel ist in Abb. 2 dargestellt. Exemplarisch wird hier die (willkürlich gewählte) Außenkontur eines Boeing 747 Verkehrsflugzeuges mit der EFA approximiert. In Abb. 2 links-oben ist die Rekonstruktion mit einem Fourier-Koeffizienten zu sehen, das Ergebnis ist eine Ellipse in der x-y-Ebene. Wird die Anzahl der verwendeten Fourier-Komponenten erhöht, verbessert sich die Güte der Approximation. Bei der Verwendung von 16 Koeffizienten ist nahezu keine Abweichung mehr von der Originalgeometrie feststellbar.

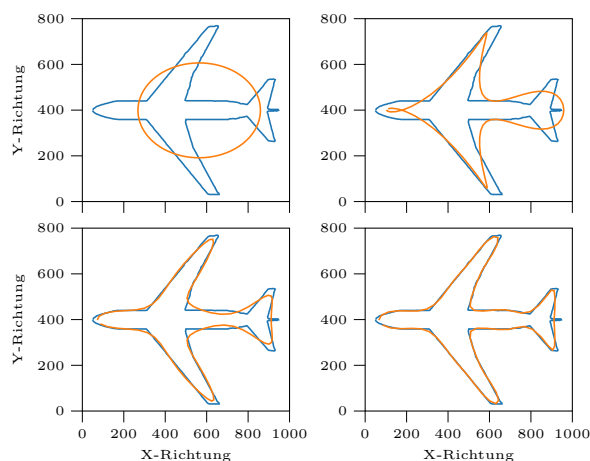


Abbildung 2: Rekonstruktion des Umrisses einer Boeing 747; blau: Originalgeometrie, orange : Approximation. Verwendung von 1 Fourier-Koeffizient (links-oben), 4 Fourier-Koeffizienten (rechts-oben), 10 Fourier-Koeffizienten (links-unten) und 16 Fourier-Koeffizienten (rechts-unten)

Die berechneten Fourier-Koeffizienten einer 2D-Kontur können nun mit der Obertonreihe hinsichtlich der Konsonanz interpretiert werden. In Abb. 3 sind die ersten 16 Fourier-Koeffizienten der in Abb. 2 (rechts-unten) dargestellten Kontur über den ersten 16 Teiltönen aufgetragen. Die berechneten Fourier-Koeffizienten werden zur Bewertung der insgesamt empfundenen Harmonie auf einen Einzahlwert umgerechnet. Dazu werden, jeweils für die x- und y-Projektion, die summierten Amplituden der konsonanten Komponenten auf die summierten Amplituden der dissonanten Komponenten bezogen:

$$K_{x,y} = \frac{\sum_i A_{x,y_i}}{\sum_j A_{x,y_j}} \quad (2)$$

mit $i \in [0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 15]$
und $j \in [6, 8, 10, 12, 13, 14]$

Ein Einzahlwert wird durch lineare Mittelung in x- und y-Richtung berechnet. Somit steht ein Maß zur Verfügung, mit dem die empfundene Konsonanz und damit die Harmonie einer Kontur berechnet werden kann. Diese Methode wird nachfolgend auf eine Reihe von Fahrzeug-Silhouetten angewendet. Die Ergebnisse werden mit der subjektiven Bewertung einer erfahrenen Expertin (Designerin) verglichen.

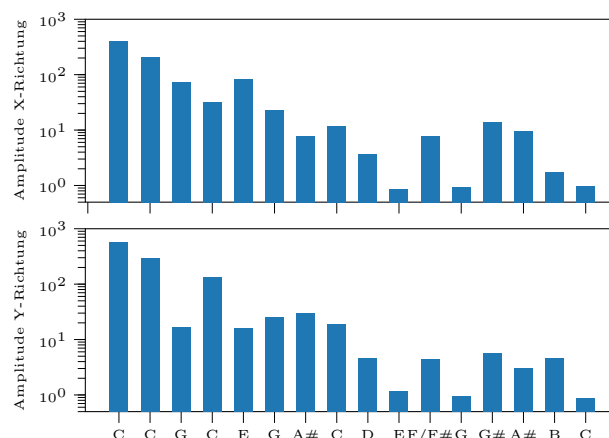


Abbildung 3: Die ersten 16 Fourier-Koeffizienten für die x- und y-Richtung der in Abb. 2 dargestellten Kontur, aufgetragen über den ersten 16 Teiltönen, bezogen auf den Ton C.











