

BACHELORARBEIT

Der zelluläre Automat als Beispiel für den (Pseudo-)Zufall in der generativen Kunst

vorgelegt am 30. April 2025

Lukas Henzgen (Matr.-Nr.: XXXXXXXXXX)

Erstprüfer: Mathis Menneking
Zweitprüfer: Prof. Dr. Edmund Weitz

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Medientechnik
Finkenau 35
20081 Hamburg

Zusammenfassung

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit stellt der Zufall und dessen Rolle in der generativen Kunst dar. Ausgehend von einer Beleuchtung der naturwissenschaftlichen deterministischen Sichtweise des Zufalls, damit verbundenen Möglichkeiten einer Generierung von Pseudozufallszahlen und einer Definition generativer Kunst wird ein Blick auf die Wurzeln der Computerkunst der 1960er Jahre geworfen. Aufbauend auf dem Fundament einer analytischen Betrachtung der Kunst durch Max Bense Informationsästhetik und Frieder Nakes weiterführender praktischer Umsetzung kristallisiert sich eine Verwendung des Zufalls als menschliche Intuition innerhalb einer Simulation der Kunstproduktion heraus. Diese historischen und philosophischen Perspektiven werden ergänzt um einen Blick auf Ansätze generativer Kunstproduktion, was es ermöglicht eine Definition losgelöst vom Computer zu stellen. Das Konzept des zellulären Automaten, insbesondere das Game of Life, wird als geeigneter Algorithmus für generative Kunst evaluiert. In der praktischen Auseinandersetzung zeigt sich, dass Zufallszahl-Generatoren eine Varianz erzeugen können, es jedoch weiterer Maßnahmen zur Simulation künstlerischer Entscheidungsfindung bedarf. Damit stellt sich die Frage nach der Autonomie generativer Systeme in der Kunstproduktion. Die Arbeit versteht generative Kunst als verbindendes Element zwischen Natur- und Geisteswissenschaften und legt ein besonderes Augenmerk auf das Potenzial der Simulation menschlicher Kreativität durch Zufallssimulation algorithmische Prozesse.

Abstract

The subject of this work is chance and its role in generative art. Starting from an illumination of the scientific deterministic view of chance, the associated possibilities of generating pseudo-random numbers and a definition of generative art, a look is taken at the roots of computer art in the 1960s. Building on the foundation of an analytical view of art through Max Bense's information aesthetics and Frieder Nake's further practical implementation, a use of chance as human intuition within a simulation of art production crystallizes. These historical and philosophical perspectives are supplemented by a look at approaches to generative art production, which makes it possible to provide a definition detached from the computer. The concept of the cellular automaton, in particular the Game of Life, is evaluated as a suitable algorithm for generative art. The practical discussion shows that random number generators can produce variance, but that further measures are required to simulate artistic decision-making. This raises the question of the autonomy of generative systems in art production. The work understands generative art as a connecting element between the natural sciences and the humanities and pays particular attention to the potential of simulating human creativity through random simulation algorithmic processes.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung.....	1
2 Der Zufall im deterministischen System des Computers.....	3
2.1 Wissenschaftlicher Zufallsbegriff.....	3
2.2 Mathematischer Zufallsbegriff.....	5
2.3 Zufallssimulation durch den Computer.....	6
3 Generative Kunst: Zufall und Algorithmen in der Kunst	7
3.1 Einführung in die generative Kunst	7
3.1.1 Regelbasierte und generative Kunst.....	8
3.1.2 Differenzierungen innerhalb der generativen Kunst.....	8
3.2 Verbindung von Natur- und Geisteswissenschaften	10
3.2.1 Eine dritte Kultur: Die Strukturwissenschaften.....	10
3.2.2 Die Informationsästhetik nach Bense	11
3.3 Das Konzept einer generativen Ästhetik.....	14
3.3.1 Benses Definition einer generativen Ästhetik	14
3.3.2 Frieder Nakes Auffassung einer generativen Ästhetik.....	15
3.4 Generative Kunst ohne Mitwirken eines Computers	19
3.4.1 Whipples stochastische Bilder: Beispiel eines Algorithmusentwurfs.....	19
3.4.2 Aleotorik: Der Zufall im künstlerischen Schaffensprozess.....	20
3.4.3 Op-Art: Verwendung mathematischer Prinzipien sorgt für optische Effekte.....	21
3.4.4 Vera Molnar: Computer zur Optimierung ihrer algorithmischen Kunst	22
4 Einordnung der generativen Kunst	23
4.1 Computerkunst der 1960er Jahre: Erforschung des Schönen	23
4.2 Kunstproduktion mithilfe des Computers	25
5 Der zelluläre Automat als Konzept.....	28
5.1 Die Geschichte des zellulären Automaten	29
5.1.1 Von Neumanns Theorie selbst reproduzierender Automaten	29
5.1.2 Conways Game of Life	29
5.2 Pseudozufall des zellulären Automaten	30
6 Praktischer Teil: Umsetzung eines Kunstwerks mit zellulärem Automaten.....	31
6.1 Konzeption und Zielsetzung	31
6.2 Programmierung des Kunstwerks	32

6.2.1	Algorithmus 1: Implementierung des Perlin-Noise	32
6.2.2	Algorithmus 2: Implementierung des Game of Life.....	33
6.2.3	Algorithmus 3: Generierung von Polygonen	33
6.3	Reflexion.....	35
7	Fazit und Ausblick	37
	Literaturverzeichnis	41
	Anhang.....	44
	Eigenständigkeitserklärung.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grafik A aus der Klasse der generativen Ästhetik.....	35
Abbildung 2: Grafik B aus der Klasse der generativen Ästhetik.....	35

1 Einleitung

Kurz vor Aufkommen erster Computergrafiken, die im Rahmen von Ausstellungen Anfang der 1960er Jahre der Öffentlichkeit präsentiert wurden, kam immer wieder vor allem durch Charles Percy Snow eine Debatte um das Bestehen zweier Kulturen auf. Gemeint war hier die große Spanne zwischen Natur- und Geisteswissenschaften, die sich vor allem in der Kunst widerspiegelt (Snow, 1959). Auch in der heutigen Gesellschaft scheint immer noch eine große Kluft zwischen dem logischen Denken des Programmierers und kreativer Denkansätze von Künstlern zu bestehen. Die generative Kunst vereint diese zwei verschiedenen Ansätze und erfreut sich vor allem seit Aufkommen des Internets einer größer werdenden Popularität (Galanter, 2016). Wichtigstes Werkzeug ist hierbei der gezielte Einsatz des Zufalls, welcher das Kunstwerk um eine unberechenbare Komponente ergänzt (Boden & Edmonds, 2009; Galanter, 2016).

Gerade aus wissenschaftlicher Sicht stellt diese Art der Kunstproduktion einen interessanten Fall dar, weil hier naturwissenschaftliche Denkansätze stärker einfließen und die deterministische Beschaffenheit des Computers klare Spuren in der Kunst hinterlässt, welche ansonsten von der freien Kreativität und augenscheinlich unberechenbaren Intuition des Menschen lebt.

Da der Zufall als wichtigstes Instrument der generativen Kunstschaaffenden gilt, entsteht eine gewisse Brisanz, die auch die Frage nach der Originalität des einzelnen Werkes aufwirft, da jedes Werk, ob beispielsweise generative Musikkomposition, Grafik oder Installation, immer einzigartig ist und bereits im nächsten Iterationsschritt vom vorherigen abweichen kann (Boden & Edmonds, 2009; Galanter, 2016). Zudem steht der Computer in der generativen Kunst im Mittelpunkt und ihre Entstehung hängt somit auch mit der Industrialisierung und der Erfindung des Computers zusammen (Nake, 1974). Dessen immer größer gewordene Zugänglichkeit für Privatpersonen führt zu einer wachsenden Popularität der generativen Kunst. Da der Computer scheinbar mehr oder weniger eigenständig arbeitet und der Umfang seiner zu leistenden Handlungen die herkömmlichen Mittel der Kunstproduktion überschreitet, ist es zudem interessant, zu ergründen, inwiefern der Künstler sich noch als dieser bezeichnen darf oder ob der Computer selbst diesen Titel mittlerweile für sich beanspruchen dürfte (Galanter, 2016). Besonderes Interesse wird in dieser Arbeit dem Prinzip des zellulären Automaten zukommen, da dieser ein gutes Beispiel für in der generativen Kunst verwendete Algorithmen ist. Anhand dieses Prinzips kann veranschaulicht werden, wie die Verwendung scheinbar äußerst simpler Regeln innerhalb eines Programms nach einer Anzahl von Iterationen zur Generierung komplexer Muster und Formen führen kann, die für den Betrachter auf den ersten Blick keinen erkennbaren Regeln zu folgen scheinen (Burks & Neumann, 1967). Dieses Unwissen über die Regeln und Mechanismen des Systems erweckt also den Eindruck von etwas zufällig Erschaffendem.

Diese Denkansätze münden schließlich in der Frage, inwiefern das Prinzip des zellulären Automaten ein passendes Beispiel für den (Pseudo-)Zufall in der generativen Kunst ist. Das Forschungsinteresse dieser Arbeit bündelt sich demnach in dem großen Begriff des Zufalls in dem Bereich der generativen

Kunst. Im Fokus steht der Computer und dessen deterministische Arbeitsweise und inwiefern diese einen klaren Gegensatz zum natürlichen Zufall darstellt. Das Prinzip des zellulären Automaten nach John von Neumann dient somit als Beispiel für die Verwendung deterministischer Abläufe und damit verbundene Zufallssimulation durch den Computer.

Bei dem Begriff des Determinismus handelt es sich um eine philosophische Theorie, die sich mit den Ursachen eines Ereignisses befasst (Herget et al., 2005). Kernaussagen, die mit dieser Auffassung einhergehen, münden in dem Glauben, in dem sich das Wirkungsgefüge der Welt als „Automatismus des Geschehens“ (Hörz, 2008, S. 1) oder als „gesetzmäßige Abläufe von Prozessen“ (Hörz, 2008, S. 1) beschreiben ließe. Komplement dessen stellt der Interdeterminismus dar. Dieser zeichnet sich demnach dadurch aus, dass die Existenz einer „Bedingtheit und Bestimmtheit der Objekte und Prozesse“ (Hörz, 2008, S. 1) abgesprochen wird und ein „Geschehen ohne Ursachen“ (Hörz, 2008, S. 1) vorherrsche. In diesem Zusammenhang kommt es in der generativen Kunst zur Verwendung von Algorithmen. Solche beschreibt Computerkünstler Frieder Nake als in sich zusammenhängende, autonom agierende Systeme, die gewisse Eingabewerte erwarten (Nake, 2001). Eine Definition Nakes lautet folgendermaßen:

Ein Algorithmus ist eine endliche Liste von Instruktionen, die wohldefiniert sind. Für jedes Problem einer Klasse von Problemen liefert der Algorithmus nach endlich vielen Schritten eine Lösung, indem man die Instruktionen eine nach der anderen ausführt. (Nake, 1974, S. 188)

Ziel dieser Arbeit ist es somit, die Rolle des Zufalls in der generativen Kunst zu untersuchen. Die Umsetzung eines praktischen Beispiels dient in diesem Rahmen dazu, ein genaueres Verständnis über den Ablauf der Produktion eines generativen Werkes zu bekommen. Innerhalb eines Algorithmus nach vorgegebenem Prinzip, also dem des zellulären Automaten, soll der Zufall platziert werden, um eine generative Ästhetik zu erschaffen, die eine Klasse von Grafiken generiert. Diese praktische Anwendung dient dazu die Begriffe Determinismus und Zufall einerseits klar gegenüberzustellen und mittels der Zufallssimulation durch den Computer zu vereinen. Dieser Ablauf soll praktisch detailliert aufzeigen, was Merkmale und Abläufe generativer Kunst sind, die zuvor ausgearbeitet werden sollen. Der Fokus liegt somit in der Vorgehensweise darauf, sich zu Beginn mit den theoretischen Grundlagen der generativen Kunst zu beschäftigen und aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse über Merkmale und Eigenheiten innerhalb der Kunst eine praktische Umsetzung dessen am Beispiel des zellulären Automaten zu vollziehen.

Zu Beginn der theoretischen Erschließung der generativen Kunst wird das auffälligste Charakteristikum, nämlich der Zufallsbegriff im Fokus stehen. Diese Erkenntnisse vereinfachen den Einstieg in die generative Kunst, die zuerst anhand offensichtlicher Charakteristika erklärt wird. Darauf aufbauend wird die Entstehung der generativen Kunst im Mittelpunkt stehen. Ihr gedankliches Fundament, welches zu Teilen auf der Informationstheorie nach Max Bense basiert, wird gefolgt von der Theorie der generativen Ästhetik nach Frieder Nake, aufgrund welcher Künstler erstmals Grafiken mit dem Computer in den 1960er Jahren kreierten. Der Grundgedanke der Erschaffung eines Regelwerks, inmitten dessen der

Zufall als wichtigstes Instrument operiert, soll im Folgenden abstrahiert werden, wodurch auch eine Einbeziehung von Werken, die ohne Beihilfe des Computers generiert wurden, zur Definition möglich wird. Nach Beantwortung aufkommender Fragen soll auf die praktische Umsetzung hingearbeitet werden, indem die Theorie des zellulären Automaten eingeführt wird. Abschließend kommt es nach Darstellung der praktischen Umsetzung und Reflexion der Resultate zu einem umfassenden Fazit, was zuvor benannte Ziele aufgreifen und einen Ausblick in die Zukunft geben soll.

2 Der Zufall im deterministischen System des Computers

Aufgrund der zentralen Positionierung des Zufalls in der generativen Kunst gilt es, sich zunächst ein klares Bild in sprachlicher und mathematischer Hinsicht von diesem zu verschaffen. Im Sprachgebrauch kommt es oft zur Nutzung des Wortes „Zufall“, um von etwas Ungewissem oder Unvorhergesehenem zu sprechen. Auffällig ist eine oftmals negative Konnotation, da eine menschliche Angst vor dem Ungewissen mit dem Zufallsbegriff einhergeht. Der Zufall steht oft im Gegensatz zu der deterministischen Weltanschauung, was eine mathematische Definition erschwert (Herget et al., 2005).

2.1 Wissenschaftlicher Zufallsbegriff

Ursprünge des Wortes „Zufall“ lassen sich bereits im Lateinischen und Altgriechischem entdecken: Verbindungen bestehen zu dem lateinischen Wort *accidens*, was sich als das von außen zum eigentlichen Wesen „Hinzukommende“ übersetzen lässt. Zudem sind auch die Worte *fortuna* (griechisch: *tychhe*), das für „Schicksal“ oder „Fügung“ steht, oder auch *casus* (griechisch: *automaton*), was sich wiederum mit „Ereignis“ oder „Vorfall“ ins Deutsche übertragen lässt, eng mit dem Zufallsbegriff verbunden (Herget et al., 2005).

Die enge Verknüpfung des Wortursprungs mit dem Schicksal oder der Fügung suggeriert, dass der Begriff des Zufalls ein schwer zu fassendes Konstrukt ist und oft mit unerklärlich scheinenden Vorkommnissen in Verbindung gesetzt wurde. Generell bezeichnet dieses Wort das Eintreten eines Ereignisses, über dessen Voraussage eine gewisse Unsicherheit besteht (Kolditz, 2019). Bereits im antiken Griechenland kristallisierte sich in der wissenschaftlichen Betrachtungsweise ein auf einem deterministischen Weltbild beruhender Ansatz heraus: „Nichts geschieht zufällig, sondern alles aus einem Grund und mit Notwendigkeit“ (Leukipp, zitiert nach Kolditz, 2019, S. 283). Diese Aussage des Philosophen Leukipp unterstreicht die Auffassung, nach der das Eintreten eines Ereignisses auf Gesetzmäßigkeiten der Natur zurückzuführen sei und die Welt Automatismen unterläge. Ähnliche Ansichten sind auch bei seinem Schüler Demokrit zu finden (Kolditz, 2019). Zeitlich später sahen auch Epikur oder Aristoteles klare Ursachen hinter scheinbaren Zufällen, welche sich im Bereich des Möglichen, aber zugleich Unwahrscheinlichem befänden (Herget et al., 2005). Ein solches Verständnis, das allen Ereignissen deter-

ministische Abläufe zuordnete, etablierte sich allgemein im 17. Jahrhundert in Bereichen der Wissenschaft und auch der Philosophie. Dies lässt sich auch in Newtons Auffassung des Universums als ein großer Mechanismus klar erkennen (Herget et al., 2005).

Der deterministischen Denkweise der Wissenschaft stand eine Auffassung eines *echten* oder auch *genuinen* Zufalls gegenüber. Dieser zeichnet sich durch das Eintreten eines Ereignisses ohne zugrunde liegende Ursachen aus und stellt somit das Pendant zum Determinismus, nämlich den Interdeterminismus, dar (Rott, 2022). Aus diesem Grund vermeiden Naturwissenschaftler eine Definition des Zufalls, der als Gegenstück einer auf Gesetzmäßigkeiten beruhenden Natur gesehen werden kann. Diese Intention lässt sich auch in der folgenden Aussage Hegels bezogen auf die Philosophie erkennen: „Die philosophische Betrachtung hat keine andere Absicht, als das Zufällige zu entfernen“ (Hegel, 1822, zitiert nach Kersting, 2008, S. 20).

Nach gängiger naturwissenschaftlicher Sicht lässt sich vor allem Unwissen über das Bestehen jeweiliger Zusammenhänge mit dem Zufallsbegriff in Verbindung setzen (Herget et al., 2005). Die sichtbare Ordnung bleibe dem Außenstehenden verborgen, weshalb die Unkenntnis eine Zusammenhanglosigkeit suggeriere. Eine Aufgabe der Wissenschaft besteht demnach darin, Erkenntnisse im Gebiet des Ungewissen zu erlangen und dieses auf diese Weise zu limitieren (Herget et al., 2005). Eine wissenschaftliche Erörterung unbekannter Territorien mündet demzufolge in größeren Möglichkeiten, wissenschaftliche Prognosen stellen zu können. Das wachsende Wissen wirkt demzufolge dem Zufall entgegen.

