

Die Entropie der Verteilung von Kantenorientierungen als
Prädiktor für die ästhetische Bewertung verschiedener
Bildkategorien

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät der
Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Maria Gennad'Evna Grebenkina
geboren am 26.05.1994 in Samara, Russland

Gutachter (*akademischer Grad, Vor- und Nachname sowie Wirkungsort*)

1. Prof. Dr. Dr. Christoph Redies, Jena

2. apl. Prof. Dr. Uwe Berger, Jena

3. Prof. Dr. Ronald Hübner, Konstanz

Tag der öffentlichen Verteidigung: 05.11.2019

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: Prof. Dr. Dr. Christoph Redies, Dr. Anselm Brachmann, Prof. Dr. Marco Bertamini, Ali Kaduhm.

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassers

Inhaltsverzeichnis

	Titelseite	
	Ehrenwörtliche Erklärung	
	Inhaltsverzeichnis	
1.	Zusammenfassung	1
2.	Abkürzungsverzeichnis	2
3.	Einleitung	3
	3.1 Geschichte der Ästhetikforschung	
	3.2 Bildeigenschaften	
	12	
4.	Ziele der Arbeit	18
5.	Publikation	21
6.	Diskussion	49
	6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	
	6.2 Rolle des Bildinhalts	51
	6.3 Bedeutung der Bewertungskategorie	54
	6.4 Kritische Betrachtung der Methodik	56
	6.5 Rolle von Kunst und Ästhetik in der Medizin	61
7.	Ausblick	64
8.	Literaturverzeichnis	66
9.	Lebenslauf	78
10.	Danksagung	79

1. Zusammenfassung

In der vorliegenden Doktorarbeit untersuche ich die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Bildeigenschaften, vordergründig der Entropie der Verteilung von Orientierungen von Helligkeitsgradienten (Kantenorientierungen) im Bild, und der ästhetischen Bewertung von verschiedenen visuellen Stimuli durch Probanden. Es wurden sowohl einfache Linien als auch komplexe abstrakte Muster sowie Bilder des täglichen Lebens (Fotografien von Fassaden und Innenarchitektur und Musik-Album-Cover) betrachtet und ihre statistischen Bildeigenschaften ermittelt. Mich interessierte vor allem die Frage, ob man eine Korrelation zwischen den Entropiewerten und einer positiven ästhetischen Bewertung verzeichnen kann. Diese Frage entstand aus der Überlegung heraus, dass die in der Neuroästhetik bereits seit längerem bekannte Bevorzugung runder gegenüber eckiger Objekte möglicherweise mit unterschiedlich hohen Entropiewerten der Objekte zusammenhängt. Zur Beantwortung dieser Frage habe ich einerseits die Entropie der Kantenorientierungen von runden und eckigen Elementen gemessen (Bertamini et al., 2016, bzw. Exp. 1), und darüber hinaus in mehreren Experimenten die ästhetische Einschätzung verschiedener Bildkategorien durch Probanden vornehmen lassen (Exp. 2, 3, 5, 6). Zusätzlich habe ich Aufnahmen von Innenarchitektur (Vartanian et al., 2013, bzw. Exp. 4) auf ihre Entropiewerte untersucht und diese mit den Ergebnissen von Vartanian et al. (2013) verglichen. Ich fand die Vermutung, dass runde Objekte hohe Entropiewerte aufweisen, bestätigt. Daneben konnte ich feststellen, dass hohe Entropiewerte bei bestimmten Bildkategorien sehr gut mit einer positiven Bewertung korrelieren. Dabei war es nicht nur bedeutsam, welcher Bildinhalt vorlag, sondern auch, welcher ästhetische Bewertungsbegriff (in diesem Fall: Harmonie, Interesse und Gefallen) angewandt wurde. Aufgrund meiner Ergebnisse kann die Entropie der Kantenorientierungen als weitere statistische Bildeigenschaft etabliert werden, die bei der ästhetischen Beurteilung von Bildern eine Rolle spielt.

2. Abkürzungsverzeichnis

AD	<i>Alzheimer's Disease</i> / Morbus Alzheimer
EEG	Elektroenzephalogramm
fMRT	Funktionelle Magnetresonanztomografie
FTD	Frontotemporale Demenz
MRT	Magnetresonanztomografie

3. Einleitung

3.1 Geschichte der Ästhetikforschung

Das Wort αἴσθησις, aísthēsis, zu verstehen als „Wahrnehmung“ oder „Empfindung“, stammt aus dem Griechischen und umfasst die Lehre von der wahrnehmbaren Schönheit und die Erforschung von Gesetzmäßigkeiten bei der Wahrnehmung von Natur und Kunst (Böhme, 2001). Insbesondere in den Zeiten der Aufklärung und in den darauffolgenden Jahrhunderten widmeten sich einflussreiche Philosophen, Mediziner, Wissenschaftler und Psychologen dem Gebiet der Ästhetik und entdeckten Zusammenhänge zwischen Kunst, Konzeption und Assoziationsfeldern des menschlichen Großhirns.

Alexander Gottlieb Baumgarten (1714-1762), einer der bedeutenden Philosophen der Aufklärung, fand im 18. Jahrhundert eine Begriffsdefinition, die bereits andeutete, dass die Ästhetik ein weitreichendes Forschungsfeld darstellt. In seiner berühmten Schrift „Aesthetica“ spricht er von der Ästhetik als „der Wissenschaft der sinnlichen Erkenntnis“ (Baumgarten, 1750-58).

Gustav Theodor Fechner (1801-1887) wählte eine andere Herangehensweise. Dieser Mediziner und Philosoph des 19. Jahrhunderts fächerte den Begriff der Ästhetik weiter auf: in die „Ästhetik von oben“, die auch von Baumgarten im Sinne der traditionellen Philosophie und Kunst behandelt wird, und die „Ästhetik von unten“, die sich des Schönheitserlebens und -verstehens über den Kunstbegriff hinaus annahm (Fechner, 1876). Gerade der „Ästhetik von unten“ maß er besondere Bedeutung bei. Fechner vertrat somit erstmals eine empirische Grundlage für das ästhetische Empfinden und gilt weithin als Wegbereiter und Urvater der Experimentellen Ästhetik. Er verfolgte in seiner eigenen Forschung den Zusammenhang zwischen dem sogenannten Goldenen Schnitt und der visuellen ästhetischen Wahrnehmung.

Der Goldene Schnitt wird definiert durch das Längenverhältnis von Gesamtstrecke und ihren Teilen: die Gesamtstrecke steht dabei in gleichem Verhältnis zu ihrem größeren Teil (also der

Gesamtstrecke plus ihrer Teilstrecke, auch *Major* genannt) wie das Teilstück (*Minor*) zum Ganzen. Mathematisch ausgedrückt:

$$(a+b)/a = a/b$$

$$a/(a+b) = b/a$$

(wobei $a = Major$ und $b = Minor$).

Die Renaissance rühmte sich seinerzeit mit der Wiederentdeckung des Goldenen Schnitts und seiner Umsetzung in zahlreichen Werken, wie etwa der „Sixtinischen Madonna“ von Raffael (1512/13) (Abb. 1).

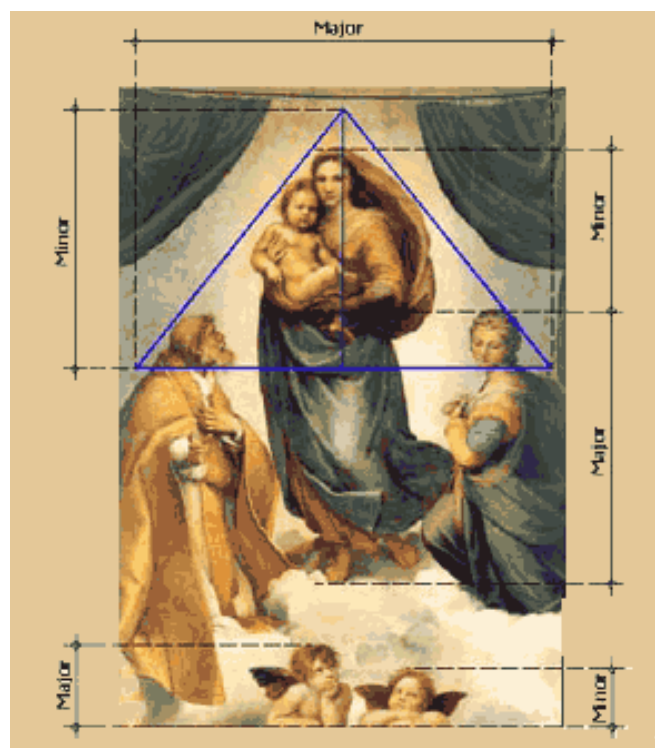


Abb. 1 Anwendung des Goldenen Schnitts auf Raffael Santis „Sixtinischer Madonna“.

Quelle: http://kauernet.de/hendes/pics/h02_sp/2.38.gif [14.11.2016, 19:34]

Zu Anfangszeiten der experimentellen Ästhetikforschung im 19. Jahrhundert stieg der Goldene Schnitt zur universalen Erklärung für Schönheitsempfinden auf. Fechner stellte diesen allgemeingültigen Lösungsansatz infrage – beispielsweise im Widerstreit über die Holbein'schen Madonna im Vergleich zur Sixtinischen Madonna von Raffael (Fechner, 1865). Darüber hinaus fand er bei Nachforschungen in europäischen Museen heraus, dass viele Bilder proportionsmäßig vom Goldenen Schnitt abwichen (Fechner, 1876). So errechnete er im Durchschnitt ein Verhältnis von 4:5 im Hoch- und 4:3 im Querformat. Der Goldene Schnitt allein sei also keine hinlängliche Erklärung für die ästhetische Wahrnehmung und Interpretation.

Bei seinen eigenen Studien abstrahierte Fechner die untersuchten Bilder zu einzelnen Linien und Punkten, die er in bestimmten Verhältnissen zueinander in Bezug setzte, und überraschte seine Zeitgenossen mit dieser fortschrittlichen und abstrakten Art der Forschung. Er war der Ansicht, dass man „mit einfachsten Beispielen operieren [müsse], wo sich das Mass nur in einer Weise anlegen lässt" (Fechner, 1866-1869). Damit prägte Fechner erste empirische Vorgehensweisen zur wissenschaftlichen Erforschung des bislang philosophisch geprägten Themas Ästhetik.

Die Experimentelle Ästhetik verlässt das Feld der Philosophie und ordnet sich der Psychologie unter, einem Forschungszweig, der im 19. Jahrhundert seine erste Blütezeit erlebte. Sie begibt sich damit auf die Suche nach denjenigen Eigenschaften von Objekten, die alleine oder in ihrem Zusammenspiel für die Empfindung subjektiven Wohlwollens beim Betrachter förderlich sind. Jacobsen gibt in einem Artikel aus dem Jahr 2006 einen umfassenden Überblick über die diversen Herangehensweisen und Methoden der Experimentellen Ästhetik. So betrachte diese nicht nur die Bildeigenschaften der analysierten Stimuli (hierbei wird nur von Symmetrie und Komplexität gesprochen, weitere Ausführungen zu Bildeigenschaften weiter unten im Text), sondern auch interindividuelle Unterschiede zwischen den

Versuchsteilnehmern, unter anderem ihren situativen, kulturellen, kognitiven, (neuro-) biologischen und emotionalen Hintergrund (Jacobsen, 2006). Insgesamt spielten laut Jacobsen insgesamt sieben Aspekte zusammen: Person, Situation, Körper, Geist, Diachronie und Ipsichronie auf Seiten des Betrachters sowie der Stimulus, der der ästhetischen Bewertung unterworfen wird (**Abb. 2**). Dabei umfasse Diachronie evolutionäre Prozesse, die bei der aktuellen Gesamtsituation der Versuchsperson eine Rolle gespielt haben könnten, Ipsichronie dagegen ihren kulturellen Hintergrund und relevante Sozialisierungsprozesse.



Abb. 2 Illustration nach Jacobsens These zur Psychology of Aesthetics. Quelle:

https://c7.staticflickr.com/1/663/31409725150_023b123a4b_o.jpg [20.12.2018, 08:25]

Die Experimentelle Ästhetik bedient sich einer großen Bandbreite diverser Arbeitsweisen, von simplen Messungen wie Paarvergleichen oder Rangreihenmethoden bis hin zu komplexen

Analyseverfahren wie der Reaktionszeitmessung, der Blickbewegungs-registrierung, dem EEG und dem fMRT. Jacobsen liefert in einem Artikel von 2013 einen Überblick über die elektrophysiologischen Untersuchungsmethoden der Experimentellen Ästhetik (Jacobsen, 2013). Das EEG folge demnach Fechners traditioneller empirischer Analysetechnik und gehe bei der Suche nach dem zentralnervösen Korrelat über die bloße Analyse der „Ästhetik von unten“ weit hinaus (Jacobsen, 2013). Die Bedeutung des fMRTs wird in einer Arbeit von Vartanian et al. aus dem Jahre 2014 näher beleuchtet. Anhand der bei der Betrachtung von Kunst gemessenen neuronalen Hirnrindenaktivität nicht nur des visuellen, sondern auch der Systeme kognitiver und emotionaler Prozessierung liefert das fMRT das morphologische Korrelat zu Jacobsens These (**Abb.2**).

Graham und Redies betonen wiederum bei einer Übersichtsarbeit zur Experimentellen Ästhetik die Wichtigkeit der Erforschung ästhetischer Grundprinzipien der betrachteten Stimuli (Graham and Redies, 2010). Gerade der Vergleich zwischen der Wahrnehmung natürlicher Szenen und künstlich erschaffener Werke mit besonderer Wertlegung auf optische Gemeinsamkeiten und Unterschiede dieser Stimuli könnten einen wichtigen Beitrag zur Erforschung des menschlichen visuellen Systems liefern. Allerdings werden bei diesen Betrachtungen die genaue Beschaffenheit der gesuchten ästhetischen Grundprinzipien beziehungsweise die gesuchten Objekt- oder Bildeigenschaften nicht endgültig aufgeklärt.

Philosophen und Psychologen, welche sich mit Ästhetikforschung beschäftigen, sind in diesem Punkt noch auf keinen gemeinsamen Nenner gekommen. Einige sind der Ansicht, dass die Antwort auf die Frage nach dem Ästhetischen nicht im betrachteten Objekt, sondern im Betrachter selbst liegt. Analytische Herangehensweisen philosophischer Art etablierten sich zu dem Thema in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit Vorreitern wie Nelson Goodman, Ernst Gombrich oder Richard Wollheim (Gombrich, 1960; Wollheim, 1968; Goodman, 1976). Goodman ging 1972 bei der Rezension von Ernst Gombrich's *Art and Illusion* (1960) auf die

visuelle Wahrnehmung des Menschen ein und kommentierte, dass Wahrnehmung vornehmlich von konzeptionellen Schemata abhängen. Ein sogenanntes „unschuldiges Auge“ (*innocent eye*), in diesem Zusammenhang als Metapher für einen naiven Betrachter, gebe es nicht. Auch weitere Studien sprechen dafür, dass die Erfahrung eines Menschen wesentlich zu seiner ästhetischen Bewertung beiträgt beziehungsweise diese beeinflusst (Martindale, 1988). In diesem Zusammenhang wird in der Fachliteratur von Vertrautheit, englisch *familiarity*, gesprochen (Goldberg et al., 2012). Bei der ästhetischen Bewertung sei eine sogenannte *novelty/familiarity*-ratio, also ein bestimmtes Zusammenspiel aus Neuheit und Vertrautheit, notwendig. Allerdings sei deren genaue Verteilung vorerst noch nicht bekannt (Goldberg et al., 2012).

In einem Untergebiet der Experimentellen Ästhetik stehen daher die neuronalen Prozesse und Hirnaktivität des Probanden im Vordergrund. Dieses Untergebiet wird „Neuroästhetik“ genannt (Chatterjee, 2011; Nadal et al., 2018). Die Neuroästhetik bedient sich unter anderem Mitteln wie dem MRT, dem fMRT oder auch dem EEG, um die neuronalen Verarbeitungsprozesse bei der Betrachtung verschiedener Objekte darzustellen und zu analysieren (Di Dio and Gallese, 2009). Sie ermöglicht neben der Darstellung visueller und sensomotorischer kortikaler Strukturen auch die Darstellung der Korrelate der emotionalen Assoziationsprozesse bei der Wahrnehmung. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Arbeit von Kirsch et al. aus dem Jahre 2016. Sie untersuchten mithilfe einer Metaanalyse den Zusammenhang zwischen ästhetischer Wahrnehmung, Belohnungssystem und motorischer und optischer Prozessierung. Die neuronale Plastizität sei einer der entscheidenden Ursachen für den oben geschilderten Einfluss von Vertrautheit betrachteter Objekte (Kirsch et al., 2016).

Aber auch die Neuroästhetik kann bislang keine zufriedenstellende Antwort beim Konflikt zwischen der *bottom-up*-Hypothese versus der *top-down*-Hypothese liefern. Die *top-down*-Hypothese schreibt in diesem Zusammenhang vor allem kognitiven Verarbeitungsprozessen

eine tragende Rolle in der menschlichen Wahrnehmung zu. Dahingegen vertreten Verfechter der *bottom-up*-Theorie, dass die Bild- bzw. Objekteigenschaften als entscheidende Rolle bei der ästhetischen Wahrnehmung spielen. Eine Wahrnehmungsstudie von G.C. Cupchik aus dem Jahre 2009 griff diese Frage auf und kam zu dem Ergebnis, dass bei der aktiven Konstruktion mentaler Bilder die Aufmerksamkeitslenkung und visuelle Suche als *top-down*-Komponenten und die Wahrnehmung von visuellen Strukturen als *bottom-up*-Prozesse interagieren (Cupchik, 2009). Sowohl für die *bottom-up*-Hypothese als auch für die *top-down*-Hypothese gibt es demnach bestätigende Ergebnisse.

Daniel Ellis Berlyne (1924-1976), ein kanadisch-britischer Philosoph, lieferte vor allem in Bezug auf die *top-down*-Hypothese bedeutsame Beiträge. Basierend auf seiner früheren Arbeit als Psychologe betrieb er Studien, die sich mit den Reaktionen von Versuchspersonen beim Betrachten verschiedener Stimuli beschäftigten, und setzte diese mit Persönlichkeitsmerkmalen und -profilen in Verbindung. In der Ästhetikforschung folgte er auf Fechner und blieb dem von ihm geschaffenen Prinzip der experimentellen Erforschung treu. Eine wichtige Arbeit Berlynes befasste sich beispielsweise mit dem Zusammenhang zwischen optischem Reiz, seiner Wirkung auf den Betrachter sowie dessen Reaktion (Berlyne, 1960). Die Eigenschaften der gewählten optischen Reize ermöglichen beim Betrachter die Auslösung eines bestimmten Erregungspotentials, des *arousals* (**Abb. 3**).

Berlynes Theorie (1960)

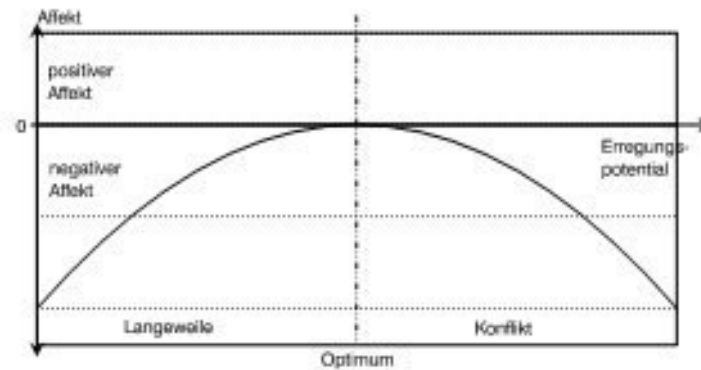


Abb. 3 Zusammenhang von optischem Reizen, dem Erregungspotential und Wirken auf den Betrachter. Quelle: <http://markentreue.com/wp-content/uploads/2009/09/berlynesTheorie.jpg> [29.11.2016, 21:22])

Die Abbildung entspricht der sogenannten Wundt-Kurve, einem diagrammatischen Zusammenhang zwischen Reiz und Reaktion, welcher von Wilhelm Wundt Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelt wurde (Wundt, 1874). Wilhelm Wundt war der Begründer der experimentellen Psychologie und war der erste Wissenschaftler, der den Zusammenhang zwischen Stimulus und menschlichem Wohlbefinden aufzeichnete. So nimmt dieses mit der Intensität des Reizes bis zu einem gewissen Grad zu, um dann einen maximalen Wert zu erreichen und mit zunehmender Intensität wieder zu fallen, bis es sich negativiert und zu Missfallen wird. Wundt liefert mit seinen Theorien bis in die heutige Zeit genutzte Anwendungsprinzipien, die unter anderem in der Werbung eine bedeutende Rolle einnehmen (z.B. Anand and Holbrook, 1986; Zyngier et al., 2007). Vereint der Stimulus in sich optimale Eigenschaften, so ist die Erregung gleich Null, die im betrachtenden Individuum ausgelöste Reaktion ist am wenigsten negativ. Jede Abweichung bewirkt eine Steigerung der Erregung. Ist das Erregungspotential zu gering, wird Langeweile, also ein negativer Affekt, empfunden,

und der Betrachter neigt dazu den Blick abzuwenden. Ist das Erregungspotential zu hoch und komplex fördert es hingegen einen Konflikt, da das Individuum es nicht einordnen kann. Es kommt zu einem negativen Affekt, der entweder darin mündet, den Blick abzuwenden, oder den Betrachter dazu führt, den Stimulus näher zu erkunden, ein Handeln, welches als *specific exploration* bezeichnet wird (Berlyne, 1960).

In seinem Hauptwerk, *Aesthetics and Psychobiology* (1971), beschäftigte Berlyne sich konkret mit dem *arousal*, welches durch optische Stimuli im Probanden ausgelöst wird. Somit ordnete er die Erforschung des ästhetischen Verhaltens behavioraler Psychologie unter. Berlyne sprach dem menschlichen Gehirn eine universelle Fähigkeit für ästhetisches Empfinden zu, unabhängig von der kulturellen Abstammung. Die Hypothese kulturübergreifender ästhetischer Bewertung ist durch weitere Studien hinlänglich belegt (Redies et al., 2017 a, b; Nadal et al., 2018). Tooby und Cosmides sprechen in diesem Zusammenhang von einem möglichen evolutionären Hintergrund ästhetischer Wahrnehmung (Tooby and Cosmides, 2001). Berlyne argumentierte, dass Regionen des Gehirns, die den menschlichen Aktivitätslevel kontrollieren, teilweise deckungsgleich mit den Arealen erschienen, die für Belohnung und Bestrafung zuständig sind. Abschließend stellte er 1974 die Hypothese vom Vorhandensein eines primären und sekundären Belohnungs- sowie eines Aversionszentrums auf. *Specific exploration* löst laut seiner Theorie eine Belohnung aus, da Unsicherheiten, die zur Aversion führen, aufgehoben werden. *Diversive exploration* beschreibt die Suche nach neuen Eigenschaften eines Stimulus zur Auslösung eventuell höher Erregungspotentiale. Diese Interaktion aus belohnenden und aversiven Erregungspotentialen sei ein Schlüssel zum Verstehen ästhetischer Wahrnehmung.

Bei diesen Ausführungen fällt auf, dass die Bildeigenschaften nicht vollständig von der Forschung vernachlässigt wurden, sind sie es doch, welche Erregung oder Aversion überhaupt erst auslösen. Seit langem ist klar, dass man dabei mehrere Eigenschaften berücksichtigen

muss. Fraglich ist, ob ihr Wechselwirken oder das vorrangige Wirken einer dieser Eigenschaften die ästhetische Wahrnehmung bewirkt.

3.2 Bildeigenschaften

Eine der ersten objektiven Bildeigenschaften, die ein ästhetisches Urteil begründen, war das Konzept des Goldenen Schnittes, mit der sich Fechner kritisch auseinandersetzte. Er kam zu dem Urteil, dass der Goldene Schnitt, im weiteren (mathematischen) Sinne also die Selbstähnlichkeit und Symmetrie, zwar keinen universellen Lösungsansatz darstelle, jedoch zweifellos eine bedeutende Rolle bei der ästhetischen Wahrnehmung einnehme.

Lange Zeit galt Symmetrie als alleinige Begründung für die Schönheitswahrnehmung, wobei diese Annahme bereits von verschiedenen Studien widerlegt werden konnte (Lüttge et al., 2018; Leder et al., 2019). Insbesondere Leder et al. wiesen nach, dass die Bedeutung der Symmetrie für die Erklärung der Wahrnehmung von Schönheit keine universelle Erklärung liefert. Gerade künstlerisch naive Versuchspersonen tendierten bei der Studie zu einer positiven Bewertung von Bildern mit hohem Maß an Symmetrie, während Künstler und Kunsthistoriker asymmetrische Bilder bevorzugten.

Eine weitere häufig untersuchte Bildeigenschaft, die sich mit der Zeit herauskristallisierte, ist die Komplexität. Definitionsgemäß gibt sie ein Maß für die Menge verschiedener Strukturen in einem Bild wieder. Berlyne et al. wiesen mittels mehrerer Versuchsreihen nach, dass ein mittleres Maß an Komplexität beim Betrachter den größten Anklang findet (Berlyne, 1974; Güçlütürk et al., 2016). Güçlütürk et al. untersuchten dieses Phänomen genauer und fanden heraus, dass bei der Aussage, dass Objekte von mittlerer Komplexität als besonders schön bewertet wurden, interindividuelle Unterschiede bestehen (Güçlütürk et al., 2016). In ihren Studien zum Thema Komplexität fanden sie mittels nachträglicher Clusterbildung heraus, dass die teilnehmenden Probanden in zwei Gruppen unterteilt werden konnten; konkret in eine, die mit zunehmender Komplexität bessere Bewertungen abgab, und eine weitere, deren

Zustimmung mit zunehmender Komplexität abnahm.

Ähnliche Clusterbildung wurde auch in unserer Forschungsgruppe von Mallon et al. beschrieben (Mallon et al., 2014). Bei einer Arbeit aus dem Jahre 2014 wurden abstrakte Bilder analysiert. Man stellte fest, dass sich die Versuchsteilnehmer anhand ihrer Bewertungen in insgesamt sieben Cluster einteilen lassen, die jeweils bestimmte Bildeigenschaften bevorzugten. Unter anderem spielten hier Selbstähnlichkeit und Farbe eine bedeutsame Rolle. Außerdem veränderte sich die Bewertung abstrakter Bilder in Abhängigkeit davon, ob vorher „schöne“ oder „weniger schöne“ Bilder betrachtet wurden. Diese Vorauswahl steigerte im Falle weniger schöner Bilder die Bewertung, und verringerte die Bewertung im Falle besonders schöner Bilder. Dabei macht sich der sogenannte Wahrnehmungskontrast, also der Einfluss vorheriger Eindrücke im gegenteiligen Sinne auf nachfolgende Bilder bemerkbar. Insgesamt konnte damit nachgewiesen werden, dass bei der subjektiven Bewertung von Kunstbildern zwar interindividuelle Unterschiede bestehen, es dabei aber auch bestimmte Bildeigenschaften gibt, die für Gruppen von Menschen einen gleichsam hohen ästhetischen Wert besitzen. Es lassen sich also gewissermaßen Bewertungstypen ausmachen (Mallon et al., 2014).

Im Bereich der modernen Experimentellen Psychologie, zu der die Experimentelle Ästhetik zählt, gilt der in Liverpool tätige Dr. Marco Bertamini als einer der führenden Experten. Er widmet sich unter anderem der möglichen Verknüpfungen zwischen Wahrnehmung und Emotion sowie weiteren Verbindungsmöglichkeiten aus visueller Auffassung und anderen affektiven Reizen. Eine seiner Arbeiten, die maßgeblich Grundlage für die vorliegende Doktorarbeit war, handelt von dem Zusammenhang zwischen Attraktivität eines visuellen Objekts und seiner Form, genauer dem Umfang seiner Kurvigkeit oder Eckigkeit (Bertamini et al., 2015). Hier zeigt sich bereits ein Grundproblem der Wahrnehmungsforschung, nämlich die unklare Nomenklatur beziehungsweise strittige Terminologie. Es herrscht eine große

Unklarheit in Bezug auf genormte Begriffe zur Beschreibung von Bildeigenschaften (Gómez-Puerto et al., 2017). Dies macht nicht nur die Verständigung von Forschungsgruppen untereinander, sondern teilweise auch das Studiendesign und die Ergebnisse von Wahrnehmungsstudien zu einem nicht ganz trivialen Problem. Gómez-Puerto et al. führen als Beispiel auf, dass zur Erforschung der potentiellen Bedrohung kantiger Objekte unter anderem Haifischzähne und Rosendornen als visuelle Stimuli verwendet wurden (Carbon, 2010), diese Objekte jedoch ihrer Kontur nach eher geschwungenen Linien entsprechen.