Ergebnisse

Die Methode der Berechnung der Koeffizienten der EFA einer Kontur und deren Interpretation mit der Teiltonreihe wird in diesem Beitrag auf ausgewählte Fahrzeug-Silhouetten angewendet. Diese werden von einer Designerin ausgewählt und sind in Tabelle 2 dargestellt. Es handelt sich bei der Auswahl um vier Mini-Vans, fünf Sportwagen sowie ein weiteres Fahrzeug. Die Fahrzeuge werden hinsichtlich der Harmonik des Designs von der Designerin intuitiv bewertet und aufsteigend in eine Skala von 0 % (Fiat Multipla) bis 100 % (Porsche 911/Mercedes Benz SL 300) geordnet. Dabei werden nur die 2D-Seitenansichten, wie in der Tabelle dargestellt, bewertet. Andere Designelemente wie Räder, Sichtkanten usw. werden in die Bewertung nicht einbezogen. Analog werden die Fahrzeug-Silhouetten mit der hier vorgestellten Methode bewertet. Dazu werden die Konturen mit der EFA in 16 Fourier-Komponenten zerlegt und aus den berechneten Amplituden gemäß Gleichung (2) ein Einzahlwert berechnet. Die Approximation mit 16 Fourier-Komponenten ermöglicht die Abbildung der Original-Silhouetten mit einem Fehler von weniger als 2%, eine ausreichend genaue Darstellung ist somit sicher gestellt. Der kleinste berechnete Einzahlwert ($K = 3,56$) wird zu 0 % gesetzt, der größte berechnete Wert ($K = 5,97$) entspricht 100 %. Alle weiteren Bewertungen folgen analog. Das Ergebnis ist ebenfalls in Tabelle 2 dargestellt. Die Fahrzeug-Silhouetten sind anhand der Bewertung der Designerin aufsteigend geordnet. Dabei erzielen die Mini-Vans eher geringere Werte des Konsonanz-Einzahlwertes als die Sportwagen.

Die Ergebnisse durch Berechnung der EFA lassen sich zunächst durch optische Betrachtung der untersuchten

Fahrzeug-Silhouetten plausibilisieren. Ein wesentlicher Unterschied der Mini-Vans gegenüber den Sportwagen besteht in der Gestaltung des Übergangs vom hinteren Radkasten zum Stoßfänger. Hier weisen die Mini-Vans überwiegend sehr schmale Strukturen auf. Deren Abbildung mit der EFA erfordert Komponenten mit hoher spezifischer Frequenz. Diese Komponenten sind eher dissonant, daher erzielen diese Fahrzeuge eher geringe Werte des Konsonanz-Einzahlwertes.

Tabelle 2: Untersuchte Fahrzeug-Silhouetten und Bewertung; Subjektive Bewertung durch Designerin und Bewertung mittels EFA in Verbindung mit der Teiltonreihe.

Fahrzeug	Silhouette	Ranking in Prozent	
		Expertin	EFA
Fiat Multipla		0	1
Daihatsu Materia		4	0
Suzuki Vitera X-90		14	31
Suzuki Wagon R+		20	3
Nissan NV 200		40	37
Aston Martin DB11		74	71
Audi A7		78	66
Ferrari 488		92	77
Mercedes Benz SL 300		100	80
Porsche 911		100	100