Da das Wissen individuell von Mensch zu Mensch variiert, mit Interesse oder Bildung stark zusammenhängt, ist zwischen dem *subjektiven* und *objektiven* Zufall zu unterscheiden. Demnach führt ein Erklärungsdefizit zu der Schlussfolgerung des rein zufälligen Eintretens von Ereignissen (Herget et al., 2005). Naturwissenschaftler Gerhart Vollmer macht das Unvorhersehbare nicht an Systemeigenschaften aus, sondern an Systemen direkt. Ein nachträgliches Erklären dieser Systeme gestalte sich einfacher als diese vorauszusagen:

Sind die Systeme jedoch einmal vorhanden, so kann man sie wenigstens nachträglich zu erklären versuchen. Tatsächlich – und eben deshalb – kann die Evolutionsbiologie viel mehr erklären als voraussagen. (Vollmer, 1995, zitiert nach Herget et al., 2005, S. 12)

Ein solches Erklärungsdefizit und auch Voraussage-Defizite beruhen laut Vollmer auf zufallsbedingtem Auftreten neuer Systeme. Die individuelle Betrachtung auf eintreffende Ereignisse und die Unfähigkeit, Verbindungen zu identifizieren aufgrund einer fehlenden Kenntnis der Umstände, führen nach Vollmer zudem zu der Schlussfolgerung des Individuums, ein zufällig aufgetretenes Ereignis erlebt zu haben. Der damit bestehende subjektive Zufall bekäme einen objektiven Charakter, falls die Menschheit in ihrer Allgemeinheit nicht über das nötige Erklärungsvermögen verfüge (Herget et al., 2005).

Im Bereich der Quantenphysik identifiziert Vollmer einen *absoluten* Zufall: Demnach gäbe es „für den Zeitpunkt eines spontanen Kernzerfalls nicht nur keine Ursache, sondern auch und erst recht keine

Erklärung” (Vollmer, 1995, zitiert nach Herget et al., 2005, S. 15). Derartige Quantenereignisse, wie der Zeitpunkt des Zerfalls radioaktiver Atome oder die Geschwindigkeit von Elektronen innerhalb eines Atoms, gelten als solche absoluten Zufälle. Hierbei stellt sich ebenfalls die Frage, ob diese Einschätzung beziehungsweise der Stand der Wissenschaft noch auf Unkenntnis beruhe oder sich hinter diesen Ereignissen wirklich keine nicht unerkannten Strukturen oder Systeme verbergen. Im Falle der Existenz solcher Systeme würde man von einem sogenannten *Superdeterminismus* sprechen (Herget et al., 2005).

Lothar Kolditz negiert Vollmers These über ein Bestehen eines *absoluten* Zufalls und führt derartige Inzidenzen auf eine Überschneidung „nur bedingt unabhängiger Ereignisketten” (Kolditz, 2019, S. 290) zurück. Derartige Ursachen weist auch Hans Rott dem absoluten Zufall zu, den er auch als *eigentlichen* Zufall. *Uneigentlicher* Zufall sei nach ihm einerseits auf eine „absolute Unvorhersagbarkeit” (Rott, 2022, S. 6) zurückführen. Gründe sieht er in Anfangsbedingungen, Gesetzmäßigkeiten der Natur oder fehlender Kompetenz zur Stellung von Prognosen. Andererseits lasse er sich ebenfalls durch eine Überlappung unabhängiger Kausalketten erklären, was sich mit der Argumentation von Kolditz deckt. Seiner Ansicht nach bestehe allerdings keine Möglichkeit einer Unterscheidung der Kategorien. Dies läge an der Komplexität der Welt und der damit verbundenen Unkenntnis über Gründe oder Kausalitäten (Rott, 2022).

2.2 Mathematischer Zufallsbegriff

In dem Mathematiker Laplace lässt sich ein weiterer Verfechter des strengen Determinismus erkennen. Seine Aussagen lassen ebenfalls keinen Spielraum für eine naturwissenschaftliche Berücksichtigung genuinen Zufalls: „Das Wort Zufall drückt also nichts anderes als unser Unwissen über die Ursachen der Erscheinungen aus, die wir ohne eine sichtbare Ordnung eintreten und einander folgen sehen“ (Laplace, zitiert nach Herget et al., 2005, S. 6). Diese Worte unterstreichen das Denken, was bereits im antiken Griechenland Einklang fand und dem absoluten Zufall eine deterministische Weltordnung entgegengesetzt. Hier findet genuiner Zufall keinen Platz; vor allem lässt er sich nicht mathematisch definieren.

Aus diesem Grund führt Herbert Hörz den Begriff des *dialektischen Determinismus* ein. Dies geht aus seiner Bestrebung hervor, den Zufallsbegriff in der deterministischen Denkweise der Wissenschaft zu implementieren. Die Mathematik stellt für Hörz eine „Wissenschaft von möglichen formalisierbaren Strukturen ideeller Systeme” (Hörz, 2008, S. 3) dar, mit welcher es möglich sei, eine Rationalisierung des menschlichen Denkens und gleichzeitig eine Steigerung der Effizienz zu erreichen. Da er in der menschlichen Denkweise stochastische Muster identifiziert, liegt es für ihn nahe, diesen Bereich der Mathematik mit dem deterministischen Denken zu vereinen. Eine derartige Einbeziehung stochastischer Methoden diene ihm zufolge als „philosophisches Instrumentarium zum Verständnis der Regularitäten und Gesetzmäßigkeiten in Natur, Technik und Gesellschaft” (Hörz, 2008, S. 4). Die Bindung des Zufallsbegriffs an Wahrscheinlichkeiten sichert somit die Möglichkeit, Ereignisse akkurat prognostizierbar

zu machen. Der Überlegung zufolge stellen objektive Zufälle lediglich nicht identifizierte Zusammenhänge kausaler Beziehungen dar, deren Eintreten allerdings an Wahrscheinlichkeiten gebunden ist (Hörz, 2008). Eine derartige Verwendung stochastischer Methoden zur Beschreibung schwer greifbarer Phänomene sieht auch Götz Kersting positiv an und stellt die Forderung an die Wissenschaft, den Zufall als alleinstehende Konzeption und nicht als paraphrasierende Bezeichnung des Interdeterminismus zu betrachten (Kersting, 2008).

Dieser Sichtweise entsprechend formuliert auch Computerkünstler Frieder Nake eine Größe als mathematisch „zufällig“, insofern diese „auf einen Wahrscheinlichkeitsraum definiert“ (Nake, 1974, S. 50) sei. Zudem müsse die Erfüllung weiterer spezifischer Kriterien gegeben sein. Eine Bezeichnung einer Zahlenfolge an dieses Prädikat sei nach Nake an die Prüfung aufgrund statistischer Verfahren gebunden (Nake, 1974).

2.3 Zufallssimulation durch den Computer

Signifikant ist, dass ein Computer nach einem streng deterministischen Prinzip, was dem Zufallsbegriff nach mancherlei Auffassung im Wege stehen würde, operiert (Nake, 1974). Generell handelt es sich bei Zufallszahlenfolgen um bestimmte Verteilungen. Um diese zu kategorisieren, differenziert man beispielsweise zwischen *kontinuierlichen* (Werte eines ganzen Intervalls) und *diskreten* (nur Werte voneinander getrennten Punkten) Folgen. Eine zweite Möglichkeit der Unterscheidung besteht zwischen *endlichen* (beschränkt) und *unendlichen* (unbeschränkt) Folgen. Aufgrund ihrer Beschaffenheit sind Computer allerdings nur in der Lage, endliche und diskrete Approximationen der gewünschten Folge an Zufallszahlen zu erzeugen (Nake, 1974).

Da der Computer in der generativen Kunst im Zentrum des Produktionsprozesses steht, ist es verwunderlich, dass dieser Bereich der Kunst sich vor allem auch durch die gezielte Nutzung des Zufalls auszeichnet. An dieser Stelle kommen *Pseudozufallszahl-Generatoren*, kurz PRNGs („pseudorandom number generators“ (Zarezadeh, 2017, S. 373)), zum Einsatz, die derartigen Approximationen herstellen. Zusätzlich sorgen sie dafür, auftretende Muster, wie periodische Wiederholungen, zu verschleiern und somit die Illusion genuinen Zufalls zu erzeugen (Herget et al., 2005; Nake, 1974; Wolfram, 1986).

„In general one considers a sequence "random" if no patterns can be recognized in it, no predictions can be made about it, and no simple description of it can be found“ (Wolfram, 1986, S. 123). Wie durch Wolframs Aussage ersichtlich wird, kann eine erzeugte Zahlenfolge als ausreichend zufällig angesehen werden, wenn das Erkennen eines Musters nicht möglich ist (Wolfram, 1986). Zur Prüfung solcher Generatoren gibt es diverse Testverfahren, die die Qualität der erzeugten Zahlenfolgen evaluieren (Herget et al., 2005).

3 Generative Kunst: Zufall und Algorithmen in der Kunst

Die Bündelung einer Simulation des Zufallsbegriffs mit der deterministischen Natur eines Algorithmus findet ihren Platz in der Welt der Kunst durch die generative Kunst (Galanter, 2016). Um sich ein genaueres Bild von diesem Begriff machen zu können, wird zunächst eine allgemeine Definition gegeben. Anschließend soll eine Abgrenzung zu der regelbasierten Kunst das Verständnis dessen schärfen, worauf der Fokus in der generativen Kunst liegt. Dieses Bild soll mittels einer genauen Unterteilung der generativen Kunst verdeutlicht werden.

Im Anschluss soll diese Definition von einer historischen Aufarbeitung anhand exemplarischer Beispiele untermauert werden. Dies dient dazu, die ursprünglichen Ansätze der Computerkunst zu verstehen, aus der die heutige generative Kunst entstand.

Abschließend werden die gedanklichen Ansätze abstrahiert, wodurch eine Erweiterung des Definitionsbegriffs möglich ist. Zur Untermauerung einer vom Computer losgelösten Definition sollen Beispiele aus der Kunstgeschichte kurz aufgeführt werden.

Hierbei gibt es keinen Anspruch auf eine Beleuchtung des gesamten Spektrums. Vielmehr soll im Laufe des Kapitels ein Überblick über zugrundeliegende gedankliche Ansätze geschaffen werden, um eine medientheoretische Einordnung in Kapitel 4 zu ermöglichen. Gewonnene Erkenntnisse sollen wiederum in 6 unter Berücksichtigung des Konzepts des zellulären Automaten, welches in 5 erklärt wird, einer praktischen Umsetzung unterzogen werden.

3.1 Einführung in die generative Kunst

Wie bereits durch vorherige Abschnitte dieser Arbeit bekannt ist, sind zentrale Elemente der generativen Kunst einerseits die Nutzung des Computers. Dieser bietet dem Künstler die Möglichkeit, eine gewisse Anzahl von Regeln zu definieren, anhand derer ein System abgesteckt wird. Weiteres Element eines solchen Systems sind Zufallsvariablen, die mittels Zufallszahl-Generatoren eine gewisse Unberechenbarkeit zu den starren Regeln ergänzen. Doch führt die Nutzung eines solchen Systems, welches beispielsweise ein visuelles Endprodukt produziert, direkt dazu, dass man ihm den Stempel „generatives Kunstwerk“ auferlegen darf?

Generative art refers to any art practice where the artist uses a system, such as a set of natural language rules, a computer program, a machine, or other procedural invention, which is set into motion with some degree of autonomy contributing to or resulting in a completed work of art.
(Galanter, 2006, S. 1)

Philip Galanter bemüht sich mit diesen Worten um einen ausgedehnteren Definitionsbegriff der generativen Kunst. Hier liegt der Fokus auf einem externen System, dem eine Anzahl von Regeln zu-

grunde liegt und an das der Künstler einen Anteil seiner Kontrolle abgibt. Im Folgenden soll ein genaueres Bild eines solchen Systems gegeben werden, was auch eine Betrachtung der anfänglichen Computerkunst beinhaltet.

3.1.1 Regelbasierte und generative Kunst

Ernest A. Edmonds verwendet erstmals 1968 den Computer als Werkzeug zur Herstellung seiner Kunstwerke. Allerdings dient dieser nur zur Lösung von Teilproblemen und steht nicht im Fokus der Kunstproduktion. Er sieht sein eigenes künstlerisches Schaffen als einen sich wiederholenden Prozess an, welcher aus den Schritten Konzeption, Aktion und Wahrnehmung bestehe. Um einzelne Produktionsschritte weniger zeitaufwändig gestalten zu können, integriert er den Computer in den Ablauf. Eine solche Rolle im Produktionsprozess mache ihn noch nicht generativ. Erst in den 1980er Jahren bewegte sich Edmonds immer mehr in die Richtung der generativen Kunst, da der Computer eine immer größere Rolle einnahm (Boden & Edmonds, 2009).

In Bezug auf moderne generative Techniken verweisen Edmonds und Boden klar darauf, dass es heutzutage öfter zu der Nutzung eines festgelegten Satzes an Regeln, die das Handeln des Computers beschränken, kommt. Diese werden der Verwendung von klassischen Algorithmen vorgezogen, da solche regelbasierte Systeme eine höhere Autonomie aufweisen. Moderne generative Künstler bevorzugen sie demnach, weil eine Programmierung mittels schrittweise arbeitender Algorithmen vermieden werden soll (Boden & Edmonds, 2009). Allerdings setzt Edmonds eine regelbasierte nicht mit der generativen Kunst gleich: Regeln sollen nicht nur den Handlungsspielraum des Computers beschränken. Vielmehr müssten diese Regeln konstruktiv zur Entscheidungsfindung des Computers beitragen, um ihren Teil in der Produktion des Kunstwerks zu leisten. Erst in diesem Fall wäre die regelbasierte gleichzeitig eine generative Kunst (Boden & Edmonds, 2009). Auch Philip Galanter teilt die Ansicht, dass nicht jede regelbasierte automatisch eine generative Kunst ist:

None of these rule-based artworks can be considered generative art because the artist never ceded control to a functionally autonomous system. There is an in-principle dependence on the artist from moment to moment, and at no point does the artist lose fine-grained control over the art-making process. (Galanter, 2016, S. 152)

Solche Regeln, die zu einer generativen Produktionstechnik führen, bilden nach ihm ein autonom agierendes Gefüge (Galanter, 2016).

3.1.2 Differenzierungen innerhalb der generativen Kunst

Um generative Kunst zu definieren, unternehmen Edmonds und Boden eine Einteilung in elf Bereiche vor, die teilweise voneinander abhängig sind und Schnittmengen miteinander aufweisen:

- (1) Ele-art involves electrical engineering and/or electronic technology.
- (2) C-art uses computers as part of the art-making process.

- (3) D-art uses digital electronic technology of some sort.
- (4) CA-art uses the computer as an aid (in principle, non-essential) in the art-making process.
- (5) G-art works are generated, at least in part, by some process that is not under the artist's direct control.
- (6) CG-art is produced by leaving a computer program to run by itself, with minimal or zero interference from a human being. NB: We chose to reject the stricter definition of CG-art (art produced by a program left to run by itself, with zero interference from the human artist).
- (7) Evo-art is evolved by processes of random variation and selective reproduction that affect the art-generating program itself.
- (8) R-art is the construction of robots for artistic purposes, where robots are physical machines capable of autonomous movement and/or communication.
- (9) In I-art, the form/content of the artwork is significantly affected by the behaviour of the audience. (10) In CI-art, the form/content of some CG-artwork is significantly affected by the behaviour of the audience.
- (11) In VR-art, the observer is immersed in a computer-generated virtual world, experiencing it and responding to it as if it were real. (Boden & Edmonds, 2009, S. 19)

Den Bereich der Computerkunst (*C-Art*) macht er als Teil der elektronischen Kunst aus (*Ele-Art*), was auf die Benutzung einer elektronischen Apparatur zurückzuführen ist. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass diese Bezeichnung in den 1960er Jahren eine Kunstbewegung umschrieb, welche große Parallelen zu heutiger generativer Kunst aufweist. Pioniere rund um Georg Nees, Frieder Nake und A. Michael Noll waren für die Generierung erster Computergrafiken verantwortlich und ebneten den Weg für generative Kunstproduktion durch den Computer (Dreher, 2020; Klütsch, 2007). Den Bereich, der heute oft als generative Kunst bezeichnet wird, nennt er *CG-Art*, also computergenerierte Kunst. Dieser sei wiederum eine Schnittmenge der Computerkunst und der generativen Kunst (Boden & Edmonds, 2009).

Die besagte generative Kunst, also *G-Art*, zeichne sich demnach nicht zwingend durch eine Nutzung des Computers aus. Kern dieses Bereichs sei eine Generierung von Kunstwerken. Der damit zusammenhängende Prozess unterlege in diesem Fall nicht oder wenigstens nur zu einem Teil der Kontrolle des Künstlers. Diese Abstraktion des Grundgedankens eines generativen Systems und das damit verbundene Loslösen vom Computer wird in dieser Arbeit an späterer Stelle vertieft.

Teilgebiet der CG-Art ist *Evo-Art*. Diese Kunstwerke zeichnen sich durch die Generierung anhand genetischer Algorithmen aus, mittels welcher eine Population über Generationen hinweg mutiere (Boden & Edmonds, 2009). Ein Beispiel für diese Kategorie ist das Prinzip des zellulären Automaten.

Die Bereiche *R-Art*, *I-Art* beziehungsweise *CI-Art* und *VR-Art* weisen ebenfalls Schnittmengen mit der generativen Kunst auf, sollen aber im Rahmen dieser Ausarbeitung keine Rolle spielen, da der Fokus

auf dem Prozess der Generierung liegt und in erster Linie Endprodukte in Form von Grafiken oder Musikkompositionen thematisiert werden sollen.

3.2 Verbindung von Natur- und Geisteswissenschaften

Das Fehlen eines überbrückenden Elements zwischen Natur- und Geisteswissenschaften wurde bereits im Zuge der Einführung in diese Arbeit erwähnt. Ein Verhärten der beiden Fronten als Resultat des kalten Krieges erkannte C.P. Snow und thematisierte dies im Jahr 1959 im Rahmen seiner Publikation *The Two Cultures and the Scientific Revolution* (Klüttsch, 2007; Snow, 1959). Snow spricht in diesem Zusammenhang von einer bestehenden Kluft zweier Kulturen, was allerdings metaphorisch für die fehlende Zusammenarbeit der Natur- und Geisteswissenschaften steht (Hörz, 2008; Klüttsch, 2007; Küppers, 2000). Diese Worte Snows können als Auslöser für verschiedene Ansätze einer Errichtung von überbrückenden Elementen gesehen werden (Hörz, 2008). Im Folgenden wird vor allem in Max Bense ein solcher Brückenbauer gefunden, der mit seiner Theorie einen Weg für Pioniere der Computerkunst, wie Georg Nees oder Frieder Nake, ebnete (Klüttsch, 2007; Nake, 1974).