Auf der Suche nach Bildeigenschaften, die für die subjektive Bewertung verantwortlich sind, beschäftigte sich unsere Arbeitsgruppe zuletzt unter anderem mit der Verteilung der Orientierung von Helligkeitsgradienten (Redies et al., 2017; Henemann et al., 2017). Als Maß für die Verteilung der Orientierung von Helligkeitsgradienten in einem Bild wird in der Experimentellen Ästhetik die Entropie genutzt. Ein gängiges Mittel, die Entropie zu bestimmen, ist die Methode nach Shannon. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit berücksichtigt, mit der eine bestimmte Orientierung von Helligkeitsgradienten sich über das Gesamtbild hinweg wiederholt. Je weniger Ordnung in der Beziehung einzelner Orientierungen zueinander herrscht, desto höher ist die Entropie. Dabei ist die Shannon-Entropie 1. Ordnung (*1st-order entropy*) ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Verteilung, die Entropie 2. Ordnung (*2nd-order entropy*) ein Maß für die Unabhängigkeit der einzelnen Orientierungen untereinander in einem Bild. Damit wird klar, dass die Entropie der Ordnung der Bildelemente entgegengestellt ist: je geordneter ein Bild erscheint, umso niedriger ist seine Entropie.

Bei der Untersuchung von Fotografien natürlicher Strukturen wie zum Beispiel dem Wachstumsmuster von Flechten und Pflanzen sowie von traditionellen Kunstwerken wurden hohe Shannon-Entropie-Werte gemessen (Redies et al., 2017 a). In diesem Zusammenhang

interessierte mich die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen positiver ästhetischer Bewertung und der Shannon-Entropie besteht. Außerdem wollte ich herausfinden, ob ein ähnliches Phänomen wie bei den traditionellen Kunstwerken auch bei der Untersuchung abstrakter Bilder nachzuweisen sei. Mit dem Fokus auf die Entropie der Orientierung von Helligkeitsgradienten bei der Analyse runder und eckiger Strukturen wollte ich darüber hinaus eine terminologische Vereinfachung der Begriffe „Rundheit“ und „Eckigkeit“ erproben.

Der Zusammenhang zwischen runden Formen und positiver subjektiver Bewertung ist ein gut erforschtes Phänomen. So zeigten Moshe Bar und Mital Neta mit ihrer Forschungsarbeit aus dem Jahre 2006 (Bar and Neta, 2006), dass Menschen runde visuelle Objekte gegenüber Eckigen bevorzugen. Ausgangspunkt für dieses Experiment war die Beobachtung, dass Menschen in ihrem Alltag in der Lage dazu sind, rasch Urteile über ihre Umgebung fällen zu können, und das vornehmlich basierend auf visuellen Eindrücken. Das setzt voraus, dass sie über bestimmte Wahrnehmungsraster verfügen müssen, die die in der Umgebung vorhandenen Reize katalogisieren und bewerten können. Die Annahme von Bar und Neta (2006) war allerdings, dass eckige Muster im Menschen ein Gefühl von Bedrohung auslösen und demnach als wenig attraktiv wahrgenommen werden.

Diese Annahme konnten Bertamini et al. (2015) widerlegen. Voraussetzung für Hypothese von Bar und Neta war die implizierte Bedrohung, die von kantigen Objekten ausgeht. Daher untersuchte Bertamini mit seiner Arbeitsgruppe die Frage, ob Beobachter explizit Kurvigkeit bevorzugen oder Kantigkeit ablehnen (Bertamini et al., 2015). In ihren Experimenten konfrontierten die Autoren die Versuchsteilnehmer unter anderem mit kantigen Bildern, die in unterschiedlicher Entfernung zu den Teilnehmern präsentiert wurden. Hierbei wurde kein signifikanter Effekt hinsichtlich der Abneigung zu eckigen Bildern und ihrer unmittelbaren Nähe deutlich. Die Bedrohlichkeitsassoziation kantiger Objekte kann demnach die Bevorzugung von kurvigen Schemen nicht vollständig erklären.

Die bislang erwähnten Bildeigenschaften – Symmetrie, Selbstähnlichkeit, Komplexität und Entropie sowie in Ermangelung eines besseren Begriffs die Kurvigkeit/Eckigkeit eines Objekts – unterscheiden sich hinsichtlich der ausgelösten Bewertung durch Versuchsteilnehmer. Wie erwähnt spielt es außerdem unter anderem eine Rolle, ob die Probanden künstlerisch naiv oder vorgebildet sind, ob es sich bei den untersuchten Objekten um Bilder abstrakter Kunst, Naturaufnahmen oder gar Portraits handelt. So zeichnen sich zum Beispiel menschliche Gesichter in der Regel durch ein hohes Maß an Symmetrie aus, wobei die Ausprägung der Asymmetrie eine hohe Variabilität aufweist (Tamir, 2015). Redies et al. konnten in einer Studie von 2007 nachweisen, dass natürliche Szenen und Kunstwerke ähnliche Bildeigenschaften aufweisen, was dafür spricht, dass Künstler sich von den visuellen Eigenschaften der visuellen Umgebung (d.h. natürlicher Szenen, an die ihr Sehsystem angepasst ist) leiten lassen (Redies et al., 2007). Konkret wurden hier die Fourier-Spektren von Fotografien menschlicher Gesichter und Porträtbilder verglichen. Die Fourier-Analyse ist eine von unserer Arbeitsgruppe oft eingesetzte Methode zur Analyse von Raumfrequenzen im Bild (Graham and Redies, 2010). Dabei wurde festgestellt, dass Künstler häufig Portraits erstellen, deren Fourier-Spektrum jenem von natürlicher Szenen ähnelt, jedoch nicht dem von Fotografien von Gesichtern.

Weitere Bildeigenschaften, die sich bei als ästhetisch ansprechend bewerteten Bildern fanden, waren u.a. eine hohe Selbstähnlichkeit der Orientierung von Helligkeitsgradienten, eine moderate Komplexität und eine niedrige Anisotropie (Redies et al., 2012). Die Anisotropie, welche mittels der PHOG-Methode (Amirshahi et al., 2012) gemessen wird, ist im weiteren Sinne eine alternative Messmethode zur Bestimmung der Verteilung der Orientierungen von Helligkeitsgradienten. Sie wird in der vorliegenden Studie als Vergleichsmaß zur Shannon-Entropie berücksichtigt.

Insgesamt wurden also folgende Bildeigenschaften in der vorliegenden Arbeit gemessen:

- (1) *1st- und 2nd-order entropy* der Helligkeitsgradienten (Redies et al., 2017 a)
- (2) Kurvigkeit/Kantigkeit (Bertamini et al., 2015)
- (3) Komplexität, gemessen mittels der fraktalen Dimension (Spehar et al., 2003)
- (4) Selbstähnlichkeit, also die Ähnlichkeit der Histogramme der orientierten Helligkeitsgradienten der Teilstücke eines Bildes zum Histogramm des Gesamtbildes (Dalal et al., 2006)

4. Ziele der Arbeit

In einer Studie aus dem Jahre 2017 (Redies et al., 2017b) wurden die Bildeigenschaften von natürlichen Bildern im Vergleich zu sog. *Bad Art* und abstrakter Kunst analysiert, jedoch keine Bewertung durch Versuchspersonen durchgeführt. Eine Bildeigenschaft von besonderer Bedeutung war die Entropie der Orientierung von Helligkeitsgradienten im Bild. Diese war bei natürlichen Bildern in der Regel hoch. Mich interessierte nun in diesem Zusammenhang unter anderem, ob ein hoher Entropie-Wert mit einer positiven Bewertung korrelieren würde.

Die rasante digital-informatische Entwicklung der letzten Jahrzehnte ermöglichte darüber hinaus eine empirische Erforschung des Einflusses verschiedener Entropiewerte (Brachmann et al., 2017). In Anlehnung an die oben geschilderten Beobachtungen zur Komplexität war es mir möglich, einen Vergleich zwischen den Werten der Entropie von Orientierungen der Helligkeitsgradienten im Bild und Bewertungen von Versuchspersonen herzustellen.

Schließlich interessierte mich außerdem neben der Bildeigenschaft auch die betrachtete Bildkategorie. In diesem Zusammenhang wollte ich herausfinden, ob zwischen einfachen und komplexen abstrakten Mustern sowie alltagsnahen Bildern, die jedoch nicht Kunstbildern entsprachen, sowie ihrer subjektiven Bewertung in Abhängigkeit der vorher gemessenen Entropie der Orientierungen von Helligkeitsgradienten ein Zusammenhang bestünde.

Im ersten Teil der Doktorarbeit (Experiment 1) untersuchte ich die von Bertamini et al. (2015) verwendeten Stimuli (Cassini-Figuren, also einfache visuelle Muster aus Kontur und weißer Innenfläche) auf ihre Entropiewerte. Ich ergründete damit, ob die Präferenz für Stimuli mit runden Konturen möglicherweise auf ihrer höheren Entropie beruht. Zur Ausweitung des beobachteten Effekts zogen wir die Untersuchung komplexer visueller Muster (Experiment 2) in Betracht, wofür wir Versuchsteilnehmern Bilder unterschiedlicher Entropiewerte präsentierten und um ihre ästhetische Bewertung baten. Die Bilder wurden mittels der

kostenlosen Software *Taprats* erstellt (Kaplan, 2004).

In Experiment 6 ergründeten wir darüber hinaus, ob durch eine Variabilität der Entropie eine Veränderung in der ästhetischen Bewertung durch die Teilnehmer ausgelöst werden kann. Dabei war besonders interessant, ob die Form (rund oder eckig) bei dieser Untersuchung noch eine Rolle spielen würde. Basierend auf anderen Studien unserer Arbeitsgruppe (Redies et al., 2015) lag die Vermutung nahe, dass mit steigender Entropie eine Zunahme der Präferenz für bestimmte Bilder in der Bewertung der Probanden auftreten würde.

Es ist bereits untersucht worden, dass sich die Bewertung von abstrakten und natürlichen Bildern unterscheidet (Vessel et al., 2010). Natürliche Bilder werden von Menschen eher auf gleiche Art und Weise interpretiert und somit annähernd universell bewertet. Vermutlich basiert dieses Phänomen auf evolutionsbiologischen Prozessen im ZNS. Dem entgegengesetzt gibt es deutlich stärker ausgeprägte Unterschiede bei der Betrachtung und Bewertung abstrakter Bilder. Um neben der Erforschung abstrakter Bilder und Aufnahmen von Landschaften und natürlicher Strukturen auch die ästhetische Bewertung von Alltagsbildern zu berücksichtigen, widmeten wir uns in den Experimenten 3 bis 5 der Analyse von Bildern von menschengemachten Objekten. Zu diesem Zweck führten wir eine *post hoc*-Analyse von Bildern von Innenarchitektur (Experiment 4) sowie zwei weitere Bewertungsstudien mit Fotografien von Hausfassaden und Albumcovern von Musik-CDs durch (Experimente 3 und 5). Diese den Versuchspersonen vertrauten Objekte sollten den Umfang des Effekts der Entropie auf die zu subjektiven Bewertungen der Teilnehmer näher beleuchten. Der Einfluss subjektiver Bewertung von abstrakten und emotional demnach eher unberührten Bildern unterstreicht den weiter oben beschriebenen Konflikt zwischen *bottom-up* und *top-down*-Hypothese.

Wir versuchten bei unseren Wahrnehmungsexperimenten die Bewertung der Versuchsteilnehmer in die einzelnen Qualitäten Gefallen (*pleasant*), Harmonieempfinden

(*harmonious*) und Interesse (*interesting*) zu differenzieren, da frühere Studien zeigten, dass diese Bewertungskriterien bei abstrakten Bildern Unterschiede ergeben können (Redies et al., 2015).

Zusammenfassend beschäftigten mich folgende Fragestellungen:

1. Ist die Entropie von Helligkeitsgradienten ein vergleichbares oder sogar besseres prädiktives Maß für die Attraktivität abstrakter und natürlicher Bilder als die Form der abgebildeten Linien und Kanten (Eckigkeit/Kurvigkeit)?
2. Unterscheidet sich die Bedeutung des Einflusses der Entropie in Bezug auf verschiedene Bildtypen bei deren ästhetischer Bewertung?
3. Welchen Einfluss hat die Auswahl der ästhetischen Bewertungskriterien (Gefallen, Harmonieempfinden und Interesse)?

5. Publikation

Erschienen in *Frontiers in Neuroscience* am 28. September 2018 unter dem Titel „*Edge-Orientation Entropy Predicts Preference for Diverse Types of Man-Made Images*“

Autoren: M. Grebenkina, A. Brachmann, M. Bertamini, A. Kaduhm und C. Redies



Edge-Orientation Entropy Predicts Preference for Diverse Types of Man-Made Images

Maria Grebenkina¹, Anselm Brachmann¹, Marco Bertamini², Ali Kaduhm¹ and Christoph Redies^{1*}

¹ Experimental Aesthetics Group, Institute of Anatomy I, Jena University Hospital, School of Medicine, University of Jena, Jena, Germany, ² Department of Psychological Sciences, University of Liverpool, Liverpool, United Kingdom

OPEN ACCESS

Edited by:

Branka Spehar,
University of New South Wales,
Australia

Reviewed by:

Yağmur Güçlütürk,
Radboud University Nijmegen,
Netherlands
Louise OHare,
University of Lincoln, United Kingdom
Maarten Wijnntjes,
Delft University of Technology,
Netherlands

*Correspondence:

Christoph Redies
christoph.redies@med.uni-jena.de

Specialty section:

This article was submitted to
Perception Science,
a section of the journal
Frontiers in Neuroscience

Received: 31 May 2018

Accepted: 10 September 2018

Published: 28 September 2018

Citation:

Grebenkina M, Brachmann A,
Bertamini M, Kaduhm A and
Redies C (2018) Edge-Orientation
Entropy Predicts Preference
for Diverse Types of Man-Made
Images. *Front. Neurosci.* 12:678.
doi: 10.3389/fnins.2018.00678

We recently found that luminance edges are more evenly distributed across orientations in large subsets of traditional artworks, i.e., artworks are characterized by a relatively high entropy of edge orientations, when compared to several categories of other (non-art) images. In the present study, we asked whether edge-orientation entropy is associated with aesthetic preference in a wide variety of other man-made visual patterns and scenes. In the first (exploratory) part of the study, participants rated the aesthetic appeal of simple shapes, artificial ornamental patterns, facades of buildings, scenes of interior architecture, and music album covers. Results indicated that edge-orientation entropy predicts aesthetic ratings for these stimuli. However, the magnitude of the effect depended on the type of images analyzed, on the range of entropy values encountered, and on the type of aesthetic rating (*pleasing*, *interesting*, or *harmonious*). For example, edge-orientation entropy predicted about half of the variance when participants rated facade photographs for *pleasing* and *interesting*, but only for 3.5% of the variance for *harmonious* ratings of music album covers. We also asked whether edge-orientation entropy relates to the well-established human preference for curved over angular shapes. Our analysis revealed that edge-orientation entropy was as good or an even better predictor for the aesthetic ratings than curvilinearity. Moreover, entropy could substitute for *shape*, at least in part, to predict the aesthetic ratings. In the second (experimental) part of this study, we generated complex line stimuli that systematically varied in their edge-orientation entropy and curved/angular shape. Here, edge-orientation entropy was a more powerful predictor for ratings of *pleasing* and *harmonious* than curvilinearity, and as good a predictor for *interesting*. Again, the two image properties shared a large portion of variance between them. In summary, our results indicate that edge-orientation entropy predicts aesthetic ratings in diverse man-made visual stimuli. Moreover, the preference for high edge-orientation entropy shares a large portion of predicted variance with the preference for curved over angular stimuli.

Keywords: experimental aesthetics, aesthetic rating, visual preference, image properties, curved/angular stimuli, luminance edges

INTRODUCTION

Since the inception of experimental aesthetics by Gustav Theodor Fechner (1801–1887), one of the central goals in this field of research has been to identify objective physical properties of images that humans perceive as visually pleasing (Fechner, 1876). It is assumed that at least some of these properties are universal across different cultures and relate to basic mechanisms of information processing in the human visual system (Bell, 1914; Berlyne, 1974; Spehar et al., 2003; Redies, 2007, 2015).

With the advent of powerful technologies in image processing and analysis, increasingly complex image properties and their association with aesthetic perception have been investigated (for reviews, see Graham and Redies, 2010; Brachmann and Redies, 2017). Examples are visual complexity (Birkhoff, 1933; Berlyne, 1974; Jacobsen and Höfel, 2002; Forsythe et al., 2011; Güclütürk et al., 2016), a scale-invariant Fourier spectrum (Graham and Field, 2007; Redies et al., 2007), symmetry (Bertamini and Makin, 2014; Wright et al., 2017), and fractality and self-similarity (Taylor, 2002; Spehar et al., 2003; Taylor et al., 2011; Redies et al., 2012; Braun et al., 2013). The present work focuses on two additional stimulus properties that have been associated with visual preference, curvi-/rectilinearity (the preference of curved over angular shapes; Bar and Neta, 2006), and edge orientation entropy (Redies et al., 2017).

The preference of human observers for curved shapes over angular shapes is particularly striking and robust (for recent reviews, see Bertamini et al., 2016; Gómez-Puerto et al., 2016). Bar and Neta (2006) proposed that angularity reflects potential danger and is thus perceived as threatening (and hence less attractive). Palumbo et al. (2015) confirmed that smoothly curved shapes are rated as more pleasant than angular ones. They studied approaching and avoiding reactions to curved and angular polygons and presented evidence that the preference for curved over angular forms does not result from a perceived threat of angular forms (Bar and Neta, 2006), but rather from a preference for the curved ones. Other studies have since confirmed this preference (Bertamini et al., 2016; Velasco et al., 2016). For example, Gómez-Puerto et al. (2017) investigated responses to curved/angular patterns by human observers in three different regions (Mexico, Ghana, and Mallorca) and concluded that the preference for curvature is common across these cultures. The preference for curved objects can even be observed in primates like chimpanzees and gorillas, but is smaller than in humans (Munar et al., 2015). The authors proposed that the human preference for curved objects is an evolutionarily ancient trait, but became modulated by higher cognitive processes and other visual preferences during human evolution. Blazhenkova and Kumar (2018) asked participants to match curved/angular shapes with five different sensory modalities and higher-level attributes, such as gender, emotion and name, and obtained non-arbitrary mappings as a result (see also the earlier work by Poffenberger and Barrows, 1924; Hevner, 1935). For example, curved shapes were associated to sweet taste and smooth texture as well as female gender and relieved emotion, while angular shapes were linked to spicy smell, rough texture, male gender and excited emotion.

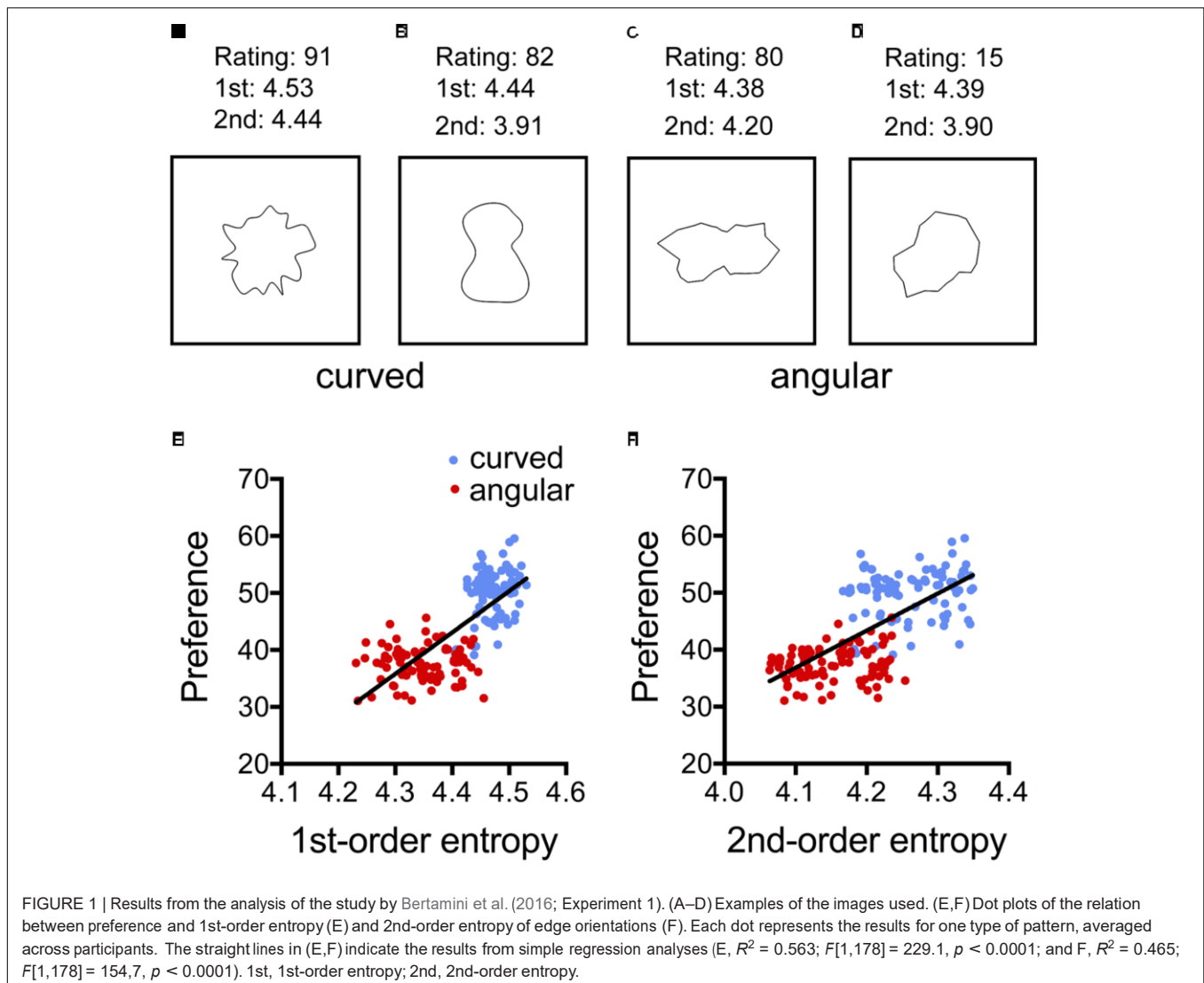
Although the preference for curved objects and forms over angular ones is well established and widely recognized, fundamental questions remain, as pointed out by Gómez-Puerto et al. (2016). In particular, the terminology is variable and most terms used in the field (curved, straight, sharp, angular, waving etc.) lack a physical definition that would allow an objective quantification. Also, it is unclear how the curved/angular account of visual preference relates to other image properties that have been associated with visually preferred stimuli.

To address these shortcomings in the present work, we draw a connection between curvilinearity and Shannon edge-orientation entropy. We have recently shown that artworks possess a high entropy of edge orientations compared to many categories of non-art images, i.e., luminance gradients and edges are more evenly distributed across orientations in artworks (Redies et al., 2017). This result holds for large subsets of traditional artworks from different cultural provenance.

Regularities in edge orientations across images of natural objects and scenes have been studied before, in particular in photographs of natural scenes (Geisler et al., 2001; Sigman et al., 2001). Recently, Redies et al. (2017) showed that there are many types of natural growth patterns, such as photographs of lichen and plants, which possess a relatively high degree of edge-orientation entropy. In many of these growth patterns, local oriented edges have emerged more or less randomly and independently so that all edge orientations are about equally likely to occur (high 1st-order entropy) and there are few correlations of edge orientations across the images (high 2nd-order entropy). In other natural stimuli, edge-orientation entropy can be relatively low, for example in some large-vista natural scenes where the horizon and vertical growth patterns (e.g., of trees) can induce regularities so that cardinal orientations are more dominant and correlate across the images. Lower edge-orientation entropy was also observed in photographs of simple objects and faces (Redies et al., 2017).

It remains unclear, however, whether man-made visual stimuli other than artworks also exhibit high edge-orientation entropy and whether this image property can be related to aesthetic perception more generally (Redies et al., 2017). To answer this question, the present study explored a wide spectrum of man-made visual stimuli and patterns. We hypothesize that edge orientation entropy is a predictor for aesthetic ratings in at least some of these stimuli as well.

Moreover, we investigated the relation between edge-orientation entropy and curvilinearity. Such a relation seems obvious if one considers simple shapes, such as the stimuli used by Bertamini et al. (2016) in their study of preference for curved over angular shapes (**Figures 1A–D**). If the shapes are angular, straight lines predominate and the orientations of luminance edges tend to be less evenly distributed than in similar shapes that are composed of curved lines. We therefore expected and indeed found in Experiment 1 that edge orientations are more evenly distributed across orientations for the curved patterns than for the angular versions in these stimuli (**Figures 1E,F**). Based on this scenario, we hypothesized that human observers prefer a high degree of edge-orientation entropy in more complex visual stimuli, including photographs



of man-made objects and scenes, as well. Moreover, we speculated that edge-orientation entropy and curvilinearity share predicted variance of preference for visual stimuli.

To test the above hypotheses, we asked participants to give ratings of their aesthetic preference for various sets of man-made images that differ in their curvilinearity or edge-orientation entropy. We thus investigated a wide variety of visual stimuli, ranging from simple line patterns to more complex abstract patterns and photographs of common man-made patterns and scenes (for an overview, see **Table 1**). For the present synopsis, we focused on group-level differences and, as a consequence, did not address the issue of possible inter-individual differences in aesthetic ratings (Berlyne, 1971; Jacobsen and Höfel, 2002; Palmer and Griscom, 2012; Mallon et al., 2014; Güclütürk et al., 2016; Spehar et al., 2016).

In our study of images of man-made patterns and scenes, we included stimuli that were produced to be preferred by human observers, such as interior scenes or music album covers. Moreover, we studied images that are abstract as well as images

that display recognizable content. We expected that formal image properties would have a smaller effect on aesthetic ratings that are driven by image content.

Specifically, the following five sets of images were analyzed:

- (1) Simple irregular geometric shapes with a black contour on a white background (Experiment 1). The shapes were taken from the study by Bertamini et al. (2016) and consisted of either curved lines (for examples, see **Figures 1A,B**) or straight lines (**Figures 1C,D**). In a rating study, the authors revealed that participants liked the curved patterns more than the angular ones (see above). In the present study, we re-analyzed the data from Bertamini et al. (2016) and related them to image properties.
- (2) As an example of complex artificial patterns, we generated ornamental stimuli that are reminiscent of Islamic decorative art, by using the program *Taprats* (Experiment 2; Kaplan, 2000). Besides varying their curvilinearity, the patterns were designed to display different degrees of

TABLE 1 | Overview of experiments.

Experiment	Type of study	Type of Stimulus	Examples shown in	Number of stimuli	Number of participants	Rating term(s)	Curvilinearity variable	Results listed in	Original rating data from
1	Exploratory	Simple artificial shapes	Figure 1	3600	20	Liking	shape (curved/ angular)	Table 2 and Figure 1	Bertamini et al., 2016
2	Exploratory	Complex artificial patterns (Taprats ornaments)	Figure 2	100	31	Interesting/pleasing/ harmonious	None	Table 3, Figure 2, and Supplementary Table S1	Present study
3	Exploratory	Photographs of complex man-made objects (building facades)	Figure 3	50	27	Interesting/pleasing/ harmonious	None	Table 4, Figure 3, and Supplementary Table S2	Present study
4	Exploratory	Photographs of complex man-made scenes (interior architecture)	Figure 4	200	18	Pleasantness/ beauty	Contour (curvilinear/ rectilinear)	Table 5, Figure 4, and Supplementary Table S3	Vartanian et al., 2013
5	Exploratory	Complex man-made design (music album covers)	Figure 5	150	27 (same as in Experiment 3)	Interesting/pleasing/ harmonious	None	Table 6, Figure 5, and Supplementary Table S4	Present study
6	Experimental	Complex artificial line patterns	Figure 7	100	31 (same as in Experiment 2)	Interesting/pleasing/ harmonious	Shape (curved/ angular)	Table 7, Figures 6, 8, and Supplementary Table S5	Present study

complexity and self-similarity. These two image properties have been previously associated with the preference for visual stimuli, including artworks (Birkhoff, 1933; Berlyne, 1974; Jacobsen and Höfel, 2002; Forsythe et al., 2011; Taylor et al., 2011; Braun et al., 2013). In the present study, we therefore asked whether there is an overlap between the contribution of these two independent variables and edge orientation entropy.

In addition, we analyzed the following datasets and asked whether edge-orientation entropy has an effect on the preference of man-made patterns and scenes that surround us in every-day life:

- (3) Photographs of building facades, which range from rather simple window patterns of mostly horizontal and vertical edge orientations, to facades that were highly ornamental (Experiment 3). Facades represent a type of images that are affectively neutral, or at least with a low arousal potential, but can be more or less pleasing to human observers.
- (4) Interior architectural scenes that differ in their curvilinearity as well as in other architectural impressions (openness and ceiling height; Experiment 4). These stimuli were introduced and rated for their beauty and pleasantness in a previous study (Vartanian et al., 2013), which provided behavioral and neurophysiological evidence that the aesthetic preference for curvilinearity can be extended to architecture. We related these previous rating data to the image properties analyzed in the present study.
- (5) Album covers from three different music genres (classic, pop, and metal) served as examples of man-made images that vary in artistic demand and graphic design (Experiment 5). It has been shown that the presence of visual arts can enhance the evaluation of consumer perceptions and evaluations of products with which it is associated (Hagtvedt and Patrick, 2008). Moreover, album cover artwork can encode valuable information that helps place an artist into a musical context (Libeks and Turnbull, 2011). Here, we asked whether curvilinearity can possibly influence visual preference of album covers and might thus be a factor that can potentially affect consumer perception of music albums.

After the analysis of these datasets, we carried out a more direct test of the predictive power of edge-orientation entropy (Experiment 6). We created a set of artificial stimuli that are composed of identical sets of either curved or angular line elements and used them in an aesthetic rating experiment, in which the lines were arranged so that they differed in curvilinearity or edge-orientation entropy. This experimental design allowed us to study the contribution of the two factors on the aesthetic ratings.

