



M-Arts: Eine Brücke zwischen Mathematik und Kunst

Barbara Kimeswenger

Private Pädagogische Hochschule der Diözese Linz
barbara.kimeswenger@ph-linz.at

EINGELANGT 16 JUN 2017

ÜBERARBEITET 23 OKT 2017

ANGENOMMEN 24 OKT 2017

Dieser Beitrag will zeigen, dass die vermeintlich unterschiedlichen Disziplinen „Mathematik“ und „Kunst“ zusammengebracht werden können. Es wird der Begriff STEAM vorgestellt, der für die Verbindung folgender Bereiche steht: Science, Technology, Engineering, Art, Mathematics. Am Beispiel der Farbenlehre, des Goldenen Schnittes und der Erstellung eines neuen Gemäldes im Rembrandt-Stil wird konkret erläutert, welcher Zusammenhang zwischen Mathematik und Malerei besteht. Diese theoretischen Ansätze sollen Ideen für fächerübergreifendes Unterrichten liefern.

SCHLÜSSELWÖRTER: Kunst, Malerei, Mathematik, STEAM

1. Einleitung

Mathematik und Kunst gelten als völlig unterschiedliche Disziplinen. Jedoch spielt sowohl die Kunst in der Mathematik als auch die Mathematik in der Kunst eine große Rolle. Dieser Artikel legt den Fokus auf die Erläuterung verschiedener Ansätze aus der Literatur, wie man diese Bereiche in Zusammenhang bringen kann. Diverse Publikationen, Projekte und Forschungen beschäftigen sich mit diesem Thema und beschreiben den Mehrwert fächerübergreifend zu arbeiten:

„There are many reasons why it is beneficial to connect mathematical concepts with visual arts education.“ (Jarvis & Naested, 2012, S. 9–10)

In diesem Beitrag werden vorwiegend Projekte aus der Malerei vorgestellt, die das Bewusstsein schärfen können, wie eine Brücke zur Mathematik gebildet werden kann. Unter anderem werden Modelle vorgestellt, die Farben mithilfe einer Pyramide bzw. einer Kugel in eine dreidimensionale, systematische Ordnung bringen. Des Weiteren wird der Goldene Schnitt erwähnt, der ein spezielles Teilungsverhältnis angibt, das häufig in der Malerei zu finden ist. Zum Schluss wird ein Projekt erläutert, indem mithilfe statistischer Analysen und neuester Technologie ein Werk im Rembrandt-Stil erstellt wird. Diese vielfältigen Ansätze können Ideen für fächerübergreifendes Unterrichten liefern. Bevor diese vorgestellt werden, wird nun der Begriff „M-Arts“ eingeführt. Diese neue Bezeichnung soll für alle Projek-

te stehen, die „Mathematik“ und „Kunst“ in Zusammenhang bringen („Mathematics“ und „The Arts“).

Nach dieser kurzen Einführung wird im Folgenden eine weitere Bezeichnung namens „STEAM“ vorgestellt. Danach wird die Kreativität als Grundlage für Innovation thematisiert und argumentiert, dass die Größe der Zielgruppen erweitert werden kann, wenn Mathematik und Kunst in Verbindung gebracht werden.

2. Mathematik und Kunst verbinden – Warum?

Der englische Begriff „STEM“ ist eine zusammenfassende Bezeichnung von folgenden Studien- und Unterrichtsfächern: Science, Technology, Engineering, Mathematics. In Anlehnung daran integriert „STEAM“ zusätzlich noch das Gebiet der Kunst (Art) und sieht somit ganz neue Möglichkeiten (Land, 2013; Platz, 2007). Eine Einbeziehung des kreativen Bereichs soll sich positiv auf die anderen Gebiete auswirken, wie im Folgenden von Land (2013) beschrieben: „Full STEAM Ahead: The Benefits of Integrating the Arts Into STEM“.