3.2.1 Eine dritte Kultur: Die Strukturwissenschaften

Snows Umschreibung kann als Fingerzeig auf die fehlende Zusammenarbeit von Geistes- und Naturwissenschaften in der westlichen Welt interpretiert werden. Der Wunsch nach einer Symbiose beider Gesinnungen wird deutlich. Dies beruht auf den Potenzialen, die Snow von einer solchen Zusammenarbeit erwartet, da diese nämlich in der Lage sei, „schöpferische Impulse“ (Klüttsch, 2007, S. 32) zu setzen.

Kennzeichnend sind die Unterschiede der beiden Denkstrukturen: Auf der einen Seite steht das deterministische Weltbild, welches in den Naturwissenschaften vertreten wird. Es gilt, Regularien und zugrundeliegende Strukturen in Abläufen innerhalb der Natur durch Experimente zu erforschen und aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse eine mathematische Formulierung verfassen zu können (Hörz, 2008). Um diese Gesetzmäßigkeiten analytisch ergründen zu können, wird auf naturwissenschaftlich typische Werkzeuge zugegriffen, die darin bestehen, die Abläufe in einer Laborumgebung zu verallgemeinern oder einer Abstraktion zu unterziehen (Küppers, 2000). Der demgegenüber stehende Ansatz der Geisteswissenschaften, der einen spekulativen Charakter aufweist (Hörz, 2008), verfolgt ein „Sinnverstehen der Wirklichkeit“ (Küppers, 2000, S. 1). Die gängige Methode besteht in diesem Kontext allerdings darin, sich Zusammenhänge aufgrund gesammelter Erfahrung zu erschließen (Küppers, 2000).

Aufgrund des Fehlens einer erkennbaren Ordnungsstruktur werden bestimmte Phänomene nur geisteswissenschaftlich untersucht. Derartige Ereignisse betitelt Küppers als das *Besondere* und beschreibt sie als „in ihrer Einzigartigkeit nicht messbare Phänomene“ (Küppers, 2000, S. 5). Diese Definition weist Parallelen zu dem in 2 erläuterten Phänomen des Zufalls auf. Auch der Zufall steht oft im Zusam-

menhang mit der Abstinenz von Struktur beziehungsweise dem fehlenden Wissen über diese. Ein Ereignis wird demnach als *besonders* oder *zufällig* angesehen, wenn ein naturwissenschaftliches Erklärungsdefizit besteht. Wilhelm Windelband unternimmt einen Versuch, die Untersuchungsschwerpunkte zu unterteilen, indem er den Naturwissenschaften das *Allgemeine* und den Geisteswissenschaften das *Besondere* zuordnet. Nach dessen Ansicht sei eine wissenschaftliche Untersuchung des Besonderen ohne vergleichende oder abstrahierende Werkzeuge, wie sie die eigentliche Naturwissenschaft aufweist, nicht möglich (Küppers, 2000, S. 8).

Als Lösung des bestehenden Problems nennt Snow in der auf seiner These aufbauenden Veröffentlichung *The Two Cultures: A Second Look* eine dritte Kultur zur Überbrückung der von ihm beschriebenen Lücke, welche eine vermittelnde Rolle innehaben soll (Hörz, 2008). Eine derartige Rolle weist Küppers den *Strukturwissenschaften* zu. Diese kommen Windelbands Forderung nach, eine Untersuchung von Phänomenen aus dem Bereich der Geisteswissenschaften mittels naturwissenschaftlicher Methoden zu gewährleisten (Küppers, 2000). Deren Vorgehensweise besteht einerseits in der Abstraktion des Untersuchungsgegenstandes und dem Ersetzen der „Wirklichkeit durch mathematische Begriffe, Symbole und deren Transformationen“ (Küppers, 2000, S. 20). Es gilt das Festhalten an Logik und mathematischen Konstanten. Gewonnene Strukturgesetze stellen eine Ableitung der Gesetzmäßigkeiten der Realität dar (Küppers, 2000). Als wichtigstes Werkzeug dient der Computer, da aufgrund des Abstraktionsgrades diese Apparatur eine Simulation durchführen kann und somit den Platz wissenschaftlicher Experimente in einer Laborumgebung einnimmt (Küppers, 2000).

3.2.2 Die Informationsästhetik nach Bense

Die Erschließung einer Strukturwissenschaft, wie es Küppers als Brücke vorschlägt, deckt sich mit dem Ansatz, den Max Bense verfolgte. Küppers sieht in der Erforschung des Besonderen das verbindende Element zwischen Natur- und Geisteswissenschaften. Durch die Unkenntnis über zugrundeliegende Struktur hinter dem Eintreten des Besonderen wurden solche Ereignisse den Geisteswissenschaften zugeordnet.

Benses Augenmerk liegt auf dem *Schönen* (Bense, 1960b). In der Kunst, welche den Geisteswissenschaften zuzuschreiben ist, ist dieses Schöne am häufigsten anzutreffen und kann oft als Kriterium gesehen werden, das subjektiv gute von schlechter Kunst unterscheidet. Die dem Schönen zugrundeliegende Struktur ist bei Betrachtung eines Werkes schwer greifbar, da diese ihren Ursprung in der menschlichen Kreativität hat, die einen zufälligen Charakter für Außenstehende aufweist.

Max Bense veröffentlicht im Jahr 1960 sein aus vier Teilen bestehendes Werk *Aesthetica*. Die Erforschung des Schönen wird besonders im vierten Teil der schriftlichen Ausarbeitung seiner Theorie mit dem Titel *Programmierung des Schönen* deutlich. Reinhard Döhl sieht in diesem vierten Band einen „ernsten Versuch der Überwindung der unglücklichen Trennung zwischen exakter und geisteswissenschaftlicher Betrachtungsweise“ (Döhl, o. J.-a). Auch Christoph Klütsch unterstreicht diese These und

spezifiziert Benses überbrückende Theorie auf den Bereich der Ästhetik, indem er diese als verbindendes Element „physikalischer und ästhetischer Welt“ (Klüttsch, 2007, S. 62) sieht.

Im Werk *Aesthetica* stellt Bense seine *Informationsästhetik* auf. Sein Ziel, die objektive Analyse der Kunst (Klüttsch, 2007), deckt sich mit der Herangehensweise der Strukturwissenschaften: Sein Hauptaugenmerk liegt auf dem Stil eines Künstlers oder einer Epoche. Diese stilistischen Eigenschaften eines Kunstwerks sollen auf ihre Merkmale reduziert werden können. Insbesondere hat Bense die „generalisierte oder spezifizierte mathematische Form“ (Bense, 1949, zitiert nach Klüttsch, 2007, S. 56) des jeweiligen Werkes vor Augen, die es aus den Werken zu rekonstruieren gelte. Deutlich lässt sich an dieser Stelle eine Reduktion auf mathematische Konstanten identifizieren, die Küppers (2000) als eines der Merkmale der Strukturwissenschaften kennzeichnet.

Benses Blick richtet sich allerdings nicht nur auf das physische Endprodukt, sondern umfasst auch die konzeptionellen Gedanken eines Künstlers, die der Herstellung eines Werkes vorausgehen. Demnach interpretiert er den gesamten ästhetischen Prozess als einen Informationsprozess, in welchem das entstandene Kunstwerk die übertragenen Informationen beinhalte. Diese seien als einzelne *Zeichen* anzusehen (Giannetti, 2007). Dieser Interpretation der Kunstproduktion als Informationsfluss zufolge sieht Max Bense das Kunstwerk als „ästhetisches Produkt“ (Klüttsch, 2007, S. 70), das eine „Konstellation von Zeichen“ (Klüttsch, 2007, S. 70) darstelle und die Kunstproduktion demnach als *Zeichenprozess*. Der analytische Blick Benses auf ein Kunstwerk ist schnell zu erkennen, da er den Begriff des *Rasters* einführt. Anhand dessen wird ein Bild unterteilt und Merkmale, wie Größe oder Format, mathematisch definiert (Bense, 1960a). Der Künstler verfügt über ein sogenanntes *Repertoire*: Dieses sei nach Bense eine Menge, die eine beliebige Anzahl an Zeichen beinhalten kann, welche vom Künstler selektiert werden (Bense, 1960a). Vorstellen kann man sich ein derartiges Konstrukt als Ansammlung aller elementaren Komponenten, die im späteren Werk vorkommen, wie Linien und Schraffuren eines Zeichners oder Farbtupfer eines Porträtmalers. Der künstlerische Schaffensprozess verlaufe demnach über eine Auswahl aus den sich im Repertoire befindlichen Zeichen.

Resultat der Anordnung der aus dem Repertoire ausgewählten Zeichen innerhalb des Rasters ist demzufolge das besagte ästhetische Produkt. Solchen „Trägern“ der „ästhetischen Information“ (Bense, zitiert nach Giannetti, 2007) widmet sich Bense, um eine in erster Linie objektive Evaluation der Kunst vollziehen zu können. Aus diesem Grund differenziert er bei der Analyse einer derartigen Informationsquelle nicht wie gewöhnlich zwischen Inhalt und Form. Da er es als eine Ansammlung der Zeichen ansieht, bezieht sich seine Art der Unterscheidung auf deren Struktur. Eine hohe Wichtigkeit schreibt Bense deshalb seiner Unterteilung in *Mikro-* und *Makroästhetik* zu. Dieser Blickwinkel folgt einem strengen naturwissenschaftlichen Muster: Inspiriert von der Unterscheidung der modernen Physik in Makro- und Mikrophysik führt er die beiden Begriffe in seiner Ästhetiktheorie ein und differenziert deshalb basierend auf Größenskalen (Giannetti, 2007). Unter der Makroästhetik verstehe man nach

Bense „die Theorie der wahrnehmungsmäßig und vorstellungsmäßig zugänglichen und evidenten Bereiche am ästhetischen Gegenstand bzw. Kunstwerk“ (Bense, 1956, zitiert nach Klütsch, 2007, S. 67). Diese Bezeichnung umfasst demnach die Aspekte, die dem Betrachter direkt ersichtlich sind. Dementsprechend wird die subjektive Wahrnehmung des Betrachters einbezogen. Die Mikroästhetik bezeichnet hingegen „die Theorie der wahrnehmungsmäßig und vorstellungsmäßig nicht direkt zugänglichen und nichtevidenten Bereiche am Kunstwerk bzw. ästhetischen Gegenstand“ (Bense, 1956, zitiert nach Klütsch, 2007, S. 67) und stelle ein „System der ästhetischen Elemente, der Zeichen und ihrer Prozesse“ (Bense, 1956, zitiert nach Klütsch, 2007, S. 67) dar. Somit richtet sich an dieser Stelle ein mikroskopischer Blick auf die einzelnen Elemente. In diesem Fall stehen die einzelnen Zeichen und die damit zusammenhängenden Prozeduren innerhalb des Wirkungsgefüges im Mittelpunkt. Eine solch detaillierte Betrachtungsweise soll Kenntnis über den Zusammenhang zwischen der theoretischen Konzeption des Künstlers und dessen praktischer Umsetzung in Form des vollendeten Werks liefern. Grundlage dessen stellt eine objektive Evaluation der zu sammelnden Zeichen und deren Informationsgehalt (Giannetti, 2007).

Erst die Produktion des Werkes, also die Umsetzung des eigentlichen Konzepts, gibt ihm die Möglichkeit, eine Analyse des Werkes zu vollziehen und benötigte Informationen auf Ebene der Mikroästhetik zu sammeln. In diesem Zusammenhang verwendet er den Begriff der *Mitrealität* (Bense, 1960a). Ein Teil der Realität sei nämlich durch „rein technische Beschreibung“ (Klütsch, 2007, S. 64) nicht greifbar. Erst durch eine physische Verwirklichung der Konzeption, also die strukturgebende Verteilung der Elemente des Repertoires, mache das Besondere aus (Klütsch, 2007). In der Quantenphysik bedarf es eines mikroskopischen Blickes auf einzelne Elemente, um scheinbar absoluten Zufall zu entdecken (Herget et al., 2005). An diesem Ort, nämlich auf Ebene kleinster Elemente, sucht Bense nach einer strukturellen Erklärung des Schönen. Dieses Phänomen, aufgrund fehlender Kenntnis über strukturelle Zusammenhänge üblicherweise den Geisteswissenschaften zugeschrieben, veranlasste Bense zu einer derartigen Übertragung einer physikalischen Sichtweise auf die Welt der Kunst. Mit Definition der beschriebenen Informationsästhetik kann Bense als ein Initiator der Computerkunst gesehen werden. Dies wird auch durch den Fakt unterstrichen, dass die erste Ausstellung von Werken der Computerkunst weltweit in Benses Galerie in Stuttgart abgehalten wurde (Klütsch, 2007). Wie Klütsch anmerkt, habe sich die Theorie insgesamt nicht etablieren können; allerdings fanden ihre Ansätze Umsetzung in der Formulierung einer generativen Ästhetik (Klütsch, 2007). Auch Reinhard Döhl bezeichnet Benses *Programmierung des Schönen* als „Theorie einer notwendigen Ästhetik als Entwurf einer künftigen Wissenschaft“ (Döhl, o. J.-a). Wichtige Erkenntnisse, wie vor allem die analytische Herangehensweise und Abstraktion eines Stils auf ein Zeichenrepertoire, ermöglichten die Idee der Generierung eines Werkes anhand der gesammelten Daten.

3.3 Das Konzept einer generativen Ästhetik

Aufbauend auf Benses Ästhetiktheorie kann das Konzept einer generativen Ästhetik als wichtiger Schritt in Richtung der Erzeugung anfänglicher Computergrafiken gesehen werden (Klüttsch, 2007; Nake, 1974). Die theoretische Formulierung und eine praktische Umsetzung dessen ereignete sich bereits in den 1960er Jahren, was im Folgenden aufgearbeitet wird. Besonders Frieder Nake unternahm einen wichtigen Schritt hinsichtlich heutiger generativer Kunstproduktion durch die Einbeziehung von Zufallssimulation (Nake, 1974). Vor allem die Rolle, die Nake dem Zufall in seinem Ansatz zuweist, kann wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Kernthematik dieser Arbeit liefern.

3.3.1 Benses Definition einer generativen Ästhetik

Max Bense entwickelte im Rahmen seiner *Aesthetica* mit der Informationsästhetik eine Ästhetiktheorie, deren Aufgabe in der Messung und Analyse stilistischer Informationen liegt. Die Beschreibung einer Kunstproduktion nach informationsästhetischer Herangehensweise vollzog ebenfalls Bense. Eine solche praktische Umsetzung deutet er in seiner Publikation mit dem Titel *projekte generativer ästhetik* an (Bense, 1965). Seine Vorstellungen einer *generativen Ästhetik* führt Bense folgendermaßen auf:

unter generativer ästhetik ist die zusammenfassung aller operationen, regeln und theoreme zu verstehen, durch deren anwendung auf eine menge materialer elemente, die als zeichen fungieren können, in dieser ästhetische zustände (vertellungen [sic] bzw. gestaltungen) bewusst und methodisch erzeugbar sind. (Bense, 1965, S. 1)

Deutlich werden die Wurzeln im Gedankenkonstrukt seiner Informationsästhetik. Die Grundlage bilden hier ebenfalls Elemente, auf deren materielle Umsetzung er verweist. Auch der Begriff des Zeichens oder seine Differenzierung zwischen Mikro- und Makroästhetik sind Teil seiner generativen Ästhetik (Bense, 1965). Grundvoraussetzung für die generative Produktion eines Werkes ist eine vorangehende Analyse. Eine *analytische Ästhetik* dient der Interpretation „ästhetische[r] Strukturen“ (Bense, 1965, S. 1) bestehender Kunstwerke und deren Weiterverarbeitung zu „ästhetische[n] Informationen“. Eine solche Abstraktion ermöglicht die Produktion „materialer Elemente“ (Bense, 1965, S. 2), also eine praktische Anfertigung der Anordnung der Elemente aus dem definierten Repertoire.

Die vier Methoden zur Abstraktion der Informationen, nämlich das semiotische, metrische, statistische oder topologische Verfahren, die Bense als Möglichkeiten nennt, müssen nicht simultan genutzt werden (Bense, 1965). Arbeiten Frieder Nakes weisen ein statistisches Verfahren auf, die von Georg Nees die topologische Vorgehensweise (Klüttsch, 2007).

Die lediglich 546 Wörter umfassende Publikation enthält die Definition einer solchen Ästhetik, in der jedoch der Computer keinerlei Erwähnung findet. Das Erwähnen einer „maschinellen“ (Bense, 1965, S. 2) Umsetzung und die Formulierung in einer „programmiersprache“ (Bense, 1965, S. 2) legen eine Fertigung von Kunstwerken auf Grundlage seiner generativen Ästhetik nahe und sind nach Klüttsch eine

logische Folge. Dieser verweist in diesem Kontext auf eine Formulierung von Georg Nees, in welcher er einen Generator als „Modell des künstlichen Schaffensprozesses“ (Nees, 1969, zitiert nach Klütsch, 2007, S. 102) bezeichnet. Bense erwähnt den Computer zwar nicht, führt aber eine Kausalkette vor, die in einer Programmiersprache mündet. Die Ausführung der Anweisungen, formuliert in der maschinellen Sprache, durch den Computer ist dann eine naheliegende Konsequenz.