In all experiments (except for the previously rated stimuli of Experiments 1 and 4; **Table 1**), we asked participants to evaluate the images according to three aesthetic rating terms (*pleasing*, *interesting*, and *harmonious*). We chose these terms based on a study by Cupchik and Gebotys (1990), which revealed differences

between the categories *interesting* and *pleasing*. The authors carried out multidimensional scaling and found that *interesting* relates to the dimensions of complexity and familiarity of images, whereas *pleasing* reflects the dimensions of emotional arousal and aesthetic effectance. Another model, proposed by Markovič (2012), identified two similar factors: aesthetic experience and hedonic tone. The former was related to ratings of “interesting,” “complex,” “imaginative,” whereas hedonic tone was more related to ratings of “pleasant,” “cheerful,” “warm.” In addition, we used *harmonious* as a term that relates more clearly to the hedonic value derived from image composition (Redies et al., 2015).

In multiple regression analyses, we related the ratings to the 1st-order and 2nd-order measures of the statistical distribution of edge orientations (Redies et al., 2017). In Experiments 1, 4, and 6, we included the angular/curved classification of the stimuli as additional predictors for their preference, as well as two other measures, self-similarity and edge density, which have been associated with traditional artworks previously (Braun et al., 2013). Self-similarity is a measure of how similar the histogram of oriented gradients are in parts of an image, compared to the histogram of the entire image (Dalal and Triggs, 2005; Amirshahi et al., 2012). Edge density is calculated on the basis of Gabor-filter responses (Redies et al., 2017) and served as a measure that is related to subjective ratings of complexity in images (Berlyne, 1971; Taylor et al., 2011; Braun et al., 2013). We included these properties as predictors of aesthetic preference in multiple regression analyses that evaluate their contribution to predicting the aesthetic ratings, relative to edge orientation entropy and curvilinearity.

Our study thus allows a comprehensive analysis of the role of curvilinearity and edge-orientation entropy in diverse types of man-made stimuli along different dimensions of visual preference.

GENERAL METHODS

Image Analysis

The analysis of objective image properties followed previously published procedures. In brief, the following properties were calculated:

Entropy of Edge Orientations

To study the spatial distribution of oriented edges in each image, we calculated the 1st-order and the 2nd-order Shannon entropy of orientation histograms (Geisler, 2008), as modified by Redies et al. (2017). Edge-orientation entropy should not be confused with the Shannon entropy of gray level values. Entropy of gray level values refers to the probability of encountering particular gray level values across an image (e.g., Kersten, 1987) or in local patches of an image (e.g., Chandler and Field, 2007). In contrast, edge-orientation entropy is based on edge-filtered images and refers to the probability of encountering particular orientations in an image (1st-order entropy) or to the statistics of pairwise comparisons of edge orientations across an image (2nd-order entropy; Geisler et al., 2001; Redies et al., 2017).

Briefly, we first downsampled the original input images to a size of 120,000 pixels. All color images were converted to grayscale images by using the ITU-R-601-2 luma transform, which weights the color channels according to their perceived luminosity. To extract edges, a set of 24 oriented Gabor filters that represented one full circle was applied (for details of the calculations, see Redies et al., 2017). Due to computing power restrictions, only the 10,000 highest edge responses were included in the analysis.

First-order edge-orientation entropy

First-order edge-orientation entropy was defined as the Shannon entropy for the summary orientation histogram that represented the strength of all edge orientations for the entire image. It measured how uniformly the edge orientations were distributed across the full spectrum of orientations in each image (Redies et al., 2017). Entropy was higher for more uniform orientation histograms, i.e., if all orientations were present at about equal strength in the image, and lower for unevenly distributed histograms. The maximum value for 24 bins of orientations (Gabor filters) was about 4.585.

Second-order edge-orientation entropy

Second-order edge-orientation entropy was calculated to measure how independent edge orientations were across an image. To obtain this measure, the orientation of each edge element was related to the orientation of all other edge elements in the same image by pairwise comparison (Geisler et al., 2001; Redies et al., 2017). First, for each edge pair, the orientation of the first (reference) edge was normalized to be horizontal. Then, for each distance d and radial direction α between all edge pairs, we obtained a $1d$ histogram, as we summed up the relative orientations θ between all edge pairs (θ histograms). For each bin defined by d (500 bins) and α (48 bins), histograms of the angles θ (24 bins across the full circle of orientations) were normalized. The θ histograms indicate the weighted probability, $P(d, \alpha, \theta)$, of observing an edge element at distance d in direction α and with an orientation difference θ for any given (reference) edge element. Filter responses near the image border (15 pixels absolute) were not included in the analysis. As a measure for the uniformity of the θ histograms, we calculated the Shannon entropy H , as follows:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^{24} P(x_i) \cdot \log_2 p(x_i) \quad (1)$$

where X is the θ histogram at distance d and angle α . For the 24 bins in the θ histogram, the theoretical entropy maximum is about 4.585 (same as for 1st-order entropy). Entropy values close to this maximum indicate a high degree of uniformity in a θ histogram, i.e., all orientations encountered in a bin at distance d and angle α relative to the orientation of the reference edge are about equally likely to occur, meaning that edge orientations are independent of each other. Entropy is lower for less uniform histograms, in which particular orientations are more prevalent compared to others. If 2nd-order entropy is low, orientation of one edge predicts orientation of other edges in the image with some non-random probability. To simplify the quantification of the results, we plotted entropy as a function of distance d

by averaging 2nd-order entropy across directions α . Finally, we averaged the values in these 1d plots for the distance range from 20 to 240 pixels (except for Experiment 1). Distances below 20 pixels was omitted to exclude regions of local collinearity (Redies et al., 2017).

Images of traditional artworks of different cultural provenance have relatively high 1st-order entropy (Redies et al., 2017), indicating that all orientations are about equally prominent in artworks on average (see also Koch et al., 2010). Moreover, 2nd-order entropy is also high in traditional artworks. This result implies that the orientations of distant edge pairs are independent of each other (Redies et al., 2017). Note that 1st-order entropy and 2nd-order entropy are not independent of each other; in general, 2nd-order entropy can be high only if 1st-order entropy is high.

Edge Density

As a measure that relates to perceived complexity of an image, we summed up the responses of all Gabor filters across the entire image, i.e., we calculated its edge density. Note that this measure reflects not only the density of edges in an image but also their contrast (i.e., edge strength). Humans prefer visual patterns of intermediate visual complexity in general (Berlyne, 1974; Taylor et al., 2011), although there are large inter-individual differences in complexity preference (Bies et al., 2016; Güclütürk et al., 2016).

Self-Similarity of Gradient Orientations (PHOG Method)

For each image, we calculated self-similarity and anisotropy of oriented gradients with a method that was derived from the PHOG descriptor (Bosch et al., 2007), as described before (Amirshahi et al., 2012). Color images were transformed into the Lab color space and image size was uniformly reduced to 100,000 pixels by bicubic interpolation and isotropic scaling for all images in all categories (Braun et al., 2013). To obtain the PHOG descriptor, we then generated histograms of oriented gradients (HOG features; Dalal and Triggs, 2005) for each image at consecutive levels of an image pyramid (Bosch et al., 2007). Histograms were obtained for 16 equally sized bins covering the full circle (360 degrees; Braun et al., 2013). Initially, the HOG features were calculated first at the ground-level (level 0) for the entire image. Then, the image was divided into four rectangles of equal size (level 1) and HOG features were calculated for each of the four sections at this level. Each section at level 1 was then again divided into four rectangles of equal size to generate the next level of the pyramid, and so on. Level 2 thus comprised 16 sections and level 3 contained 64 sections. The HOG features were calculated for each section at a given level.

To obtain a measure of self-similarity, the histograms at different levels of the pyramid were compared with the ground-level histogram (Amirshahi et al., 2012). We calculated self-similarity as the mean value for levels 1–3 of the pyramid in the present study. At higher levels, values for self-similarity become unstable, due the exceedingly small size of the image sections that is used in the analysis (Amirshahi et al., 2012). A value of 0 indicates minimal self-similarity and a value close to 1 nearly complete self-similarity. For a detailed description of the procedure, see the Appendix in Braun et al. (2013).

Rating Procedure

The stimuli and ratings analyzed in Experiments 1 and 4 were obtained from previous studies (Vartanian et al., 2013; Bertamini et al., 2016). For Experiments 2, 3, 5, and 6, the following general procedure was used to obtain aesthetic ratings on the set of stimuli used in each experiment.

Participants

Participants (for groups and numbers of participants, see **Table 1**) were recruited by advertisements in places frequented by students of various disciplines; they were mostly university students or graduates (for population details, see individual experiments). None of the participants were art professionals or had received formal training in the arts. All participants reported normal or corrected-to-normal vision. The study was approved by the ethics committee of Jena University Hospital (approval number 4808-05/16) and was carried out in accordance with the ethical guidelines of the Declaration of Helsinki. Prior to the experiment, all participants gave their written consent.

General Procedure

Before the experiments, participants were requested to fill out a questionnaire that included biographic questions (sex, age, handedness, and correction for abnormal vision; see individual experiments) as well as questions regarding the training and interest in the visual arts and music. Each experiment was carried out separately. Within each experiment, the subjective categories (*interesting*, *pleasing*, and *harmonious*) were evaluated separately as a block. For every participant, we randomized the order of the subjective categories as well as the order of the images within each block.

The stimuli were displayed on a black screen (EIZO ColorEdge CG241W) at a viewing distance of 70 cm that was assured by the use of a chin rest. Stimuli were presented at a size of 135 mm \times 135 mm (10.92° \times 10.92° of visual angle). For each stimulus run, a fixation cross was presented first (500 ms duration), followed by the stimulus image and a rating scale at the bottom of the screen. Participants were asked to rate each image on a continuous-looking, free scale (100 steps) that ranged from *not interesting* to *interesting* (and respective terms for *pleasing* and *harmonious*). The scale was displayed on the screen below the stimulus and participants entered their rating by clicking on the position chosen. For rating analysis, we converted the 100 steps of the rating scale to a scale ranging from 0 to 1. There was no time limitation for the participants to evaluate each image. After responding, the next presentation cycle began. Before starting the next evaluation block, participants were free to take a break for as long as they wished.

The stimuli used in Experiments 2, 3, and 6, which are not subject to copyright restrictions by third parties, as well as the raw data for all experiments can be retrieved from the Open Science Framework (accession code: osf.io/cxyj4).

Statistical Methods

By multiple linear regression, we analyzed the dependence of the different ratings on the four calculated image properties (1st-order entropy, 2nd-order entropy, edge density, and

self-similarity) for each experiment (Model 1). In Experiments 1 and 6, *shape* (curved or angular) served as an additional independent variable in Model 1, in Experiment 4 architectural features (curved or angular *contour*, *openness* of space and *ceiling height*), and in Experiment 5 music genre. We also considered reduced models that included the two measures of entropy as the only independent variables (Model 2). Moreover, for Experiments 1 and 6, we analyzed models that included the entropies and *shape* (Model 3) as well as *shape* alone (Model 4). This was done to assess the extent to which these variables of interest predicted the ratings, compared to the full models. Differences between models were assessed by an ANOVA (R^2 difference test). Because the present study focuses on group-level differences, all ratings were averaged across participants before entering them in the analysis.

The analysis was carried out with the *lm* package in R (R Development Core Team, 2017). This program also calculated which of the variables had a significant effect on the rating when the other variables in a given model were controlled for (highlighted in bold letters in the tables). Moreover, using the same package, R^2 values were calculated for each model to estimate how much of the variability in the outcome is accounted for by the predictors of each model. The R^2 values were adjusted to account for the number of predictors in each model (R^2_{adj}). In addition, the package calculated the Akaike Information Criterion (AIC) which considers both the model fit and the number of parameters used; it allows to compare the relative quality of the fit for different models that are applied to the same set of data (Akaike, 1974). The smaller the AIC values, the better the model.

As an index for the effect of the variables on the outcome in the models, standardized regression coefficients β_i were calculated with the *lm.beta* package of the R project. This index estimates the number of standard deviations by which the outcome will change as a result of a change of one standard deviation in the predictor, provided that the effects of all other predictors are held constant (Field et al., 2012).

Additionally, the dependencies of the ratings on selected variables were visualized in scatter plots and are shown in the figures, together with the lines from simple linear regressions; statistics for these regressions are provided in the figure legends.

EXPERIMENT 1: PATTERNS BY Bertamini et al. (2016)

Bertamini et al. (2016) created a series of simple geometric patterns that consisted of either curved lines (for examples, see **Figures 1A,B**) or straight lines (**Figures 1C,D**). Their rating study revealed that participants preferred the curved patterns over the angular ones. Here, we asked whether the two types of patterns also differed in their edge-orientation entropy. This is likely because the angular patterns contain straight lines of specific orientations. As a consequence, the strength of the edges would tend to be less uniform across orientations for the angular than for the curved lines. We therefore anticipated that the

TABLE 2 | Results from multiple linear regression analyses of the data from Experiment 1 (Bertamini et al., 2016).

Variable	β_i	t-value	p-value
Model 1 (AIC = 475.6; R^2_{adj} = 0.75; $F[5,174]$ = 106.9; $p < 0.0001$)			
Shape	0.70	8.24	< 0.0001
1st-order entropy	0.128	1.18	0.239
2nd-order entropy	0.032	0.35	0.725
Edge density	0.072	1.07	0.288
Self-similarity	-0.0007	-0.017	0.986
Model 2 (AIC = 564.0; R^2_{adj} = 0.58; $F[2,177]$ = 124.9; $p < 0.0001$) ¹			
1st-order entropy	0.56	7.16	< 0.0001
2nd-order entropy	0.24	3.10	0.002
Model 3 (AIC = 472.8; R^2_{adj} = 0.75; $F[3,176]$ = 178.7; $p < 0.0001$)			
Shape	0.75	10.92	< 0.0001
1st-order entropy	0.05	0.60	0.548
2nd-order entropy	0.10	1.65	0.101
Model 4 (AIC = 474.1; R^2_{adj} = 0.74; $F[1,178]$ = 521.3; $p < 0.0001$)			
Shape	0.86	22.83	< 0.0001

Model 1 is the full model. Model 3 describes the effect of shape (curved or angular), 1st-order entropy and 2nd-order entropy on the preferences ratings. The two measures of entropy are the only predictors in Model 2, while shape is the only predictor in Model 4. Variables that are significant predictors when controlling for the remaining variables are highlighted by bold letters. ¹Different from Model 1 ($F[177,174]$ = 39.97, $p < 0.0001$) and Model 3 ($F[177,176]$ = 119.34, $p < 0.0001$).

participants of the rating study preferred the (curved) stimuli with the higher entropy.

Methods

The 3,600 stimuli of Experiment 1 by Bertamini et al. (2016) were analyzed. The stimuli consisted of irregular shapes with a black contour on a white background. The shapes were based on Cassini ovals and were systematically altered along three parameters (shape, vertex, and articulation), resulting in 180 combinations of different stimulus parameters (90 with angular lines and 90 with curved lines; for examples, see **Figures 1A–D**). Image size was 460 pixels \times 460 pixels. Bertamini et al. (2016) asked twenty participants to rate the 180 different combinations for preference on a scale ranging from *dislike* (0) to *like* (100) with a mouse click on a continuously looking scale presented on the screen below the stimulus. In the present study, the mean preference ratings from the study by Bertamini et al. (2016) for each combination of parameters were averaged over participants and were then entered in a multiple regression analysis in which *shape* (curved and angular) served as a binary variable to indicate curvilinearity (**Table 1**). Because the patterns typically covered only an area of about 250 pixels \times 250 pixels in the images, the calculation of 2nd-order entropy was restricted to 20–160 pixels distance between edge pairs.

Results

Figure 1 and **Table 2** summarize the results for the effect of the shape and the calculated image properties (entropies) on the

mean preference ratings. **Table 2** lists the results for the four models that were used in the regression analysis. In the model with all independent variables (Model 1; see “Statistical Methods” section) and in Model 3, which includes *shape*, 1st-order entropy and 2nd-order entropy as independent variables, *shape* was the strongest predictor. In Model 2, which excluded *shape*, both edge-orientation entropies predicted preference, with 1st-order entropy being the strongest predictor. The explained variance (R^2_{adj}) was larger for Model 1 (75%) than for Model 2 (58%), and larger for Model 3 (75%) than for Model 2, but it did not differ significantly between any of the other model pairs including Models 2 and 4. The AIC indicates that Model 2 is inferior to the other models. **Figure 1** shows scatter plots of the relations between the mean preference ratings and 1st-order entropy (**Figure 1E**) and 2nd-order entropy (**Figure 1F**), respectively. These scatter plots also visualize the good separation of preference ratings based on *shape* alone (clusters of red and blue dots in **Figure 1**; predicted variance of 74% in Model 4). As described by Bertamini et al. (2016), curved patterns were preferred over angular ones. First-order entropy was higher for the curved stimuli (*median*: 4.47) than for the angular ones (*median*: 4.35; Mann–Whitney test, $U = 80$, $p < 0.0001$). A similar relation was obtained for 2nd-order entropy (*median*: 4.26 and 4.15, respectively; $U = 674$, $p = 0.0001$).

Discussion

Results matched our expectation that 1st-order entropy and 2nd-order entropy of edge orientations are higher in the curved stimuli than in the angular stimuli. In addition, our findings suggest that the two measures of entropy together predict the preference ratings of the stimuli about as well as their curved/angular shape (Bertamini et al., 2016).

EXPERIMENT 2: ORNAMENTAL GEOMETRIC PATTERNS

In the previous experiment, stimuli were relatively simple shapes. In Experiment 2, we therefore asked whether the

edge-orientation entropies relate to visual preference also for more complex geometric stimuli. To answer this question, we created a series of artificial ornamental patterns, some of which were vaguely reminiscent of decorative art (for examples, see **Figures 2A–F**).

Methods

With the freely available *Taprats* computer software¹ (Kaplan, 2000), author M. G. generated a set of artificial ornamental patterns. The size of the images was 500 pixels \times 500 pixels. From this set, we arbitrarily selected a subset of 100 patterns that differed widely not only in edge-orientation entropy but also in self-similarity and edge density (for a more detailed description of these measures, see section “General Methods”). For the exemplary images shown in **Figures 2A–F**, the calculated image properties are listed in **Supplementary Table S1**. Thirty-one participants (*mean* 25.8 years, *range* 18–35 years, 12 male) rated the 100 *Taprats* images in the same session as the stimuli in Experiment 6. The order of the two experiments was randomized. We asked participants to rate the patterns according to the three rating terms *interesting*, *pleasing* and *harmonious* (see section “General Methods”).

Results

Table 3 lists the results of the multiple linear regression analysis. **Supplementary Table S1** displays the median values for the image properties and ratings. The full models (Model 1) can explain 13 and 22% of the variance for the rating terms *pleasing* and *interesting*, respectively. The strongest predictors are 2nd-order entropy (positive effect) and self-similarity (negative effect). The same two variables are also predictors for the rating term *harmonious*, but Model 1 has stronger predictive power (43%). For *harmonious*, the effect of the two variables has an inverse pattern, i.e., there is a negative effect for 2nd-order entropy and a positive effect for self-similarity. For *harmonious* only, 1st-order entropy is also a predictor when controlling for

¹<http://www.cgl.uwaterloo.ca/csk/washington/taprats> (last accessed 28 December 2017)

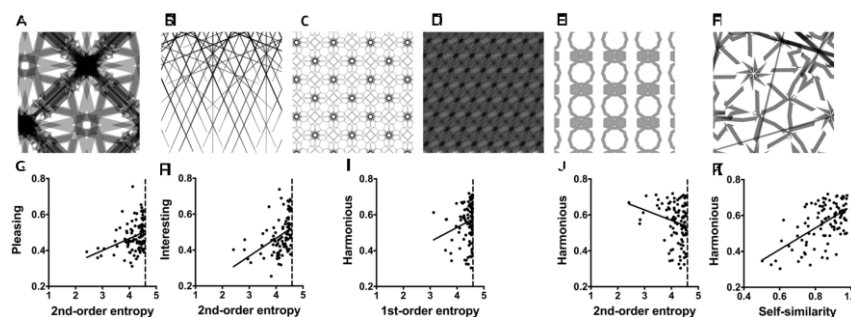


FIGURE 2 | (A–F) Examples of the *Taprats* stimuli (Experiment 2). The ratings and image properties for the images are listed in Supplementary Table S1. (G–K) Dot plots of the relation between *pleasing* versus 2nd-order entropy of edge orientations (G); *interesting* versus 2nd-order entropy (H); *harmonious* versus 1st-order entropy (I); *harmonious* versus 2nd-order entropy (J); and *harmonious* versus self-similarity (K). Each dot represents the results for one image, averaged across participants. The straight lines in (G–K) indicate the results from simple regression analyses (G, $R^2 = 0.113$; $F[1,98] = 12.51$, $p = 0.0006$; H, $R^2 = 0.174$; $F[1,98] = 20.66$, $p < 0.0001$; I, $R^2 = 0.037$; $F[1,98] = 3.73$, $p = 0.056$; J, $R^2 = 0.048$; $F[1,98] = 4.91$, $p = 0.029$; and K, $R^2 = 0.342$; $F[1,98] = 50.97$, $p < 0.0001$).

TABLE 3 | Results from a multiple linear regression analyses (*Taprats* patterns, Experiment 2).

Variable	β_i	t-value	p-value
<i>Pleasant</i>			
Model 1 ($AIC = -509.8$; $R^2_{adj} = 0.13$; $F[4,95] = 4.60$; $p = .0019$)			
1st-order entropy	-0.06	-0.553	0.581
2nd-order entropy	0.36	3.171	0.0021
Edge density	0.11	1.032	0.305
Self-similarity	-0.23	-2.153	0.034
Model 2 ($AIC = -509.0$; $R^2_{adj} = 0.10$; $F[2,97] = 6.69$; $p = 0.0019$)			
1st-order entropy	-0.13	-1.206	0.231
2nd-order entropy	0.40	3.590	0.0005
<i>Interesting</i>			
Model 1 ($AIC = -481.5$; $R^2_{adj} = 0.22$; $F[4,95] = 7.87$; $p < 0.0001$)			
1st-order entropy	-0.106	-0.975	0.33
2nd-order entropy	0.45	4.221	< 0.0001
Edge density	0.14	1.347	0.181
Self-similarity	-0.28	-2.769	0.0068
Model 2 ($AIC = -477.7$; $R^2_{adj} = 0.17$; $F[2,97] = 11.24$; $p < 0.0001$) ¹			
1st-order entropy	-0.19	-1.800	0.075
2nd-order entropy	0.50	4.695	< 0.0001
<i>Harmonious</i>			
Model 1 ($AIC = -491.7$; $R^2_{adj} = 0.43$; $F[4,95] = 19.39$; $p < 0.0001$)			
1st-order entropy	0.24	2.557	0.0121
2nd-order entropy	-0.32	-3.544	0.0006
Edge density	-0.11	-1.303	0.196
Self-similarity	0.60	6.903	< 0.0001
Model 2 ($AIC = -453.38$; $R^2_{adj} = 0.13$; $F[2,97] = 8.631$; $p = 0.0004$) ²			
1st-order entropy	0.39	3.595	0.0005
2nd-order entropy	-0.39	-3.616	0.0005

^{1,2} Different from Model 1: ¹ $F[97,95] = 3.84$, $p = 0.025$; and ² $F[97,95] = 25.74$, $p < 0.0001$. In Model 1, 1st-order entropy, 2nd-order entropy, edge density and self-similarity were predictors of the three aesthetic ratings (pleasing, interesting, and harmonious). Model 2 was restricted to the two measures of entropy. Variables that are significant predictors when controlling for the remaining variables are highlighted by bold letters.

the other variables. Here, self-similarity has a stronger predictive power than the edge-orientation entropies (Table 3). Restriction of the model to the two measures of entropy (Model 2 in Table 3) yields similar results for *pleasing* (10 and 13%, respectively; R^2 difference test, $F[97,95] = 2.32$, $p = 0.103$). However, Model 2 has slightly less predictive power for *interesting* (17 and 22%, respectively) and much less for *harmonious* (13 and 43%, respectively).

Figure 2 displays scatter plots of the relation between some of the variables and the three rating terms. Note that, for 1st-order entropy, values are closer to the maximum value of about 4.585 (for orientation histograms with 24 bins; Supplementary Table S1) than for 2nd-order entropy.

Discussion

Experiment 2 shows that the four calculated variables predict the aesthetic ratings not only for simple shapes (Experiment 1) but also for more complex ornamental patterns. However, the strength of the effect depends on the type of aesthetic rating. Compared to *pleasing* and *interesting*, the effect is stronger for *harmonious*, where self-similarity is a stronger predictor than the two measures of entropy. Moreover, the sign of the effect is opposite for *harmonious* for all four variables.

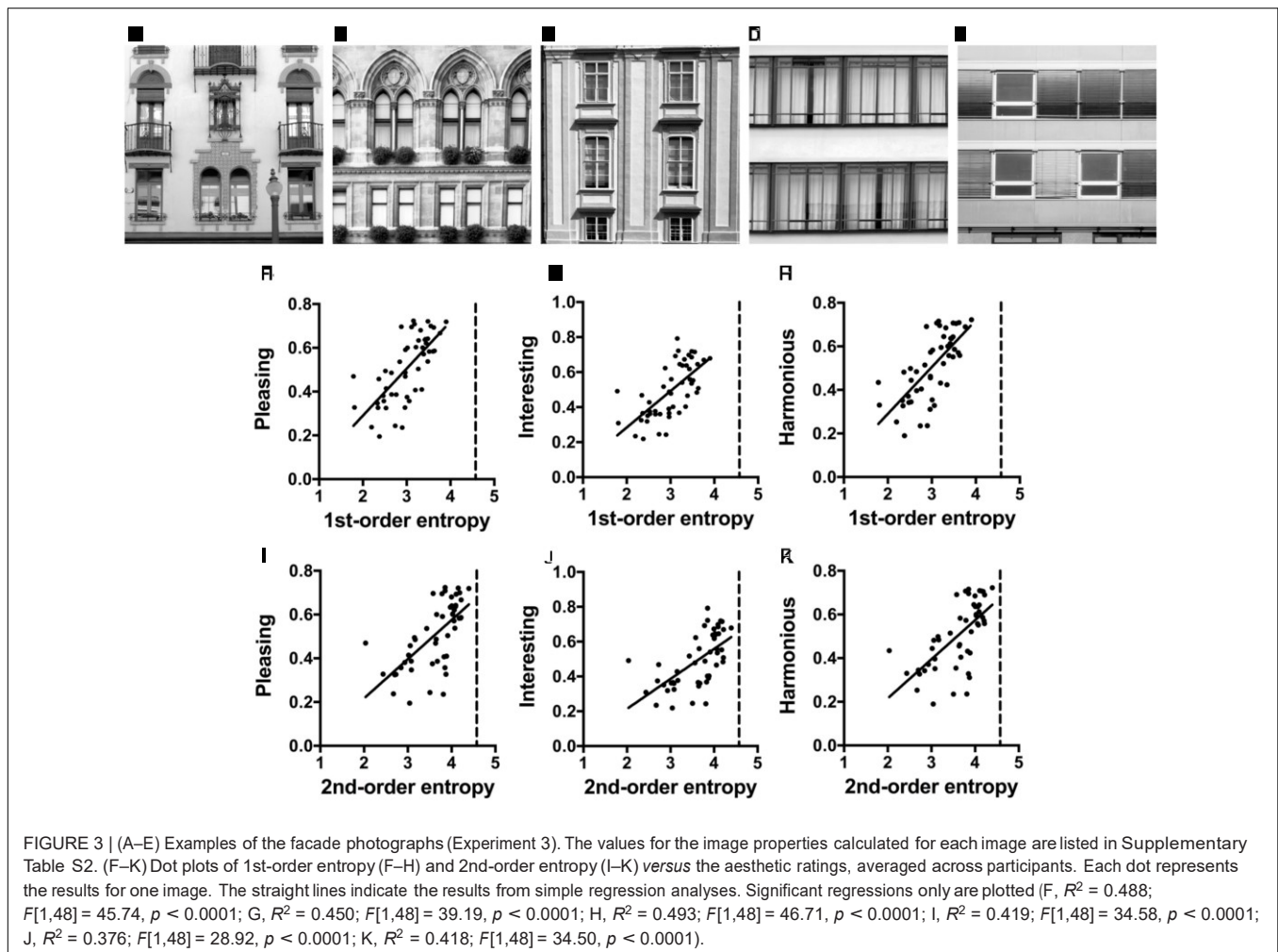
EXPERIMENT 3: BUILDING FACADES

Next, we asked whether edge-orientation entropy is a predictor of aesthetic ratings for objects that we encounter in our everyday environment. Modern humans spend most of their time inside buildings or outside in an urban environment and are thus exposed to a large spectrum of man-made objects, patterns and scenes. It has been proposed that the statistics of the visual environment can have an effect on our psychological well-being (Joye, 2007). The question of what objective characteristics human prefer in their visual environment is thus of considerable interest for architecture and urban development. Therefore, as examples of architecture, we studied images of building facades (Experiment 3) and indoor architectural scenes (Experiment 4).