Eine von vielen Möglichkeiten der Zusammenarbeit von Lehrpersonen aus den Unterrichtsfächern „Mathematik“ und „Bildnerische Erziehung“ schlägt Land (2013, S. 550) wie folgt vor:

„For example, if the big idea was data, the mathematics teacher could introduce skills related to data collection and frequency charts. Simultaneously, the art educator could introduce the skills related to visual literacy through a use of color and icons. In the end, the synthesis of learning may be a data visualization representing personally collected data through the use of colors and icons. Other applications of STEAM may take the form of circuit bending, musical compositions, kinetic art, product design, prototype development, and performance art.“

Die angesprochene Visualisierung in diesem Zitat hat nicht nur in der Statistik einen großen Stellenwert, sondern auch in anderen Teilgebieten der Mathematik, wie etwa in der Geometrie. Visualisierung wird oft als Bindeglied zwischen Mathematik und Kunst verstanden, da sie in beiden Disziplinen eine wichtige Rolle einnimmt (Emmer, 1994). Bildliche Darstellungen werden auch im Unterricht eingesetzt, da sie Mathematik einsehbar machen und förderlich für Vorstellungen von mathematischen Begriffen sein können (Kimeswenger & Hohenwarter, 2015).

Weitere konkrete Ansatzpunkte für eine fächerübergreifende Denkweise beschreiben die Herausgeber Fenyvesi, Téglási und Szilágyi (2014) in ihrem Buch „Adventures on Paper. Math-Art Activities for Experience-centered Education of Mathematics. Visuality & Mathematics.“ Unter vielen Beispielen nimmt der Mathematiker und Bildhauer George Hart Bezug zu der Kunst des Papierfaltens und beschreibt mögliche Aktivitäten mit Schülerinnen und Schülern.

„The mathematical connections in paper folding and origami’s great potential in mathematics education are widely known and accepted.“ (Fenyvesi, Téglási, & Szilágyi, 2014, S.9)

In den letzten Jahrhunderten haben viele Beispiele gezeigt, dass Kunst mit anderen Bereichen in Verbindung gebracht werden kann. Es entwickelten sich wissenschaftliche Plattformen, die fächerübergreifende Projekte publizieren, wie etwa das STEAM Journal (2017).

Des Weiteren etablierte sich eine internationale Konferenz namens „Bridges“, die Brücken zwischen Mathematik und andere Disziplinen (wie etwa Kunst, Musik, Architektur, Bildung und Kultur) bauen möchte. Seit 1998 haben die jährlichen Bridges-Konferenzen, die in Nordamerika, Europa oder Asien stattgefunden haben, Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus über dreißig Ländern angezogen. Das Konferenzprogramm beinhaltet wissenschaftliche Vorträge mit internationalen Referentinnen und Referenten, Workshops, Kunstveranstaltungen und Kunstausstellungen (Bridges, 2017a, 2017b).

Sich mit verschiedenen Feldern von STEAM zu befassen ist keine neue Idee, sondern hat bereits Leonardo da Vinci in bemerkenswerter Art und Weise gezeigt.

TABELLE 1. Leonardo da Vinci – ein Vorbild für STEAM (vgl. Boucheron & Giorgione, 2013; Atalay, 2006).

| STEAM | | Leonardo da Vinci (1452–1519) Beispiele von Berufsbezeichnungen |
|-------|-------------|---|
| S | Science | Forscher |
| T | Technology | Techniker und Erfinder, festgehalten in Zeichnungen in verschiedenen Notizbüchern |
| E | Engineering | Als Ingenieur der Renaissance bezeichnet, zahlreiche Modelle von Leonardos Maschinen wurden umgesetzt |
| A | Art | Zeichner und Maler, z.B. „Mona Lisa“ |
| M | Mathematics | Mathematiker |

Atalay (2006) nennt Leonardo da Vinci als ersten modernen Forscher in seinem Buch „Math and the Mona Lisa“ und verdeutlicht, dass er Bemerkenswertes gleichermaßen als Forscher, Techniker, Erfinder, Ingenieur, Zeichner, Maler und Mathematiker vollbracht hat.