3.3.2 Frieder Nakes Auffassung einer generativen Ästhetik

Aktive Akteure im Bereich der anfänglichen Computerkunst, wie Georg Nees oder Frieder Nake, orientierten sich an der Denkweise von Max Bense und setzten die Ansätze praktisch um. Nake entwickelte einen eigenen, auf Benses Theorie aufbauenden, Ansatz einer *generativen Ästhetik* (Klütsch, 2007). Im Jahr 1985 nahm Nake rückblickend Bezug auf Benses Vorhaben und formulierte seine Zielsetzung:

Bense hatte einmal bemerkt, daß Ästhetik »keinesfalls eine vorangehende«, sondern »in jedem Fall eine nachfolgende Wissenschaft« sei. Das beschriebene Programm [Generative Ästhetik I] sollte diese Aussage ins Wanken bringen. Es sollte den Nachweis liefern, daß man Eigenschaften ästhetischer Objekte im Voraus nennen und dementsprechende Objekte konstruieren lassen konnte. Ästhetische Beschreibung sollte vor ästhetischer Wirklichkeit möglich sein, nicht nur umgekehrt. Das Programm, das Bense selbst anlässlich der Grafiken von Georg Nees Projekte generativer Ästhetik genannt hatte, sollte in mathematischer Strenge erfüllt werden. (Nake, 1985, zitiert nach Klütsch, 2007, S. 154)

Hervorsticht die Trennung in vorangehende und nachfolgende Wissenschaften. Nakes Anliegen lag darin, die theoretischen Erkenntnisse aus Benses Informationsästhetik für eine praktische Umsetzung zu nutzen (Klütsch, 2007).

Bereits 1963 fängt der studierte Mathematiker an, erste Grafiken unter Beihilfe des Computers zu entwerfen. Diese bezeichnet er als *ad-hoc-Programme*, zu welchen er auch das 1964 publizierte Programmpaket *COMPARTER 56* zählt. Nake beschreibt derartig generierte Grafiken jedoch als oberflächlich und bemängelt fehlenden kunsthistorischen Einfluss (Nake, 1974). Eine darauffolgende Auseinandersetzung mit Benses Theorie nutzte er dazu, eigene Vorstellungen auf dem Fundament der Informationsästhetik aufzubauen (Klütsch, 2007). Nach der Publikation von Benses *Aesthetica* im Jahr 1966 griff er dessen Ansätze auf und definierte ein *ästhetisches Programm*:

Gegeben sei ein (endliches) Repertoire R von Zeichen, eine (endliche) Menge M von Regeln, diese Zeichen miteinander zu verknüpfen, und eine Intuition I , nach der die Zeichen und Regeln aus R bzw. M ausgewählt werden können. Dann heißt das Tripel (R, M, I) ästhetisches Programm. (Nake, 1968, zitiert nach Klütsch, 2007, S. 147)

Im Vordergrund stehen der Begriff des Zeichenrepertoires, der bereits im Rahmen der Informationsästhetik verwendet wurde, eine Menge an Regeln, die sich auf die Zeichen des Repertoires anwenden lassen und der Begriff der Intuition. Die Einführung der Intuition nimmt eine tragende Rolle in Nakes Sichtweise an: Ihre Funktion liegt in der Auswahl der Zeichen aus dem Repertoire unter Berücksichtigung des Regelwerkes.

Nakes verfolgte das Vorhaben von Max Bense, den abstrakten Begriff der Kunst wissenschaftlich zu untersuchen und unternahm einen praktischen Versuch, den „ästhetischen Raum mathematisch“ (Klütsch, 2007, S. 150) zu skizzieren.

Aufbauend auf Benses Ansatz erkennt Nake wiederholende Prozeduren in den Mechanismen des Kunsthandwerks und beschreibt dieses durch eine abstrakte kybernetische Modellierung unter Berücksichtigung einer zeitlichen Komponente, die aus zwei „Regelkreisen“ besteht: Neben dem *ökonomischen Regelkreis* liegt besonderes Interesse auf dem *ästhetischen Regelkreis*. In diesem realisiert der Produzent das Objekt als Träger ästhetischer Information. In der Phase der *Transition* gelangt dieses zum Rezipienten, der eine kritische Bewertung vollzieht (Nake, 1974). Durch Verwendung dieser kybernetischen Modellierung bezieht sich Nake auf die bereits durch Bense vertretene Ansicht, nach welcher Kunst als eine „Form der Kommunikation“ (Nake, 1974, S. 11) anzusehen sei.

Im Mittelpunkt der wechselseitigen Beziehung zwischen dem Künstler als Produzenten und dem Kritiker als Rezipienten steht in diesem Ablauf das ästhetische Objekt. Ästhetik, oft als die „Wissenschaft vom Schönen“ (Nake, 1974, S. 22) verstanden, gilt es nach Nakes wissenschaftlichem Verständnis anhand von Merkmalen zu messen. Zu diesem Zweck verwendet er eine analytische Ästhetik. Eine solche Analyse dezimiere einen Gegenstand durch die Entnahme von Informationen. Bei einer generativen Ästhetik handelt es sich nach seiner Auffassung um eine „Approximationen an die eigentlich gesuchten Algorithmen“ (Nake, 1974, S. 26) der analytischen Ästhetik. Diese Annäherung benötige es, wenn die Anzahl an Messungen, die eine analytische Ästhetik bedürfe, nicht im Bereich des Möglichen liege. Kernelemente einer solchen generativen Ästhetik sind die Erzeugung von Informationen zu einem Objekt und dessen anschließende Realisation (Nake, 1974).

In der analytischen Ästhetik sieht Nake eine Art der Datenverarbeitung, die dem Ziel nachgeht, „Aussagen über und Bewertungen von ästhetischen Objekten“ (Nake, 1974, S. 28) zu erhalten. Während des künstlerischen Schaffensprozesses evaluiert der Künstler nach jeder Anpassung an dem Objekt, ob dieses seinen Vorstellungen entspricht. Ein Vergleich zwischen „Ist- und Soll-Daten“ (Nake, 1974, S. 31) wird nach jeder Iteration vollzogen, bis es zu einer Gleichheit der Werte kommt. Diese Prozedur erinnert stark an algorithmische Verfahren und lädt zu einer Computersimulation ein. Eine solche Simulation, ein *ästhetisches Labor*, wird umgesetzt durch einen Algorithmus, der die Arbeitsweise des Künstlers beschreibt. Dieser in einem Quelltext formulierte Algorithmus stellt somit eine generative Ästhetik dar (Nake, 1974).

Das eingangs erwähnte *ästhetische Programm* formulierte Nake als Antwort auf Benses Theorie einer „vorangehenden Ästhetik“ (Nake, 1985, zitiert nach Klütsch, 2007, S. 154). Ein solches setzt sich aus allen „Anweisungen, Zielvorstellungen, Ratschlägen, Beschreibungen, die ein Künstler einem Programmierer übermittelt, damit dieser ein Computerprogramm für die Herstellung gewisser ästhetischer Objekte schreiben soll“ (Nake, 1974, S. 33), zusammen. Es ist demnach als Entwurf des Kunstwerkes zu verstehen, der in einen Algorithmus übersetzt werden muss. Anhand dessen setzt der Computer eine Generierung des Werkes um.

Die Einbeziehung einer Variable I, die die Intuition des Künstlers darstellt, sorgt dafür, dass gewisse Teile des Programms während des Prozessablaufs veränderlich sind und nicht vor der Produktion definiert, werden müssen. Unter dem Begriff der Intuition versteht Nake in diesem Zusammenhang eine Problemlösung. Dieser Lösungsansatz zeichne sich dadurch aus, dass die Idee der Gefühlswelt entspringe und nicht auf einer nachvollziehbaren Logik beruhe (Nake, 2001). Er verweist an dieser Stelle auf den Künstler Wassily Kandinsky, der die Entscheidungsfindung im künstlerischen Produktionsprozess auf „inneren Notwendigkeiten“ (Nake, 1974, S. 48) zurückführte, welche wiederum auf dem „freien Gefühl“ (Nake, 1974, S. 48) beruhen. Frieder Nake sieht in der Nutzung von Zufallszahl-Generatoren eine Möglichkeit, die menschliche Eigenschaft der Intuition in die Computersimulation einer Kunstproduktion zu integrieren. Nach jedem Iterationsschritt wird demnach per Zufallssimulation bestimmt, welche Transformationen von Zeichen vollzogen werden sollen. Das bestehende Regelwerk kann als die im Inneren des Künstlers verwurzelte Unausweichlichkeit interpretiert werden, die auf ungezwungenen Gefühlen beruhe.

Ergebnisse einer solchen Generierung sind nach Nake als „Auswahl aus einer Klasse von Bildern“ (Nake, 1968, zitiert nach Klütsch, 2007, S. 143) zu sehen. Durch die Integration der Zufallssimulation ist das Endprodukt nach Ausführung des Programms bis auf die gegebenen Rahmenbedingungen individuell. Die besagte Klasse umfasst demnach alle möglichen Resultate und die tatsächlich erzeugten Grafiken sind ein Teil dieser Klasse. Bezogen auf den Repertoirebegriff handelt es sich bei einer Klasse somit um alle Möglichkeiten einer Anordnung der Elemente des Repertoires.

Frieder Nakes Verständnis von Ästhetik und dem Ablauf der Kunstproduktion in einem kybernetischen Modell mündeten in einer Zentralisierung der Intention innerhalb des Prozesses. Die intuitive Entscheidungsfindung innerhalb des Prozesses ist für Nake der entscheidende Punkt des künstlerischen Schaffens und für die Wissenschaft am schwierigsten zu fassen. In der Computersimulation nach informationsästhetischer Herangehensweise wird diese durch den Pseudozufall repräsentiert.

In dem Konzept des ästhetischen Programms lassen sich klar Züge der Informationsästhetik identifizieren, jedoch formuliert Nake eine angepasste Definition einer generativen Ästhetik:

Eine generative Ästhetik ist eine Methode zur Erzeugung ästhetischer Objekte und Ereignisse (ästhetische Zustände). Diese Methode muss durch einen Algorithmus ausdrückbar sein, also mit gegebenen Mitteln ein gegebenes Ziel in endlicher Zeit erreichen. (Nake, 1974, S. 182)

Als zentrale Absicht nennt er in diesem Kontext die Herstellung von „dialektischer Einheit und Polarität von ästhetischer Kritik und ästhetischer Produktion“ (Nake, 1974, S. 185), was sein Interesse an einer, den gesamten Abläufen der Kunstproduktion umfassenden, Simulation unterstreicht. Der Fokus liegt nach Klütsch darauf, den „ästhetischen Raum mathematisch“ (Klütsch, 2007, S. 150) charakterisieren zu können, damit sich dieses Gebiet effizient nach relevanten Merkmalen durchsuchen ließe.

Ein Bild sei demnach „eine Realisation eines bestimmten Elements eines bestimmten ästhetischen Raumes“ (Klütsch, 2007, S. 144). Die aktive Umsetzung solcher Bilder mündete in Nakes *Generative Ästhetik I*, welche er selbst als Klimax seines konzeptionellen Schaffens bezeichnete. Das Merkmal, welches diese von den zuvor erstellten ad-hoc-Programmen unterscheidet, ist, dass der verwendete Algorithmus nicht nur ein generierender, sondern auch ein *konstruktiver* sei. In der ersten Produktionsphase der *Vorselektion*, welcher typischerweise die *Generation* und die *Selektion* folgen, werde eine Auswahl anhand von Kriterien getroffen (Klütsch, 2007). Dies resultiert in eine kleinere Anzahl generierter Grafiken, die allerdings hinsichtlich zuvor festgelegter Kriterien, näher dem gewünschten Endprodukt sind.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die Entscheidung, den Zufall in die Formulierung einer generativen Ästhetik mit einzubeziehen, als wichtiger Schritt gesehen werden kann, ein überbrückendes Element zwischen Natur- und Geisteswissenschaft zu erzeugen. Innerhalb der Strukturwissenschaften wird das Ziel verfolgt, aufgrund einer „Reduktion des Besonderen auf das Allgemeine“ (Hörz, 2008, S. 7), Informationen zu erhalten, was mit rein naturwissenschaftlichen Methoden nicht im Bereich des Möglichen zu sein scheint (Küppers, 2000). Herbert Hörz evaluiert derartige Methoden, die der Vereinigung der Wissenschaften dienen sollen, und merkt in diesem Zusammenhang an, dass ein derartiges Vorgehen aus wissenschaftlicher Sicht eine Daseinsberechtigung habe, insofern es sich nicht um „philosophischen Reduktionismus“ (Hörz, 2008, S. 7) handele. Aufgrund der Tatsache, dass er eine solche Reduktion nicht als ausreichend empfindet, führt Hörz (2008) den dialektischen Determinismus als verbindendes Element an: Mittels stochastischer Methoden soll der objektive Zufall im deterministischen Denken verankert werden (vgl. 2.2). Durch die gezielte Nutzung des Zufalls, eignet sich Nakes Theorie zur Verbindung der beiden Disziplinen besser als Benses Informationsästhetik. Zudem ist er bemüht, Benses teils philosophischen Ideen ein mathematisches Fundament zu verleihen. Verweise auf Zufälligkeit ließen sich allerdings bereits in Benses Theorie finden: Frieder Nake verweist gezielt auf eine Passage in Benses *Aesthetica*, in der dieser die Begriffe „stochastisch“ und „intuitiv“ als Synonym verwendet:

Auch „Programme“ in bestimmten „Programmiersprachen“ zur „maschinellen“ Realisation „freier“ (stochastischer, intuitiver) oder „gebundener“ (im voraus festgelegter, deduzierter) ästhetischer Strukturen gehören zum System generativer Ästhetik. (Bense, 1960a, S. 334)

3.4 Generative Kunst ohne Mitwirken eines Computers

Bereits in 3.1. wurde Philip Galanters Definition generativer Kunst aufgegriffen, nach der ein regelbasiertes System im Mittelpunkt stehe, an das der Künstler Teile seiner Kontrolle abgebe (Galanter, 2006). Die Durchführung eines solchen Systems durch den Computer ist eng mit dem Begriff der generativen Kunst verbunden, nach Galanter allerdings nicht zwingend notwendig. Dies unterstreicht er, indem er seine eigentliche Definition generativer Kunst umformuliert:

Generative art refers to any art practice in which the artist cedes control to a system with functional autonomy that contributes to, or results in, a completed work of art. Systems may include natural language instructions, biological or chemical processes, computer programs, machines, self-organizing materials, mathematical operations, and other procedural inventions. (Galanter, 2016, S. 154)

Hier sieht er die Nutzung eines autonomen Systems als Grundvoraussetzung, ein Kunstwerk als „generativ“ zu bezeichnen. Des Weiteren ist für Galanter wichtig zu betonen, dass es sich hierbei lediglich um die Beschreibung der Art der Kunstproduktion handle und der inhaltliche Aspekt keinerlei Beschränkungen unterliege (Galanter, 2016). Nachstehend werden Beispiele aufgeführt, die die These Galanters einer nicht erforderlichen Einbindung des Computers in die generative Kunst unterstreichen sollen.

3.4.1 Whipples stochastische Bilder: Beispiel eines Algorithmusentwurfs

Bereits die Unterteilung verschiedener Bereiche der generativen Kunst nach Boden und Edmonds suggerierte eine Denkweise, in der die generative Kunst nicht zwingend mit dem Computer verbunden ist. Als einführendes Beispiel zur Bekräftigung Galanters These dient nachfolgend der Entwurf von einem aus Regeln bestehenden Systems von Fred L. Whipple aus dem Jahr 1968. Die Beschreibung seiner *stochastic paintings* erschien in der ersten Ausgabe des Magazins *Leonardo* und thematisiert eine Vorlage zur systematischen Anfertigung von Malerei. Der Computer findet keinerlei Erwähnung in dem Artikel.

The word stochastic derives from the Greek word for target, indicating something random in character. It is now a widely used technical word in mathematics and physics, representing completely random assemblages or processes. Thus, stochastic paintings are those in which shapes and/or colors are structured randomly. (Whipple, 1968, S. 2)

Whipple nennt als Merkmal der *stochastic paintings* eine zufällige Strukturierung von Form und Farbe. Die Spezifizierung dieser Werke führt er wie folgt fort: „First, a stochastic painting must be based on a set of rules governing the nature of the randomness.“ (Whipple, 1968, S. 2) Deutlich lassen sich hier die Hauptaspekte der generativen Kunst erkennen: Die Nutzung von Zufallsvariablen und ein gegebenes Regelwerk. Der Einbeziehung des Zufalls schreibt Whipple die Funktion zu, dass diese einen

eigenen Charme erzeuge, da hiermit ein großer Interpretationsspielraum für den Betrachter entstehe (Whipple, 1968).

Whipples Vorgehen bestehe darin, ausgehend von zufällig ausgewählten Paaren an Zahlen, eine Prozedur anhand von neun Regeln zu vollziehen (Whipple, 1968). Diese sollen an dieser Stelle nicht im Detail ausgeführt werden. Das Beispiel dient allerdings dazu, aufzuzeigen, dass in Abhängigkeit von der gewählten Definition eine Einbeziehung von Kunstwerken, bei deren Produktion der Computer keine Rolle spielt, in die generative Kunst möglich ist.

3.4.2 Aleotorik: Der Zufall im künstlerischen Schaffensprozess

Vor allem in der Musikgeschichte lassen sich Anzeichen für Arten der Kunstproduktion finden, in denen der Computer nicht als Hilfsmittel benutzt wurde. Ein populäres Beispiel einer generativen Kompositionstechnik ist Wolfgang Amadeus Mozarts *musikalisches Würfelspiel* (Boden & Edmonds, 2009; Galanter, 2016; Ihmels & Riedel, 2007). Derartige Techniken lassen sich bereits im Untertitel des Stückes erkennen: „Walzer oder Schleifer mit zwei Würfeln zu componieren ohne musikalisch zu seyn noch von der Composition etwas zu verstehen“ (Ihmels & Riedel, 2007). Die Einbeziehung einer Zufallskomponente lässt sich in der Nutzung zweier Würfel erkennen. Durch das Werfen dieser Würfel wurden 16 Takte aus einer 176 Takte umfassenden Auflistung selektiert. Die dadurch festgelegte Zusammensetzung dieser Takte resultiert in einer individuellen Komposition aus insgesamt 1116 möglichen Kombinationen (Ihmels & Riedel, 2007). Dieser Prozess lässt sich als generatives Vorgehen beschreiben, in welchem sowohl die Nutzung des Zufalls als auch eine auf Regeln basierende Vorgehensweise zu erkennen ist.