Aus Sicht des Designs ist ein grundlegender Unterschied der Harmonie von Mini-Vans und Sportwagen offensichtlich. Sowohl diese grundlegende Unterscheidung, als auch die Abstufung innerhalb der Fahrzeugklassen wird hier durch die Bewertung anhand der EFA qualitativ korrekt wieder gegeben. Lediglich die Plätze (1/2), (3/4) und (6/7) sind jeweils gegenüber der Wertung durch die Designerin vertauscht. Unter Berücksichtigung der Verschiedenheit der verwendeten Bewertungsmethoden, durch die Intuition einer Designerin und durch mathematische Analyse, ist die Übereinstimmung der Ergebnisse bemerkenswert. Dies legt die Vermutung nahe, dass die in der Grundform verschiedener Fahrzeug-Silhouetten vorhandene Harmonie mithilfe musiktheoretischer Metriken quantitativ beschrieben und beurteilt werden kann. Dadurch wird eine erste Schnittstelle zwischen Design und technisch-funktionalen Modellen in der Produktentwicklung ermöglicht. Als eine Anwendung könnten Designer markenspezifische Harmonie-Parameter definieren, die als Festanforderungen während der technischen Auslegung berücksichtigt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird eine Methode zur Objektivierung von Produktdesign vorgestellt. Dabei wird eine Objektkontur mittels der elliptischen Fourier-Transformation in Fourier-Komponenten zerlegt, diese werden mit Metriken der Musiktheorie hinsichtlich der empfundenen Harmonie interpretiert. Die Methode ist in der Lage, die Außenkontur verschiedener Kraftfahrzeuge hinsichtlich der Harmonie plausibel zu bewerten. Die Bewertung entspricht in weiten Teilen der Bewertung einer erfahrenen Designerin. Um allgemeingültige Aussagen zu treffen sind allerdings weitere, umfangreiche Analysen und die Einbindung mehrerer Design-Experten notwendig. Sinnvoll wäre auch, den Betrachtungsrahmen der zu untersuchenden Objekte zu erweitern und mehrere Seitenansichten in die Analyse einzubeziehen (bspw. beim Fahrzeug neben der Seitenansicht auch die Front- und Heckansichten). Ein weiterer Ansatz zur Objektivierung des Produktdesigns kann die Nutzung von Machine-Learning-Verfahren (ML) bieten. Dabei kann die hier verwendete EFA zur Erzeugung von Merkmalen verwendet werden, die mittels ML in Verbindung mit dem subjektiven Empfinden von Probanden verbunden werden.

Literatur

- [1] Löbach, B.: Industrial Design. Grundlagen der Industrieproduktgestaltung. Karl Thieme Verlag, München, 1976
- [2] Braess, H.-H. et al.: Automobil Design und Technik. Formgebung, Funktionalität, Technik. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007
- [3] Krasteva, P. et al.: Ansatz zur Formalisierung der Design-DNA am Beispiel der Fahrzeugaußengestalt. DfX-Symposium, Tutech Verlag, Hamburg, (2016), 269–282
- [4] Luccarelli, M. et al.: Automotive Design Quantification: Parameters Defining Exterior Proportions According to Car Segment. SAE Technical Paper 2014-01-0357 (2014), doi:10.4271/2014-010357
- [5] Hammad, F.: Dimensionen der Gestaltwerdung. Ein Beitrag zur Systematik der Produktentwicklung. Diss. TU Braunschweig, München, 2013
- [6] Birkhoff, E.: Einige mathematische Elemente der Kunst, Edition Rot, Stuttgart, 1968
- [7] Hagenmaier, O.: Der goldene Schnitt. Weltbild Verlag, Augsburg, 1988
- [8] Schöffler, K.: Proportionen und ihre Musik: Was Brüche und Tonfolgen miteinander zu tun haben. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019
- [9] Schönberg, A.: Harmonielehre. No. 3370. Universal-edition, 1922
- [10] Loy, G.: Musimathics, MIT Press, Cambridge, MA, 2006
- [11] Kuhl, F. P., Giardina, C. R.: Elliptic Fourier features of a closed contour. Computer graphics and image processing 18.3 (1982), 236–258