In der Tabelle 1 werden seine verschiedenen möglichen Berufsbezeichnungen aufgelistet. Leonardo da Vinci, der als STEAM-Vorbild gesehen werden kann, hat die einzelnen Bereiche nicht isoliert voneinander betrachtet, sondern sich mit ihnen allen intensiv beschäftigt (Boucheron & Giorgione, 2013; Atalay, 2006).

Viele Ideen als Forscher und Erfinder wurden später umgesetzt und sind Wirklichkeit geworden. Darunter Gleitflugapparate in der Luftfahrtabteilung oder

Turbinen (Boucheron & Giorgione, 2013). Als Maler und Zeichner verwendete er die Mathematik als unverzichtbares Element in seiner Kunst, wie Atalay (2006, S. xviii) verdeutlicht:

„The underlying mathematics and the principles of symmetry are not just useful, they are indispensable [in his art].“

Als Techniker, Erfinder, Ingenieur, Zeichner, Maler und Mathematiker zählt seine grenzenlose Kreativität als Quelle für viele verschiedene Innovationen dieser Zeit, das zum nächsten Punkt führt (Boucheron & Giorgione, 2013; Atalay, 2006).

Kreativität als Grundlage für Innovation

Laut Kannonier (2017) fördert Kunst Kreativität und Kreativität ist Grundlage für Innovation. Leonardo da Vinci ist ein gutes Beispiel dafür. Er hat gezeigt, dass es möglich ist, Kunst mit Mathematik, Technik und Wissenschaft zu vereinen. Unter Zuhilfenahme aller Bereiche von – wie wir heute sagen würden – STEAM wurde es ihm möglich, noch nie dagewesene Erfindungen zu kreieren (Boucheron & Giorgione, 2013). Der wirtschaftliche Erfolg und technologische Fortschritt wird von Neuheiten und Erfindungen beflügelt, wozu es kreative Personen bedarf. Neben der Förderung von Kreativität als Grundlage für Innovation nennt Kannonier (2017) die Entwicklung heute noch unbekannter zukünftiger Berufsbilder als weitere Notwendigkeit, sich mit Kunst zu beschäftigen. Da niemand voraussagen kann, welche Technologien oder Berufsbilder die Zukunft prägen werden, müssen Schülerinnen und Schüler und Studierende breit ausgebildet werden, um sie darauf vorzubereiten. Dazu muss Freiraum für Kreativität als Grundlage für Innovation gelassen werden, so Kannonier (2017).

Dass Mathematik in heutigen Innovationen bzw. Technologien eine wichtige Rolle spielt, verdeutlichen ebenso Drijvers et al. (2016, S. 1):

„Both in professional practice and in personal life, it is particularly striking how digital technologies such as software-controlled engines, smart phones, tablets, and GPS devices rely on mathematical algorithms that are invisible to the user, but play essential roles ‘under the hood’. Implications of these technology-rich environments have the potential to influence the nature of mathematics education and the concepts and skills that future students will possess.“

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beide Bereiche, Kunst und Mathematik, in der Schule gefördert werden sollen und für Innovationen von Bedeutung sein können.

Erweiterung von Zielgruppen

Ein weiterer Grund, eine Brücke zwischen diesen beiden Disziplinen zu bauen, ist die Möglichkeit, die Zielgruppen zu erweitern. Es soll einerseits die Aufmerksamkeit von Kunstinteressierten geweckt werden. Andererseits sollen auch Personen angesprochen werden, die sich für Mathematik begeistern können. Man erhofft sich, mit fächerübergreifenden Projekten die Aufmerksamkeit einer größeren Anzahl an Personen zu wecken. Des Weiteren soll das Einbeziehen der künstlerischen Perspektive auch das Interesse an anderen Bereichen fördern (Land, 2013).