Derartige Kompositionsprinzipien werden nach Reinhard Döhl oftmals dem Terminus der *Aleotorik* zugeordnet. Dieses Wort lässt sich auf den lateinischen Begriff *aleator* (dt.: Würfelspieler) zurückführen und beschreibt die Bestrebung, „den Einfluß der Komponisten auf das Musikstück so weit als möglich zu reduzieren, d.h. weitgehend nicht-intentionale Werke zu schaffen“ (Döhl, o. J.-b). Döhl (o. J.-b) nennt zwei Wege zur Umsetzung einer derartigen Komposition: Der erste bestehe aus dem Wurf eines Würfels für die Zusammensetzung des Musikstückes, worunter auch Mozarts Ansatz fällt. Andererseits sei ebenfalls eine mathematisch kalkulierte Zusammensetzung einer Komposition, basierend auf bestimmten Regeln, eine Option. In Bezug auf aleotorische Kompositionstechniken ist auch die serielle Musik zu nennen, zu der Namen wie Karlheinz Stockhausen gehören. Der Fokus bei ihr liegt auf der Erschaffung einer einheitlichen Ordnung, anhand der Merkmale einer Komposition. Basierend auf Grundlagen der Zwölftontechnik entsteht eine serielle Komposition aus der Variation von Reihe an Tönen, die von dem Komponisten durch Bestimmung des Ordnungssystems genau kontrolliert werden konnten (Ihmels & Riedel, 2007).

Eine Berücksichtigung elektronischer Instrumente sei durch eine solche Systematisierung der Musik anhand festgelegter Variablen nach Ihmels und Riedel (2007) konsequent. Eine ähnliche Aussage

lässt sich auch bei Döhl finden, der den Bereich der aleatorischen Denkansätze nicht nur in der Musik sieht. Für diesen befindet sich demnach „der Zufall als ästhetisches Prinzip“ (Döhl, o. J.-b) als namensgebendes Element im Kern der Aleotorik. An dieser Stelle verweist er auf aleatorische Prinzipien in der Literatur. Diese *literarische Aleotorik* umfasse laut Döhl (o. J.-b) auch maschinell erzeugten Text, womit auch der Computer als Instrument geeignet sei.

Kunstschaffende aus dem Bereich der Aleotorik eint das Interesse an einem generativen System, das losgelöst von bestimmten Bereichen der Kunst, sein Anwendungsgebiet findet. Generative Ansätze beschränken sich somit nicht nur auf die Musik, sondern sind auch in anderen Kunstformen zu finden. Begriffe wie Aleotorik oder generative Kunst umfassen demnach eher ein gedankliches Konstrukt als eine Klassifizierung nach Inhalt oder Form des Werkes. Eine genauere Betrachtung des Komponisten John Cage lässt erkennen, dass er seine aleatorischen Ansätze neben der Musik auch in der Literatur und Malerei verwirklichte (Döhl, o. J.-b; Galanter, 2016; Ihmels & Riedel, 2007). In der Malerei lässt sich beispielsweise zudem auf Jackson Pollock verweisen, der durch das Werfen von Farbe auf Leinwand auch eine Art generatives System nutzte (Boden & Edmonds, 2009). Die Abgabe seiner vollen Kontrolle an Gesetze der Physik, die nach dem Abwurf auf das Material einwirkten, kann als Übergabe an ein autonomes System angesehen werden.

Reinhard Döhl bezeichnet Texte, die einer aleatorischen Erzeugung zugrunde liegen, als „stochastisch“ (Döhl, o. J.-b). Eine solche Bezeichnung lässt sich neben Whipples Anleitung zur Anfertigung der stochastic paintings in denen Kompositionen von Iannis Xenakis wiederfinden (Ihmels & Riedel, 2007; Luque, 2009; Nake, 1974; Xenakis, 1992). Seine Kompositionstechnik integrierte eine Zufallssimulation und im Laufe der Zeit verwendete er zunehmend den Computer.

3.4.3 Op-Art: Verwendung mathematischer Prinzipien sorgt für optische Effekte

Eine weitere wichtige Rolle für die Entstehung erster Computerkunst kann auch der Kunstrichtung Op-Art zugewiesen werden. Christoph Klütsch sieht beispielsweise Beziehungen der frühen Computerkunst zu dem Konstruktivismus, dem Zufall, der konkreten Kunst, der Kybernetik und der Op-Art (Klütsch, 2007). Das signifikante Merkmal liegt hier allerdings nicht, wie in den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen aleatorischen Ansätzen der Kunst, in der zentralen Rolle des Zufalls, sondern in der Erzeugung einer Illusion beim Betrachter. Klar zu identifizieren ist aber auch hier ein Fundament basierend auf mathematischen Strukturen (Klütsch, 2007). Der Fokus liegt auf der menschlichen Wahrnehmung, mit welcher Künstler der Op-Art bewusst spielen: Das menschliche Bewusstsein beruhe nach Klütsch (2007) auf durch Perzeption gesammelten Daten. Der dauerhaft stattfindende Auswahlprozess dieser Information unterliege Fehlern, die eine Illusion zur Folge haben könnten. Durch ein gezieltes Erzwingen von Fehlern in der Kausalkette gelingt es Künstler der Op-Art wahrnehmungspsychologische Phänomene in der Kunst zu verankern. Exakte mathematische Regularien bilden eine logische Struktur, in welcher die Fehler integriert werden (Klütsch, 2007).

Eine direkte Brücke zur anfänglichen Computerkunst bildet A. Michael Noll, der in beiden Bereichen Spuren hinterließ. Noll referenziert in seinem Werk *Ninety Parallel Sinusoids With Linearly Increasing Period* das Werk *Current* der Op-Art Künstlerin Bridget Riley. Das mathematische Prinzip hinter der parallelen Anordnung mehrerer Sinuskurven inspirierte Noll dazu, das Vorgehen mit Hilfe eines Computers umzusetzen. Die Maschine sah er als wie geschaffen für die Umsetzung von Op-Art an (Klüttsch, 2007).

3.4.4 Vera Molnar: Computer zur Optimierung ihrer algorithmischen Kunst

Die aus Ungarn stammende Künstlerin Vera Molnar gehört mit ihren auf Algorithmen basierenden Werken zu den wichtigsten Vertretern der generativen Computerkunst (Klüttsch, 2007). Im Übergang zur Nutzung eines Computers im Prozess ihrer Kunstproduktion beschreibt sie bereits in den 1960er Jahren das Konzept einer *machine imaginaire*, welches an die Funktionsweise eines Computers erinnert.

The images I »create« consist of a combination of simple geometric elements. I develop a picture by means of a series of small probing steps, altering the dimensions, the proportions and number of elements, their density and their form, one by one in a systematic way in order to guess what kind of formal modification challenges the change in the perception of my picture: perception being the basis of aesthetic reaction. (Klüttsch, 2007, S. 100)

Der von ihr beschriebene systematische Weg, der Teil ihres Schaffensprozesses ist, erinnert an die von einem Computer ausgeführten Algorithmen. 1975 erklärt die Künstlerin ihre Ursprünge bis hin zur Verwendung eines Computers. Ihre bis zu diesem Zeitpunkt häufig verwendete Methode beschreibt sie wie folgt:

I began by making pictures of nymphs and trees but soon I replaced figurative subject matter by simple geometrical shapes. Later I began to make nonfigurative pictures that were the result of a procedure in which initial simple geometrical elements and their combination were successively altered in specific ways, a procedure that I continue to follow. (Molnar, 1975, S. 2)

Diese Art und Weise geometrische Figuren anzuordnen, beschreibt sie als zeitintensiv, weshalb der Computer aus Gründen der Effizienz herangezogen wurde: „In 1968, I was able to gain access to a digital computer to facilitate the execution of this time-consuming procedure“ (Molnar, 1975, S. 2). Diesem Ablauf, der sich bei der Produktion ihrer Bilder iterativ ereignet und zum finalen Resultat führt, geht eine ursprüngliche Idee Molnars voraus. Diese Prozedur sei mühsam und aufgrund der vielen Iterationen, die Korrekturen am Werk mit sich bringen, sei die eigentliche Vorstellung nur noch in Ansätzen im Resultat letztendlich zu erkennen. Jeder Durchlauf könne als Sondierungsschritt gesehen werden, dem eine Evaluation folge. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse könne ein weiterer Durchlauf vollzogen werden. Dieses kleinschrittige Herantasten, welches oft nur kleinste Korrekturen von geometrischen Formen mit sich bringe, gestalte sich per Hand sehr mühsam und sei oft zu zeitintensiv, um eine ausreichende Anzahl von Iterationen durchführen zu können. Eine logische Konsequenz dessen sei für Molnar

die Nutzung des Computers. Die Durchführung ihrer systematisierten Arbeitsweise durch den Computer habe neben der Zeitersparnis auch den entscheidenden Vorteil, Schritte rückgängig machen zu können, wodurch Fehler nicht endgültig werden (Molnar, 1975).

Molnars Kunst kann in erster Linie der algorithmischen Kunst zugeordnet werden. Das Interesse der Künstler liegt hier weniger auf dem Erzeugen von Illusionen beim Betrachter der Kunstwerke, wie es in der Op-Art der Fall ist. Vielmehr zeichnet sie sich dadurch aus, dass das Erkennen von Strukturen beim Rezipienten den ästhetischen Sinn befriedigt (Klüttsch, 2007). Vor allem Frieder Nake schafft es laut Klüttsch (2007), Strukturen erstmals zu erzeugen, die zuvor lediglich dargestellt oder Transformationen unterzogen wurden.

4 Einordnung der generativen Kunst

Die Fragen, die mit Aufarbeitung der Thematik rund um die generative Kunst immer präsenter werden, drehen sich um den eigentlichen Zweck der generativen Kunst innerhalb des großen Kosmos der Kunstproduktion: Relevant ist einerseits, inwiefern es sich hierbei wirklich um Kunst handelt. Damit einher gehen Fragen nach der Originalität eines Werkes oder der Autorschaft und der Rolle des Computers. Auch stellt sich die Frage, wo die Kreativität in dieser Form der Kunstproduktion liegt.

4.1 Computerkunst der 1960er Jahre: Erforschung des Schönen

In Laufe dieser Arbeit wurde aufgezeigt, dass die generative Kunst auf der Computerkunst basiert, die in den 1960er Jahren aufkam. Ausgangspunkt war selbstverständlich die Erfindung des Computers, aber auch die Problematik um zwei Kulturen, mit welchen Geistes- und Naturwissenschaften gemeint waren. Das Erkennen dieser grundsätzlichen Unterschiede im Denken der beiden Wissenschaften kann als Grundgedanke gesehen werden, der hinter der Entstehung der generativen Kunst steckt. In der Naturwissenschaft gilt es, Fakten und Merkmale zu suchen und anhand dieser erworbenen Informationen, Ordnungsstrukturen und Kausalitäten zu erkennen. Mittels dieser Erschließung von Strukturen wird es möglich, bisher unerforschte beziehungsweise unerschlossene Bereiche der menschlichen Natur verstehen zu können und dem Ungewissen Struktur zu verleihen. Die Unkenntnis über die Struktureigenschaften, die zu dem Eintreten gewisser Ereignisse führen, wird oft als Zufall bezeichnet, wie in Kapitel 2 aufgezeigt wurde.

Menschliche Kreativität zeichnet sich allerdings durch scheinbar zufällige Entscheidungen aus. Gerade diese Eigenschaft des Menschen sorgt dafür, Kunstwerken das besondere Etwas zu verleihen. Die Struktureigenschaften des Besonderen galt es nach Küppers zu erforschen, um die Brücke zwischen Geistes- und Naturwissenschaften zu errichten. Als Lösungsansatz kann die Strukturwissenschaft gesehen werden. Die Kunst kann als Ausdruck menschlicher Kreativität (O'Hear, 1995) gesehen werden, welche dem Besonderen zugeordnet wird und das in der bestehenden Kluft der Kulturen zu finden ist. Endprodukte der Kunstproduktion stellen einen Ausdruck menschlicher Kreativität dar, welche sich

schwer durch deterministisches Denken erklären lassen. Da sie hier am greifbarsten zu sein scheint, besteht wissenschaftliches Interesse an der Entstehung von Kunstwerken.

Max Bense setzte seinen eigenen Fokus auf das Schöne im Bereich der Kunst, was man als Teilmenge des Besonderen, nach welchem die Strukturwissenschaft forscht, interpretieren kann. Den in Kapitel 3.2.2 thematisierten Versuch von Bense, mit Hilfe seiner Informationsästhetik Informationen aus Kunstwerken zu entnehmen, resultierte aus dem Verlangen, diesen Bereich der Geisteswissenschaft naturwissenschaftlich zu untersuchen und an Merkmalen festmachen zu können. Aufgrund dessen wurde das Konzept einer generativen Ästhetik aufgebaut, die für Künstler wie Frieder Nake oder Georg Nees als Grundlage diente, Kunstwerke mittels des Computers zu generieren. Merkmale sind Zufallsvariablen, die ihren Platz innerhalb eines vom Künstler definierten Regelwerks finden. Da die Theorie einer Informationsästhetik als Formulierung einer Theorie aufbauend auf strukturwissenschaftlichen Prinzipien gesehen werden kann, lässt sich die generative Ästhetik als eine gezielte Umsetzung dessen in der Kunst ansehen.

Auffällig ist hierbei, dass sich die Charakteristika der generativen Kunst nur auf die Anfertigung der Werke beschränken. Eine solche Fokussierung auf die Art und Weise der Kunstproduktion und ein inhaltliches Grundgerüst basierend auf Informationen aus Stilanalysen bereits bestehender Werke unterstreichen Villem Flussers Formulierung von der Computerkunst als wahrer „Kern der Postmoderne“ (Flusser, zitiert nach Nake, 2001, S. 33). Frieder Nake identifiziert bereits in Benses Ansatz einer messenden Ästhetik Ideen der Postmoderne, betont aber zugleich, dass Bense diese These nicht gestützt hätte. Nake selbst beschreibt die Informatik als „erste konstruktive postmoderne Wissenschaft“ (Nake, 2001, S. 227).

Der Künstler kreiert ein System und gibt damit Teile seiner Autorschaft ab. In Bezug auf den wissenschaftlichen Hintergedanken lässt sich dieses System als eine Art digitale Laborumgebung verstehen. In diesem soll nun der Kern der Kunst, nämlich menschliche Kreativität, einer Untersuchung unterzogen werden. Die menschliche Kreativität wird durch den Einsatz von Zufallssimulationen dargestellt. Nach Nake übernehme der Zufall in der generativen Kunst die Rolle der menschlichen Intuition. Diese wird in der digitalen Laborumgebung, basierend auf einem exakt definierten Regelwerk, auf ihren Informationsgehalt untersucht, um sich ein wissenschaftliches Bild von der Kreativität des Menschen verschaffen zu können. Somit ist eine generative Ästhetik zur Erzeugung generativer Werke als eine Simulation der Entscheidungsfindung im künstlerischen Schaffensprozess zu verstehen. Dieser Prozess wird durch die von Nake beschriebenen Regelkreise abstrakt dargestellt. Durch die Verwendung eindeutig formulierter Regeln und Grenzen, sind jegliche Abweichungen innerhalb der Simulationsergebnisse auf die Variable der Intention zurückzuführen.

Der Computer ist, wie in Kapitel 3.6 gezeigt, nicht das zwingende Instrument, um ein Labor nach deterministischer Logik zu erschaffen, aber ist aufgrund seiner Beschaffenheit bestens dafür geeignet. Ein hoher Grad der Abstraktion ermöglicht im Bereich der Strukturwissenschaften, Experimente zur

Erschließung von Informationen durch eine Computersimulation zu ersetzen. Dies sorgte dafür, dass sich mit Erfindung des Computers, Erschließung der Informatik und der Informationsästhetik die Computerkunst in den 1960er Jahren entwickelte. Demnach sind Teile der anfänglichen Computerkunst, ausgehend von Max Bense, mehr als ein strukturwissenschaftliches Experiment mittels einer Computersimulation anzusehen.

Dennoch ist nicht jede Nutzung generativer Systeme in der auf ein solches Forschungsinteresse zurückzuführen. Eine Verwendung dieser Art der Kunstproduktion wird auch des Öfteren genutzt, um Abläufe zu beschleunigen und iterative Produktionsweisen zu optimieren, wie es beispielsweise bei Vera Molnar oder Ernest Edmonds der Fall war. Eine derartige Abstraktion des Schaffensprozesses bietet sich auch im Hinblick auf Denkweisen unterschiedlicher Strömungen an. Eine Verwendung generativer Ansätze weist beispielsweise Denkmuster abstrakter Kunst, konzeptueller Kunst oder des Surrealismus auf (Boden & Edmonds, 2009).

4.2 Kunstproduktion mithilfe des Computers

Durch den Einsatz des Computers in der Computerkunst beziehungsweise in großen Teilen der heutigen generativen Kunst ist es nicht zu vermeiden, sich die Frage zu stellen, ob es sich bei diesem Ansatz überhaupt um Kunst handelt.

Max Bense reagierte auf abwertende Kritik, die im Rahmen erster Ausstellungen von Computerkünstlern publiziert wurde, und betitelte diese als „künstliche Kunst“ (Bense, 1965, zitiert nach Klütsch, 2007, S. 22). Mit Verwendung dieser Bezeichnung spielt Bense jedoch auf die Verwendung von Technologie an, die in den Produktionsprozess eingebunden wird. In 3.3.1. wurde bereits thematisiert, dass Bense durch seinen Ansatz der Untersuchung eines Kunstwerks auf dessen Strukturierung an Informationen die Kunst objektiviert. Der Analyseprozess, in dem ein Kunstwerk als Zeichen angesehen wird, weist einen programmierbaren Charakter auf. Die Formulierung der erhaltenen Informationen über Merkmale und Regeln des vorliegenden Stils in einer Programmiersprache und die Ausführung des generativen Algorithmus durch eine Maschine werden durch das Attribut „künstlich“ beschrieben (Klütsch, 2007). Nach Klütsch zielt es Bense mit dieser Formulierung auf eine „Radikalisierung der Objektivierung von Kunst“ (Klütsch, 2007, S. 101) ab. Dies bestätigt die in 4.1. angeführte These, dass das Ziel der Akteure dieser Bewegung auf naturwissenschaftlichem Interesse beruhte und der Computer als Werkzeug diente, eine Simulation aufgrund der vollzogenen Objektivierung der Kunst durchzuführen.