The majority of people in industrialized countries live in cities. The facades of buildings are among the visual stimuli that are frequently and regularly viewed by a large number of people. Facades are dominated by regularly arranged windows with a structure of mostly cardinal (horizontal and vertical) orientations. This basic pattern can be embellished by the addition of more or less elaborate ornaments and decorations, which can render the facades more pleasant or interesting to look at. Consequently, building facades are well suited to study general visual preferences.

Methods

Front facades were photographed by author C. R., mostly in the cities of Vienna and Berlin. Images were taken with a digital camera (EOS 500D with EF-S15-85 mm f/3.5-5.6 IS USM lens; Canon, Tokyo, Japan) and were saved in RAW format. Out of the 175 photographs in the original dataset (Braun et al., 2013), 50 images that covered a variety of decorations were selected for the rating experiment. Each photograph was cropped to select a photographic detail that showed two stories of a building. For monochrome versions of the images, we used the L channel of the Lab color space, in which channels are weighted according to their perceived luminosity, similar to the luma transform, which was mentioned in the section "General Methods, Entropy of Edge Orientations". The image size was 500 pixels \times 500 pixels. The luminance histograms were equalized such that they shared the same luminance distribution, which was computed as the mean cumulative histogram of all images. Examples are shown in Figures 3A–E and their image properties are listed in Supplementary Table S2.



The group of participants was different from the group that participated in Experiment 2. Twenty-seven participants (mean age: 26.4 years, range: 20–40 years, 14 male) were asked to evaluate 50 facade photographs according to the three rating terms *interesting*, *pleasing*, and *harmonious* (see section “General Methods”) in the same session as the stimuli in Experiment 5. The order of the experiments and the three ratings was randomized.

Results

The results of the multiple linear regression analysis are listed in **Table 4**. The full models with all four variables (Model 1) explain 55, 51, and 29% of the variance in the ratings for *interesting*, *pleasing*, and *harmonious*, respectively. For *pleasing* and *interesting*, the strongest predictor was 1st-order entropy whereas the four variables were similarly strong predictors for *harmonious*. Restriction of the model to the two measures of entropy (Model 2 in **Table 4**) yields results similar to Model 1 for *interesting* (48 and 51%, respectively; R^2 difference test, $F[47,45] = 2.67$, $p = 0.081$), but Model 2 has less predictive power for *pleasing* (48 and 55%, respectively) and for *harmonious* (21 and 29%, respectively). For all rating terms, 1st-order entropy

is a strong positive predictor whereas 2nd-order entropy has a negative effect. **Figures 3F–K** shows scatter plots for the two measures of entropy with the results from single linear regression. For *pleasing*, *interesting*, and *harmonious*, 1st-order entropy alone explains 49, 45, and 42%, and 2nd-order entropy alone 42, 38, and 42% of the variance, respectively.

Discussion

Results for the facades suggest that edge-orientation entropy plays a role also in the aesthetic rating of man-made objects. For all three rating terms, edge-orientation entropy is a strong predictor. Facades are rated as more *interesting* and *pleasing* when overall edge orientation is more evenly distributed across the full spectrum of orientations. This effect is possibly achieved by complementing the cardinal orientations, which are prevalent in the window frames, by various ornaments and decorations. When oblique orientations are introduced, edges are more uniformly distributed across orientations (higher 1st-order entropy). Moreover, for *harmonious*, higher ratings are obtained when the spatial distribution of edge orientations across the facades is more irregular (higher 2nd-order entropy; for an example, see **Figure 3A**).

TABLE 4 | Results from a multiple linear regression analyses for facade photographs (Experiment 3).

Variable	β_i	<i>t</i> -value	<i>p</i> -value
<i>Pleasant</i>			
Model 1 (AIC = -224.0; R^2_{adj} = 0.55; $F[4,45]$ = 16.11; $p < 0.0001$)			
1st-order entropy	0.72	1.891	0.065
2nd-order entropy	-0.08	-0.222	0.823
Edge density	0.21	1.851	0.071
Self-similarity	0.16	1.581	0.138
Model 2 (AIC = -218.85; R^2_{adj} = 0.48; $F[2,47]$ = 16.11; $p < 0.0001$) ¹			
1st-order entropy	1.11	2.890	0.0058
2nd-order entropy	-0.42	-1.101	0.276
<i>Interesting</i>			
Model 1 (AIC = -215.7; R^2_{adj} = 0.51; $F[4,45]$ = 13.99; $p < 0.0001$)			
1st-order entropy	0.88	2.209	0.032
2nd-order entropy	-0.24	-0.602	0.550
Edge density	0.16	1.323	0.192
Self-similarity	0.14	1.258	0.215
Model 2 (AIC = -214.1; R^2_{adj} = 0.48; $F[2,47]$ = 23.64; $p < 0.0001$)			
1st-order entropy	1.18	3.067	0.0036
2nd-order entropy	-0.51	-1.313	0.196
<i>Harmonious</i>			
Model 1 (AIC = -221.9; R^2_{adj} = 0.29; $F[4,45]$ = 6.02; $p = 0.0006$)			
1st-order entropy	0.20	0.408	0.685
2nd-order entropy	0.26	0.541	0.591
Edge density	0.21	1.449	0.154
Self-similarity	0.20	1.473	0.148
Model 2 (AIC = -218.8; R^2_{adj} = 0.21; $F[2,47]$ = 7.82; $p = 0.0012$) ²			
1st-order entropy	0.61	1.288	0.204
2nd-order entropy	-0.12	-0.243	0.809

^{1,2} Different from Model 1: ¹ $F[47,45] = 4.54$, $p = 0.016$; and ² $F[47,45] = 3.42$, $p = 0.042$. In Model 1, 1st-order entropy, 2nd-order entropy, edge density and self-similarity were predictors of the three aesthetic ratings (pleasant, interesting, and harmonious). Model 2 was restricted to the two measures of entropy. Variables that are significant predictors when controlling for the remaining variables are highlighted by bold letters.

EXPERIMENT 4: INTERIOR SCENES

Urban dwellers worldwide spend most of their time indoors. Therefore, as another example of man-made stimuli of general and widespread appearance, we analyzed 200 images of modern interior architecture. The images were previously studied by Vartanian et al. (2013) and varied in several architectural aspects, including their degree of curvilinearity (for examples, see Figures 4A–D). Based on results from approach-avoidance decisions and fMRI data, Vartanian et al. (2013) concluded that the well-established preference for curvilinear objects extends to architecture. In the present *post hoc* analysis, we asked whether

the image properties calculated for these images relate to the ratings of *pleasantness* and *beauty* ratings that were obtained in the study by Vartanian et al. (2013).

Methods

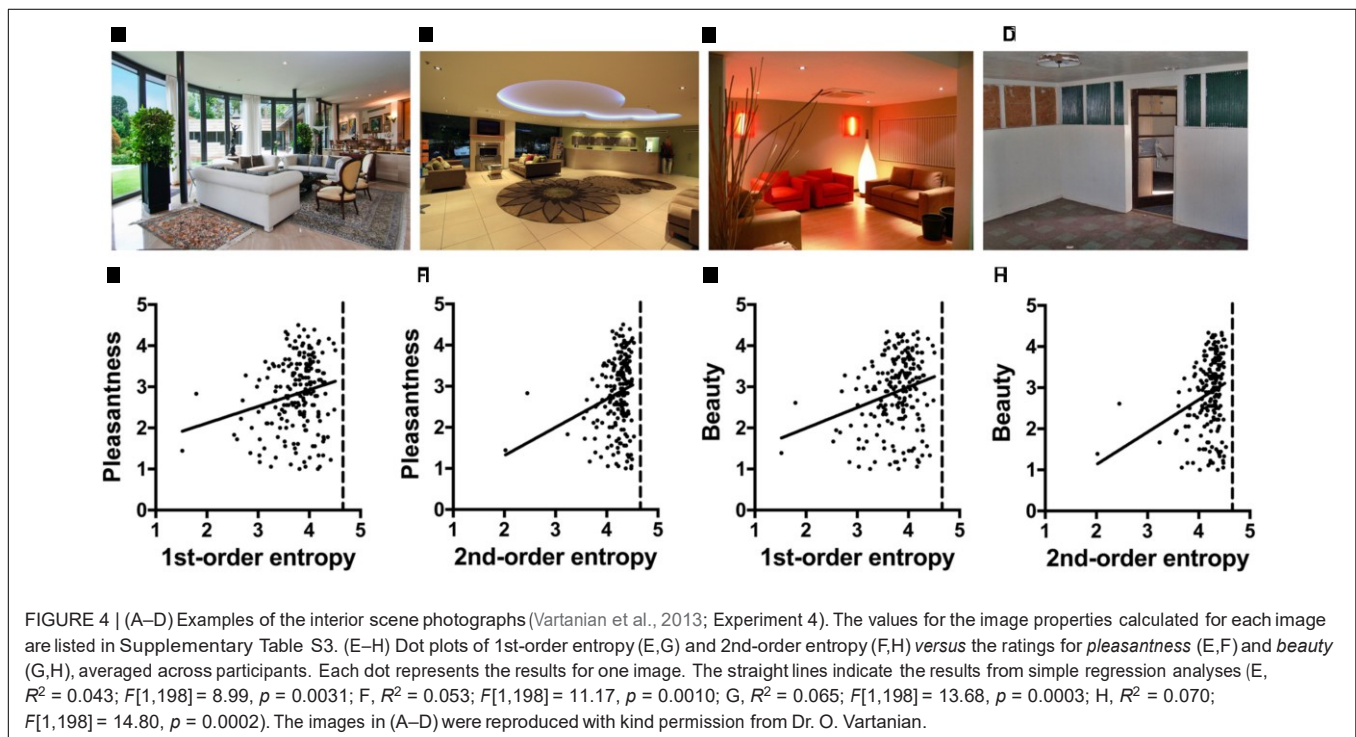
The 200 color images of interior scenes from the study of Vartanian et al. (2013) were kindly provided by Oshin Vartanian, University of Toronto. In their study, the authors had these stimuli rated by eighteen participants for *pleasantness* and *beauty* on a five-point scale with anchors “very unpleasant”/“very pleasant” and “very ugly”/“very beautiful” respectively, after the completion of the fMRI scanning in their study. Note that the two ratings terms are not independent of each other. The *pleasant* ratings accounted for 58% of the observed variance in *beautiful* ratings. The images were systematically controlled for the architectural features *contour* (curvilinear or rectilinear), *ceiling height* (high or low) and *openness of space* (open or closed; Vartanian et al., 2013). In the present study, we used these three binary variables alongside the four measured image properties (for mean values, see Supplementary Table S3) as independent variables in a multiple linear regression analysis to predict the ratings of *pleasantness* and *beauty*, respectively, which had been obtained by Vartanian et al. (2013) (Model 1). *Contour* (curvilinear or rectilinear) served as a binary variable to indicate curvilinearity (Table 1). We also ran the same analysis with the two measures of entropy only (Model 2).

Results

The full model (Model 1), which includes the four image properties and the three architectural control variables, explains 14 and 15% of the variance for the *pleasantness* and *beauty* ratings, respectively (Table 5). For both ratings, *openness* but not *contour* or *ceiling height* are predictors when the other variables are controlled for. Moreover, edge density and self-similarity are also predictors. The restricted Model 2 has less predictive power than Model 1, and predicted 4 and 6% of the variance, respectively. *Contour* alone did not predict the ratings. The scatter plots in Figures 4E–H visualize the minor, positive effect of the two edge-orientation entropies on the ratings.

Discussion

Vartanian et al. (2013) reported that participants were more likely to judge interior spaces as beautiful if they were curvilinear as opposed to rectilinear. In their fMRI experiment, beauty ratings co-varied with activation of a brain network that is known to underlie the aesthetic evaluation of different types of visual stimuli. The present *post hoc* analysis of the post-scanning evaluations of the same stimuli, reveal that *openness* is a much stronger predictor of the ratings of *pleasantness* and *beauty* than *contour* or *ceiling height*. Moreover, 1st-order and 2nd-order entropy alone also predict some of the variance of the ratings of *pleasantness* and *beauty* (about 4 and 6%, respectively; Table 5). Compared to the building facades (Figures 3F–K), the values for the entropies are relatively high and, for 2nd-order entropy, close to the maximum value of about 4.585 (dashed vertical lines in Figures 4E–H). However, the respective linear



correlations with the ratings (Figures 4E–H) are relatively weak.

EXPERIMENT 5: MUSIC ALBUM COVERS

Following artificial patterns and veridical photographs of architecture, we next investigated the role of edge-orientation entropies in the aesthetic rating of music album covers. It has been shown that low-level image features of music-related visual information, such as a cover art, can differ between music genres (Libeks and Turnbull, 2011). To analyze a spectrum of music album covers, we studied covers from three different music genres, which were classified according to the MUSIC model by Rentfrow et al. (2011). This model describes musical preference in relation to sonic and psychological attributes in various genres and contains five different labels: *Mellow* (relaxing, quiet sometimes sad music such as R&B and soft rock), *Unpretentious* (country, folk and singer/songwriter genres), *Sophisticated* (jazz and other inspiring, dynamic music), *Intense* (distorted, loud aggressive music, such as classic rock, punk and heavy metal) and *Contemporary* (electric, pop genres). In the present study, we arbitrarily chose pop (short for popular music) as an example of *Contemporary* music, metal for *Intense* music and classic music for *Sophisticated* music.

Methods

For each music genre (metal, pop and classic music), we collected 50 images (150 images in total) from private music collections and the internet (for examples, see Figures 5A–C). The 150 images were presented as a block in randomized

order. The same 27 participants as in Experiment 3 took part in the experiment. The order of the two experiments was randomized.

For multiple linear regression, we used a model in which all images were analyzed together, and the four image properties and the three music genres were independent variables (Model 1; Table 6). With this model, we also analyzed the music genres, which were represented by a categorical variable. In addition, Model 2 assessed the effect of the entropies alone.

Results

The mean values for 1st-order entropy and 2nd-order entropy are close to the theoretical maximum values (about 4.585; Supplementary Table S4; see dashed vertical lines in Figures 5D–I). Table 6 lists the results from multiple linear regression for the full model, which includes all four image properties and music genre (Model 1), calculated on the basis of all 150 images. Model 1 explains 4.5, 25, and 9.3% of the rating variability for *pleasing*, *interesting*, and *harmonious*, respectively. In this model, larger 1st-order entropy tends to increase ratings and larger 2nd-order entropy tends to decrease ratings for each of the three rating terms (Table 6). However, single linear regressions did not yield slopes significantly different from zero for the two measures of entropy (Figures 5D–I). For all three rating terms, music genre contributes substantially to the predictions of the model. For *interesting*, the music genre *metal* is by far the strongest predictor. For *harmonious*, the variables *pop* and *metal* are significant predictors when the other variables are controlled for.

When the model is restricted to the two measures of entropy (Model 2), predictive power does not decrease for *pleasing* (R^2

TABLE 5 | Results from a multiple linear regression analyses for interior scene photographs (Experiment 4).

Variable	β_i	t-value	p-value
<i>Pleasantness</i>			
Model 1 (AIC = -80.98; R^2_{adj} = 0.14; $F[7,192]$ = 5.55; $p < 0.0001$)			
1st-order entropy	0.12	0.797	0.426
2nd-order entropy	0.13	0.870	0.385
Edge density	0.24	3.243	0.0014
Self-similarity	-0.18	-2.580	0.0106
Contour	-0.005	-0.072	0.943
Openness	0.20	2.897	0.0042
Ceiling height	0.025	0.371	0.0711
Model 2 (AIC = -65.1; R^2_{adj} = 0.044; $F[2,197]$ = 5.57; $p < 0.0045$) ¹			
1st-order entropy	0.017	0.113	0.910
2nd-order entropy	0.22	1.447	0.149
<i>Beauty</i>			
Model 1 (AIC = -79.53; R^2_{adj} = 0.15; $F[7,192]$ = 5.82; $p < 0.0001$)			
1st-order entropy	0.17	1.163	0.246
2nd-order entropy	0.11	0.766	0.444
Edge density	0.22	3.061	0.0025
Self-similarity	-0.18	-2.544	0.0117
Contour	0.045	0.679	0.498
Openness	0.18	2.619	0.0095
Ceiling height	0.037	0.539	0.591
Model 2 (AIC = -65.88; R^2_{adj} = 0.062; $F[2,197]$ = 7.59; $p = 0.0007$) ²			
1st-order entropy	0.16	0.647	0.518
2nd-order entropy	0.27	1.209	0.228

^{1,2}Different from Model 1: ¹ $F[197,192] = 5.31$, $p = 0.00014$; and ² $F[197,192] = 4.82$, $p = 0.00036$. In Model 1, 1st-order entropy, 2nd-order entropy, edge density, self-similarity and the three architectural variables contour, openness, and ceiling height were predictors for the three types of aesthetic ratings (pleasantness and beauty). Model 2 was restricted to the two measures of entropy. Variables that are significant predictors when controlling for the remaining variables are highlighted by bold letters.

difference test, $F[143,147] = 0.984$, $p = 0.419$). However, the AIC suggests that Model 2 is better than Model 1. Compared to Model 1, Model 2 does not allow a significant prediction for *interesting*, and predicts only 3.5% of the variance for *harmonious*.

When music genres are analyzed separately (results not shown in a table), the two models do not predict the ratings for *classic* and *metal* covers. However, self-similarity alone predicts ratings of *classic* album covers for *pleasing* ($R^2_{adj} = 0.086$, $F[1,48] = 5.59$, $p = 0.022$) and *interesting* ($R^2_{adj} = 0.138$, $F[1,48] = 8.84$, $p = 0.005$), but not for *harmonious*. Model 1 predicts ratings of *pop* album covers for *pleasing* ($R^2_{adj} = 0.14$, $F[4,45] = 3.05$, $p = 0.026$), *interesting* ($R^2_{adj} = 0.13$, $F[4,45] = 2.868$, $p = 0.034$) and *harmonious* ($R^2_{adj} = 0.27$, $F[4,45] = 5.547$, $p = 0.0010$), with 1st-order entropy (positive effect) and 2nd-order entropy (negative effect) being the strongest predictors.

Discussion

The variance predicted by the full model, which includes the four image properties and music genre as variables, was relatively low for *pleasing* (4.5%; **Table 6**) and *harmonious* (9.3%). For *pleasing*, the two edge-orientation entropies alone (Model 2) accounted for a similar amount of variability (4.5%) but the entropies were rather weak predictors for *harmonious* (3.5% only). The higher predictive power of Model 1 for *interesting* was largely predicted by music genre, specifically the *metal* category (25%), which was rated more *interesting* than the other two music genres on average (**Supplementary Table S4**). As predictors, the image properties play less of a role (**Table 6**). However, the relatively weak influence of the edge-orientation entropies on the ratings may also be due to a ceiling effect because values for both entropies (**Supplementary Table S4**) are closer to their maximum value than in Experiments 2–4 (**Supplementary Tables S1–S3**). More of the variances in the ratings is explained if the music genres are analyzed separately, at least for *classic* and *pop* covers. Here, Model 1 and self-similarity, respectively, account for 8–27% of the variances within the two music genres.

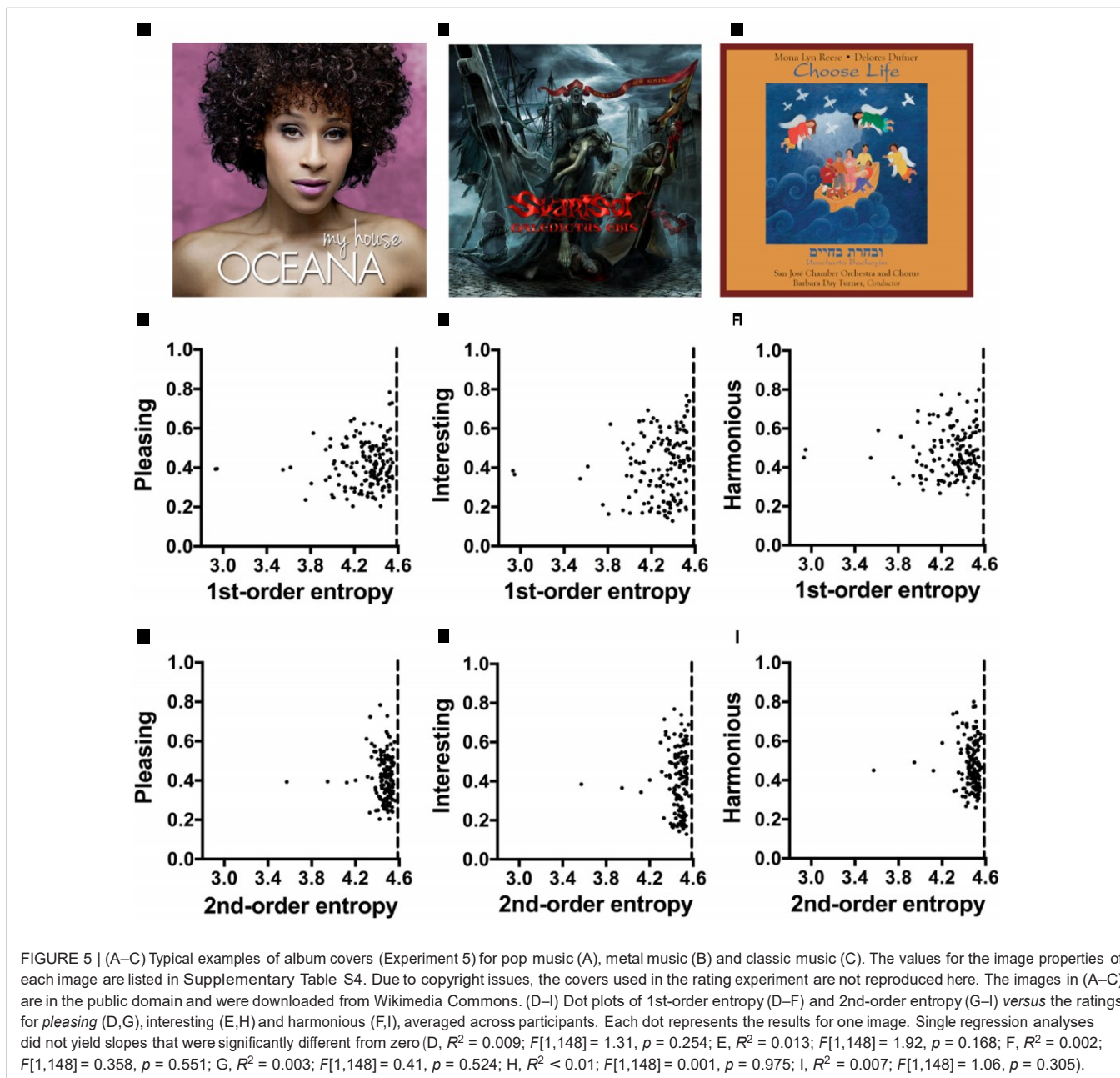
EXPERIMENT 6: ANGULAR/CURVED LINE PATTERNS

Experiment 6 is different from the previous set of experiments. In this second part of our study, we created artificial patterns that were composed of either curved lines or straight lines that formed sharp angles. The aim was to directly manipulate entropy and curvature. Each stimulus consisted of 40 separate line elements and was thus considerably more complex than the stimuli analyzed in Experiment 1. More importantly, we systematically increased and decreased the 2nd-order edge-orientation entropy by manipulating the layout of the lines using an evolutionary approach that changed a stimulus stepwise until a desired entropy value was reached. In this way, we obtained stimuli that varied in their curvilinearity or their 2nd-order edge-orientation entropy, but were composed of comparable sets of lines. This allows us, for the first time, to study the relative contributions of curvilinearity and edge-orientation entropy to the aesthetic ratings. Like in Experiments 2, 3, and 5, we asked participants to rate the stimuli according to how *pleasing*, *interesting*, and *harmonious* they were perceived. Based on the postulated preference of humans for curvilinear stimuli, we expected that the curved stimuli would be rated more highly than the angular patterns. Moreover, because artworks possess high edge-orientation entropy (Redies et al., 2017), we wondered whether the stimuli with high 2nd-order entropy would be rated more highly than the stimuli with low 2nd-order entropy.

Methods

Generation of the Stimuli

We created images within specific ranges of entropy using an evolutionary procedure, which will be described in the following. At the outset, we defined a set of fixed line elements, each consisting of three points in the plane. The points for each



element can be connected by drawing a line from the first to the second point and from the second to the third one. The result is a triangle with one open side because there is no connection from the first to the last point (Figure 6A). Alternatively, the three points can be expressed as a quadratic Bézier curve. The resulting element has the same start and end points as the first one, but no sharp corner (Figure 6B). We refer to the two types of lines as “angular” and “curved” respectively (for examples, see Figure 7). As shown in Figures 6A,B, each set of 20 line elements contained shorter and longer lines with different relative positions of the intervening points. Two sets of the 20 line elements shown in Figure 6 were used for each stimulus, resulting in a total of 40 elements.

By an evolutionary procedure, we generated stimuli with a wide range of 2nd-order edge-orientation entropy. This was accomplished by manipulating the position and orientation of each stimulus until it reached a desired entropy value. The procedure to achieve this goal was as follows: In a first step, we set each line element to a random position on the canvas and measured the 2nd-order edge-orientation entropy of the resulting image containing all elements. A mutation of this seed image was then obtained by altering the position of each of its elements with probability $p = 0.1$ by either translation or rotation, either of which was selected randomly. In case of a translation, an element was shifted in a random direction by a random distance between zero and the size of the canvas times a strength factor. We started

TABLE 6 | Results from a multiple linear regression analyses for music album covers (Experiment 5).

Variable	β_i	t-value	p-value
<i>Pleasant</i>			
Model 1 (AIC = -653.5; R^2_{adj} = 0.045; $F[6,143]$ = 2.17; p = 0.049)			
1st-order entropy	0.38	2.376	0.0188
2nd-order entropy	-0.370	-2.371	0.0191
Edge density	0.042	0.463	0.644
Self-similarity	0.023	0.259	0.796
Genre metal	0.282	1.629	0.105
Genre pop	0.031	0.593	0.554
Model 2 (AIC = -657.4; R^2_{adj} = 0.045; $F[2,147]$ = 4.54; p = 0.0122)			
1st-order entropy	0.41	2.942	0.0038
2nd-order entropy	-0.38	-2.777	0.0062
<i>Interesting</i>			
Model 1 (AIC = -593.3; R^2_{adj} = 0.25; $F[6,143]$ = 9.47; p < 0.0001)			
1st-order entropy	0.268	1.919	0.057
2nd-order entropy	-0.253	-1.839	0.068
Edge density	0.132	1.639	0.103
Self-similarity	0.092	1.151	0.252
Genre metal	0.833	5.448	< 0.0001
Genre pop	0.060	1.319	0.189
Model 2 (AIC = -556.7; R^2_{adj} = 0.024; $F[2,147]$ = 11.24; p < 0.0640) ¹			
1st-order entropy	0.33	2.366	0.0193
2nd-order entropy	-0.267	-1.910	0.0581
<i>Harmonious</i>			
Model 1 (AIC = -645.9; R^2_{adj} = 0.093; $F[6,143]$ = 3.55; p = 0.0026)			
1st-order entropy	0.39	2.511	0.0131
2nd-order entropy	-0.37	-2.458	0.0152
Edge density	-0.18	-1.969	0.0509
Self-similarity	0.014	0.159	0.874
Genre metal	-0.37	-2.182	0.0308
Genre pop	-0.12	-2.440	0.0159
Model 2 (AIC = -640.5; R^2_{adj} = 0.035; $F[2,147]$ = 3.74; p = 0.026)			
1st-order entropy	0.35	2.536	0.0126
2nd-order entropy	-0.37	-2.666	0.0085

^{1,2}Different from Model 1: ¹ $F[143,147]$ = 12.38, p < 0.0001; and ² $F[143,147]$ = 3.331, p = 0.0121. Model 1 comprised all four image properties as well as music genre to predict the aesthetic ratings. Model 2 was restricted to 1st-order entropy and 2nd-order entropy. Variables that are significant predictors when controlling for the remaining variables are highlighted by bold letters.

with a strength factor of 0.5 and decreased it linearly until it reached 0.01, so that changes became successively smaller at later stages of the process. In case of a rotation, we rotated an element around its own center by an angle between $-\pi/2$ and $\pi/2$ times the same strength factor. Whenever parts of an element had been shifted to positions outside of the canvas after mutation, they were shifted back.

After each mutation, we measured the total 2nd-order entropy of the resulting image for all pairs of edges that were separated by more than 20 pixels, including pairs of edges that were separated by more than 240 pixels. If their entropy value was closer to the desired value, we used the mutated image as the new seed image for a future generation in the evolutionary procedure. If the entropy value was farther, the image was discarded and the procedure started anew with the seed image. In this way, a series of images was generated with entropy values that converged on the desired value; the procedure was stopped when an image with a value close to the desired value was generated. For technical reasons, the resulting images had to be transformed to a different image format for a better display of the lines in the rating experiment. With this procedure, we obtained 50 images each with angular and curved lines, respectively (100 images in total), which covered a wide range of 2nd-order entropy values (for examples, see **Figure 7**).

Rating Experiment

Rating was carried out in the same session as Experiment 2. The order of the two experiments was randomized. Like in Experiment 2, the size of the images was 500 pixels × 500 pixels. Again, we asked participants how *interesting*, *pleasant* and *harmonious* they rated the stimuli (see section “General Methods”). Participants were the same 31 persons who took part in Experiment 2. The order of the two experiments was randomized. In the multiple linear regression, *Shape* (curved or angular) served as a binary variable to indicate curvilinearity (**Table 1**).