3. Beispiele

Nach der Beschäftigung mit STEAM, der Kreativität und der Erweiterung von Zielgruppen sollen konkrete Beispiele beschrieben werden, wie Mathematik und Kunst in Verbindung gebracht werden können. Im Folgenden wird die Farbenlehre thematisiert und mathematische Modelle zur systematischen Anordnung von Farben angesprochen. Im Anschluss wird der Goldene Schnitt erwähnt, der für Kompositionen in der Malerei herangezogen wird. Das letzte beschriebene Beispiel skizziert ein Projekt, das mit Hilfe statistischer Methoden ein noch nie dagewesenes Rembrandt-Gemälde kreiert.

Farbenlehre

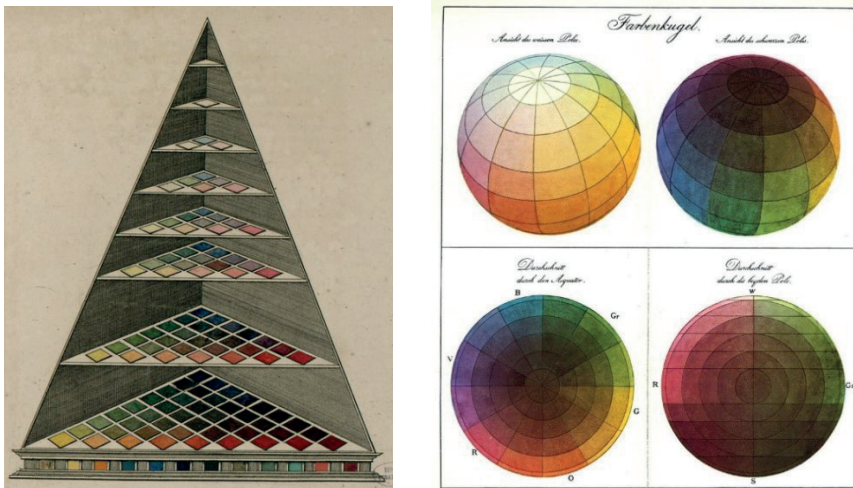
Das erste erläuterte Thema, mit dem sich Künstlerinnen und Künstler, Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler, Mathematikerinnen und Mathematiker gleichermaßen beschäftigen, ist die Farbenlehre. Der folgende historische Einblick soll zeigen, dass dieses komplexe Wissensgebiet verschiedene Bereiche berührt. Während die Kunst sich mit der Wirkung der Farben auf die betrachtenden Personen auseinandersetzt, sind Farben auch der wesentliche Bestandteil jeder visuellen Information und spielen in der Wissenschaft eine wichtige Rolle (Küppers, 2016).

Schon vor mehreren Jahrhunderten beschäftigte man sich mit diesem Thema. Es wurden verschiedene Modelle entwickelt, Farben in eine systematische, geometrische Ordnung zu bringen. Laut Küppers (2016) stammt der erste bekannte Versuch von dem Jesuiten Franciscus Aguilonius, der 1613 eine lineare Farbanordnung entwickelt hat. Danach beschäftigten sich unter anderen auch Johannes Kepler, René Descartes, Isaac Newton, Johann Wolfgang von Goethe und Johannes Itten mit der Farbenlehre. Im Laufe der Jahrhunderte entwickelten Malerinnen und Maler, Künstlerinnen und Künstler sowie Forscherinnen und Forscher immer wieder Modelle, Farben in geeigneter Weise anzuordnen.

Der Naturforscher und Mathematiker Johann Heinrich Lambert (1728–1777) schlägt die erste dreidimensionale Farbanordnung in Form einer Pyramide vor (siehe Abbildung 1). An den Dreiecksecken der Grundfläche sind Zinnoberrot, Königsgelb und Bergblau angeordnet. Die anderen Farben ergeben sich durch ihre Mischungen. Betrachtet man beispielsweise die Grundfläche, liegen zwischen den Eckfarben weitere sieben Abstufungen und insgesamt ergeben sich 45 Farbnuancen auf der untersten Ebene. Weitere Schnittebenen beinhalten verschiedene Farbnuancen wie in Abbildung 1 abgebildet, wobei Weiß an der Spitze platziert wird (Küppers, 2016; Lambert, 1772).