Generell lässt sich aber nicht jede Implementation des Computers in den Produktionsprozess auf einen solchen Beweggrund zurückführen. Beim Stellen der Frage, ob es sich bei computergenerierter Kunst um Kunst im eigentlichen Sinne handle, ist eine häufig verwendete Herangehensweise, zu hinterfragen, wo in diesem Fall die Kreativität läge (Boden & Edmonds, 2009; Galanter, 2016). Anthony O’Hear führt den Standpunkt an, eine Maschine könne keine Kunst produzieren, denn Ausdruck

menschlicher Kreativität und Erfahrungen sei Kern der Kunst (O’Hear, 1995). Einige Philosophen, wie auch O’Hear, weisen diesem die Rolle als Antithese zur Kunst zu (Boden & Edmonds, 2009). Bense widersetzt sich mit seiner künstlichen Kunst solchen Kritikern, da er etwas maschinell Produziertes gleichzeitig provokativ als Kunst bezeichnet. Klütsch (2007) verweist in diesem Zusammenhang darauf, dass Bense bewusst eine Tautologie verwende, um darauf anzudeuten, dass Kunst immer etwas Künstliches habe, da diese nie in der Natur ohne menschliches Zutun entstehe. Die mit Entstehen der Computerkunst aufkommende Kritik beziehe sich somit vielmehr darauf, dass Kunst zwar nicht natürlich entstehe, aber menschliche Kreativität benötige (Klütsch, 2007). Die Verlagerung des Schaffensprozesses auf eine Apparatur sorgt für Widerspruch, da der Mensch seine Kontrolle zum Teil an etwas Maschinelles abgebe. Obwohl diese Übertragung an ein autonom agierendes System ein bereits bestehendes Konzept war, wie in 3.6. gezeigt wurde, stößt der Gedanke mit Verwendung des Computers auf besondere Ablehnung.

Falls eine Erweiterung zuvor genannter Auffassung lediglich die Forderung nach Kreativität voraussetze, stünde die Frage nach der Fähigkeit von Maschinen zur Entwicklung eines kreativen Verhaltens im Raum. Dieser Untersuchungsgegenstand wurde bereits als Zielsetzung anfänglicher Computerkunst in 4.1. vermutet. Die Philosophin Margaret Boden beschreibt Kreativität als die Entwicklung von Ideen, die „new, surprising and valuable“ (Boden, 1992, S. 1) sein sollen. Die Einbettung von Zufallsvariablen garantiert die Erfüllung zweier Kriterien: Sowohl neue als auch überraschende Wendungen lassen sich durch eine Zufallssimulation im Auge des Betrachters erzeugen. Wertvolle Erkenntnisse, die zu dem Erreichen des Schönen führen, liefert die reine Einbeziehung von Zufallsvariablen nicht. Nach Philip Galanter bedürfe es einer Differenzierung der Systeme zur Generierung von Kunstwerken zwischen *komplexen Systemen* und *komplexen adaptiven Systemen* (Galanter, 2016). Das Wort adaptiv suggeriert im naturwissenschaftlichen Kontext laut Galanter (2016) eine strukturelle Modifizierung anhand der Ereignisse in der Umwelt. Um somit eine Simulation menschlicher Kreativität zu erzeugen, müssen sich verwendete Algorithmen zur Laufzeit des Programms hinsichtlich des Ziels anpassen. Eine solche Unterscheidung ist bereits in den Werken Frieder Nakes zu erkennen. Seine ersten Schritte im Bereich generativ erstellter Grafiken in Form seiner ad-hoc-Programme bemängelt er aufgrund deren Simplizität und dem Fehlen von Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Zuständen der Programme (Klütsch, 2007; Nake, 1974). Eine Analyse, auf der Entscheidungen bezüglich des weiteren Programmverlaufs zu treffen sind, ist der Punkt, der seine anfänglichen Grafiken von anderen Werken unterscheidet. Eine solche Anpassung an die Umstände zur Laufzeit ist es, die ein Programm nach Galanter adaptiv werden lässt. Im Falle von Nake werden derartige Algorithmen als „konstruktiv“ (Klütsch, 2007, S. 149) bezeichnet.

Eine konstruktive algorithmische Vorgehensweise kann als Schritt gesehen werden, einem Computerprogramm die Eigenschaft der Erzeugung von sowohl neuen als auch überraschenden Ereignissen, einzugestehen, die sich ebenfalls als wertvoll bewerten lassen. Boden, die Kreativität an diesen drei Variablen festmacht, betont jedoch, dass ästhetische Werte eines jeden Menschen stark individuell sind.

Oftmals sei es schwer, diese subjektiven Werte in Worte zu fassen. Allerdings ist eine exakte Formulierung von Parametern zur Implementierung in ein Computerprogramm von großer Wichtigkeit, um akkurate Ergebnisse erzielen zu können (Boden, 1992).

O'Hear (1995) zufolge seien Computer allerdings selbst in einem solchen Falle nur trainiert, das Auslösen menschlicher Gefühle zu antizipieren, was allein auf menschlichem Wissen basiere. Ein Grundgerüst bestehend auf menschlichen Erfahrungen mache Kunst aus und sei nicht durch einen Computer zu errichten (O'Hear, 1995). Dieser sei nur im Stande, Modelle anhand bestehender Kunstwerke zu erstellen. Nach O'Hear (1995) fehle einem Computer ebenfalls die Eigenschaft wahrhaft überraschende Momente zu erzeugen. Dies mag als Verweis darauf gesehen werden, dass der Computer lediglich zu einer Simulation des Zufalls im Stande ist. Der künstlerische Schaffensprozess eines „guten“ Werkes zeichne sich zudem durch den Ausdruck der Auseinandersetzung des Künstlers mit seiner Gefühlswelt während des Prozesses aus, wozu ein Computer nicht im Stande ist (O'Hear, 1995). Die darauf aufbauende Fantasie des Menschen zeigt enge Verbindungen mit der Kunst auf. Selbst eine dem menschlichen Denken nachempfundene Modellierung des Computers kann nach O'Hears (1995) Ansicht auch nur ein Modell eines Resultats menschlicher Fantasie produzieren. Kunst zeichne sich durch die menschliche Imperfektion aus. Demgegenüber steht die fehlerfreie maschinelle Produktion (O'Hear, 1995).

Nach einer solchen Definition des Kunstbegriffs wäre eine generative Kunstproduktion nur möglich, wenn sich der Produzent noch als Urheber des Werkes bezeichnen kann. Die Übertragung der Kontrolle an ein System lässt sich zu einem gewissen Grad als Abgabe der Autorschaft an beispielsweise den Computer interpretieren (Galanter, 2016). Boden und Edmonds (2009) verweisen in diesem Zusammenhang auf die Postmoderne. Die damit zusammenhängenden Rückverweise auf bestehende Werke andere Künstler befeuerte eine Debatte um die Frage nach dem eigentlichen Urheber (Boden & Edmonds, 2009). Villem Flusser sah, wie in 4.1. erwähnt, die Computerkunst als Höhepunkt der Postmoderne (Nake, 2001), was auch in diesem Kontext durchaus Sinn ergibt: Die Debatte um eine Teilung der Autorschaft zwischen Menschen und System kann jedes Endprodukt eines solchen Systems umfassen.

Frieder Nake ging sogar so weit, diese Teilung der Autorschaft in der Signatur seiner Werke *Zufälliger Polygonzug 13.9.1965* deutlich zu signalisieren. Diese lautet nämlich *Nake/ER56/Z64*, wobei *ER56* die Produktbezeichnung seines Computers und *Z64* die seines verwendeten Graphomaten darstellt. Dies kann als klares Zeichen gesehen werden, dem im generativen Prozess eingebundenen Computer, einen Anteil an der Rolle des Urhebers zuzugestehen (Klutsch, 2007). Galanter (2016) verweist in diesem Zusammenhang auf Aussagen bezüglich des „death of the author“ (Galanter, 2016, S. 167) und betont, dass einige Kritiker die Hauptfunktion generativer Kunst in einer Destabilisierung der Autorschaft sehen. Wiederkehrender Kritikpunkt generativer Kunst liegt demzufolge in dem System, welches eine Generierung ermöglicht. Die Bindung des Kunstbegriff an die Kreativität des Menschen steht

einer Einordnung der generativen in die allgemeine Kunst im Weg, da die Kontrolle und Autorschaft nur in Gänze beim Menschen liegen, wenn man diesen als Schöpfer des Werkes ansieht.

Für Frieder Nake liegt der kreative Anteil in der generativen Kunstproduktion an anderer Stelle: Seinen eigenen Ansichten nach lasse sich im Falle der Computerkunst auch bei Abgabe der Kontrolle von Kunst sprechen. Er verschiebt nämlich den Fokus auf die konzeptionelle Aufgabe eines Künstlers. Der Programmierer sei demnach der „Schöpfer des Programms“ (Klüttsch, 2007, S. 145). Dessen Aufgabe bestehe in der Konzeption des Programms. Wie auch in der Fotografie, wird die Realisierung der Konzeption durch eine Maschine umgesetzt. Allerdings ist in der Computerkunst eine Trennung des konzeptuellen Grundgerüsts von der maschinellen Umsetzung nicht möglich: Ohne die Ausführung durch den Computer ist die Anfertigung einer Grafik nicht realisierbar. Dem geht jedoch eine Konzeption in Form des Quellcodes voraus. Wenn das konzipierte Programm ein ästhetisches sei, lasse sich der Programmierer nach Nake als Künstler ansehen (Klüttsch, 2007; Nake, 1974).

Weitere Probleme, wie das Fehlen eines eindeutigen Originals, was auch bereits in der Fotografie ein Problem darstellt, oder auch die uneindeutige Intention lassen die Zuweisung zur Kunst ein weiterhin umstrittenes Thema sein. Die Antwort auf die Frage liegt somit im individuellen Kunstverständnis des Betrachters und der Intention des Produzenten. Dies konstatiert auch Frieder Nake und verweist auf die ständige Wandlung und Modifikation des Kunstbegriffs: „Immer noch wird oft übersehen, daß diese Frage überhaupt erst gestellt werden kann, wenn eine Definition von »Kunst« vorliegt“ (Nake, 1968, zitiert nach Klüttsch, 2007, S. 132). Der Kunstbegriff beruht auf keiner allgemeingültigen Definition, weshalb auch eine Zuweisung oder Abgrenzung von der Kunst erst Sinn ergibt, wenn diese vorliegt. Solange sie nicht besteht, kann es als Entscheidung des Individuums betrachtet werden, einem Computer eine schöpferische Fähigkeit in der Kunstproduktion zu attestieren.

5 Der zelluläre Automat als Konzept

Das Konzept des zellulären Automaten ist ein in der generativen Kunst oft verwendetes mathematisches Prinzip nach dem Mathematiker John von Neumann und Stanislaw Ulam (Burks & Neumann, 1967). Ursache dessen sind vor allem die beeindruckenden visuellen Ergebnisse, die sich bereits unter Nutzung eines simplen Regelwerkes erzeugen lassen oder auch die Simulation komplexer Prozesse mittels des Automaten. Einordnen lässt sich dieses Prinzip nach Definition von Boden und Edmonds in den Bereich der Evo-Art (Boden & Edmonds, 2009). Oftmals dient dieses geläufige Konzept als erster Berührungspunkt mit der generativen Kunst, wie es auch für Musiker und generativen Künstler Brian Eno der Fall war: „It was the first thing I'd ever seen on a computer actually, of a game invented by an English mathematician called John Conway. The game was called Life. Modest title for a game“ (Eno, 1996). Im Rahmen dieser Arbeit soll eine praktische Umsetzung eines generativen Kunstwerks unter Einbeziehung dieses Prinzips stattfinden. Ziel ist es auch, bereits thematisierte Merkmale der generativen Kunst mit einzubeziehen.

5.1 Die Geschichte des zellulären Automaten

Das Prinzip des zellulären Automaten basiert auf einer Theorie von John von Neumann und Stanislaw Ulam (Burks & Neumann, 1967; Lund, 2019). Dieses diente erstgenanntem dazu, ein Modell eines Systems zur Replizierung von Objekten zu entwickeln. 1970 konzipierte John Horton Conway ein auf der Definition zellulärer Automaten aufbauendes Spielprinzip (Gardner, 1970; Lund, 2019).

5.1.1 Von Neumanns Theorie selbst reproduzierender Automaten

Das Modell zellulärer Automaten wird beschrieben durch vier Variablen: Der *Zellularraum* R beschreibt „Menge von Zellen oder Atomen, die durch n -Tupel repräsentiert werden“ (Lund, 2019, S. 11). Jeder Zelle in R wird zu jeder Zeit ein Zustand aus der *endlichen Zustandsmenge* Q zugeordnet. Die jeweiligen Zellen weisen Nachbarschaftsbeziehungen zu Elementen der *endlichen Nachbarschaft* N auf (Lund, 2019). Der nächste Zustand der jeweiligen Zellen berechnet sich anhand des „aktuellen Zustands dieser Zelle sowie den gegenwärtigen Zuständen der nach N definierten Nachbarzellen“ (Lund, 2019, S. 13). Die Berechnung erfolgt anhand der deterministischen *Update-Funktion* δ , die auf dem jeweiligen Regelwerk basiert. Bezogen auf das Regelwerk lässt es keine simultane Anwendung der einzelnen Regeln zu und auch die möglichen Zustände der Zellen sind voneinander abgegrenzt. Die Zustände aller Zellen des Zellularraums zu einem spezifischen Zeitpunkt nennt man *Generation*. Initialisiert wird das System mit einer *Anfangsgeneration* (Lund, 2019).

Zu erwähnen ist auch die Klassifizierung zellulärer Automaten nach Stephen Wolfram. Die Einteilung umfasst vier Klassen. Im Kontext dieser Arbeit ist *Klasse IV* von Relevanz. Sie umfasst „zelluläre Automaten, die in Abhängigkeit von der gewählten Anfangsgeneration sowohl reguläre als auch zufällige respektive chaotische Muster erzeugen können“ (Wolfram, 2002, S. 223–296). Dieser Beschreibung lässt sich John Horton Conways Adaption des Modells *Game of Life* zuordnen (Lund, 2019).

5.1.2 Conways Game of Life

John Horton Conway, seines Zeichens britischer Mathematiker am Gonville and Cais College, entwickelte im Jahr 1970 eine Variante des von Neumannschen Modells, bei der es sich bis heute um die vermutlich populärste Version handelt. Hierbei handelte es sich um ein Spiel namens Life, in welchem auf einem Schachbrett Prozesse des realen Lebens simuliert werden sollten (Gardner, 1970). Nach der Definition von John von Neumann weist dieses Spiel einen Zellularraum, eine endliche Nachbarschaft, eine Zustandsmenge und eine Update-Funktion auf: Der Zellularraum R ist ein „zweidimensionales, nicht begrenztes Spielfeld“ (Lund, 2019, S. 20), der dargestellt wird durch eine „nicht-endliche Menge mit zweistelligen Tupeln“ (Lund, 2019, S. 20). Aufgrund der Anordnung des Spielfelds sind jeder Zelle in R acht benachbarte Zellen zugeordnet. Es handelt sich um eine *binäre Zustandsmenge* (zwei Elemente), aus der jeder Zelle der Zustand *tot* oder *lebendig* zugeordnet wird. Zu Beginn des Spiels entsteht

eine zufällige Zustandszuweisung der Anfangsgeneration. Das Regelwerk, welches über die Zustandsübergänge entscheidet, ist wie folgt definiert:

1. Survivals. Every counter with two or three neighboring counters survives for the next generation.
2. Deaths. Each counter with four or more neighbors dies (is removed) from overpopulation. Every counter with one neighbor or none dies from isolation.
3. Births. Each empty cell adjacent to exactly three neighbors--no more, no fewer--is a birth cell. A counter is placed on it at the next move. (Gardner, 1970, S. 2)

Das signifikante Merkmal an Conways Variante liegt in der Bildung komplexer Elemente, ausgehend von dem schmalen Regelwerk. Einerseits entstehen *statische Strukturen* über Generationen hinweg. Solche sind „fest und verändern sich ohne Einwirkung von außen nicht“ (Lund, 2019, S. 22). *Dynamische Objekte* ändern sich über eine zeitliche Distanz, verfallen allerdings in einen statischen Zustand. *Oszillierende Objekte* sind wiederum von dynamischer Natur, münden allerdings in einer periodischen Wiederholung ihrer Zustände (Lund, 2019). Der sogenannte *Gleiter* ist ein „oszillierendes Objekt, welches sich in eine bestimmte Richtung fortbewegt“ (Lund, 2019, S. 24). Dies geschieht mit einer konstanten Geschwindigkeit. Des Weiteren lassen sich innerhalb des Systems komplexe Konstruktionen, wie logische Schaltungen oder Speicherzellen anhand gewählter Zustandskombinationen der Anfangsgeneration, erzeugen (Lund, 2019).

5.2 Pseudozufall des zellulären Automaten

Ein wichtiges Charakteristikum der generativen Kunst ist wie Galanter (2016) betont, einerseits die Übergabe der Kontrolle an ein autonomes System, welches anhand von Regeln festgelegt wird. Die regelabhängige Zustandsveränderung jeder Zelle über Generationen hinweg ist demnach eine optimale Ausgangssituation, um solche Systeme zur Erzeugung generativer Kunstwerke zu nutzen. Erwähnenswert ist auch die Bildung komplexer Strukturen ohne die Verwendung eines aufwändigen Regelwerks. Wie Conways Game of Life zeigt, können bereits drei einfache Vorgaben reichen, einen hohen Grad an Komplexität des generierten Endprodukts zu erzielen. Bereits nach einer Anzahl an Iterationen erhalten erzeugte Strukturen ohne Kenntnis über das zugrundeliegende Regelwerk einen willkürlichen Charakter. Zudem ist das zweite Hauptmerkmal solcher autonomer Systeme die Platzierung von Zufallsvariablen, deren Wertzuweisung in den meisten Fällen über Zufallszahl-Generatoren vollzogen wird. In Kapitel 2.1.3. fand bereits eine Einführung in die Funktionsweise solcher Generatoren statt.