Results

For the 100 images used in the rating experiment, we calculated 1st-order entropy, 2nd-order entropy (separately for the distance ranges of 20–240 pixels and >240 pixels, respectively), edge density and self-similarity (**Supplementary Table S5**). In addition, we plotted the dependence of 2nd-order entropy on pixel distance (for angular stimuli, see **Figure 6C**; for curved stimuli, see **Figure 6D**). In both plots, 2nd-order entropy values are plotted as the means for the 10 stimuli with the highest values (*black* lines), the 10 stimuli with the values closest to the median value (*green* lines) and the 10 stimuli with the lowest values (*red* lines), respectively. For both angular and curved stimuli, large absolute differences in 2nd-order entropy were observed for distances of >240 pixel distance, whereas 2nd-order entropy for shorter distance (20–240 pixels) and 1st-order entropy assumed values close to the maximum value (about 4.585; horizontal dotted line in **Figures 6C,D**; see also **Figure 8**). Note that the largest edge pair distances in the stimuli are about 350–400 pixels (**Figures 7C,D**). Therefore, the variability in the 2nd-order entropy, which was generated during the evolutionary procedure, is mainly driven by edge pairs that are spaced more widely apart. Moreover, for the stimuli with maximized 2nd-order entropy (*black* lines in **Figures 6C,D**), high entropy values were maintained with increasing distances, to decrease sharply for the most distant edge pairs. In contrast, 2nd-order entropy decreased more gradually in the stimuli, in which 2nd-order entropy was minimized (*red* lines in **Figures 6C,D**).

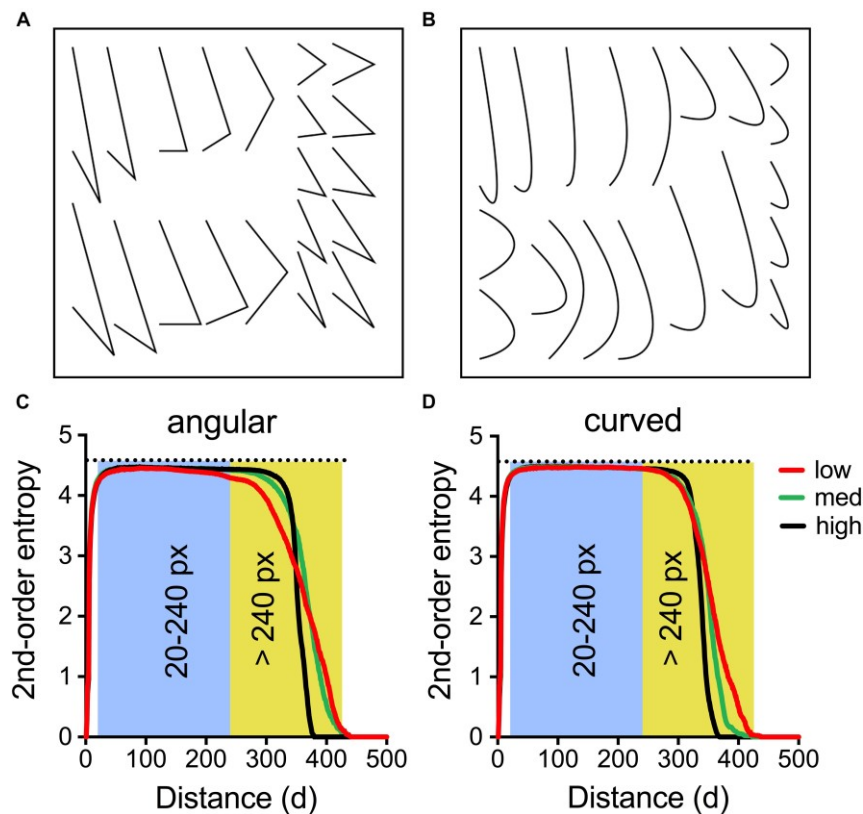


FIGURE 6 | Characteristics of the line stimuli used in Experiment 6. The stimuli were composed of a set of either angular line elements (A) or curved ones (B). Each set was used twice in each stimulus, resulting in 40 line elements per stimulus (see Figure 7). In (C,D), the mean 2nd-order entropy for the angular stimuli (C) and the curved stimuli (D) was plotted as a function of pixel distance for the 10 stimuli with lowest entropy values above 240 pixels distance (*low*, red lines; angular *Median*: 3.25, *Range*: 3.19–3.44; curved *Median*: 3.44, *Range*: 3.33–3.52), with the values closest to the median entropy (*med*, green lines; angular *Median*: 3.77, *Range*: 3.68–3.83; curved *Median*: 3.80, *Range*: 3.70–3.90) and with the highest entropy values (*high*, black lines; angular *Median*: 4.11, *Range*: 4.06–4.20; curved *Median*: 4.14, *Range*: 4.09–4.21), respectively. The shaded areas indicate the distance between 20–240 pixels and >240 pixels, respectively.

On average, the angular stimuli had lower 1st-order entropy values and lower 2nd-order entropy values for the range of 20–240 pixel distance. They were rated as more *pleasing* and more *interesting* than the curved stimuli on average (**Supplementary Table S5**). The other measures did not differ significantly between angular and curved stimuli.

The three ratings differed in the variables that had the strongest effect on the ratings (**Table 7**). For *pleasing*, the full Model 1 explained 63% of the variance in the rating. The model with the variable *shape* (Model 4) accounted for about half as much the variability as Model 2, which comprised the three entropy variables only (21% versus 42%, respectively). The effect of 2nd-order entropy on the rating was negative for shorter distances (20–240 pixels) and positive for larger distances (>240 pixels).

For *interesting*, the full Model 1 explained 55% of the rating. The explained variance of *shape* alone (Model 4) did not differ significantly from Model 2 (entropies alone), but Model 2 explained less of the rating variability (14%) than the model that accounted for *shape* and the entropies (27%, Model 3).

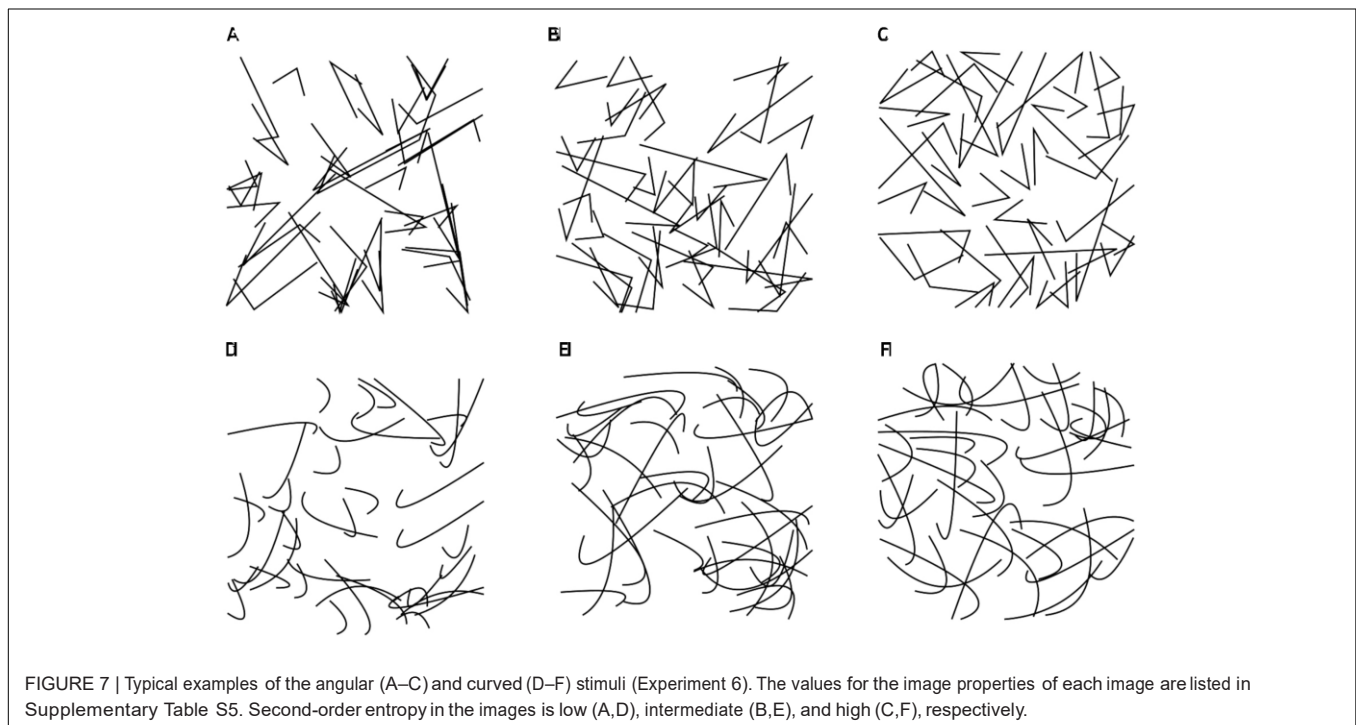
For *harmonious*, self-similarity was the strongest predictor in the full Model 1. In Models 2 and 3, 2nd-order entropy

(>240 pixels distance) was by far the strongest predictor while the effect of *shape* on the rating was weak. *Shape* alone (Model 4) did not predict the *harmonious* rating.

Figure 8 confirms the linear dependence of the ratings for *pleasing* and *harmonious* on 2nd-order entropy (>240 pixel distance; black lines in **Figures 8G,I**). This dependence is also observed when angular and curved stimuli are analyzed separately (red lines and blue lines, respectively, in **Figures 8G,I**). For *interesting*, a correlation is obtained for curved stimuli only (blue line in **Figure 8H**). The values for the other entropies are close to their maximum value (about 4.585; vertical dashed lines in **Figures 8A–F**) and the observed correlations for *pleasing* and *harmonious* are negative and relatively weak (black lines in **Figures 8A,B,D,E**).

Discussion

In Experiment 6, we generated a series of angular and curved line patterns, which systematically varied in their 2nd-order entropy. A closer inspection of these patterns revealed that the variability of 2nd-order entropy was driven mainly by edge pairs that were lying at the periphery of the patterns, i.e., for edge pairs that were spaced >240 pixels apart (**Figure 6**). Entropy was close to



the maximum value for less distant edge pairs (20–240 pixels distance).

In view of the general preference for curvilinear patterns, we expected that the curved stimuli would be rated more highly than the angular patterns. We can dismiss this expectation for the rating of *harmonious* where *shape* alone (Model 4) was not a significant predictor. For *harmonious*, *shape* played only a minor role in the other regression models (Models 1 and 3; Table 7). Instead, 2nd-order entropy (>240 pixels distance) explained about half of the variability in the ratings (Table 7 and Figure 8I). For the other two rating terms (*pleasing* and *interesting*), the results were less striking. Here, *shape* contributed 21% to explaining the variability in the rating of *pleasing* (Model 4) while the entropies (Model 2) explained 42% of the *pleasing* ratings. For *interesting*, the opposite pattern was found (26% of variance explained by Model 4, and 14% by Model 2). For *interesting*, edge density proved to be the strongest predictor in the full Model 1.

In conclusion, Experiment 6 indicates that the edge-orientation entropies are more powerful predictors for ratings of *pleasing* and *harmonious* than curvilinearity.

GENERAL DISCUSSION

We studied whether objective image properties predict aesthetic preferences in a wide variety of man-made visual stimuli, ranging from single closed contours, to photographs of every-day architectural patterns (building facades and interior scenes), and to music album covers, which are designed to attract the potential listeners' attention. A particular focus of our study was on the

question of whether edge-orientation entropy and curvilinearity have overlapping effects on aesthetic ratings.

Our results demonstrate that edge-orientation entropy affects ratings to different degrees, depending on the image category. The largest effect was observed for the facade photographs (Experiment 3) and for the complex artificial line patterns (Experiment 6), where up to half of the variance in the aesthetic ratings is accounted for by 1st-order or 2nd-order edge-orientation entropy. By contrast, the two entropy variables accounted for only 3.5% of the variance in the rating of the music covers for *harmonious*. In the following sections, we will first discuss these differences between the stimuli in more detail. Second, we will compare the effect of the different variables, especially with respect to the difference between edge-orientation entropy and curvilinearity, on the aesthetic ratings. Third, the difference between 1st-order entropy and 2nd-order entropy is evaluated. Fourth, we will point out differences between the rating terms in their dependence on the image properties. Finally, we will discuss some shortcomings of our study and possible future directions of research.

Differences Between the Visual Stimuli and How Their Rating Is Predicted by Image Properties

All image properties calculated in the present study represent global visual features that relate to the formal structure of the images. Our results confirm previous studies that revealed an effect of such global image properties on the preference of visual stimuli (Berlyne, 1974; Taylor, 2002; Jacobsen and Höfel, 2002; Spehar et al., 2003; Bar and Neta, 2006; Graham and

TABLE 7 | Results from multiple linear regression analyses of the data from Experiment 6.

Variable	β_i	t-value	p-value
<i>Pleasant</i>			
Model 1 (AIC = -637.4; R^2_{adj} = 0.63; $F[6,93]$ = 29.41; $p < 0.0001$)			
Shape (curved)	-0.27	-2.86	0.0052
1st-order entropy	0.03	0.34	0.734
2nd-order entropy (20–240 pixels)	-0.34	-2.91	0.0045
2nd-order entropy (>240 pixels)	0.20	2.11	0.038
Edge density	0.41	4.90	< 0.0001
Self-similarity	0.26	3.46	0.0008
Model 2 (AIC = -594.6; R^2_{adj} = 0.42; $F[3,96]$ = 24.9; $p < 0.0001$) ¹			
1st-order entropy	0.02	0.15	0.883
2nd-order entropy (20–240 pixels)	-0.57	-4.81	< 0.0001
2nd-order entropy (>240 pixels)	0.69	7.99	< 0.0001
Model 3 (AIC = -604.1; R^2_{adj} = 0.48; $F[4,95]$ = 23.61; $p < 0.0001$) ²			
Shape (curved)	-0.36	-3.40	< 0.0001
1st-order entropy	0.04	0.39	0.695
2nd-order entropy (20–240 pixels)	-0.30	-2.21	0.030
2nd-order entropy (>240 pixels)	0.61	7.14	< 0.0001
Model 4 (AIC = -565.6; R^2_{adj} = 0.21; $F[1,98]$ = 27.3; $p < 0.0001$) ³			
Shape (curved)	-0.47	-5.23	< 0.0001
<i>Interesting</i>			
Model 1 (AIC = -638.6; R^2_{adj} = 0.55; $F[6,93]$ = 21.05; $p < 0.0001$)			
Shape (curved)	-0.33	-3.19	0.002
1st-order entropy	0.04	0.37	0.709
2nd-order entropy (20–240 pixels)	-0.12	-0.93	0.357
2nd-order entropy (>240 pixels)	-0.24	-2.30	0.024
Edge density	0.71	7.64	< 0.0001
Self-similarity	-0.003	-0.04	0.97
Model 2 (AIC = -576.7; R^2_{adj} = 0.14; $F[3,96]$ = 6.26; $p = 0.0006$) ⁴			
1st-order entropy	0.01	0.043	0.965
2nd-order entropy (20–240 pixels)	-0.44	-3.01	0.003
2nd-order entropy (>240 pixels)	0.32	3.04	0.003
Model 3 (AIC = -593.0; R^2_{adj} = 0.27; $F[4,95]$ = 10.35; $p < 0.0001$) ⁵			
Shape (curved)	-0.54	-4.37	< 0.0001
1st-order entropy	0.04	0.35	0.724
2nd-order entropy (20–240 pixels)	-0.03	-0.19	0.848
2nd-order entropy (>240 pixels)	0.20	1.98	0.051
Model 4 (AIC = -593.7; R^2_{adj} = 0.26; $F[1,98]$ = 35.3; $p < 0.0001$) ⁶			
Shape (curved)	-0.51	-5.95	< 0.0001
<i>Harmonious</i>			
Model 1 (AIC = -589.2; R^2_{adj} = 0.72; $F[6,93]$ = 43.71; $p < 0.0001$)			
Shape (curved)	-0.09	-1.06	0.293
1st-order entropy	0.02	0.28	0.780

(Continued)

TABLE 7 | Continued

Variable	β_i	t-value	p-value
2nd-order entropy (20–240 pixels)	-0.12	-1.15	0.251
2nd-order entropy (>240 pixels)	0.32	3.90	0.0002
Edge density	0.27	3.69	.0004
Self-similarity	0.47	7.12	< 0.0001
Model 2 (AIC = -535.4; R^2_{adj} = 0.51; $F[3,96]$ = 35.20; $p < 0.0001$) ⁷			
1st-order entropy	0.03	0.29	0.775
2nd-order entropy (20–240 pixels)	-0.20	-1.80	0.075
2nd-order entropy (>240 pixels)	0.79	9.92	< 0.0001
Model 3 (AIC = -534.7; R^2_{adj} = 0.51; $F[4,95]$ = 26.75; $p < 0.0001$) ⁸			
Shape (curved)	-0.11	-1.09	0.278
1st-order entropy	0.04	0.36	0.718
2nd-order entropy (20–240 pixels)	-0.11	-0.85	0.397
2nd-order entropy (>240 pixels)	0.76	9.24	< 0.0001
Model 4 (AIC = -465.7; R^2_{adj} = 0; $F[1,98]$ = 0.48; $p = 0.49$) ⁹			
Shape (curved)	-0.07	-0.70	0.487

Model 1 describes the effect of shape (curved or angular) and the four image properties on the preferences ratings. Model 3 includes shape and the two measures of edge orientation entropy as variables. The two measures of entropy are the only predictors in Model 2. Shape is the only predictor in Model 4. Variables that are significant predictors when controlling for the remaining variables are highlighted by bold letters. ¹Different from Model 1 ($F[96,93]$ = 19.52, $p < 0.0001$) and Model 2 ($F[96,95]$ = 11.55, $p = 0.001$). ²Different from Model 1 ($F[95,93]$ = 21.06, $p < 0.0001$). ³Different from Model 1 ($F[98,93]$ = 23.55, $p < 0.0001$), Model 2 ($F[98,95]$ = 17.72, $p < 0.0001$), and Model 3 ($F[98,96]$ = 18.75, $p < 0.0001$). ⁴Different from Model 1 ($F[96,93]$ = 30.13, $p < 0.0001$) and Model 3 ($F[96,95]$ = 19.08, $p < 0.0001$). ⁵Different from Model 1 ($F[95,93]$ = 29.86, $p < 0.0001$). ⁶Different from Model 1 ($F[98,93]$ = 13.63, $p < 0.0001$). ⁷Different from Model 1 ($F[96,93]$ = 25.39, $p < 0.0001$). ⁸Different from Model 1 ($F[95,93]$ = 37.03, $p < 0.0001$). ⁹Different from Model 1 ($F[98,93]$ = 52.10, $p < 0.0001$), Model 2 ($F[98,95]$ = 35.33, $p < 0.0001$), and Model 3 ($F[98,96]$ = 52.31, $p < 0.0001$).

Redies, 2010; Forsythe et al., 2011; Bertamini et al., 2016; Gómez-Puerto et al., 2016; Brachmann and Redies, 2017). However, it is generally agreed that not only image structure, but also the displayed content can determine the aesthetic preference of visual stimuli (Bullot and Reber, 2013; Redies, 2015; Pelowski et al., 2017). We therefore expected that formal image properties would affect aesthetic ratings less strongly for images that display recognizable content (Experiments 3–5) than for images that are devoid of semantic meaning (i.e., the abstract patterns in Experiments 1, 2, and 6). Our results for the different image categories largely confirm this expectation. On the one hand, for the abstract patterns, all image properties together (Model 1) explained up to 75% of the rating variability (Tables 2, 3, 7). The lowest explained variability (13%) was obtained for the *pleasing* rating of the Taprats patterns (Table 3). On the other hand, explained variance for the *pleasing* and *harmonious* ratings of the music covers were below 10% (lowest value, 3.5%; Table 6). Although we did not measure the effect of displayed content by objective means in Experiment 5 (music album covers), it is possible that the observers' preferences for particular music genres or individual musicians might elicit a content-based bias, thereby diminishing the effect of formal image properties. A spillover effect for preference in the other direction, i.e., from

the visual to the auditory domain, has been demonstrated for music-related material previously (Libeks and Turnbull, 2011). For the *interesting* rating of music covers, the predicted variance was higher (25%), but it was driven mainly by *metal* (Table 6), possibly because many covers of metal music show exciting, shocking or even disgusting content, which arouses the observers' interest. For the interior scenes, predicted variance was also low (around 15% for the *pleasantness* and *beauty* ratings; Table 5). By contrast, the image properties predict the rating of the building facades to a higher degree (29–55% of the variance predicted). Similar to the abstract stimuli, the facade images are likely to be rated based on their visual structure rather than on contextual factors, such as familiarity with or explicit knowledge about the style or the designer of the decorations. We thus conclude that the image properties studied, including the edge-orientation entropies, can be strong predictors for preference, especially for abstract stimuli or stimuli that are evaluated predominantly based on their visual structure.

Differences Between the Image Properties and How They Affect the Ratings

In order to study differences in the effects of the image properties on the aesthetic ratings, we compared a full model (Model 1), which comprised all measured properties as independent variables, with models restricted to a subset of these properties. As outlined in the Introduction, we were particularly interested in the effect of the two measures of entropy, also in comparison to curvilinearity (*shape* or *contour* variables), in Experiments 1, 4, and 6.

First, we compared the full model with all variables (Model 1) to Model 3, which omitted self-similarity and edge density and was thus restricted to the two edge-orientation entropies (Experiments 2, 3, and 5) plus the curvilinearity variables (*shape/contour*; Experiments 1, 4, and 6; Table 1). The predicted variance (R^2_{adj}) shows a decrease and/or the AIC value an increase from Model 1 to Model 3, which indicates that the omitted factors (edge density and self-similarity) have an additional independent effect on the ratings (except for Experiment 1 and *pleasing* in Experiment 5). The relative decrease from Model 1 to Model 3 was small for facade photographs (e.g., from 55 to 48% for the *pleasing* rating) and the complex line patterns in Experiment 6 (e.g., from 63 to 48% for the *pleasing* rating), but larger for the interior scenes (e.g., from 14 to 4.4% for the *pleasantness* rating) and strongest for the *harmonious* rating of the Taprats images (from 43 to 13%). Importantly, except for the *interesting* rating of the album covers, the edge-orientation entropies and the curvilinearity variables (*shape/contour*) together (Model 3) remained significant predictors for all aesthetic ratings in all image categories. This finding underscores the importance of these measures for aesthetic evaluations of different types of man-made visual stimuli.

Second, we compared the predictive power of the edge-orientation entropies with that of the curvilinearity variables (*shape/contour*) in Experiments 1, 4, and 6 (Table 1).

For the interior scene photographs (Experiment 4), *contour* alone did not contribute to the *pleasantness* and *beauty* ratings (unlike the architectural variable *openness*, Table 5). Moreover, *shape* alone did not contribute to the *harmonious* rating of the complex line patterns in Experiment 6 (Table 7). The predicted variance in the *pleasing* rating increased from 42 to 48% and the variance in the *interesting* rating increased from 14 to 27%, when *shape* was added (Model 3 in Table 7) to the model that consists of the edge-orientation entropies only (Model 2). Similarly, for the rating in Experiment 1, *shape* contributed an additional 17% to the variance predicted by the entropies alone (58%; compare Models 2 and 3 in Table 2). When Model 2 (entropies alone) was compared to Model 4 (*shape* alone), the entropies alone predicted more of the rating variance for the *pleasing* and the *harmonious* ratings in Experiment 6 than *shape* alone. Strikingly, there was no significant difference between the two models for the other ratings in Experiments 1 and 6 (Tables 2, 7).

Together, these results suggest that edge-orientation entropies are as good or better predictors for the aesthetic ratings than the curvilinearity variables (*curved/angular*). This is particularly evident in Experiment 6 where the angular line patterns are rated as more *pleasing* and *interesting* than the curved ones on average. Here, 40 angular or curved lines are superimposed in a texture-like arrangement. It is possible that edge-orientation entropy is a strong predictor for the preference of such textures, while curved or angular shape is more important for the preference of lines that are perceived individually. More experiments are needed to address this question.

Moreover, the edge-orientation entropies share a large portion of predicted variance for the preference for curved over angular stimuli. In other words, for most of the ratings in Experiments 1, 4, and 6, the entropies can substitute for the *curvilinearity* variable (*shape* or *contour*), at least in part, to predict the aesthetic ratings. Thus, the question of whether stimuli are curved or angular can be partly operationalized by measuring edge-orientation entropy in the images. In view of the uncertainties that underlie the terminology and concepts of the *curved/angular* account (Gómez-Puerto et al., 2016), the concept of edge-orientation entropy may thus have the advantage that it is captured more precisely in mathematical terms (Geisler, 2008; Redies et al., 2017). However, whether a visual stimulus is curved or angular, can be more easily grasped by intuition.

First-Order and 2nd-Order Edge-Orientation Entropy

As explained in more detail in the Section "General Methods," 1st-order edge-orientation entropy is a measure of how uniformly the edge orientations are distributed across the full spectrum of orientations in an image. Second-order edge-orientation entropy is a measure of how independent edge orientations are distributed across an image. Both measures have an upper bound that depends on the number of orientation bins analyzed (≈ 4.585 for the 24 bins analyzed in the present study). In a previous study, we showed that large subsets of traditional artworks assume values close to this upper bound (Redies et al., 2017). In the present study, the edge orientation

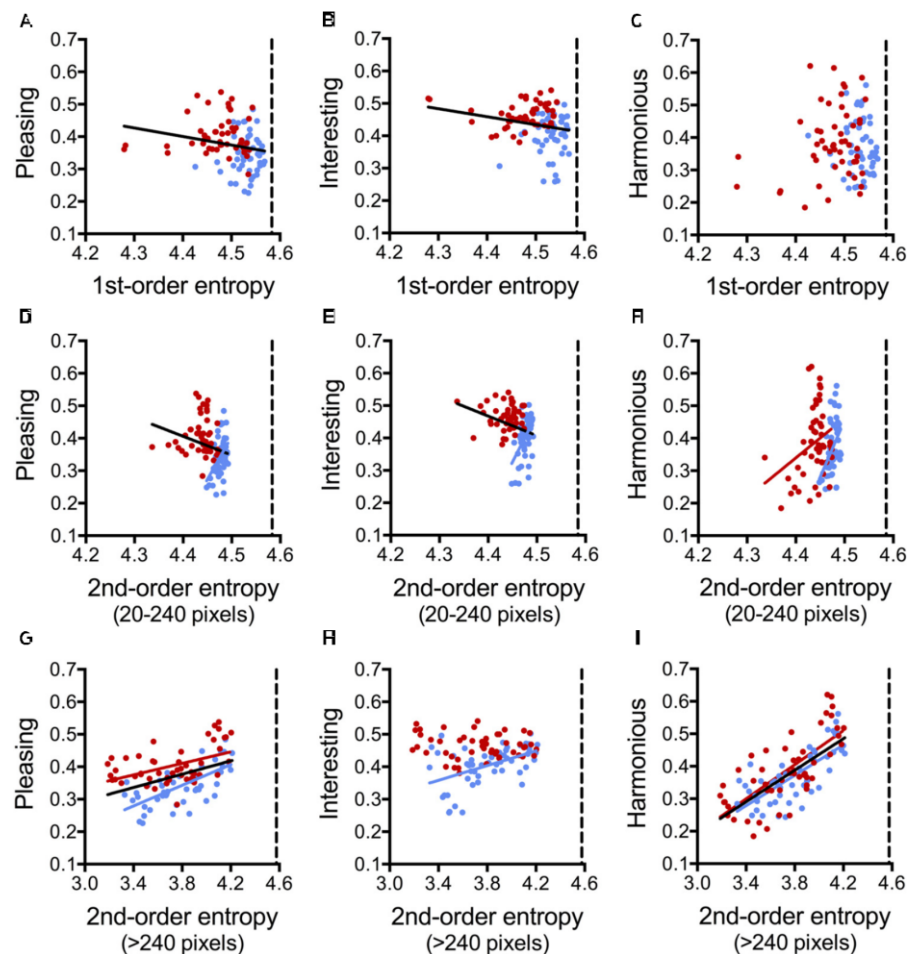


FIGURE 8 | Dot plots of 1st-order entropy (A–C), 2nd-order entropy (20–240 pixels distance; D–F), and 2nd-order entropy (>240 pixels distance; G–I) versus the ratings for *pleasing* (A,D,G), *interesting* (B,E,H), and *harmonious* (C,F,I), averaged across participants (Experiment 6). Each dot represents the results for one image (red, angular patterns; and blue, curved patterns). Note that the scaling of the x-axis is different in (A–F) and (G–I). The straight lines indicate the results from simple regression analyses (A, both, angular and curved [black line]: $R^2 = 0.045$; $F[1,198] = 4.64$, $p = 0.013$; B, both [black line]: $R^2 = 0.049$; $F[1,198] = 5.07$, $p = 0.034$; D, both [black line]: $R^2 = 0.045$; $F[1,198] = 4.64$, $p = 0.034$; curved [blue line]: $R^2 = 0.201$; $F[1,48] = 12.08$, $p = 0.0011$; E, both [black line]: $R^2 = 0.049$; $F[1,198] = 5.07$, $p = 0.027$; curved [blue line]: $R^2 = 0.246$; $F[1,48] = 15.64$, $p = 0.0003$; F, angular [red line]: $R^2 = 0.092$; $F[1,48] = 4.86$, $p < 0.032$; curved [blue line]: $R^2 = 0.189$; $F[1,48] = 11.15$, $p < 0.0016$; G, both [black line]: $R^2 = 0.190$; $F[1,98] = 22.91$, $p < 0.0001$; angular [red line]: $R^2 = 0.219$; $F[1,48] = 13.48$, $p = 0.0006$; curved [blue line]: $R^2 = 0.460$; $F[1,48] = 40.92$, $p < 0.0001$; H, curved [blue line]: $R^2 = 0.227$; $F[1,48] = 14.12$, $p = 0.0005$; I, both [black line]: $R^2 = 0.499$; $F[1,98] = 97.68$, $p < 0.0001$; angular [red line]: $R^2 = 0.521$; $F[1,48] = 52.19$, $p < 0.0001$; curved [blue line]: $R^2 = 0.533$; $F[1,48] = 54.84$, $p < 0.0001$).

entropies of some image categories (e.g., of music cover designs) are also close to the upper bound, whereas those of other image categories (e.g., photographs of facades) scatter more widely. In general, we observe strong and positive predictive effects of the entropies on the aesthetic ratings if the entropy values scatter more widely. This pattern is observed for the simple shapes (Figures 1E,F), the facade images (Figures 3F–K), the interior scenes (Figures 4E–H), and for the 2nd-order entropy (>240 pixels) in Experiment 6 (Figures 8G–I). Vice versa, we observe weak and, in some cases, even negative predictive effects of the entropies for image categories with entropy values that are clustered close to the upper bound, as is the case for the album covers (Figures 5D–I), and for short-range 1st-order entropy and 2nd-order entropy (20–240 pixels) in Experiment 6 (Figures 8A–F). The only exception is the *harmonious* rating

(but not the *interesting* and *pleasing* ratings) of the *Taprats* images (Figure 2J), where 2nd-order entropy is a negative predictor despite its wide range of values. In this case, however, self-similarity is a relatively strong predictor for the *harmonious* rating (Figure 2K and Table 3), compared to 2nd-order entropy. We thus conclude that, with this exception, the two measures of entropy are positively associated with aesthetic ratings, and that this effect is stronger if the range of entropy values is wide and remote from its upper bound.