Der berühmte Maler Philipp Otto Runge (1777–1810) entwickelte eine Farbkugel, die ebenso in Abbildung 1 von verschiedenen Blickwinkeln und mithilfe zweier Durchschnitte dargestellt wird. Bei der Erstellung nutzte er seine Erfahrung als Maler, Farben zu mischen. Aus seiner Sicht zählen Gelb, Rot, Blau, Weiß und Schwarz zu fünf „Elementarfarben“. An den Polen dieser Kugel – ähnlich einem Globus – sind Weiß und Schwarz platziert. An der restlichen Oberfläche des Körpers ordnet er verschiedene Farbmischungen mit kontinuierlichen Übergängen an (Küppers, 2016).

ABBILDUNG 1. Modelle zur Anordnung von Farbe: Farbpyramide (Lambert, 1772, S. 129) und Farbkugel von Runge (1810) (Küppers, 2016, S. 45)



Neben der Pyramide und der Kugel wurden danach auch noch andere geometrische Körper für Modelle zur Anordnung von Farben herangezogen, wie etwa der Rhomboeder von Küppers (2016).

Farben gehören zu den zentralsten Aspekten bei der Erstellung künstlerischer Werke. Verschiedene Malerinnen und Maler setzen sich zum Ziel, in den Gemälden Farbenreichtum und Leuchtkraft zu steigern, um eine einzigartige Bild-

wirkung zu erzielen. Einer darunter ist der Expressionist Ernst Ludwig Kirchner (1880–1938). Seine Werke werden kunsthistorisch erforscht und vor allem auf die Aspekte wie etwa Maltechnik, Schaffensprozess und Malweise untersucht. Seine Arbeiten stehen nicht nur für prägnante Kompositionen, sondern auch vor allem für eine hohe Leuchtkraft von Farben, so die Herausgeber Schick und Skowranek (2011) des Buches „»Keiner hat diese Farben wie ich.« Kirchner malt“.

Kompositionen und der Goldene Schnitt – Mathematik und Malerei

Mathematik kann nicht nur bei der Anordnung von Farben, sondern auch in Kompositionen eine Rolle spielen, wie folgendes Beispiel verdeutlichen soll.

Der Goldene Schnitt (mathematisches Symbol: Φ) bezeichnet ein Teilungsverhältnis, das häufig in der Malerei auftaucht und von Menschen als besonders harmonisch empfunden wird (Felgentreu & Nowald, 2011). Eine Strecke ist im Goldenen Schnitt geteilt, wenn sich beide Teilstücke zueinander verhalten, wie die ganze Strecke zum längeren Stück. Dabei wird die längere Strecke a als Major und die kürzere b als Minor bezeichnet (siehe Abbildung 2; Walser, 2013).

ABBILDUNG 2. Im Goldenen Schnitt geteilt (Major a : längere Strecke, Minor b : kürzere Strecke) (Walser, 2013, S. 17)



Dabei gilt:

$$\Phi = \frac{a+b}{a} = \frac{a}{b}$$

Verschiedene KünstlerInnen nehmen auf dieses spezielle Teilungsverhältnis in ihren Werken Bezug. Der Kunstprofessor und Teilnehmer der zuvor genannten Bridges-Konferenz Chris Bartlett (2013) beschreibt zum Beispiel die Komposition seines Gemäldes „Greek Island House“ (Acryl auf Leinwand, 2012; siehe Abbildung 3). Für diese Malerei hat er seine Leinwand in einem speziellen Verhältnis gewählt ($1:\sqrt{\Phi}$ oder $1:1.272$).