Ein weiterer gravierender Vorteil neben einer eigenständigen Zustandsveränderung von Zellen ist die Möglichkeit der Zufallszahl-Generierung. In diesem Kontext sei auf die Arbeiten von Stephen Wolfram verwiesen, der auf das Bestehen der Möglichkeit der Erzeugung zufälliger Zahlenreihen durch Verwendung zellulärer Automaten aufmerksam macht. Präzise formuliert, weist er auf die Verwendung

einheitlicher, eindimensionaler zellulärer Automaten mit zwei möglichen Zuständen hin, die zur Erzeugung zufälliger Bitfolgen genutzt werden. Insbesondere Verwendung der von ihm definierten Regel 30 solle sich positiv darauf auswirken, das, hinter der Bitfolgen liegende, Muster unkenntlich zu machen (Wolfram, 1986). Z. Zarezadeh verweist auf eine Nutzung uneinheitlicher zellulärer Automaten, deren kombiniertes Regelwerk, bestehend aus Wolframs Regeln Nummer 90 und 150, zur Erzielung qualitativ wertigerer PNSs führt. Die Bezeichnung uneinheitlich bezieht sich in diesem Kontext auf die Regelwerke der Zellen. Eine Erweiterung um eine Implementierung eines Erinnerungsvermögens der Zellen, gebe die Möglichkeit der Speicherung vorheriger Zustände (Zarezadeh, 2017).

Eine derartige Anpassung Wolframs Ansatzes ermögliche die Erzielung von „ziemlich guten Ergebnissen“ (Zarezadeh, 2017, S. 384). Dieser Ansatz zeigt, dass zelluläre Automaten durchaus zur Erzeugung von Zufallszahlen im Stande sind.

6 Praktischer Teil: Umsetzung eines Kunstwerks mit zellulärem Automaten

Diese praktische Umsetzung soll exemplarisch dazu dienen, die in 2 bis 4 erarbeiteten Standpunkte bezüglich der Merkmale generativer Kunst anzuwenden und somit die Erkenntnisse zu vertiefen. In 5 wurde der zelluläre Automat eingeführt, bei welchem es sich um ein populäres Beispiel verwendeter Algorithmen in der generativen Kunst handelt. Insbesondere das Game of Life des Mathematikers John Conway findet oft Anklang in generativen Kunstwerken.

6.1 Konzeption und Zielsetzung

Ziel dieser praktischen Auseinandersetzung ist es einerseits, der Rolle des Zufalls in der generativen Kunst vertiefend nachzugehen. Es wurde bereits die Erkenntnis erarbeitet, dass der Einsatz von Zufallsvariablen die Intuition eines Künstlers simulieren soll. Diese Erkenntnis beruht vor allem auf Aussagen Frieder Nakes (Nake, 1974). Des Weiteren wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass diese Simulation dazu dient, menschliche Kreativität einer wissenschaftlichen Analyse unterziehen zu können.

Somit wird im folgenden Beispiel ein System geschaffen. Unter Voraussetzung gewisser Regeln, agiert der Zufall innerhalb dieser und imitiert die intuitive Entscheidungsfindung eines Menschen. Mechanismen zur Simulation des Zufalls unter Zuhilfenahme des Computers wurden bereits in 2.3. thematisiert. Diese generative Ästhetik soll in der Lage sein, Klassen einzelner individueller Grafiken zu erzeugen.

Außerdem gilt es zu prüfen, inwiefern der zelluläre Automat als ein Modell für generative Kunst in Frage kommt. Wichtige Eigenschaften des Prinzips könnten hierbei die generativen Veränderungen anhand des Regelwerks oder auch die Möglichkeit der Zufallssimulation sein. Arten und Weisen der Verwendung als Zufallszahl-Generator wurden bereits in Kapitel 5.2 erläutert.

6.2 Programmierung des Kunstwerks

Ein wichtiges Instrument zur Erzeugung von Grafiken anhand einer generativen Ästhetik mittels des Computers ist das Verfassen eines Quelltextes. Der Künstler formuliert in diesem sein Regelwerk in einer passenden Programmiersprache. Ein Compiler ist anschließend dafür zuständig diesen in Maschinensprache zu übersetzen, um die Anweisungen dem Computer verständlich zu machen. Bei der verwendeten Programmiersprache handelt es sich um die Sprache *p5.js*. Diese frei zugängliche Open-Source-Bibliothek stellt eine Erweiterung der Sprache *JavaScript* dar, durch die eine Erstellung von generativen Kunstwerken zugänglicher gemacht werden soll (Groß et al., 2018). Der verfasste Quellcode beinhaltet im Wesentlichen drei Teile. Diese einzelnen Algorithmen sollen kurz erläutert werden, um ein Verständnis für die Architektur des Programms schaffen zu können.

6.2.1 Algorithmus 1: Implementierung des Perlin-Noise

Der erste Algorithmus basiert auf dem Prinzip des *Perlin Noise* nach Kenneth H. Perlin. Besagter amerikanischer Informatiker verfolgt mit seiner Konzeption ebenfalls die Generierung einer Folge an Zufallszahlen. Der entscheidende Gedanke liegt allerdings darin, dass sich erzeugte Werte n an dem jeweiligen Wert des zuvor erzeugten Folgeelements $n-1$ orientieren sollen, indem n nur eine gewisse Abweichung zu $n-1$ aufweisen darf (Shiffman, 2024). Eine solche Folge an Zufallswerten weist somit keine abrupten Sprünge zwischen aufeinanderfolgenden Werten auf, wie es PRNGs für gewöhnlich tun. Während einer Filmproduktion, in der Perlin involviert war, entwickelte er diesen Algorithmus zur prozeduralen Texturgenerierung für Spezialeffekte und veröffentlichte diesen im Jahr 1983 (Shiffman, 2024).

Zur Generierung dieser algorithmisch geglätteten Folgen verfügt die Programmiersprache *p5.js* über die Funktion *noise()*, welche auf einer Implementierung des Algorithmus basiert (Groß et al., 2018; Shiffman, 2024). Diese kann als Alternative zu der Funktion *random()* genutzt werden, um eine Zufallszahlenfolge in der Programmiersprache zu erzeugen (Shiffman, 2024). Hierbei handelt es sich um eine leistungsoptimierte Adaption des eigentlichen Algorithmus, die als Resultat Werte des Bereichs zwischen 0 und 1 liefert (Shiffman, 2024).

Verteilt man diese Werte auf Koordinaten eines zweidimensionalen Rasters ändert sich die Anzahl der benachbarten Zellen auf acht Stück, welche zum Vergleich herangezogen werden (Shiffman, 2024). Eine Evaluation benachbarter Zellen ist auch in dem Konzept des zellulären Automaten integriert, wie in 5 aufgezeigt wurde (Burks & Neumann, 1967; Gardner, 1970; Lund, 2019; Wolfram, 2002). Im Rahmen dieser Umsetzung dient dieses Prinzip zur Erzeugung eines Hintergrundes (Batch, 2021).

6.2.2 Algorithmus 2: Implementierung des Game of Life

Der zweite Algorithmus dient nun dazu, die Orte auf dem Hintergrund auszuwählen, an denen Elemente aus 6.2.3. platziert werden sollen. Grund für die unregelmäßige Platzierung ist eine gewollte Unordnung, die der Grafik eine gewisse Brisanz verleihen soll. Der dem zugrundeliegende Algorithmus ist der zelluläre Automat, genauer gesagt das Regelwerk des Game of Life nach John Conway (Gardner, 1970).

Wichtig ist eine Zerlegung des Bildschirms in ein zweidimensionales Raster, in welchem jede Zelle unterschiedliche Zustände annehmen kann (Shiffman, 2024). Aus diesem Grund wird bei Initialisierung des Programms eine Zeilen- und Spaltenzahl festgelegt, die in Relation zu der Höhe und Breite des Bildschirms stehen. Die einzelnen Zustände der jeweiligen Zellen werden innerhalb einer verschachtelten Schleife durch einen weiteren Zufallszahl-Generator vergeben. Möglich sind die Werte „0“ oder „1“, die durch die Funktion *make2dArray()* in einem mehrdimensionalen Array, das den Dimensionen des Rasters entspricht, gespeichert werden (Shiffman, 2017). Zur Laufzeit des Programms werden in jeder Iteration die Zustände der einzelnen Zellen anhand der von John Conway definierten Regeln evaluiert und gegebenenfalls angepasst. Diese Auswertung und Neubelegung der Array-Elemente werden mittels der Prüfung der zugehörigen Bedingungen durch bedingte Anweisungen ermöglicht (Shiffman, 2017). Die Veränderung der Zustände im Raster, das sich über die Grafik erstreckt, ermöglicht es nun, die im nächsten Algorithmus erzeugten Formen, zu platzieren.

6.2.3 Algorithmus 3: Generierung von Polygonen

Jede Zelle des erstellten Rasters kann in diesem Beispiel somit die Zustände „0“ oder „1“ annehmen. Bezogen auf die von John Conway entworfene Simulation des Lebens lassen sich diese als „tot“ oder „lebendig“ interpretieren (Gardner, 1970). In diesem Fall wird der Zustand „lebendig“ einer Zelle dazu genutzt, in dem Bereich des Rasters ein Polygon zu zeichnen.

Die erstellte Klasse *Polygon()* enthält zugehörige Funktionen und Variablen. Über Instanziierung dieser Klasse ist es möglich Polygone an den festgelegten Koordinaten zu erzeugen.

Beim Aufruf dieser Klasse werden die Punkte des Polygons anhand von mehreren Kennziffern errechnet. Benötigt werden zum einen die X- und Y-Koordinate der zugehörigen Zelle aus dem Raster. Diese Koordinaten werden als Mittelpunkt der zu erzeugenden Form genutzt. Die weiteren benötigten Werte sind einerseits die Länge des Radius, anhand derer ein Kreis um den Mittelpunkt aufgespannt wird. Ein weiterer eminenter Parameter zur Erzeugung liegt in der Wertigkeit des Polygons, was die Anzahl der Eckpunkte bezeichnet. Neben der Positionierung, der Länge des Kreisradius und der Wertigkeit, werden zwei weitere Werte von dem Programm erwartet: Bei diesen handelt es sich um Zahlen, die die Irregularität und die Kantigkeit des Polygons beschreiben (Ounsworth, 2014).

Ziel des Algorithmus soll sein, möglichst kantige Formen zu generieren, um das Empfinden von Unordnung aufgrund des visuell Gesehenen beim Rezipienten zu erzeugen. Um eine hohe Irregularität der Formen zu erreichen, wird der Kreis umlaufen. Die Anzahl der dafür benötigten Schritte wird durch die angegebene Anzahl der Eckpunkte festgelegt. Die Schrittgröße wird in der Funktion *random_angle_steps()* anhand der Werte für die Schrittzahl und der Irregularität, festgelegt (Ounsworth, 2014). Für zufällige Abweichungen sorgt wiederum der Einsatz eines Zufallszahl-Generators innerhalb der Funktion. Die Winkelschritte werden als Gleichungen für Winkel und Radien der Scheitelpunkte zurückgegeben: Diese werden wiederum Werten aus einem Bereich zugeteilt, indem wiederum ein weiterer Zufallszahl-Generator zum Einsatz kommt, nämlich die Erzeugung von Zufallszahlen als Resultat der Gaußschen Normalverteilung (Ounsworth, 2014).

Der Wert *irregularity* definiert also, wie gleichmäßig die Anordnung der Eckpunkte um den als Hilfsmittel gezogen Kreis positioniert werden. Diese Zahl sorgt in Kombination mit der zweiten Variable *spikeyness*, dafür, die visuelle Unordnung kontrollieren zu können. Diese gibt die Größe der Abweichung vom Kreis an. Gemeint ist der Abstand zu dem zu Beginn gezogenen Kreis, also auch die Abweichung von dem Wert, der zu Beginn als Radius angegeben wurde (Ounsworth, 2014).

Der Einsatz von weiteren Zufallszahl-Generatoren sorgt bei Ausführung des Programms dafür, dass den Variablen, die der Algorithmus benötigt, Werte innerhalb vorgegebener Bereiche zugeteilt werden. Diese zufälligen Schwankungen innerhalb der gegebenen Grenzen sorgen beispielsweise für größere Unterschiede zwischen den einzelnen Polygonen oder Überlappungen einzelner Formen, da die Radien ein Vielfaches der Zellgrößen erreichen können.

6.3 Reflexion

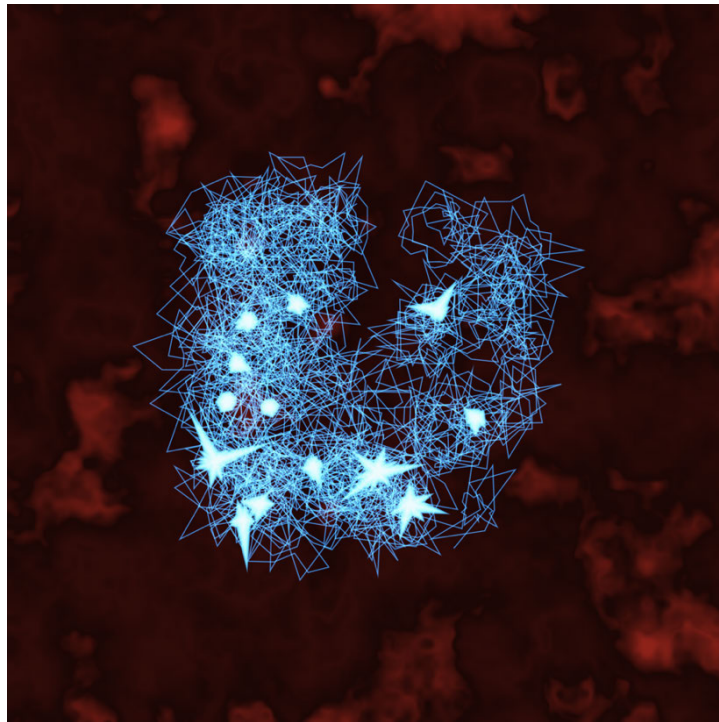


Abbildung 1: Grafik A aus der Klasse der generativen Ästhetik
Quelle: Eigene Darstellung

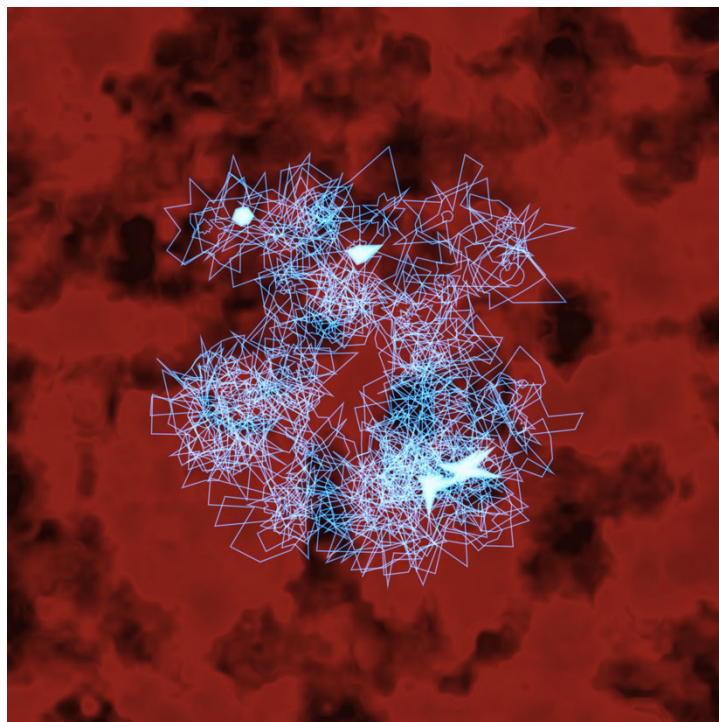


Abbildung 2: Grafik B aus der Klasse der generativen Ästhetik
Quelle: Eigene Darstellung

Die Verbindung der Prinzipien des Game of Life mit anderen Regeln führt zum Entwurf eines Algorithmus, der es ermöglicht, ein visuelles Endprodukt zu erzeugen, welches durch die gezielte Platzierung von Zufallsvariablen Unterschiede im Erscheinungsbild aufweist. Nach der Definition Frieder Nakes handelt es sich um eine generative Ästhetik, deren Aufgabe es ist, eine Klasse an Grafiken zu erzeugen (Nake, 1974).

Eine Zielsetzung dieses Versuchs einer praktischen Umsetzung war zum einen, ein System zu erschaffen, in welchem die menschliche Intuition durch den Einsatz von Zufallssimulation nachgeahmt werden soll. Diese Pseudozufallszahl-Generatoren sollten in einem von Regeln definierten Rahmen Abweichungen erzeugen, die einzelne Grafiken der Klassen unterscheidbar machen. Der Einsatz mehrerer Pseudozufallszahl-Generatoren, die durch die Programmiersprache *p5.js* implementiert werden können, ermöglichen die gewünschte Varianz der Endergebnisse. Auch der Einsatz eines Regelwerkes findet in der Umsetzung ihren Platz: Das Regelwerk des zellulären Automaten wurde zur Positionierung gewisser Formen eingesetzt. Deren Gestalt unterliegt auch wiederum definierten Vorgaben.

Die Vorgabe ein solches System zu kreieren, welches der Auffassung von Frieder Nake einer generativen Ästhetik unterliegt, dient dem Zweck, den Ansatz eines digitalen Labors zur Erforschung menschlicher Kreativität nachzubauen. Dadurch soll geprüft werden, inwiefern diese für ihren Forschungszweck geeignet ist.

Anhand der Ergebnisse lässt sich erkennen, dass die Abweichungen zwischen einzelnen Grafiken auf die Nutzung der Zufallssimulation zurückzuführen sind. Die zufällig erstellte Ausgangslage für den zellulären Automaten, die randomisierte Selektion von Ausgangswerten aus einem Wertebereich zur Erzeugung der einzelnen Polygone oder auch die Zusammenstellung der Farbwerte oder Eingabeparameter des Hintergrundes sorgen für unterschiedliche Endergebnisse, vgl. Abb. 1 und 2. Dies führt dazu, dass einige Resultate stimmiger oder interessanter für individuelle Betrachter wirken. Allerdings wurde die zutreffende Kombination an Parametern für den Algorithmus nicht intuitiv bestimmt und ein den Vorstellungen entsprechendes Werk erschaffen. Vielmehr wurde durch zufällige Zusammensetzungen und Wertzuweisungen eine Anzahl von zu einem gewissen Grad unterschiedlichen Werken erzeugt, aus denen eine Teilmenge Interesse bei einem Betrachter erwecken kann.