The relative contribution of 1st-order entropy and 2nd-order entropy to the aesthetic ratings differs between the image categories. In some cases, e.g., for the building facades, 1st-order entropy is a stronger predictor for the aesthetic ratings than 2nd-order entropy (Table 4). In other cases, e.g., for the complex line patterns in Experiment 6, 2nd-order entropy has a stronger

effect on the aesthetic rating that 1st-order entropy (Table 7). It should be pointed out that the two measures of entropy are not independent of each other (Redies et al., 2017). The Spearman correlations for 1st-order entropy and 2nd-order entropy (>240 pixels) range from a correlation coefficient of $r = 0.97$ ($p < 0.0001$) for the building facades (Experiment 3) to no correlation at all in Experiment 6. It is thus difficult to extract a common overall pattern for the differential effect of the entropies on the ratings.

Differences Between Rating Terms and Their Dependence on the Image Properties

As outlined in the Introduction, the three ratings terms used in Experiments 2, 3, 5, and 6 mirror different aesthetic aspects of the stimuli. *Pleasing* has been described as a more subjective judgment that combines emotional arousal and aesthetic effectance while *interesting* is thought to reflect a more objective way to evaluate images (Cupchik and Gebotys, 1990); *harmonious* was proposed to relate to the hedonic value of the image composition (Redies et al., 2015). There may be differences, however, in what exactly is considered *pleasing*, *interesting*, or *harmonious* in various types of images, for example, between abstract line images and music album covers. It is therefore not surprising to see differential effects of the image properties on the ratings in Experiments 2, 3, 5, and 6. When we evaluated the full model (Model 1), we did not observe any systematic variation of the effect of the image properties on the ratings across all image categories. For example, Model 1 predicted a larger percentage of the *harmonious* rating for the Taprats images than for the *pleasing* and *interesting* ratings (Table 3), but the inverse pattern was seen for the facade images (Table 4), while the percentage predicted was rather similar for all ratings on the complex line stimuli (Table 7). Interestingly, for the facade images, self-similarity was positively related to *harmonious* but negatively to *pleasing* and *interesting*. We have observed a similar difference for complex abstract images, where images with higher self-similarity were rated more *harmonious* but less *interesting* (Redies et al., 2015). In conclusion, the proportion of rating variance that is predicted by the image properties depends not only on the image properties but also on the rating terms.

GENERAL CONCLUSIONS AND EXPERIMENTAL LIMITATIONS

Previously, we have shown that edge-orientation entropy is high in traditional artworks of different cultural provenance when compared to many categories of other man-made or natural patterns and scenes (Redies et al., 2017). The present results indicate that edge-orientation entropy predicts aesthetic ratings in diverse artificial images and photographs of man-made scenes. The magnitude of this effect, however, depends on the category of images analyzed, on the range of entropy values encountered, and on the type of aesthetic ratings (*pleasing*, *interesting*, or *harmonious*). In general, higher edge-orientation

entropies correlate with higher aesthetic rating, in particular, if entropy values cover a wide range and do not approach their upper bound. Moreover, it should be noted that the findings of the present study are specific to the laboratory setting (Brieber et al., 2015) and our analysis was restricted to six special types of man-made images. Because aesthetic ratings can be domain-specific (Hayn-Leichsenring et al., 2013; Jacobsen, 2014), it remains to be studied whether our findings can be generalized to other man-made images or to natural patterns or scenes. Also, the participants in our study were undergraduates or had finished higher education; all participants were younger than 40 years. These limitations and any idiosyncratic taste associated with them may have had an effect on the ratings, especially for the images that displays cultural content (interior scenes and music album covers).

Despite these caveats, the present findings lead us to speculate that images with high edge-orientation entropy are aesthetically preferred over ones with low entropy. Results from Experiment 6, where we systematically manipulated 2nd-order entropy in artificial stimuli that were composed of otherwise identical line elements, suggests that this effect is a causal one. Here, the edge orientation entropies alone are strong predictors of the *pleasing* and *harmonious* ratings (Table 7 and Figures 8G,I). Moreover, edge orientation entropy is a predictor for the ratings that is as strong or stronger than their curved or angular *shape/contour* (compare Models 2 and 4 in Tables 2, 7), with a large degree of overlap of predictive power between these variables (compare Models 2 and 3 in Tables 2, 7).

It would be interesting to study whether the visual preference for high edge-orientation entropy is shared in different cultures or even in species like great apes, as has been shown for curvilinear patterns (Munar et al., 2015; Gómez-Puerto et al., 2017). Despite the widespread preference for curvature, Cotter et al. (2017) described inter-individual differences that can modulate this preference. In particular, participants with higher artistic expertise or openness to experience showed a stronger preference for smooth curvatures in irregular polygons. Several other studies have previously revealed differences between human observers in evaluating the hedonic values of visual stimuli (Berlyne, 1971; Jacobsen and Höfel, 2002; Palmer and Griscom, 2012). For example, individual differences in rating studies on visual complexity have been reported (e.g., Spehar et al., 2015, 2016; Bies et al., 2016; Güclütürk et al., 2016). Mallon et al. (2014) described that clusters of participants preferred different combinations of low-level image properties, such as color characteristics and self-similarity. To obtain an overview of the influence of edge orientation entropy on preference for different sets of stimuli, the present study focuses on group-level differences. It thus remains to be studied whether the preference for high edge orientation entropy is subject to inter-individual variability.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

MG and CR conceived the study and contributed stimuli. AB wrote the computer code to generate the stimuli for

Experiment 6. MB contributed the stimuli for Experiment 1. MG and AK carried out the experiments. MG and CR analyzed the data. MG, AB, and MB contributed to writing the paper. CR wrote the paper and supervised the study at all stages.

FUNDING

This work was supported by funds from the Institute of Anatomy, Jena University Hospital.

REFERENCES

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Autom. Contr.* 19, 716–723. doi: 10.1109/IAC.1974.1100705
- Amirshahi, S. A., Koch, M., Denzler, J., and Redies, C. (2012). PHOG analysis of self-similarity in esthetic images. *Proc. SPIE* 8291:82911J. doi: 10.1117/12.911973
- Bar, M., and Neta, M. (2006). Humans prefer curved visual objects. *Psychol. Sci.* 17, 645–648. doi: 10.1111/j.1467-9280.2006.01759.x
- Bell, C. (1914). *Art*. London: Chatto & Windus.
- Berlyne, D. E. (1971). *Aesthetics and Psychobiology*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Berlyne, D. E. (1974). *Studies in the New Experimental Aesthetics: Steps Toward An Objective Psychology of Aesthetic Appreciation*. New York, NY: Hemisphere.
- Bertamini, M., and Makin, A. (2014). Brain activity in response to visual symmetry. *Symmetry* 6, 975–996. doi: 10.3390/sym6040975
- Bertamini, M., Palumbo, L., Gheorghes, T. N., and Galatsidas, M. (2016). Do observers like curvature or do they dislike angularity? *Br. J. Psychol.* 107, 154–178. doi: 10.1111/bjop.12132
- Bies, A. J., Blanc-Goldhammer, D. R., Boydston, C. R., Taylor, R. P., and Sereno, M. E. (2016). Aesthetic responses to exact fractals driven by physical complexity. *Front. Hum. Neurosci.* 10:210. doi: 10.3389/fnhum.2016.00210
- Birkhoff, G. D. (1933). *Aesthetic Measure*. Cambridge, MA: Harvard University Press. doi: 10.4159/harvard.9780674734470
- Blazhenkova, O., and Kumar, M. M. (2018). Angular versus curved shapes: correspondences and emotional processing. *Perception* 47, 67–89. doi: 10.1177/0301006617731048
- Bosch, A., Zisserman, A., and Munoz, X. (2007). “Representing shape with a spatial pyramid kernel” in *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Image and Video Retrieval*, (Amsterdam), 401–408. doi: 10.1145/1282280.1282340
- Brachmann, A., and Redies, C. (2017). Computational and experimental approaches to visual aesthetics. *Front. Comp. Neurosci.* 11:102. doi: 10.3389/fncom.2017.00102
- Braun, J., Amirshahi, S. A., Denzler, J., and Redies, C. (2013). Statistical image properties of print advertisements, visual artworks and images of architecture. *Front. Psychol.* 4:808. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00808
- Brieber, D., Nadal, M., and Leder, H. (2015). In the white cube: museum context enhances the valuation and memory of art. *Acta Psychol.* 154, 36–42. doi: 10.1016/j.actpsy.2014.11.004
- Bullot, N. J., and Reber, R. (2013). The artful mind meets art history: toward a psycho-historical framework for the science of art appreciation. *Behav. Brain Sci.* 36, 123–137. doi: 10.1017/S0140525X12000489
- Chandler, D. M., and Field, D. J. (2007). Estimates of the information content and dimensionality of natural scenes from proximity distributions. *J. Opt. Soc. Am. A* 24, 922–941. doi: 10.1364/JOSAA.24.000922
- Cotter, K. N., Silvia, P. J., Bertamini, M., Palumbo, L., and Vartanian, O. (2017). Curve appeal: exploring individual differences in preference for curved versus angular objects. *Iperception* 8:2041669517693023. doi: 10.1177/2041669517693023
- Cupchik, G. C., and Gebotys, R. J. (1990). Interest and pleasure as dimensions of aesthetic response. *Emp. Stud. Arts* 8, 1–14. doi: 10.2190/L789-TPPY-BD2Q-T7TW
- Dalal, N., and Triggs, B. (2005). “Histograms of oriented gradients for human detection” in *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05)*, Vol. 2, (San Diego, CA: IEEE), 886–893. doi: 10.1109/CVPR.2005.177
- Fechner, G. T. (1876). *Vorschule der Ästhetik*. Leipzig: Breitkopf and Härtel.
- Field, A., Miles, J., and Field, Z. (2012). *Discovering Statistics Using R*. Los Angeles, CA: Sage.
- Forsythe, A., Nadal, M., Sheehy, N., Cela-Conde, C. J., and Sawey, M. (2011). Predicting beauty: fractal dimension and visual complexity in art. *Br. J. Psychol.* 102, 49–70. doi: 10.1348/000712610X498958
- Geisler, W. S. (2008). Visual perception and the statistical properties of natural scenes. *Annu. Rev. Psychol.* 59, 167–192. doi: 10.1146/annurev.psych.58.110405.085632
- Geisler, W. S., Perry, J. S., Super, B. J., and Gallogly, D. P. (2001). Edge co-occurrence in natural images predicts contour grouping performance. *Vis. Res.* 41, 711–724. doi: 10.1016/S0042-6989(00)00277-7
- Gómez-Puerto, G., Munar, E., and Nadal, M. (2016). Preference for curvature: a historical and conceptual framework. *Front. Hum. Neurosci.* 9:712. doi: 10.3389/fnhum.2015.00712
- Gómez-Puerto, G., Rossello, J., Corradi, C., Acedo-Carmona, C., Munar, E., and Nadal, M. (2017). Preference for curved contours across cultures. *Psychol. Aesthet. Creat. Arts* doi: 10.1037/aca0000135
- Graham, D. J., and Field, D. J. (2007). Statistical regularities of art images and natural scenes: spectra, sparseness and nonlinearities. *Spat. Vis.* 21, 149–164. doi: 10.1163/156856807782753877
- Graham, D. J., and Redies, C. (2010). Statistical regularities in art: relations with visual coding and perception. *Vis. Res.* 50, 1503–1509. doi: 10.1016/j.visres.2010.05.002
- Güclütürk, Y., Jacobs, R. H., and Van Lier, R. (2016). Liking versus complexity: decomposing the inverted U-curve. *Front. Hum. Neurosci.* 10:112. doi: 10.3389/fnhum.2016.00112
- Hagtvedt, H., and Patrick, V. (2008). The influence of art infusion on the perception and evaluation of consumer products. *Adv. Consum. Res.* 35, 795–796.
- Hayn-Leichenring, G. U., Kloth, N., Schweinberger, S. R., and Redies, C. (2013). Adaptation effects to attractiveness of face photographs and art portraits are domain-specific. *Iperception* 4, 303–316. doi: 10.1068/i0583
- Hevner, K. (1935). Experimental studies of the affective value of colors and lines. *J. Appl. Psychol.* 19, 385–398. doi: 10.1037/h0055538
- Jacobsen, T. (2014). Domain specificity and mental chronometry in empirical aesthetics. *Br. J. Psychol.* 105, 471–473. doi: 10.1111/bjop.12094
- Jacobsen, T., and Höfel, L. (2002). Aesthetic judgments of novel graphic patterns: analyses of individual judgments. *Percept. Mot. Skills* 95, 755–766. doi: 10.2466/pms.2002.95.3.755
- Joye, Y. (2007). Architectural lessons from environmental psychology: the case of biophilic architecture. *Rev. Gen. Psychiatry* 11, 305–328. doi: 10.1037/1089-2680.11.4.305
- Kaplan, C. S. (2000). *Computer Generated Islamic Star Patterns*. Winfield, KS: Southwestern College.
- Kersten, D. (1987). Predictability and redundancy of natural images. *J. Opt. Soc. Am. A* 4, 2395–2400. doi: 10.1364/JOSAA.4.002395
- Koch, M., Denzler, J., and Redies, C. (2010). 1/f² Characteristics and isotropy in the Fourier power spectra of visual art, cartoons, comics, mangas, and

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Dr. Carolin Altmann for critical comments on the manuscript.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

The Supplementary Material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2018.00678/full#supplementary-material>

- different categories of photographs. *PLoS One* 5:e12268. doi: 10.1371/journal.pone.0012268
- Libeks, J., and Turnbull, D. (2011). You can judge an artist by an album cover: using images for music annotation. *IEEE MultiMedia* 18, 30–37. doi: 10.1109/MMUL.2011.1
- Mallon, B., Redies, C., and Hayn-Leichsenring, G. U. (2014). Beauty in abstract paintings: Perceptual contrast and statistical properties. *Front. Hum. Neurosci.* 8:161. doi: 10.3389/fnhum.2014.00161
- Markovič, S. (2012). Components of aesthetic experience: aesthetic fascination, aesthetic appraisal, and aesthetic emotion. *Iperception* 3, 1–17. doi: 10.1068/i0450aap
- Munar, E., Gómez-Puerto, G., Call, J., and Nadal, M. (2015). Common visual preference for curved contours in humans and great apes. *PLoS One* 10:e0141106. doi: 10.1371/journal.pone.0141106
- Palmer, S. E., and Griscom, W. S. (2012). Accounting for taste: individual differences in preference for harmony. *Psychon. Bull. Rev.* 20, 453–461. doi: 10.3758/s13423-012-0355-2
- Palumbo, L., Ogden, R., Makin, A. D., and Bertamini, M. (2015). Does preference for abstract patterns relate to information processing and perceived duration? *Iperception* 6:2041669515604436. doi: 10.1177/2041669515604436
- Pelowski, M., Markey, P. S., Forster, M., Gerger, G., and Leder, H. (2017). Move me, astonish me...delight my eyes and brain: the Vienna integrated model of top-down and bottom-up processes in Art Perception (VIMAP) and corresponding affective, evaluative, and neurophysiological correlates. *Phys. Life Rev.* 21, 80–125. doi: 10.1016/j.plrev.2017.02.003
- Poffenberger, A. T., and Barrows, B. E. (1924). The feeling value of lines. *J. Appl. Psychol.* 8, 187–205. doi: 10.1037/h0073513
- R Development Core Team (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Redies, C. (2007). A universal model of esthetic perception based on the sensory coding of natural stimuli. *Spat. Vis.* 21, 97–117. doi: 10.1163/156856807782753886
- Redies, C. (2015). Combining universal beauty and cultural context in a unifying model of visual aesthetic experience. *Front. Hum. Neurosci.* 9:219. doi: 10.3389/fnhum.2015.00218
- Redies, C., Amirshahi, S. A., Koch, M., and Denzler, J. (2012). PHOG-derived aesthetic measures applied to color photographs of artworks, natural scenes and objects. *ECCV 2012 Ws/Demos, Part I. Lect. Notes Comp. Sci.* 7583, 522–531. doi: 10.1007/978-3-642-33863-2_54
- Redies, C., Brachmann, A., and Hayn-Leichsenring, G. U. (2015). Changes of statistical properties during the creation of graphic artworks. *Art Percept.* 3, 93–116. doi: 10.1163/22134913-00002017
- Redies, C., Brachmann, A., and Wagemans, J. (2017). High entropy of edge orientations characterizes visual artworks from diverse cultural backgrounds. *Vis. Res.* 133, 130–144. doi: 10.1016/j.visres.2017.02.004
- Redies, C., Hasenstein, J., and Denzler, J. (2007). Fractal-like image statistics in visual art: similarity to natural scenes. *Spat. Vis.* 21, 137–148. doi: 10.1163/156856807782753921
- Rentfrow, P. J., Goldberg, L. R., and Levitin, D. J. (2011). The structure of musical preferences: a five-factor model. *J. Pers. Soc. Psychol.* 100, 1139–1157. doi: 10.1037/a0022406
- Sigman, M., Cecchi, G. A., Gilbert, C. D., and Magnasco, M. O. (2001). On a common circle: natural scenes and Gestalt rules. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 98, 1935–1940. doi: 10.1073/pnas.031571498
- Spehar, B., Clifford, C. W. G., Newell, B. R., and Taylor, R. P. (2003). Universal aesthetic of fractals. *Comput. Graph.* 27, 813–820. doi: 10.1016/S0097-8493(03)00154-7
- Spehar, B., Walker, N., and Taylor, R. P. (2016). Taxonomy of individual variations in aesthetic responses to fractal patterns. *Front. Hum. Neurosci.* 10:350. doi: 10.3389/fnhum.2016.00350
- Spehar, B., Wong, S., van de Klundert, S., Lui, J., Clifford, C. W. G., and Taylor, R. P. (2015). Beauty and the beholder: the role of visual sensitivity in visual preference. *Front. Hum. Neurosci.* 9:514. doi: 10.3389/fnhum.2015.00514
- Taylor, R. P. (2002). Order in Pollock's chaos - Computer analysis is helping to explain the appeal of Jackson Pollock's paintings. *Sci. Am.* 287, 116–121. doi: 10.1038/scientificamerican1202-116
- Taylor, R. P., Spehar, B., Van Donkelaar, P., and Hagerhall, C. M. (2011). Perceptual and physiological responses to Jackson Pollock's fractals. *Front. Hum. Neurosci.* 5:60. doi: 10.3389/fnhum.2011.00060
- Vartanian, O., Navarrete, G., Chatterjee, A., Fich, L. B., Leder, H., Modrono, C., et al. (2013). Impact of contour on aesthetic judgments and approach-avoidance decisions in architecture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110(Suppl. 2), 10446–10453. doi: 10.1073/pnas.1301227110
- Velasco, C., Salgado-Montejo, A., Elliot, A. J., Woods, A. T., Alvarado, J., and Spence, C. (2016). The shapes associated with approach/avoidance words. *Motiv. Emot.* 40, 689–702. doi: 10.1007/s11031-016-9559-5
- Wright, D., Makin, A. D. J., and Bertamini, M. (2017). Electrophysiological responses to symmetry presented in the left or in the right visual hemifield. *Cortex* 86, 93–108. doi: 10.1016/j.cortex.2016.11.001

Conflict of Interest Statement: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2018 Grebenkina, Brachmann, Bertamini, Kaduim and Redies. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Supplementary Material

Edge-Orientation Entropy Predicts Preference for Diverse Types of Man-Made Images

Maria Grebenkina, Anselm Brachmann, Marco Bertamini, Ali Kaduhm, Christoph Redies*

* **Correspondence:** Corresponding Author: christoph.redies@med.uni-jena.de

Supplementary Table 1. Results for individual images and median results for the *Taprats* stimuli used in Experiment 2. The values listed are for the images shown in Figure 2A-F, as well as the *median* value (\pm *median absolute deviation* [*MAD*]) for all 100 images.

Images	Statistical image properties				Ratings		
	1st-order entropy	2nd-order entropy	Edge density	Self-similarity	<i>Pleasing</i>	<i>Interesting</i>	<i>Harmonious</i>
A	4.45	4.44	119.6	0.65	0.65	0.67	0.42
B	3.61	4.16	238.0	0.62	0.76	0.74	0.57
C	4.45	4.12	146.8	0.87	0.45	0.37	0.72
D	4.07	4.16	75.0	0.98	0.31	0.32	0.50
E	4.29	3.91	71.7	0.84	0.34	0.25	0.63
F	4.52	4.36	135.7	0.60	0.41	0.43	0.30
<i>Median</i>	4.50	4.34	196.9	0.88	0.46	0.46	0.58
\pm <i>MAD</i>	\pm 0.06	\pm 0.17	\pm 88.8	\pm 0.07	\pm 0.06	\pm 0.07	\pm 0.08

Supplementary Table 2. Results for individual images and median results for the facade photographs (Experiment 3). The values listed are for the images shown in Figure 3A-E, as well as for all 50 images (*median* \pm *median absolute deviation* [*MAD*]).

Images	Statistical image properties				Ratings		
	1st-order entropy	2nd-order entropy	Edge density	Self-similarity	<i>Pleasing</i>	<i>Interesting</i>	<i>Harmonious</i>
A	3.49	4.15	121.5	0.76	0.71	0.73	0.77
B	3.62	4.11	171.6	0.75	0.71	0.65	0.75
C	2.97	3.65	167.2	0.79	0.46	0.39	0.52
D	2.20	2.67	140.4	0.78	0.23	0.24	0.41
E	2.38	3.04	99.2	0.77	0.19	0.22	0.31
<i>Median</i>	3.04	3.82	140.7	0.76	0.52	0.49	0.52
\pm <i>MAD</i>	\pm 0.39	\pm 0.27	\pm 21.1	\pm 0.03	\pm 0.12	\pm 0.14	\pm 0.09

Supplementary Table 3. Results for individual images and median results for the interior scene photographs (Experiment 4). The values listed are for the images shown in Figure 4A-D, as well as for all 200 images (*median* \pm median absolute deviation [*MAD*]). Abbreviations: 1st, 1st-order entropy; 2nd, 2nd-order entropy; cl, closed space; hc, high ceiling; lc, low ceiling; op, open space; ro, round contour; sq, square contour.

Images	Statistical image properties				Ratings	
	1st-order entropy	2nd-order entropy	Edge density	Self-similarity	Pleasantness	Beauty
A (hc, op, ro)	3.79	4.32	133.5	0.65	4.50	4.28
B (lc, op, sq)	3.81	4.25	70.6	0.55	4.22	4.22
C (lc, cl, sq)	4.08	4.34	61.4	0.55	2.89	3.17
D (lc, cl, sq)	3.03	3.67	57.2	0.56	1.17	1.06
<i>Median</i>	3.85	4.29	76.3	0.56	3.00	2.89
\pm <i>MAD</i>	\pm 0.25	\pm 0.10	\pm 19.8	\pm 0.06	\pm 0.61	\pm 0.61



Supplementary Table 4. Results for the music album covers (Experiment 5). The values listed are for the exemplary images shown in Figure 5A-C, as well as for 50 images each of the three album categories (*median ± median absolute deviation [MAD]*).

Images	Statistical image properties				Ratings		
	1st-order entropy	2nd-order entropy	Edge density	Self-similarity	<i>Pleasing</i>	<i>Interesting</i>	<i>Harmonious</i>
A (pop)	4.48	4.51	81.1	0.67			
B (metal)	4.49	4.52	98.0	0.69			
C (classic)	4.22	4.48	58.0	0.55			
Pop	4.35 ± 0.11	4.48 ± 0.03	99.9 ± 21.3	0.60 ± 0.07	0.42 ± 0.10	0.36 ± 0.14	0.45 ⁵ ± 0.08
Metal	4.41 ¹ ± 0.10	4.51 ± 0.03	103.7 ± 27.1	0.66 ² ± 0.08	0.40 ³ ± 0.06	0.50 ⁴ ± 0.08	0.43 ± 0.07
Classic	4.30 ± 0.11	4.49 ± 0.04	102.2 ± 23.5	0.63 ± 0.06	0.38 ± 0.07	0.31 ± 0.10	0.49 ± 0.08

¹ different from *classic* ($p < .01$; Kruskal-Wallis test with Dunn's post-test)

² different from *pop* ($p < .01$) and *classic* ($p < .05$)

³ different from *classic* ($p < .05$)

⁴ different from *pop* ($p < .001$) and *classic* ($p < .0001$)

⁵ different from *metal* and *classic* (both $p < .0001$)



Supplementary Table 5. Results for the stimuli used in Experiment 6. The values listed are for the exemplary images shown in Figure 6A-C, as well as for 50 images each of the curved and angular categories (*median ± median absolute deviation [MAD]*).

Images	Statistical image properties					Ratings		
	1st-order entropy	2nd-order entropy (20-240 pixels)	2nd-order entropy (>240 pixels)	Edge density	Self-similarity	<i>Pleasing</i>	<i>Interesting</i>	<i>Harmonious</i>
A (angular)	4.28	4.34	3.21	150.0	0.50	0.37	0.51	0.34
B (angular)	4.48	4.46	3.79	166.6	0.57	0.37	0.41	0.38
C (angular)	4.43	4.43	4.09	179.7	0.60	0.53	0.47	0.62
D (curved)	4.54	4.49	3.48	123.9	0.54	0.23	0.31	0.31
E (curved)	4.51	4.49	3.90	165.2	0.60	0.35	0.44	0.35
F (curved)	4.53	4.48	4.15	175.9	0.62	0.45	0.45	0.50
<i>Angular</i>	4.49 ¹	4.44 ¹	3.77	165.0	0.54	0.38 ¹	0.46 ¹	0.38
	± 0.034	± 0.011	± 0.22	± 6.43	± 0.037	± 0.028	± 0.026	± 0.67
<i>Curved</i>	4.54	4.48	3.80	165.8	0.54	0.34	0.41	0.35
	± 0.017	± 0.007	± 0.19	± 5.63	± 0.026	± 0.037	± 0.031	± 0.064

¹ significantly different from *curved* ($p < .0001$; two-tailed Mann-Whitney test)



6. Diskussion

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Experiment 1 konnten wir zeigen, dass die runden Cassini-Figuren, die von Bertamini et al. für ihre Studie genutzt wurden (Bertamini et al., 2016), sich durch höhere Entropiewerte auszeichnen als die eckigen Cassini-Figuren, die die Versuchspersonen weniger bevorzugten. Außerdem konnten wir bei den Bewertungsstudien in den Experimenten 2 und 3 sowie 5 und 6 eine Korrelation zwischen der Entropie und positiven ästhetischen Bewertungen (d.h., visueller Präferenz) vermerken. Dabei war bei den Experimenten 2 und 5 vor allem die *1st-order entropy* ein guter Prädiktor für positive Bewertungen, während in Experiment 3 und 6 die *2nd-order entropy* vordergründig bedeutsam war.

Besonders ausgeprägt war die Korrelation zwischen visueller Präferenz und Entropie bei den Fotografien von Fassaden (Experiment 3), bei denen sich die *1st-order entropy* durch eine besonders hohe Vorhersagekraft auszeichnete, und in Experiment 6.