„Unique to this $\sqrt{\Phi}$ rectangle is that the vertical and horizontal lines drawn at the intersection of a diagonal and one at right angles to it bisect the short and long sides and the diagonal at golden ratio divisions. Using one intersection creates four interior rectangles, three of which are similar $\sqrt{\Phi}$ rectangles and one made up of two horizontal squares. Mathematical alignments so created form an invisible structure to give a unified self-referential system of organization.“ (Bartlett, 2013, S. 1)

ABBILDUNG 3. Malerei, deren Komposition Bezug auf den Goldenen Schnitt nimmt (Bartlett, 2012, S. 1)



Neben der Malerei von Bartlett findet man den Goldene Schnitt auch in anderen Kunstwerken, wie etwa auch in Arbeiten von Leonardo da Vinci (Maor & Jost, 2014).

The Next Rembrandt

Das letzte skizzierte Beispiel nimmt Bezug auf die Werke des niederländischen Malers Rembrandt (1606–1669) (Candlish, 1999). Dieses Projekt ist in einer Zusammenarbeit der Technischen Universität Delft, Microsoft, ING Bank, J. Walter Thompson Amsterdam, Museum Het Rembrandthuis und Maurithuis entstanden. Es hat sich zum Ziel gesetzt, ein Gemälde im Stil des niederländischen Malers mithilfe neuester Technologie zu generieren. Dabei wurden große Datenmengen erhoben, die die Besonderheit und Seele der Werke von Rembrandt beschreiben sollten. Mithilfe statistischer Methoden wurden diverse Gemälde des Künstlers analysiert, die als Grundlage für die Erstellung eines neuen Gemäldes dienten (Next Rembrandt, 2017).

ABBILDUNG 4. Der neue „Rembrandt“ mithilfe statistischer Analysen und eines 3D-Druckers erstellt (Next Rembrandt, 2016, 3:34) und rechts ein Beispiel einer Analyse eines Originalwerkes von Rembrandt (Next Rembrandt, 2016, 2:24)

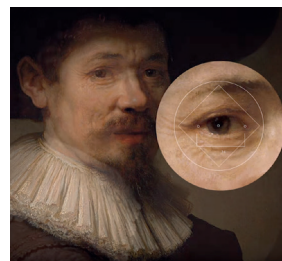


ABBILDUNG 5. Zweites Beispiel einer Analyse eines Rembrandt-Werkes
(Next Rembrandt, 2016, 2:39)



Insgesamt wurden 346 Gemälde von Rembrandt untersucht und die statistischen Auswertung ergab, dass das neue Werk folgende Kriterien erfüllen soll: Darstellung von einem (a) Portrait, (b) mit heller Hautfarbe, (c) eines männlichen Geschlechtes, (d) mit Gesichtsbehaarung, (e) zwischen 30–40 Jahre alt, (f) mit dunkler Kleidung, (g) mit Kragen, (h) mit einem getragenen Hut und (i) mit einem nach rechts geneigten Kopf. Nach dieser statistischen Analyse wurde weiter erforscht, wie das neue Werk aussehen soll, um den Stil des niederländischen Künstlers nachahmen zu können. Hierzu wurden verschiedene Portraits in einzelne Partien unterteilt und mit Originalwerken verglichen – beispielsweise wurden Nase, Mund und Ohren der Originalportraits einzeln untersucht. Mithilfe angewandter Mathematik wurde analysiert, wie etwa ein typisches Rembrandt-Auge aussehen soll. Abbildung 4 rechts zeigt ein Beispiel, wie ein Originalwerk hierfür in geometrische Figuren zerlegt wurde. Ebenso wurden die Proportionen des Kopfes und der einzelnen Partien (Auge, Nase, Mund etc.) genau untersucht (siehe Abbildung 5) und miteinander verglichen. Um die Struktur eines Ölgemäldes zu erreichen, die von Pinselstrichen charakterisiert wird, wurde die Arbeit mit einem 3D-Drucker generiert und ein neues Gemälde im Stil des niederländischen Künstlers Rembrandt kreiert (siehe links in Abbildung 4) (Next Rembrandt, 2017).

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem Begriff STEAM, der für die Vernetzung folgender Bereiche steht: Science, Technology, Engineering, Art, Mathematics. Es wird der Mehrwert betont, Brücken zwischen Kunst und den anderen Bereichen zu bauen (Land, 2013; Platz, 2007). Das Auseinandersetzen mit ihr soll Kreativität fördern, die als Grundlage für Innovationen genannt wird (Kannonier, 2017). Des Weiteren kann die Größe der Zielgruppe erweitert werden, wenn die Kunst zu den anderen STEM-Fächern in Beziehung gesetzt wird. Gerade in der Schule scheint es wichtig, dass Kindern und Jugendlichen der Zusammenhang verschiedener Disziplinen nähergebracht wird. In diesem Beitrag wurden die Themen Visualisierung und Origami für Unterrichtsbeispiele angesprochen, die Kunst und Mathematik vereinen können.

Leonardo da Vinci wird als Vorbild genannt, der gleichermaßen Forscher, Techniker, Erfinder, Ingenieur, Zeichner, Maler und Mathematiker war (Boucheron & Giorgione, 2013; Atalay, 2006). Dieser Beitrag stellt verschiedene Ansätze vor, die zeigen, dass sich Mathematik und Kunst näher sind als man vielleicht denkt. Farben sind beispielsweise ein wesentlicher Bestandteil der bildenden Kunst und wurden von Malerinnen und Malern, Forscherinnen und Forschern und Mathematikerinnen und Mathematikern mit verschiedenen Modellen in eine systematische, geometrische Ordnung gebracht (wie etwa mithilfe einer Pyramide, einer Kugel oder eines Rhomboeders) (Küppers, 2016). Des Weiteren wurde der Goldene Schnitt als Grundlage für Kompositionen in der Malerei erwähnt (Bartlett, 2012). Das letzte skizzierte Beispiel in diesem Artikel beschreibt ein Projekt namens „Next Rembrandt“, dessen Ziel es war, mithilfe statistischer Analysen und eines 3D-Druckers ein Gemälde im Rembrandt-Stil zu erzeugen. Jahrhunderte nach dem Tod des berühmten niederländischen Malers wurde ein Männerporträt in seinem künstlerischen Stil mit technologischer Unterstützung generiert (Next Rembrandt, 2016, 2017).

Diese theoretischen Ausführungen sollen Ansätze für ein fächerübergreifendes Unterrichten liefern. Des Weiteren bieten sie Ideen für ein zukünftiges Projekt, um wie die Beispiele zuvor, eine Brücke zwischen Mathematik und Kunst zu bilden. Dazu sollen Interviews mit Künstlerinnen und Künstlern geplant und durchgeführt werden, um zu erfahren, welche Theorien oder auch mathematische Modelle diese für die Erstellung eigener Werke heranziehen. Diese qualitative Forschung soll neue Ideen entwickeln, eine Verbindung zwischen Mathematik und Kunst/Malerei aufzuzeigen. Darüber hinaus sollen eigene Werke angefertigt und ausgestellt werden, die auf den entwickelten Konzepten auf Grundlage der erhobenen Daten und der Analyse der geführten Interviews basieren. Schließlich sollen die entwickelten Ideen in Workshops in einer Klasse praktisch umgesetzt werden können, um Kindern bzw. Jugendlichen zu verdeutlichen, dass eine Verbindung zwischen Mathematik und Kunst bestehen kann.