In Experiment 6, bei dem wir die *2nd-order entropy* der untersuchten Linienmuster variierten, zeigte sich die Überlegenheit der *1st-* und *2nd-order entropy* im Vergleich zur „Form“ (Kurvigkeit/Eckigkeit der Linien und Kanten) der untersuchten Bilder hinsichtlich der Vorhersagekraft für visuelle Präferenz. Insbesondere bei den Kategorien „Gefallen“ (mit 21% Prädiktion der beobachteten Varianz in den Bewertungen bei Beachtung aller Bildeigenschaften [Model 1, Table 7] und mit 42% Prädiktion bei Augenmerk auf *1st-* und *2nd-order entropy* [Model 3, Table 7]) und „Harmonie“, bei der die Form keinen signifikanten Einfluss hatte und sich stattdessen die *2nd-order entropy* als relevant für die Prädiktion erwies, war die positive Korrelation zwischen hohen Entropiewerten und positiver Bewertung deutlich.

Dabei war die prädiktive Stärke besonders deutlich ausgeprägt, wenn die jeweils untersuchte Bildkategorie ein breit gefächertes Spektrum von Entropiewerten aufwies (zum Beispiel bei den Fassadenbildern in Experiment 3), während sich dieser Effekt bei Bildkategorien, deren

Entropiewerte tendenziell am oberen Grenzwert rangierten (zum Beispiel bei den Aufnahmen von Innenarchitektur in Experiment 4 oder den Album-Covern in Experiment 5) weniger deutlich bemerkbar machte. Dieses Phänomen wird von uns als *ceiling effect* gedeutet.

Bei der Korrelation zwischen Bewertung und Entropie ist es nicht unerheblich, welche Bewertungskategorie (Gefallen, Harmonie, Interesse) betrachtet wurde (zur Bedeutung der Bewertungskategorie, siehe unten im Text). Zum Teil ergaben sich gegensätzliche Zusammenhänge zwischen Entropiewerten der Bilder und den jeweiligen Bewertungskategorien.

Die multiple Regressionsanalyse der Versuchsergebnisse beleuchtete die Bedeutung der einzelnen Bildeigenschaften und Bewertungskriterien sowie ihre Zusammenhänge genauer. Dabei verglichen wir unter anderem die prädiktive Qualität der Bildeigenschaften Form und Entropie. Wir nutzten mehrere Modelle, bei denen wir zur näheren Untersuchung des Einflusses der einzelnen Bildkategorien verschiedene Konstellationen analysierten. Beispielsweise betrachteten wir bei Modell 1 (Model 1) alle untersuchten Bildeigenschaften inklusive ihrer Form und bei Modell 3 (Model 3) untersuchten wir den Einfluss der beiden Entropiewerte und der Form und klammerten dabei die Kategorien fraktale Dimension und Selbstähnlichkeit aus. Es ergab sich, dass über alle Experimente hinweg (mit Ausnahme der Musik-Cover und des Bewertungskriteriums „Interessant“, siehe Rolle des Bildinhalts) beide Entropiewerte und die Form wichtige Prädiktoren für die positive ästhetische Bewertung darstellten. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass die 2nd-order entropy in Experiment 6 (einfache Linienmuster) ein besseres prädiktives Maß darstellte als die Form.

Somit schließen wir aus den Ergebnissen, dass die Entropie ein geeignetes Mittel ist, um die ästhetische Wertigkeit von abstrakten Bildern und, in minder starkem Ausmaß, Alltagsbildern teilweise vorauszusagen.

6.2 Rolle des Bildinhalts

Interessanterweise beobachteten wir, dass der Grad der Prädiktion der Bewertung durch die Entropie abnahm, je emotional „gefärbter“ die von den Versuchspersonen betrachteten Objekte waren. Derselbe Effekt war auch hinsichtlich des Einflusses der Form der betrachteten Bilder zu verzeichnen. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass Alltagsbilder im Vergleich zu abstrakten Linienmustern eine stärkere Verknüpfung zur Persönlichkeit beziehungsweise den persönlichen Vorlieben des Betrachters aufweisen und der Einfluss der Bildeigenschaften eine geringere Rolle spielt als die kognitive Prozessierung des Bildinhalts. Die Bedeutung des Bildinhalts für die ästhetische Bewertung wurde bereits mehrfach nachgewiesen (Bulot and Reber, 2014; Redies et al., 2015; Pelowski et al., 2017).

Besonders ausgeprägt war die Korrelation zwischen Album-Covern des Musikgenres Metal und der hohen Bewertungen in der Kategorie „Interesse“ (Experiment 5). In diesem Zusammenhang ist es sehr wahrscheinlich, dass bei der Bewertung der Album-Cover der Musikgeschmack den entscheidenden Einfluss auf die ästhetische Bewertung hatte. Der Musikgeschmack korreliert in einem gewissen Maß mit der Persönlichkeit (Delsing et al., 2008; Rentfrow and Gosling, 2003; Rentfrow et al., 2011). Bei der Auswahl der Genres der von uns untersuchten Album-Cover orientierten wir uns an dem von Rentfrow, Goldberg und Levithin im Jahre 2011 postulierten MUSIC-Schema. Dieses Modell unterscheidet fünf Richtungen des „Musikgeschmacks“ (*Mellow*, *Unpretentious*, *Sophisticated*, *Intense* und *Contemporary*). So werde bei *Mellow* ruhige, eher traurige Musik wie R&B und Soft Rock bevorzugt, während bei *Intense* eher aggressive, laute Musik wie Punk und Heavy Metal dominiert. Das Genre hat bei der Gestaltung der Album-Cover eine entscheidende Bedeutung (Libeks and Turnbull, 2011), da es letztendlich auch die Einordnung der zum Kauf angebotenen Musik-CDs in einen bestimmten musikalischen Kontext ermöglicht und somit dem potentiellen Käufer das rasche Auffinden geeigneter Musik-CDs erleichtert. Hier liegt der Schluss nahe, dass die visuelle Bewertung der Ästhetik von CD-Covern weniger von ihren

Bildeigenschaften, sondern vielmehr vom Musikgeschmack und im weitesten Sinne von der Persönlichkeit der Betrachter abhängt. Außerdem sind CD-Cover im Unterschied zu den abstrakten Mustern aus den Experimenten 2 und 6 deutlich plastischer und können stärkere Assoziationen auslösen. Beispielsweise können im Falle der Musik-Cover aus dem Genrebereich Metal entweder positive Reaktionen, beispielsweise durch ihren Wiedererkennungswert, oder ablehnende Haltung durch brutale oder anstößige Bilder hervorgerufen werden. Das könnte die Assoziation zwischen hohen Bewertungen in der Kategorie „Interesse“ und Covern des Musikgenres Metal erklären.

Die Album-Cover des Metal-Genres zeichnen sich durch hohe Entropiewerte aus. Ausgehend von der Assoziation zwischen hohen Entropiewerten und positiver ästhetischer Bewertung war also, losgelöst vom Musikgeschmack und Inhalt der Cover, eine überwiegend positive subjektive Bewertung wahrscheinlich. Insbesondere wäre ein deutlicher Unterschied in der ästhetischen Bewertung im Vergleich zu Album-Covern aus dem Pop-Genre zu erwarten gewesen, die durchschnittlich niedrige Entropiewerte aufweisen. Dennoch erwiesen sich die statistischen Bildeigenschaften bei der linearen Regressionsanalyse als weniger starke Prädiktoren für die ästhetische Bewertung der Cover als das jeweilige Musikgenre.

Klassik und Pop stellten sich bei der Erhebung ihrer statistischen Bildeigenschaften ähnlich dar und bilden somit einen Kontrast zu Album-Covern des Metal-Genres. Mögliche Ursachen hierfür sind einerseits der umfangreichere gestalterische Aspekt bei Metal-Covern, die oft traditionelle Kunstwerke, Landschaftsaufnahmen oder komplexe Architektur integrieren, andererseits die stärker ausgeprägte Bedeutung von Text und Schrift insbesondere bei Klassik-Covern. Die Schrift besitzt im Bereich der Ästhetikforschung einen ganz eigenen Stellenwert (Changizi et al., 2005; Solomon et al., 1994; Melmer et al., 2013). So zeichnen sich Texte hinsichtlich ihrer ästhetischen Eigenschaften beispielsweise durch eine hohe Detailgenauigkeit bei gleichzeitigem Fehlen einer globalen Struktur aus (Melmer et al., 2013; zur globalen Struktur, siehe Kritische Betrachtung der Methodik [6.4]).

Neben dem Aspekt des größeren Anteils von Text am Gesamtbild im Vergleich zu Metal-Covern wurden sowohl bei Covern des Genres Pop als auch bei Klassik-Covern überdurchschnittlich häufig Gesichter abgebildet. Auch Gesichter nehmen eine Sonderstellung in der Ästhetikforschung und den Neurowissenschaften ein (Collins et al., 2016). So ist es beispielsweise bemerkenswert, dass die meisten Menschen in der Lage sind, Gesichter besonders schnell zu erkennen (Tanaka, 2001) beziehungsweise auch nach langer Zeit wiederzuerkennen (Bahrick et al., 1975). Außerdem ist die Gesichterwahrnehmung des Menschen offenbar äußerst sensitiv bezüglich subtiler Änderungen (Haig, 1984). Sie weist außerdem zum Teil interkulturelle Unterschiede auf (Wang et al., 2015; Estéphan et al., 2018).

Gesichter sind nicht nur evolutionsbiologisch relevant, sei es bei der Sozialisierung im frühen Säuglings- und Kindheitsalter (Samuels and Ewy, 1985) oder bei der Partnerwahl nach Erlangen der Geschlechtsreife (Kranz et al., 2006), auch in der Kunst sind bezüglich der Wahrnehmung von Gesichtern einige Besonderheiten zu erwähnen. So sucht der Betrachter ganz intuitiv in einem Kunstbild nach einem Gesicht (Mather, 2014). Dafür muss nicht einmal notwendigerweise ein Mensch oder Tier auf dem Bild abgebildet sein. Das Phänomen der Pareidolie, der Wahrnehmung von Gesichtern in Landschaften, Wolkenformationen oder Architektur, wurde vom italienischen Künstler Giuseppe Arcimboldo (1526 - 1593) in seinen berühmten Gemälden mit Arrangements von Gemüse, Obst, Blumen und Büchern besonders einprägsam demonstriert. Diese Beobachtungen sprechen für besondere, phylogenetisch alte Strukturen des ZNS, die für Gesichterwahrnehmung verantwortlich und bei der Wahrnehmung und Bewertung von Gesichtern zu berücksichtigen sind (Nichols et al., 2010; Guntupalli et al., 2017).

Anders verhält es sich dagegen bei den abstrakten Mustern. Diese unterliegen hohen interindividuellen Unterschieden, die vermutlich stark mit den persönlichen Assoziationen

des Betrachters (Vessel et al., 2010; Schepman et al., 2015), sowie seiner Vorbildung beziehungsweise seinem Kenntnisstand zusammenhängen (van Paaschen et al., 2015).

6.3 Bedeutung der Bewertungskategorie

Neben den Bildeigenschaften und dem Bildinhalt stellten wir fest, dass für die Bedeutung der Entropie in Bezug auf ästhetische Bewertung der optischen Stimuli auch die Wahl der jeweiligen Bewertungskategorie (Gefallen, Harmonie, Interesse) von wesentlicher Bedeutung war. Wir entschieden uns für diese drei Kategorien unter anderem in Anlehnung an eine Studie von Cupchik und Gebotys aus dem Jahre 1990, die relevante Unterschiede zwischen dem Bewertungskriterium „Interesse“ (*interesting*) und der Frage nach dem subjektiven Gefallen (*pleasing*) beschrieben (Cupchik and Gebotys, 1990). Die Autoren argumentierten, dass Gefallen stärker mit Emotionen (*emotional arousal*) interagiere, während Interesse vornehmlich mit der Komplexität und der Vertrautheit (*familiarity*, s.o.) der betrachteten Objekte zusammenhänge.

In Experiment 1 konnte beispielsweise eine gute Korrelation zwischen Entropie und der Bewertungskategorie „Harmonie“ (*harmonious*) verzeichnet werden. Auch in Experiment 3 hatte ein hoher Entropiewert eine gute Vorhersagefähigkeit in Bezug auf alle drei Bewertungskategorien (*pleasant*, *interesting* und *harmonious*). Vor allem bei den Fassaden war außerdem die Assoziation zwischen hoher Selbstähnlichkeit und hohen Bewertungen bei *harmonious* bemerkenswert, während gleichsam die Einschätzungen für die Kategorie *interesting* abnahmen. *Harmonious* und *interesting* scheinen somit subjektiv einander entgegengesetzte Bewertungskategorien zu sein.

Ein ähnliches Phänomen wurde bereits in einer früheren Arbeit beschrieben (Schwabe et al., 2018). In dieser Arbeit wurden abstrakte Bilder unter verschiedenen Betrachtungszeiten bezüglich der Bewertungskategorien *interesting*, *harmonious*, *pleasing* sowie *ordered* (geordnet) untersucht. Interessanterweise korrelierte die Komplexität der Bilder mit hohen

Bewertungen in den Kategorien *interesting* und *pleasing*, und sie erwies sich in dieser Hinsicht damit als ein gutes prädiktives Maß. Die Bewertungen der Kategorie *harmonious* ließen sich über das Ausmaß der Komplexität nicht vorhersagen.

Diese Diskrepanz lässt sich möglicherweise bereits durch die gewählten Termini erläutern. Die Kategorie *harmonious* repräsentiert eine strukturbasierte Bewertung, während *interesting* sich eher auf kognitive Prozesse, bezieht beziehungsweise diese gewissermaßen beim Betrachter voraussetzt (Schwabe et al., 2018). Darüber hinaus muss erwähnt werden, dass die Interpretation der Begriffe „interessant“ und „harmonisch“ sich unter Versuchspersonen unterscheiden kann. Einige verknüpfen ästhetischen Wert eher mit der Kategorie *interesting*, während andere damit eher den Begriff *harmonious* assoziieren (Redies et al., 2015).

Diese sprachliche Unschärfe, welche bereits in der Einleitung in Hinblick auf die fehlende Definition von Kurvigkeit und Eckigkeit erwähnt wurde, wurde von Lyssenko et al. kritisch hervorgehoben (Lyssenko et al., 2016). In ihrer Studie untersuchten sie Assoziationen zwischen Adjektiven zur Beschreibung ästhetischer Wahrnehmung, diversen Bildeigenschaften (u.a. Selbstähnlichkeit, Komplexität, Anisotropie und Farbe) und bestimmten Persönlichkeitseigenschaften (operationalisiert mit dem *Big5-Inventory*, einer verkürzten aber vergleichbar validen Variante des *Big-Five-Tests*, siehe dazu Ausblick). Sie stellten fest, dass ästhetische Wahrnehmung durch verschiedene Betrachter mit einer großen Bandbreite an Adjektiven assoziiert wird. So benutzten ihre Versuchsteilnehmer insgesamt 1447 verschiedene Adjektive zur Bewertung abstrakter Bilder, wobei das Adjektiv „interessant“ insgesamt am häufigsten genutzt wurde, um eine Einschätzung der betrachteten Bilder vorzunehmen. Lyssenko et al. schlussfolgerten daraus einerseits, dass sich die Experimentelle Ästhetik eine Vielzahl von Adjektiven zur Beschreibung der ästhetischen Wahrnehmung bedienen müsse, und andererseits, dass klare Definitionen für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Studien untereinander von immenser Bedeutung sei.

6.4 Kritische Betrachtung der Methodik

(1) Auswahl der Bildeigenschaften

Der Anteil, den die Entropie zur ästhetischen Bewertung beiträgt, hängt wesentlich davon ab, welche Bildeigenschaften bei der multiplen Regressionsanalyse betrachtet wurden. Daher ist diese Methode kritisch zu betrachten. Es gibt noch weitere Bildeigenschaften, die wir in die Analyse hätten einbeziehen können, die sich aber zum Teil mathematisch nicht so präzise wie die Entropie berechnen lassen.

In einem Bild, sei es nun eine Naturaufnahme oder ein Kunstbild, herrschen allgemein gesprochen globale Beziehungen der Bildeigenschaften untereinander, die letzten Endes in einem Gesamtkonzept auf den Betrachter wirken. Man kann in diesem Zusammenhang auch von der Komposition eines Bildes beziehungsweise einer gewissen visuellen Balance sprechen. Die Komposition ist in der Kunst definiert als das zweidimensionale Arrangement von Bildelementen untereinander (Vartanian et al. 2005). Laut Rudolf Arnheim (1904 – 2007), einem Mitbegründer der modernen Kunstpädagogik und renommiertem Kunstpsychologen, beinhaltet visuelle Balance Größe, Farbe und (Aus-)Richtung der einzelnen Bildelemente (Arnheim, 1954).

Womöglich am bekanntesten ist Arnheim für die Mitbegründung der sogenannten Gestalttheorie. Diese besagt im Wesentlichen, dass ein Bild nicht aus seinen einzelnen Teilbildern oder Elementen zusammengesetzt sei und diese seine Gesamtwirkung beeinflussten, sondern die Teilbilder von Prinzipien des Gesamtbildes beeinflusst würden (Wertheimer, 1925). Es wird also ganz allgemein eine Vielzahl von Bildelementen, die für Gesamtkomposition und Balance verantwortlich sind, angenommen. Obwohl McManus et al. in einer Studie aus dem Jahr 2011 Arnheims Gestalttheorie an abstrakter Kunst und Fotografien anwandten und keine universale Gültigkeit nachweisen konnten, so ließen sich die Gestaltprinzipien dennoch wenigstens teilweise anwenden (McManus et al., 2011). Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass Komposition darüber hinaus von anderen

Bildeigenschaften abhängen.

Vartanian et al. untersuchten in einer Studie aus dem Jahre 2005, ob in sogenannten Meisterwerken bildender Künstler eine stärker ausgeglichene Balance der Bildelemente vorherrsche als in Bildern minderer künstlerischer Qualität (Vartanian et al., 2005). Zwar konnten sie ihre Hypothese nicht belegen, wiesen jedoch nach, dass die Komposition eine bedeutsame Rolle in der ästhetischen Wahrnehmung spielt. Allein mit der visuellen Balance der Bildelemente oder mit der Komposition sei die ästhetische Wahrnehmung dennoch nicht zu begründen.

Da die Entropie als Maß für die Verteilung der Orientierung von Helligkeitsgradienten nachweislich mit höherer ästhetischer Wahrnehmung korreliert, wäre es nur naheliegend auch das Konzept von Balance und Komposition zu berücksichtigen. Folgerichtig sind weitere Studien zum Thema Komposition, Balance und Entropie nötig, um genauere Aussagen über ihre einzelnen Bedeutungen treffen zu können.

Außerdem sei auch die Bedeutung der Form erneut hervorgehoben. Bei der Betrachtung komplexer natürlicher Szenen extrahiert und fragmentiert das visuelle System des Menschen die Gesamtkomposition des Bildes in einzelne Cluster, die dann wesentlich von der Form bestimmt sind (Elder, 2018). In der Zusammenfassung unserer Ergebnisse wurde bereits erwähnt, dass die Entropie bei einigen der von mir untersuchten Bildkategorien ein adäquates und besser berechenbares Maß darstellt als ihre reine Form.

Ein weiterer bedeutsamer Aspekt, der von uns nicht näher betrachtet wurde, ist die Farbigkeit der einzelnen Bilder. Alle Bildkategorien (mit Ausnahmen der Musik-Cover) wurden den Versuchspersonen als Grauwert-Bilder gezeigt. Somit lässt sich keine verlässliche Aussage über die Rolle der Farbigkeit und ihrer Interaktion mit der Entropie treffen. Frühere Studien haben gezeigt, dass Farbigkeit bei der ästhetischen Bewertung eine wesentliche Rolle spielt (Palmer et al., 2013).

(2) Auswahl der Bilder

Ästhetische Bildbewertung hängt stark von den analysierten Objekten ab (Hayn-Leichsenring et al., 2013). In Abhängigkeit ihrer semantischen Bedeutung und des emotionalen *arousals* beim Betrachter rufen verschiedene Bildmotive unterschiedliche Reaktionen hervor. Dieser Effekt war bei uns vor allem bei den Metal-Covern zu beobachten (siehe Rolle des Bildinhalts [6.2]). Daher bleibt ungewiss, ob die Ergebnisse der vorliegenden Doktorarbeit auf andere menschengemachte Objekte und natürliche Szenen übertragbar sind. Bei uns ergaben sich große Unterschiede in der Bewertung einzelner Bilder in Abhängigkeit von der Bewertungskategorie und vom Bildinhalt. In diesem Zusammenhang eröffnet sich Spielraum für weiterführende Studien (siehe Ausblick).

(3) Präsentation der Bilder

Zunächst einmal erfolgten die Bewertungen der verschiedenen Bilder unter Laborbedingungen (Brieber et al., 2015). Somit lässt sich der nachgewiesene Zusammenhang zwischen Entropie und positiver Bewertung nicht ohne Weiteres auf die ästhetische Wahrnehmung im Alltag übertragen, obwohl auch Alltagsbilder untersucht wurden. Zum Beispiel zeigte sich, dass die Bewertung von Bildern unter anderem davon beeinflusst wird, ob Betrachter diese in einem Labor analysierten oder ob sie sich dabei in einem Museum befanden. In einem Museum wurden Bilder durchschnittlich als ästhetisch wertvoller wahrgenommen (Tschacher et al., 2012).

Wie in der Einleitung erwähnt, ist außerdem die Darbietung der betrachteten Objekte unter anderem hinsichtlich der Reihenfolge in der Präsentation bedeutsam. Die ästhetische Wahrnehmung hängt von der vorherigen Stimulation des visuellen Systems ab (Hayn-Leichsenring et al., 2013). In diesem Zusammenhang spielen die Begriffe Adaptation (Hayn-Leichsenring et al., 2013) und Wahrnehmungskontrast (Mallon et al., 2014) eine Rolle. Wir haben uns bemüht, diese Bias- Effekte durch Randomisierung der Bilder innerhalb eines

Bewertungsblocks (Gefallen/Harmonie/Interesse) sowie der Randomisierung der Reihenfolge der einzelnen Bewertungsblöcke zu minimieren. Außerdem nahmen zwei unabhängige Gruppen von Versuchspersonen an den Experimenten 2 und 6 sowie 3 und 5 teil. Dennoch können wir den Einfluss oben genannter Bias-Effekte nicht völlig ausschließen. Insbesondere der Aspekt der *familiarity* (Goldberg et al., 2012; Reber et al., 2004) dürfte bei den Alltagsbildern von hohem Interesse gewesen sein und ist nicht vollständig zu vermeiden. Laut Reber et al. (2004) beeinflusst u.a. die Vertrautheit von Objekten die kognitive Prozessierung der Sinneseindrücke und beschleunigt diese, wodurch eine eher positive Bewertung hervorgerufen wird.

Bei den Experimenten 2, 3, 5 und 6 gab es bei der Präsentation der Bilder keine von uns gesetzte zeitliche Begrenzung. Das heißt, die Versuchsteilnehmer konnten selbst darüber entscheiden, wie lange sie die Bilder ansehen wollten, ehe sie ihre Bewertung abgaben. Damit ergibt sich in dieser Studie eine weitestgehend untergeordnete Rolle der Betrachtungszeit in der ästhetischen Bewertung, da wir diese nicht gemessen haben.

Wahrnehmung und Bewertung erfolgt binnen Millisekunden, um rasche Entscheidungsfindung und gegebenenfalls eine Reaktion zu ermöglichen. Den Einfluss des „ersten Eindrucks“, also der raschen Einschätzung eines anderen Menschen, untersuchten Bar und Neta 2006. Sie postulierten, dass der erste Eindruck sogar binnen der ersten Millisekunden entstünde, und bezeichneten diese sehr raschen, eher oberflächlichen ästhetischen Einschätzungen als *survival related* (Bar and Neta, 2006). Es sei, evolutionärbiologisch gesehen, sinnvoll, mögliche Gefahrensituationen möglichst rasch als solche wahrzunehmen, um entsprechend rasch darauf reagieren zu können.

Die Bedeutung der zeitlichen Komponente bei der Wahrnehmung von Kunstbildern haben Verhavert et al. (2018) charakterisiert (Verhavert et al., 2018). Sie zeigten, dass, ausgehend von verschiedenen ästhetischen Bewertungskategorien (Schönheit [*beauty*], Außergewöhnlichkeit [*specialness*] und Eindrücklichkeit [*impressiveness*]), für die

Einschätzung von Schönheit und Außergewöhnlichkeit geringere Betrachtungszeiträume nötig sind als für die Bewertung der Eindrücklichkeit (Verhavert et al., 2018).

Auch bei den Bewertungskategorien, die für unsere Studie verwendet wurden (*interesting*, *harmonious* und *pleasant*), ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der ästhetischen Bewertung bei verschiedenen Betrachtungszeiten. So wiesen Schwabe et al. (2018) nach, dass Betrachtungszeiten von 50ms für eine zuverlässige Bewertung der Harmonie abstrakter Bilder ausreichend sind, während sich bei *interesting* und *pleasant* keine konsistenten Ergebnisse bei diesen kurzen Betrachtungszeiten verzeichnen ließen (Schwabe et al., 2018).

Schließlich spielt die Zeitschiene auch bei der Bewertung natürlicher und künstlicher Bilder im Vergleich eine Rolle (Mullin et al., 2017). Bei natürlichen Szenen war die ästhetische Bewertung unabhängig vom zeitlichen Aspekt konstant, während sich kurze und unbefristete Betrachtungszeiten bei der Betrachtung künstlicher Bilder stärker auf die ästhetische Bewertung auswirkten.

(4) Auswahl der Versuchspersonen

Die ästhetische Bewertung hängt am Ende nicht nur mit den analysierten Bildstrukturen zusammen, sondern ist wesentlich von der bewertenden Person abhängig. Jacobsen sprach in diesem Zusammenhang von sieben Hauptfaktoren, die synergistisch bei der ästhetischen Bewertung zusammenspielen (Jacobsen, 2006; siehe Einleitung). Daher ist als Schwäche der Doktorarbeit auch die Auswahl der Versuchsteilnehmer zu berücksichtigen. Diese waren alle jünger als 40 Jahre, akademisch ausgebildet (Studenten/Universitätsabsolventen) und künstlerisch nicht professionell vorgebildet, also sogenannte *art naives*. Die Rolle künstlerischer Vorbildung für die ästhetische Bewertung von Objekten sei hier noch einmal hervorgehoben (Leder et al., 2014). Es ist dabei unter anderem bemerkenswert, dass die ästhetische Präferenz von *art naives* scheinbar eine höhere Beständigkeit aufweist als die von Experten (Abeln et al., 2016; McManus et al., 2011).

6.5 Rolle von Kunst und Ästhetik in der Medizin

Interessant bleibt die Frage, ob die beiden unterschiedlichen Felder Medizin und Kunst auch Schnittstellen aufweisen. Die Frage kann mit Ja beantwortet werden, sei es in Bezug auf die Anwendung der oben erwähnten besonderen Aspekte in der Gesichterwahrnehmung bei Plastischer und Rekonstruktiver Chirurgie, sei es in Bezug auf die Kunsttherapie in Psychiatrie und Psychosomatik. Im Folgenden will ich insbesondere die Wechselwirkung zwischen Kunst und Demenz näher beleuchten.

Der demografische Wandel, welcher sich zurzeit vor allem in den Industrienationen mit zunehmender Geschwindigkeit vollzieht, verwandelt Erkrankungen des älteren Menschen, im Besonderen die verschiedenen Formen der Demenz, in Kernaspekte medizinischer Forschung und experimenteller Therapieansätze. Laut der Deutschen Alzheimer-Gesellschaft leben im Jahr 2018 1,7 Millionen Menschen mit Demenz in Deutschland (Deutsche Alzheimer Gesellschaft e.V., 2018). Bis zum Jahr 2050 könnte sich diese Zahl auf 3 Millionen erhöhen. Jedes Jahr träten mehr als 300.000 Neuerkrankungen auf.

Bei den unterschiedlichen Formen der Demenz handelt es sich in der Mehrzahl der Fälle um den Morbus Alzheimer (im Folgenden AD, kurz für *Alzheimer's disease*), seltener um Formen der vaskulären Demenz oder der frontotemporalen Demenz (im Folgenden FTD). Während beim Morbus Alzheimer die Persönlichkeit der Betroffenen lange stabil bleibt und zunächst Kurzzeitgedächtnis und Orientierung leiden, finden sich schwerwiegende Veränderungen der Persönlichkeit bei der FTD bereits in der frühen Krankheitsphase (Deutsche Alzheimer Gesellschaft e.V., 2017). Das liegt vornehmlich daran, dass bei der AD eine generalisierte Hirnatrophie stattfindet, während die FTD vor allem frühzeitig Bereiche betrifft, die für Persönlichkeit, Organisation und Planung zuständig sind. Die FTD ist in der Regel sehr schnell klinisch manifest, während AD-Patienten lange Zeit durch verschiedene Adaptationsprozesse ihre Krankheit „verheimlichen“ können. Dies spiegelt sich auch beim Umgang der Betroffenen mit der Kunst wider (Mather, 2014). Bei AD wird beobachtet, dass

der künstlerische Stil mit fortschreitender Krankheitsdauer zunehmend abstrakter wird (Crutch et al., 2006). Die FTD zeichnet sich dagegen durch einen zunehmenden Verlust exakter Proportion und Komposition aus (Rankin et al., 2007), der künstlerische Stil verlagert sich binnen kurzer Zeit eher ins Impressionistische (Mell et al., 2003). Es ist bemerkenswert, dass Gehirnerkrankungen sowohl dazu führen können, dass sich der Stil vormals künstlerisch aktiver Menschen grundlegend ändert (z.B. nach einem Schlaganfall; Sherwood, 2012), als auch dazu, dass sich ursprünglich nicht-Kunstschaffende dazu inspiriert fühlen, sich mit Kunst auseinanderzusetzen (Miller et al., 1998).

Studien belegen, dass es trotz des zunehmenden Verlusts von Gedächtnisinhalten bestimmte Aspekte von Persönlichkeit und gewisse persönliche Vorlieben gibt, welche konstant bleiben. Beispielsweise führten Graham et al. im Jahre 2013 eine Studie mit an AD Erkrankten durch, die die Aufgabe hatten, über einen Zeitraum von zwei Wochen Bilder und Fotografien von Landschaften und Gesichtern zu bewerten. Es wurde festgestellt, dass Patienten mit AD einen stabile Präferenz für bestimmte künstlerische Landschafts- oder Porträtbilder haben, fotografische Aufnahmen von Gesichtern jedoch auf weniger konstante Resonanz trafen. Die Autoren bezeichneten die konstante Vorliebe für bestimmte Kunstbilder als „*island of stability*“ (zu Deutsch: Insel der Stabilität) und vermuteten, dass die unterschiedliche Stabilität bei den präferierten Bildern auf verschiedene zerebrale Verarbeitungsprozesse zurückzuführen sei. Gesichter auf Fotos würden vermutlich stärker mit Erinnerungen und Selbstreflexion in Zusammenhang gebracht, da sich der Betrachter mitunter die Frage stelle, ob er dieses Gesicht bzw. diese Person erkennen müsse. Dieses Problem ergibt sich weniger bei der Betrachtung von Kunstbildern und Landschaftsfotos, die möglicherweise aus diesem Grund weniger von den kognitiven Defiziten bei AD betroffen sind (Graham et al., 2013). Bei der Frage, ob ästhetische Wahrnehmung nun stärker von primären sensorischen oder viel eher von sekundären kognitiv-prozessiven Vorgängen beeinflusst wird (Leder 2013), würde dies die zweite Theorie unterstützen. Es bleibt die Frage, warum Gesichter bzw. ihr fotografisches

Pendant mit Erinnerungen aus dem Langzeitgedächtnis verknüpft werden und ob sie dafür bestimmte Bildeigenschaften besitzen, womit wiederum eine sensorische Komponente vorliegen würde.

Unabhängig von dieser Diskussion ist es jedoch nicht von der Hand zu weisen, dass Bilder und Kunst für die Therapie der Demenz ein sehr ergiebiges Feld darstellen. Die Kunsttherapie bietet ein probates Mittel, um Patienten einerseits die Möglichkeit zu geben, ihre Persönlichkeit zu erhalten und wiederzuerkennen, und ermöglicht es ihnen andererseits auch, selbstständig mit ihrer Erkrankung umzugehen (Chancellor et al., 2013). Kunst repräsentiert eine Form der Expression, die ansonsten nicht auswertbare und nicht zu erlangende Informationen liefert (Schott, 2012). Sowohl die aktive als auch die passive Auseinandersetzung mit Kunst, d.h. sowohl die Betrachtung als auch die Erschaffung von Kunstwerken, sind dafür geeignet. Eine umfangreiche Übersichtsarbeit zur Bedeutung der Kunsttherapie liefern Chancellor et al. (2013). Sie weisen darauf hin, dass medikamentöse Demenztherapie bislang keinen bahnbrechenden Erfolg aufweisen kann und betonen die Rolle nicht-medikamentöser Therapien.

7. Ausblick

Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine Korrelation zwischen ästhetischer Präferenz und Entropie der Verteilung der Orientierung von Helligkeitsgradienten im Bild besteht. Das Ausmaß dieser Korrelation wird zum einen von den betrachteten Bildern, zum anderen den ausgewählten Bewertungskriterien und, nicht zuletzt, von den Betrachtern selbst beeinflusst. In früheren Arbeiten ist bereits dargestellt worden, dass bei der ästhetischen Bewertung von Kunstbildern interindividuelle Unterschiede bestehen, sich jedoch auch bestimmte Cluster ähnlicher ästhetischer Präferenz ausmachen lassen (Mallon et al., 2014.)

Für weitere Forschung auf diesem Gebiet ist es unter anderem erforderlich, den Einfluss der Persönlichkeitsstruktur der Versuchsteilnehmer zu berücksichtigen. Als mögliches Maß kann der sogenannte *Big Five*-Test (Goldberg, 1990; Costa and McCrae, 1992) genutzt werden. Eine der hier berücksichtigten Kategorien, die sogenannte *Openness* (im Sinne von Aufgeschlossenheit), wurde in diversen Studien mit einer Vorliebe für Bildende Künste assoziiert (Chamorro-Premuzic and Furnham, 2004; Furnham and Walker, 2001). Zwischen der Extraversion, einer weiteren Kategorie des Big Five-Tests, und einer Präferenz für moderne Kunst im Vergleich zu den „traditionellen“ Bildern konnten ebenfalls Parallelen gezogen werden (Eysenck, 1941; Burt, 1939).

Neben dem Big Five-Test wird in der Experimentellen Psychologie gerne der *Emphatizing-/Systemizing-Quotient* (EQ/SQ) genutzt (Baron-Cohen, 2009). EQ und SQ ermöglichen eine Einordnung der Persönlichkeit der Probanden nach eher empathischen Eigenschaften (EQ) oder einer überwiegend systematisierenden (SQ) Persönlichkeitsstruktur. Nicht eindeutig zuzuordnende Persönlichkeitsmerkmale werden bei dieser Betrachtung als „Typ B-Persönlichkeit“ geführt. Mögliche Unterschiede in der ästhetischen Präferenz könnten so einem bestimmten Persönlichkeitstypus zugeordnet werden.

Bei der Auswahl zukünftiger Versuchspersonenkollektive kann der Fokus unter anderem darauf gelegt werden, ob diese künstlerische Vorbildung erfahren haben (Leder et al., 2014; Cotter et al., 2017). Auch ist es interessant zu beleuchten, ob soziokulturelle und interkulturelle Unterschiede die Korrelation aus Entropie und positiver subjektiver Bewertung beeinflussen (Redies et al., 2017; Nadal et al., 2018).

Darüber hinaus können in späteren Arbeiten weitere Bildkategorien berücksichtigt werden, da die von uns getroffene Auswahl an Alltagsbildern nicht repräsentativ für die Wahrnehmung des alltäglichen Lebens durch den Menschen ist.

8. Literaturverzeichnis

Abeln, J., Fresz, L., Amirshani, S., McManus, C., Koch, M., Kreysa, H., Redies, C. (2016) Preference for well-balanced saliency in details cropped from photographs. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9:704; doi:10.3389/fnhum.2015.00704

Baumgarten, A. G. (1986) *Aesthetica*. Hildesheim: Georg Olms

Amirshahi, C., Koch, M., Redies, C., Denzler, J. (2012) PHOG analysis of self-similarity in aesthetic images. Human Vision and Electronic Imaging XVII, Burlingame, CA, USA, *Proceedings of SPIE- IS&T*, 82911:J1-J10; doi:10.1117/12.911973

Anand, P., Holbrook, M. (1986) Chasing the Wundt curve: an adventure in consumer esthetics. *Advances in Consumer Research*, 13:655-657

Arnheim, R. (1954) *Art and Visual Perception*. Berkley: University of California Press

Bahrick, H. P., Bahrick, P. O., Wittlinger, R. P. (1975) Fifty years of memory for names and faces: A cross-sectional approach. *Journal of Experimental Psychology*, 104:54-75; doi:10.1037/0096-3445.104.1.54

Bar, M., Neta, M., Linz, H. (2006) Very first impressions. *Emotion*, 6:269-278; doi:10.1037/1528-3542.6.2.269

Bar, M., Neta, M. (2006) Humans prefer curved visual objects. *Psychological Science*, 17:645-648; doi:10.1111/j.1467-9280.2006.01759.x

Baron-Cohen, S. (2009) Autism: the Empathizing–Systemizing (E-S) Theory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1156:68-80; doi:10.1111/j.1749-6632.2009.04467.x

Berlyne, D. E. (1960) *Conflict, Arousal and Curiosity*. *McGraw-Hill Series in Psychology*. New York, NY, USA: McGraw-Hill

Berlyne, D. E. (1974) *Studies in the New Experimental Aesthetics: Steps Toward an Objective*

Psychology of Aesthetic Appreciation. New York, NY, USA: Hemisphere

Bertamini, M., Palumbo, L., Gheorghes, T. N. (2015) Do observers like curvature or do they dislike angularity? *British Journal of Psychology*, 107:154-178; doi:10.1111/bjop.12132

Böhme, G. (2001) *Asthetik. Vorlesungen über Ästhetik als allgemeine Wahrnehmungslehre*. München: Wilhelm Fink

Brachmann, A., Redies, C. (2017) Computational and experimental approaches to visual aesthetics. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 11:102; doi:10.3389/fncom.2017.00102

Brieber, D., Leder, H., Nadal, M. (2015) The experience of art in museums: An attempt to dissociate the role of physical context and genuineness. *Empirical Studies of the Arts*, 33:95-105; doi:10.1177/0276237415570000

Bullot, N., Reber, R. (2014) The artful mind meets art history: Toward a psycho-historical framework for the science of art appreciation. *Behavioral and Brain Sciences*, 36:123-137; doi:10.1017/S0140525X12000489

Burt, C. (1939) The factorial analysis of emotional traits, Part I. *Journal of Personality*, 7:238-254; doi:10.1111/j.1467-6494.1939.tb02146.x

Carbon, C. (2010) The cycle of preference: long-term dynamics of aesthetic appreciation. *Acta*

Psychologica, 134:233-244; doi:10.1016/j.actpsy.2010.02.004

Chamorro-Premuzic, T., Furnham, A. (2004) Personality and intelligence as predictors of statistics examination grades. *Personality and Individual Differences*, 37:943-955; doi:10.1016/j.paid.2003.10.016

Chancellor, B., Duncan, A., Chatterjee, A. (2013) Art therapy for Alzheimer's disease and other dementias. *Journal of Alzheimer's Disease*, 39:1-11, doi:10.3233/JAD-131295

Changizi, M., Zhang, Q., Ye, H., Shimojo, S. (2005) The structures of letters and symbols throughout human history are selected to match those found in objects in natural scenes. *American Naturalist*, 167:E117-E139; doi:10.1086/502806

Chatterjee, A. (2011) Neuroaesthetics: a coming of age story. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23:53-62; doi:10.1162/jocn.2010.21457

Collins, J., Koski, J., Olson, I. (2016) More than meets the eye: the merging of perceptual and conceptual knowledge in the anterior temporal face area. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10:189; doi:10.3389/fnhum.2016.00189

Costa, P., McCrae, R. (1992) Four ways five factors are basic. *Personality and Individual Differences*, 13:653-665; doi:10.1016/0191-8869(92)90236-I

Cotter, K. N., Silvia, P. J., Bertamini, M., Palumbo, L., and Vartanian, O. (2017) Curve appeal: exploring individual differences in preference for curved versus angular objects. *iPerception*, 8:204166951769302; doi:10.1177/2041669517693023

Crutch, S. J., Rossor, M. N. (2006) Artistic changes in Alzheimer's disease. *International Review of Neurobiology*, 74:147-16; doi:10.1016/S0074-7742(06)74012-0

Cupchik, G. C., Gebotys, R. J. (1990) Interest and pleasure as dimensions of aesthetic response.

Empirical Studies of the Arts, 8:1-14; doi:10.2190/L789-TPPY-BD2QT7TW

Cupchik, G. C. (2009) Viewing artworks: contributions of cognitive control and perceptual facilitation to aesthetic experience. *Brain and Cognition*, 70:84-91; doi:10.1016/j.bandc.2009.01.003

Dalal, N., Triggs, B., Schmid, C. (2006) Human detection using oriented histograms of flow and appearance. *Lecture Notes in Computer Science*, 3952:428–441; doi:10.1007/11744047_33

Delsing, M., ter Bogt, T., Engels, R., Meeus, W. (2008) Adolescents' music preferences and personality characteristics. *European Journal of Personality*, 22:109-130; doi:10.1002/per.665

Deutsche Alzheimer Gesellschaft e.V (2018) Selbsthilfe Demenz, Informationsblatt 1, *Die Häufigkeit von Demenzerkrankungen*; www.deutsche-alzheimer.de [11.01.2019; 16:30]

Deutsche Alzheimer Gesellschaft e.V (2017) Informationsblatt 11, *Die Frontotemporale Demenz*; www.deutsche-alzheimer.de [11.01.2019; 16:32]

Du, A., Schuff, N., Kramer, J., Rosen, H., Gorno-Tempini, M., Rankin, K., Miller, B., Weiner, M. (2007) Different regional patterns of cortical thinning in Alzheimer's disease and frontotemporal dementia *Brain*. *European Journal of Personality*, 130:1159–1166; doi:10.1093/brain/awm016

Di Dio, C., Gallese, V. (2009) Neuroaesthetics: A review. *Current Opinion in Neurobiology*, 19:682-687; doi: 10.1016/j.conb.2009.09.001

Elder, J. H. (2018) Shape from contour: computation and representation. *Annual Review of Vision Science*, 4:423-450; doi:10.1146/annurev-vision-091517-034110

Estéphan, A., Fiset, D., Saumure, C., Plouffe-Demers, M., Zhang, Y., Sun, D., Blais, C. (2018) Time course of cultural differences in spatial frequency use for face identification. *Scientific Reports*, 8:1816; doi:10.1038/s41598-018-19971-1

Eysenck, H. J. (1941) “Type”-factors in aesthetic judgements. *British Journal of Psychology*, 10.1111/j.2044-8295.1941.tb00992.x

Fechner, G. T. (1865) Ueber die Frage des Goldenen Schnitts. *Archiv für die Zeichnenden Künste*, 11:100-112

Fechner, G. T. (1871) Ueber die Aechtheitsfrage der Holbein'schen Madonna; Leipzig: Breitkopf und Härtel

Fechner, G. T. (1876) *Vorschule der Ästhetik*. Leipzig: Breitkopf und Härtel

Furnham, A., Walker, J. (2001) Personality and judgements of abstract, pop art, and representational paintings. *European Journal of Personality*, 15:57-72; doi:10.1002/per.340

Böhme, G. (2001) *Asthetik*. München: Wilhelm Fink

Goldberg, L. R. (1990) An alternative "description of personality": The Big-Five Factor structure. *Journal of Personality and Social Psychology*, 59:1216-1229; doi: 10.1037/0022-3514.59.6.1216

Goldberg, L.R., Funk, B.A., Podell, K. (2012) How the brain deals with novelty and ambiguity: implications for neuroaesthetics. *Rendiconti Lincei*, 23: 227-238; doi.org/10.1007/s12210-012-0186-0

Gombrich, E. (1960) *Art and Illusion*. Wien: Phaidon Press

Gómez-Puerto, G., Rossello, J., Corradi, C., Acedo-Carmona, C., Munar, E., Nadal, M. (2017) Preference for curvature: a historical and conceptual framework. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9:712; doi:10.1037/aca0000135

Goodman, N. (1976) *Languages of Art*. Indianapolis, IN, USA: Hackett Publishing Company

Graham, D., Redies, C. (2010) Statistical regularities in art: relations with visual coding and perception. *Vision Research*, 50:1503-1509; doi:10.1016/j.visres.2010.05.002

Graham, D., Stockinger, S., Leder, H. (2013) An island of stability: art images and natural scenes – but not natural faces – show consistent esthetic response in Alzheimer’s-related dementia, *Frontiers in Psychology*, 4:107; doi:10.3389/fpsyg.2013.00107

Güclütürk, Y., Jacobs, R. H., Van Lier, R. (2016) Liking versus complexity: decomposing the inverted U-curve. *Frontiers in Neuroscience*, 10:112; doi:10.3389/fnhum.2016.00112

Guntupalli, J. S., Gobbini, M. I. (2017) Reading faces: from features to recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 21:915-916; doi: 10.1016/j.tics.2017.09.007

Haig, N. (1984) The effect of feature displacement on face recognition. *Perception*, 13:505-512; doi:10.1068/p130505

Hayn-Leichsenring, G. U., Kloth, N., Schweinberger, S. R., Redies, C. (2013) Adaptation effects to attractiveness of face photographs and art portraits are domain-specific. *iPerception* 4:303–316; doi:10.1068/i0583

Henemann, G., Brachmann, A., Redies, C. (2017) Statistical image properties in works from the Prinzhorn collection of artists with schizophrenia. *Frontiers in Psychiatry*, 8:273; doi:10.3389/fpsy.2017.00273

Jacobsen, T. (2006) Bridging the arts and sciences: a framework for the psychology of aesthetics. *Leonardo*, 39:155-162; doi:10.1162/leon.2006.39.2.155

Jacobsen, T. (2013) On the electrophysiology of aesthetic processing. *Progress in Brain Research*, 204:159-168; doi:10.1016/B978-0-444-63287-6.00008-7

Kaplan, C. S. (2004) Islamic star patterns in absolute geometry. *ACM Transactions on Graphics*, 23:97-119; doi:10.1145/990002.990003

Kirsch, L. P., Urgesie, C., Cross, E. S. (2016) Shaping and reshaping the aesthetic brain: Emerging perspectives on the neurobiology of embodied aesthetics. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 62:56-68; doi:10.1016/j.neubiorev.2015.12.005

Kranz, F., Ishai, A. (2006) Face perception is modulated by sexual preference. *Current Biology*, 16:63-68; doi:10.1016/j.cub.2005.10.070

Leder, H. (2013) Next steps in neuroaesthetics: Which processes and processing stages to study? *Psychology of Aesthetics, Creativity and the Arts*, 7:27-37; doi:10.1037/a0031585

Leder, H., Gerger, G., Brieber, D., Schwarz, N. (2014) What makes an art expert? Emotion and evaluation in art appreciation. *Cognition and Emotion*, 28:1137-1147; doi:10.1080/02699931.2013.870132

Leder, H., Tinio, P., Brieber, D., Kröner, T., Jacobsen, T., Rosenberg, R. (2019) Symmetry is not a universal law of beauty. *Empirical Studies of the Arts*, 37:104–114; doi:10.1177/0276237418777941

Libeks, J., Turnbull, D. (2011) You can judge an artist by an album cover: Using images for music annotation. *IEEE MultiMedia*, 18:30-37; doi:10.1109/MMUL.2011.1

Lüttge, U., Souza, G. M. (2018) The Golden Section and beauty in nature: the perfection of symmetry and the charm of asymmetry. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* (im Druck); doi:10.1016/j.pbiomolbio.2018.12.008

Lyssenko, N., Redies, C., Hayn-Leichsenring, G. (2016) Evaluating abstract art: relation between term usage, subjective ratings, image properties and personality traits. *Frontiers in Psychology*, 7:973; doi:10.3389/fpsyg.2016.00973

Mallon, B., Redies, C., Hayn-Leichsenring, G. (2014) Beauty in abstract paintings: perceptual contrast and statistical properties. *Frontiers in Neuroscience*, 8:161; doi:10.3389/fnhum.2014.00161

Martindale, C. (1988) Aesthetics, psychobiology and cognition. In: F. H. Farley & R. W. Neperud (Hrsg.), *The Foundations of Aesthetics, Art, & Art Education*, New York, NY, USA: Praeger. S. 7-42

Mather, G. (2014) *The Psychology of Visual Art*. Cambridge: Cambridge University Press

McManus, I. C., Stöver, K., Kim, D. (2011) Arnheim's Gestalt theory of visual balance: examining the compositional structure of art photographs and abstract images. *iPerception*, 2:615-647; doi:10.1068/i0445aap

McManus, I. C., Zhou, F. A., l'Anson, S. (2011) The psychometrics of photographic cropping: the influence of colour, meaning and expertise. *Perception*, 40:332-357; doi:10.1068/p6700

Mell, J., Howard, S., Miller, B. (2003) Art and the brain: the influence of frontotemporal dementia on an accomplished artist. *Neurology*, 60:1707; doi:10.1212/01.WNL.0000064164.02891.12

Melmer, T., Amirshani, S. A., Koch, M., Denzler, J. (2013) From regular text to artistic writing and artworks: Fourier statistics of images with low and high aesthetic appeal. *Frontiers in Neuroscience*, 7:106; doi:10.3389/fnhum.2013.00106

Miller, B. L., Mishkin, F., Boone, K., Prince, F., Ponton, M., Cotman, C. (1998) Emergence of artistic talent in frontotemporal dementia. *Neurology*, 51:978; doi:10.1212/WNL.51.4.978

Mullin, C., Hayn-Leichsenring, G., Redies, C., Wagemans J. (2017) The GIST of beauty: An investigation of aesthetic perception in rapidly presented images. *Human Vision and Electronic Imaging XVII*, Burlingame, CA, USA, pg. 248-256; Springfield, VA, USA: Society for Imaging Science and Technology; doi:10.2352/ISSN.2470-1173.2017.14.HVEI-152

Nadal, M., Chatterjee, A. (2018) Neuroaesthetics and art's diversity and universality. *WIREs Cognitive Science*, e1487; doi:10.1002/wcs.1487

Nichols, D. F., Betts, L. R., Wilson, H. R. (2010) Decoding of faces and face components in face-sensitive human visual cortex. *Frontiers in Psychology*, 1:28; doi:10.3389/fpsyg.2010.00028

Pelowski, M., Markey, P. S., Forster, M., Gerger, G., Leder, H. (2017) Move me, astonish me... delight my eyes and brain: The Vienna Integrated Model of top-down and bottom-up processes in Art Perception (VIMAP) and corresponding affective, evaluative, and neurophysiological correlates. *Physics of Life Reviews*, 21:126-127; doi:10.1016/j.plrev.2017.02.003

Reber, R., Schwarz, N., Winkielman, P. (2004) Processing fluency and aesthetic pleasure: Is beauty in the perceiver's processing experience? *Personality and Psychology Review*, 8:364-382; doi:10.1207/s15327957pspr0804_3

Redies, C., Brachmann, A., Wagemans, J. (2017 a) High entropy of edge orientations characterizes visual artworks from diverse cultural backgrounds. *Vision Research*, 133:130-144; doi:10.1016/j.visres.2017.02.004

Redies, C., Brachmann, A. (2017 b) Statistical image properties in large subsets of traditional art, *Bad Art*, and abstract art. *Frontiers in Neuroscience*, 11:593; doi:10.3389/fnins.2017.00593

Redies, C., Hasenstein, J., Denzler, J. (2007) Fractal-like image statistics in visual art: similarity to natural scenes. *Spatial Vision*, 21:137-148; doi:10.1163/156856807782753921

Redies, C., Amirshani, S., Koch, M., Denzler, J. (2012) PHOG-derived aesthetic measures applied to color photographs of artworks, natural scenes and objects. *Lecture Notes in Computer Science*, 7583:522–531; doi:10.1007/978-3-642-33863-2_54

Redies, C., Brachmann, A., Hayn-Leichsenring, G. (2015) Changes of statistical properties during the creation of graphic artworks. *Art & Perception*, 3:93-116; doi:10.1163/22134913-00002017

Redies, C. (2015) Combining universal beauty and cultural context in a unifying model of visual aesthetic experience. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9:218; doi:10.3389/fnhum.2015.00218

Rentfrow, S., Gosling, P., Swann W. B. Jr. (2003) A very brief measure of the Big-Five personality domains. *Journal of Research in Personality*, 37:504-528; doi:10.1016/S0092-6566(03)00046-1

Rentfrow, S., Goldberg, L. R., Levithin, D. J. (2011) The structure of musical preferences: A five- factor model. *Journal of Personality and Social Psychology*, 100:1139-1157; doi:10.1037/a0022406

Samuels, C. A., Ewy R. (1985) Aesthetic perception of faces during infancy. *British Journal of Developmental Psychology*, 3:221-228; doi:10.1111/j.2044-835X.1985.tb00975.x

Schepman, A., Rodway, P., Pullen, S. J., Kirkham, J. (2015) Shared liking and association valence for representational art but not abstract art. *Journal of Vision*, 15:11; doi:10.1167/15.5.11

Schott, G. D. (2012) Pictures as a neurological tool: lessons from enhanced and emergent artistry in brain disease. *Brain*, 135:1947–1963; doi:10.1093/brain/awr314

Schwabe, K., Menzel, C., Mullin, C., Redies, C., Wagemans, J. (2018) GIST perception of image composition in abstract artworks. *iPerception*, 9:1–25; doi:10.1177/2041669518780797

- Sherwood, K. D. (2012) How a cerebral hemorrhage altered my art. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6:55; doi:10.3389/fnhum.2012.00055
- Solomon, J. A., Pelli, D. G. (1994) The visual filter mediating letter identification. *Nature*, 369:395-397; doi:10.1038/369395a0
- Spehar, B., Colin, W.G., Clifford, C. W. G., Newell, B. R., Taylor, R. P. (2003) Chaos and graphics: Universal aesthetic of fractals. *Computers & Graphics*, 27:813-820; doi: 10.1016/S0097-8493(03)00154-7
- Tamir, A. (2015) Quantitative analysis of face symmetry. *Journal of Craniofacial Surgery*, 26:1268-1269; doi:10.1097/SCS.0000000000001610
- Tanaka, J. W. (2001) The entry point of face recognition: evidence for face expertise. *Journal of Experimental Psychology*, 130:534-543; doi:10.1037/0096-3445.130.3.534
- Tooby, J., Cosmides, L. (2001) Does beauty build adapted minds? Toward an evolutionary theory of aesthetics. *SubStance*, 30:6-27; doi:10.1353/sub.2001.0017
- Tschacher, W., Greenwood, S., Kirchberg, V., Wintzerith, S., van den Berg, K., Tröndle, M. (2012). Physiological correlates of aesthetic perception of artworks in a museum. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 6:96-103; doi: 10.1037/a0023845
- van Paaschen, J., Bacci, F., Melcher, D. (2015) The influence of art expertise and training on emotion and preference ratings for representational and abstract artworks. *PloS One*, 10:e0134241; doi:10.1371/journal.pone.0134241
- Vartanian, O., Martindale, C., Podsiadlo, J., Overbay, S., Borkum, J. (2005) The link between composition and balance in masterworks vs. paintings of lower artistic quality. *British Journal of Psychology*, 96:493-503; doi:10.1348/000712605X47927

Verhavert, S., Wagemans, J., Augustin, M. (2018) Beauty in the blink of an eye: the time course of aesthetic experiences. *British Journal of Psychology*, 109:63-84; doi:10.1111/bjop.12258

Vessel, E. A., Rubin, N. (2010) Beauty and the beholder: highly individual taste for abstract, but not real-world images. *Journal of Vision*, 10:63-84; doi:10.1167/10.2.18

Wang, Z., Quinn, P. C., Tanaka, J. W., Xiaoyang, Y., Yu-Hao, S., Jiangang, L., Pascalis, O., Leizhong, G., Kang, L. (2015) An other-race effect for configural and featural processing of faces: upper and lower face regions play different roles. *Frontiers in Psychology*, 6:559; doi:10.3389/fpsyg.2015.00559

Wertheimer, M. (1925) Vortrag vor der Kant-Gesellschaft 1924, Erlangen: Verlag der Philosophischen Akademie

Wollheim, F. A. (1968) *Art and Its Objects*. Cambridge: Cambridge University Press

Wundt, W. M. (1874) *Grundzuge der Physiologischen Psychologie*, Leipzig: Engelmann

Zyngier, S., Peer, W., van Hakemulder, F. (2007) Complexity and foregrounding: in the eye of the beholder? *Poetics Today*, 28:653-682; doi:10.1215/03335372-2007-011

9. Lebenslauf

Kerndaten

Name	Maria Gennad'Evna Grebenkina
Geburtstag	26. 05. 1994
Geburtsort	Samara, Russland
Deutsche Staatsbürgerin seit	2006 (Einbürgerung durch Stadt Kassel)

Bisherige Ausbildung

Friedrich-Schiller-Universität Jena	2012-2018 Abschluss: Staatsexamen Humanmedizin: 1,5
Wilhelmsgymnasium Kassel	2004-2012 Abschluss: Allgemeine Hochschulreife: 1,3
Grundschule Moselweiß Koblenz	2000-2004

Bisherige Tätigkeiten

Tutor im Skillslab Jena	2013-2018
Tutor im Institut für Biochemie	2014
Tutor im Institut für Anatomie	2013

Weitere Qualifikationen

Sprachen	Deutsch, Russisch, Englisch fließend; Spanisch Grundkenntnisse; Deutsche Gebärdensprache Grundkurs
----------	--

10. Danksagung

Ich möchte mich im Besonderen bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Dr. Redies bedanken, der durch eine sehr umfassende und zuverlässige Betreuung während der gesamten Arbeit an Publikation und Dissertation brillierte und für jedes Problem eine Lösung fand. Ebenso bedanke ich mich bei Prof. Dr. Bertamini, Dr. Anselm Brachmann und Ali Kaduham für ihr Engagement und ihre Beiträge beim Erstellen der Publikation.

Ich danke meiner Familie für die Ermöglichung meiner akademischen Ziele und die Förderung meines persönlichen künstlerischen Interesses von frühester Kindheit an.

Nicht zuletzt danke ich den Teilnehmern der diversen Experimente für eure Zeit und euren Einsatz und insbesondere Hagen R., Ben W. und Frank S., ihr wart mir in vielen Lebenslagen sehr treue und geschätzte Freunde und seelisch-moralische Stützen.