Literatur

- Atalay, B. (2006). *Math and the Mona Lisa: The Art and Science of Leonardo da Vinci*. New York: Smithsonian.
- Bartlett, C. (2013). *Mathematical Art Galleries*. Chris Bartlett. Verfügbar unter: <http://gallery.bridgesmathart.org/exhibitions/2013-bridges-conference/bartlett>
- Boucheron, P., & Giorgione, C. (2013). *Leonardo da Vinci. Vorbild Natur. Zeichnungen und Modelle*. München: Deutsches Museum.
- Bridges. (2017a). *About Bridges*. Verfügbar unter: <http://bridgesmathart.org/about>
- Bridges. (2017b). *The Bridges Organization*. Verfügbar unter: <http://bridgesmathart.org>
- Candlish, L. (1999). *ArtBook Rembrandt. The great Dutch master – his life in paintings*. New York, NY: Dorling Kindersley.
- Drijvers, P., Ball, L., Barzel, B., Heid, M. K., Cao, Y., & Maschietto, M. (2016). *Uses of Technology in Lower Secondary Mathematics Education. ICME-13 Topical Surveys*. Springer. Verfügbar unter: http://doi.org/10.1007/978-3-319-33666-4_1
- Emmer, M. (1994). Introduction to The Visual Mind: Art and Mathematics. In M. Emmer (Hrsg.), *The Visual Mind: Art and Mathematics*. Cambridge & London: MIT.
- Felgentreu, S., & Nowald, K. (Hrsg.). (2011). *Duden, Basiswissen Schule: Kunst. 7. Klasse bis Abitur*. Mannheim und Berlin: Duden Schulbuchverlag.
- Fenyvesi, K., Téglási, I. O., & Szilágyi, I. P. (2014). *Adventures on Paper. Math-Art Activities for Experience-centered Education of Mathematics. Visuality & Mathematics*. Verfügbar unter: http://vismath.ektf.hu/ex_book/Book_p_1_100_EN.pdf
- Jarvis, D., & Naested, I. (2012). *Exploring the Math and Art Connection: Teaching and Learning Between the Lines*. Calgary, Canada: Brush Education.
- Kannonier, R. (2017, Mai). „Knappe Ressourcen in Kirche und Staat: Was bleibt für die Kunst?“. Vortrag auf Podiumsdiskussion, NORDICO Linz.
- Kimeswenger, B., & Hohenwarter, M. (2015). Interaktion von Darstellungsformen und GeoGebraBooks für Tablets. In H. Wiesner, E. Süß-Stepancik, & J. Roth (Hrsg.), *Medienvielfalt in der Mathematik. Lernpfade als Weg zum Ziel* (S. 171–184). Wien: Springer.
- Küppers, H. L. (2016). *Einführung in die Farbenlehre*. Köln: DuMont Buchverlag.
- Land, M. H. (2013). Full STEAM Ahead: The Benefits of Integrating the Arts Into STEM. *Procedia Computer Science*, 20, 547–552.
- Lambert, J. H. (1772). *Beschreibung einer mit dem Calauschen Wachse ausgemalten Farbenpyramide*. Berlin: Haude und Spener.
- Next Rembrandt. (2016). *Video zu The Next Rembrandt*. Verfügbar unter: <https://www.nextrembrandt.com/>
- Next Rembrandt. (2017). *The Next Rembrandt*. Verfügbar unter: <https://www.nextrembrandt.com/>

Maor, E., & Jost, E. (2014). *Beautiful Geometry*. Princeton: Princeton University Press.
Platz, J. (2007). *How do you turn STEM into STEAM? Add the Arts!* Ohio Alliance for Arts Education. Verfügbar unter: <http://www.oaae.net/en/resources/educator/stem-to-steam>

Schick, K., & Skowranek, H. (2011). »Keiner hat diese Farben wie ich.« *Kirchner malt*. Davos: Kirchner Museum Davos, Hatje Cantz.

STEAM Journal. (2017). *The STEAM Journal*. Verfügbar unter: <http://scholarship.claremont.edu/steam/>

Walser, H. (2013). *Der Goldene Schnitt*. Leipzig: Edition am Gutenbergplatz Leipzig.

Bildnachweis

Abbildung 1: Public Domain (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lambert_Farbenpyramide_1772.jpg bzw. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Runge_Farbenkugel.jpg)

Abbildung 3: Nachdruck mit freundlicher Erlaubnis von C. Bartlett

Abbildungen 4–5: Nachdruck mit freundlicher Erlaubnis von ING Bank und J. Walter Thompson