Somit handelt es sich vielmehr um die Simulation von Entscheidungen im künstlerischen Schaffensprozess. Der zielgerichtete Gedanke, der Teil der Intuition ist, welcher nämlich darauf hinsteuert, etwas für den Rezipienten oder den Künstler selbst als ästhetisch ansprechend oder auch schön wirken zu lassen, wird in Berücksichtigung von Zufallszahlen innerhalb eines regelbasierten Systems nicht mit einbezogen. Eine Entscheidungsfindung wird zwar implementiert, allerdings berücksichtigt diese in diesem Beispiel keinen wertenden Hintergedanken, der auf das Ziel hinsteuert, etwas subjektiv Schönes zu erschaffen. Ein Schritt, vergleichbar mit Nakes Schritt der Vorselektion, bedarf es, um ein solches Ziel zu erfüllen (Klutsch, 2007). Dies wäre ein Schritt in Richtung der Erfüllung der, von Boden formulierten, Kriterien eines kreativen Verhaltens (Boden, 1992).

Ein weiteres Ziel bestand darin, den zellulären Automaten auf dessen Nutzbarkeit als Modell für generative Kunst zu testen. Durch Konzipierung und Umsetzung des Beispiels wurde ersichtlich, dass der zelluläre Automat sehr gut aufzeigt, wie die Nutzung einer geringen Anzahl simpler Regeln dazu führen kann, dass nach einer gewissen Anzahl von Iterationen die zugrunde liegende Logik nur noch schwer zu erkennen ist. Ohne die Kenntnis über Regeln und Strukturen kann eine außenstehende Person nicht mehr die Zusammenhänge der Zustände einzelner Zellen erkennen.

7 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit stand zu Beginn der Begriff der generativen Kunst und die damit verbundene Einbeziehung des Zufalls. Es wurde in 2 aufgezeigt, dass der Zufall oftmals nach naturwissenschaftlichem Verständnis mit einer fehlenden Kenntnis über strukturelle Zusammenhänge, die das Eintreten gewisser Ereignisse bedingen, in Verbindung gesetzt wird. Dies mündet in dem naturwissenschaftlichen Grundverständnis, nach dem strukturelle Eigenschaften erforscht werden sollen. Eine derartige Denkweise lässt sich schwer mit dem Glauben an genuine Zufall vereinen.

In der Mathematik ist es schwierig, den Zufall mit dem deterministischen Denken zu vereinbaren. Aus diesem Grund kommt es zur Verwendung stochastischer Methoden. Deshalb wird versucht, objektiven Zufall an Eintrittswahrscheinlichkeiten festzumachen. Die deterministische Weltauffassung der Naturwissenschaft spiegelt sich in der Erfindung des Computers wider, welcher nach rein logischen Abläufen operiert. Die generative Kunst zeichnet sich durch die Einbeziehung sogenannter Pseudozufallszahl-Generatoren aus. Bei diesen handelt es sich um deterministische Funktionen, die als Endprodukt eine approximierte Folge von Zahlen liefern. Ziel eines solchen Generators liegt darin, das Auftreten periodischer Wiederholungen innerhalb der Zahlenfolgen zu verschleiern und den Anschein zu wahren, es läge der Generierung der ausgegebenen Zahlen keinerlei Struktur zu Grunde.

Ausgehend von der Möglichkeit der Erzeugung von Pseudozufallszahlen mithilfe des Computers wurden in 3.1. die Hauptmerkmale generativer Kunst aufgeführt: Der von Philip Galanter angeführte Definitionsversuch umfasst vor allem ein autonom agierendes System, das der Zielsetzung einer Generierung von Kunstwerken nachgehend, ein Endprodukt liefert. Die beiden wichtigsten Attribute eines solchen Systems sind die Implementierung von Pseudozufallszahl-Generatoren und die präzise Definition eines Regelwerks. Innerhalb der vom Künstler abgesteckten Anweisungen operiert das System und erzeugt Kunstwerke in Form von beispielsweise Grafiken. Eine Varianz innerhalb der Endprodukte ist auf die Nutzung von Pseudozufallszahlen zurückzuführen. Eine genaue Differenzierung verschiedener Bereiche generativer Kunst und eine Abgrenzung zur regelbasierten Kunst sorgten in 3.1. für eine präzisere Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes.

Das naturwissenschaftliche Verlangen eines strukturellen Ergründens unbekannter Bereiche lässt sich auch in der in 3.2.1. aufgegriffenen Rede Snows aus dem Jahr 1959 identifizieren. Die metaphorische

Kluft zwischen zwei Kulturen symbolisiert das Fehlen eines Bindeglieds zwischen den besagten Naturwissenschaften und den Geisteswissenschaften. Küppers benennt das Besondere, was ähnlich wie der Begriff des Zufalls als ein Überbegriff für Ereignisse genommen wird, deren zugrundeliegende Struktur im Bereich des Unerklärlichen liegt. Aufbauend auf einer Abstraktion ist es somit Anliegen der Strukturwissenschaften, eine Analyse durch naturwissenschaftliche Methoden von Phänomenen, die der Geisteswissenschaft zuzuordnen sind, zu vollziehen. Das Ziel von Max Bense ist dementsprechend eine Analyse des Schönen, welches als Bereich des Besonderen in der Kunst gesehen werden kann. Wichtiges Hilfsmittel ist nach den Strukturwissenschaften und Benses Informationsästhetik eine Computersimulation. Aufbauend auf Benses theoretischem Ansatz einer künstlerischen Stilanalyse sieht Frieder Nake die Möglichkeit einer dem Produktionsprozess vorausgehenden Analyse, anhand welcher eine auf Algorithmen basierende Generierung von Kunstwerken durch ihn in die Praxis umgesetzt wurde. Das beschriebene Entstehen der Computerkunst kann als eine Grundlage für heutige generative Kunst gesehen werden.

Allerdings zeigt bereits die in 3.1. eingeführte Definition generativer Kunst, dass der gedankliche Ansatz einer Verlagerung der schöpferischen Freiheit an ein System, bereits vor Entstehung der Computerkunst bestand. Die damit verbundene Aufhebung einer Bindung an den Computer wird auch umso deutlicher durch einen Blick auf Denkmuster der algorithmischen Kunst, der Op-Art oder aleatorischen Kompositionstechniken, wie in 3.4. angedeutet.

Das in 5. eingeführte Konzept des zellulären Automaten von John von Neumann und insbesondere das darauf aufbauende Spielprinzip des Game of Life eignen sich als Algorithmen für die generative Kunstproduktion. Sowohl die in 5.2. aufgeführte Möglichkeit der Zufallszahl-Generierung und auch die Erzeugung komplexer Muster, basierend auf einem simplen Regelwerk, resultieren in einem breiten Fundament, das als Einstieg in generative Kunst genutzt werden kann. Letztere Eigenschaften wurden in 6. einer praktischen Umsetzung unterzogen. Zudem finden sich in der Popularität der Theorie und der Komplexität der entstehenden Muster weitere Argumente für eine Nutzbarkeit der Prinzipien des zellulären Automaten innerhalb eines Systems zur Generierung von Kunstwerken.

Die Platzierung eines autonomen Systems in dem Prozess der Kunstproduktion führt dazu, dass viele Fragen und damit zusammenhängende Diskurse aufkommen. In 4. wurden bereits mehrere relevante Aspekte beleuchtet und unterschiedliche Lösungsansätze präsentiert. Besondere Brisanz liegt in der Frage nach einer Einbeziehung einer generativen Produktionsweise in den Kunstbegriff. Um diese Frage beantworten zu können wurden in 4.1. vor allem die ursprünglichen Hintergedanken anfänglicher Computerkunst hinterfragt. Als ein Ausgangspunkt für die Entstehung der Computerkunst kann neben der Erfindung des Computers und der damit verbundenen Bildung des naturwissenschaftlichen Fachbereichs der Informatik, ebenfalls der wachsende Wunsch nach einem Bindeglied zwischen Natur- und Geisteswissenschaften gesehen werden. Die Idee einer Erforschung geisteswissenschaftlicher Phänomene durch eine starke Abstraktion kann als Grundlage für Max Benses Informationsästhetik gesehen

werden. Die Fähigkeit, künstlerische Stile messbar zu machen und deren praktische Umsetzung durch Personen wie Frieder Nake, führten zu der Erkenntnis, dass eine Erforschung der Kunst als Hauptmotivation einiger Computerkünstler der ersten Stunde gesehen werden kann. Demnach ist diese Produktionsweise in der Kluft zwischen Geistes- und Naturwissenschaften zu sehen. Ihre Funktion kann als verbindendes Element interpretiert werden, in dem naturwissenschaftliche Werkzeuge, wie die Abstraktion oder die Analyse, innerhalb des Kunstkosmos operieren.

Weitere Ansätze auf diese Frage wurden in 4.2. aufgegriffen. Ein gängiger Standpunkt besteht darin, dass Kunst auf menschlicher Kreativität beruhe. Diese zeichne sich nach Margaret Boden durch die Produktion neuer, überraschender, als auch wertvoller Einfälle aus. Mittels adaptiver Algorithmen nähert man sich einer Simulation solcher Fähigkeiten an, erreicht nach beispielsweise O'Hear allerdings nicht die signifikanten Eigenheiten menschlicher Fantasie. Auch der Standpunkt wird vertreten, dass eine Abgabe der schöpferischen Fähigkeiten gegen eine Einordnung in den Kunstbegriff spreche.

Letztendlich liegt eine solche Zuordnung im subjektiven Empfinden des Betrachters und in dessen individueller Definition von Kunst.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt allerdings nicht nur auf der Einordnung solch generativer Ansätze innerhalb des Kunstgeschäfts. Vielmehr thematisiert diese Arbeit den Zufall, der eine prägende Rolle in der generativen Kunst einnimmt. Dieser schwer greifbare Begriff steht für eine Unkenntnis über strukturelle Merkmale. In 4.1. wurde die These aufgestellt, dass die Bestrebung von Künstlern bzw. Wissenschaftlern rund um Frieder Nake und Max Bense auf einem Interesse der wissenschaftlichen Untersuchung menschlicher Kreativität beruhe. Kreativität als Auswurf menschlicher Fantasie bündelt sich in der Kunst und ist in keinem anderen Bereich so greifbar. Ein wissenschaftlicher Erklärungsversuch wird nach Prinzipien der Strukturwissenschaften anhand einer Abstraktion und Simulation durch den Computer vollzogen. Der Einsatz des Pseudozufalls hat demnach den Sinn, kreative Entscheidungsfindung innerhalb dieser Simulation einer Kunstproduktion darzustellen. Gerade in Hinblick auf die Erschließung einer künstlichen Intelligenz, welche menschliches Denken und Entscheidungsfindung simulieren soll, ist es von besonderer Bedeutung, kreative Denkprozesse in diese Überlegungen miteinzubeziehen.

Des Weiteren wurde eine Evaluierung der Theorie des zellulären Automaten vollzogen, nach welcher diese als durchaus sinnvoll für generative Kunstproduktion empfunden wurde. Besonders die Fähigkeit der Verwendung als Zufallszahl-Generator spricht für das Prinzip. Auch in dieser praktischen Umsetzung wurde der Einsatz von Zufallszahl-Generatoren beleuchtet und in Hinblick auf eine Simulation menschlicher Kreativität untersucht. Hierbei zeigte sich, dass durch die Verwendung solcher Generatoren eine Vielzahl an Instanzen der Klasse erzeugt werden. Eine Selektierung der Grafiken hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung des Schönen ist deshalb eminent. Die von Frieder Nake thema-

tisierte Phase der Vorselektion gilt es deshalb in der Zukunft in einen generativen Algorithmus zu implementieren. Ein solch adaptives Charakteristikum ist deshalb ein signifikanter Schritt zu einer Simulation kreativer Entscheidungsfindung des menschlichen Individuums.

Kritisch anzumerken ist in Hinblick auf die praktische Auseinandersetzung mit der Thematik die Komplexität des konzipierten Algorithmus. Produzenten generativer Werke verfügen über ein hohes Maß an Erfahrung, was sich in den zu Grunde liegenden Algorithmen bemerkbar macht.

Außerdem ist zu erwähnen, dass es sich bei dieser Arbeit nicht um eine umfassende Analyse des gesamten Bereichs der generativen Kunst handelt. Vielmehr wurde der Grundgedanke exemplarisch anhand weniger Beispiele und Kunstwerke aufgegriffen, um den gedanklichen Ansatz und die damit verbundene Intention nachvollziehen zu können.

Hinsichtlich der genannten Punkte gibt es die Möglichkeit, das Forschungsfeld breiter zu gestalten, um andere Beweggründe generativer Kunstschaffender zu evaluieren und in Vergleich mit den bereits erarbeiteten Punkten stellen zu können. Vor allem hinsichtlich einer weiteren praktischen Umsetzung gibt es weitere Möglichkeiten, wie die Implementierung interaktiver Komponenten. Auch das Endprodukt ist nicht an die Realisation als Grafik gebunden, sondern kann sich auch im Bereich der Musikkomposition befinden, wodurch sich eine hybride Umsetzung, die beispielsweise eine visuelle Ausgabe mit der Generierung von Klängen verbindet, erzeugen ließe. Interessante Forschungsbereiche stellen auch generative Ansätze in der Architektur oder ein Blick auf künstliche Intelligenz dar.

Literaturverzeichnis

- Batch, D. (2021, August 8). *The tips to make the Perlin noise creative coding works more interesting*. Deconbatch's Land of 1000 Creative Codings. <https://www.deconbatch.com/2021/08/tips-perlin-parameter.html>
- Bense, M. (1960a). *Aesthetica*. Deutsche Verlags-Anstalt.
- Bense, M. (1960b). *Programmierung des Schönen: Allgemeine Text Theorie Und Textästhetik*. Agis-Verlag.
- Bense, M. (1965). *Projekte generativer Ästhetik. Elektronische Rechenanlagen realisierten programmierte ästhetische Objekte | Database of Digital Art*. <http://dada.compart-bremen.de/item/publication/291>
- Boden, M. A. (1992). *Die Flügel des Geistes. Kreativität und Künstliche Intelligenz*. (R. von Savigny, Hrsg.). Artemis.
- Boden, M. A., & Edmonds, E. (2009). What is generative art? *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1080/14626260902867915>
- Burks, A. W., & Neumann, J. V. (1967). *Theory of Self-reproducing Automata*. University of Illinois Press.
- Döhl, R. (o. J.-a). *Reinhard Döhl | über | Max Bense: Programmierung des Schönen*. Abgerufen 4. April 2025, von <https://www.reinhard-doehl.de/bense1.htm>
- Döhl, R. (o. J.-b). *Reinhard Döhl: Exkurs über Aleatorik*. Abgerufen 29. März 2025, von <https://www.stuttgarter-schule.de/aleatori.htm>
- Dreher, T. (2020). *History of computer art* (2nd update June 2020 for the eBook, with a modified chapter II.1.1). Lulu Press. <https://doi.org/10.11588/artdok.00007723>
- Eno, B. (1996, Juni 8). *Generative Music—Brian Eno—In Motion Magazine*. <https://www.inmotionmagazine.com/enol.html>
- Galanter, P. (2006). Generative art and rules-based art. *Vague terrain*, 3. <https://scholar.google.com/scholar?cluster=9547865000322300178&hl=en&oi=scholar>
- Galanter, P. (2016). Generative Art Theory. In C. Paul (Hrsg.), *A Companion to Digital Art* (1. Aufl., S. 146–180). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118475249.ch5>

- Gardner, M. (1970). *Mathematical Games—The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game „life“—M. Gardner—1970.*
- Giannetti, C. (2007, Februar 15). *Kybernetische Ästhetik und Kommunikation* [Text]. Medien Kunst Netz. http://www.medienkunstnetz.de/themen/aesthetik_des_digitalen/kybernetische_aesthetik/print/
- Groß, B., Laub, J., & Bohnacker, H. (2018). *Generative Gestaltung*. <http://www.generative-gestaltung.de/2/>
- Herget, W., Hischer, H., & Richter, K. (2005). *Was für ein Zufall!? : Einige Bemerkungen über einen wenig beachteten Kern der Stochastik*. <https://doi.org/10.22028/D291-26288>
- Hörz, H. (2008). Determinismus und Stochastik: Ist die Kluft zwischen den zwei Wissenschaftskulturen zu überwinden? *LIFIS online*, 1–13. <https://doi.org/10.14625/KXP:1786321742>
- Ihmels, T., & Riedel, J. (2007, Februar 15). *Die Methodik der generativen Kunst* [Text]. Medien Kunst Netz. http://www.medienkunstnetz.de/themen/generative_tools/generative_art/
- Kersting, G. (2008). Der Zufall – ein Helfer und kein Störenfried: Warum die Wissenschaft stochastische Modelle braucht. *Forschung Frankfurt : Wissenschaftsmagazin der Goethe-Universität*, 26(2), 20–24.
- Klütsch, C. (2007). *Computer Grafik: Ästhetische Experimente zwischen zwei Kulturen Die Anfänge der Computerkunst in den 1960er Jahren*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-39410-6>
- Kolditz, L. (2019). *Leukipp und der Zufall*. <https://leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2019/08/24-Kolditz.pdf>
- Küppers, B.-O. (2000). *Die Strukturwissenschaften als Bindeglied zwischen Natur- und Geisteswissenschaften*.
- Lund, S. (2019). *Modellierung adaptiver und dynamischer Systeme—Selbstorganisation, Künstliches Leben, Leben als Spiel*.
- Luque, S. (2009). The Stochastic Synthesis of Iannis Xenakis. *Leonardo Music Journal*, 19, 77–84.
- Molnar, V. (1975). *Toward Aesthetic Guidelines for Paintings with the Aid of a Computer on JSTOR*. <https://www.jstor.org/stable/1573236?seq=1>

- Nake, F. (1974). *Ästhetik als Informationsverarbeitung: Grundlagen und Anwendungen der Informatik im Bereich ästhetischer Produktion und Kritik*. Springer.
- Nake, F. (2001). *Vilém Flusser und Max Bense des Pixels angesichtig werdend: Eine Überlegung am Rande der Computergrafik*. Fotografie denken : über Vilém Flusser's Philosophie der Medienmoderne. http://openbibart.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=oba_0362857
- O'Hear, A. (1995). Art and Technology: An Old Tension. *Royal Institute of Philosophy Supplements*, 38, 143–158. <https://doi.org/10.1017/S1358246100007335>
- Ounsworth, M. (2014, August 13). Answer to „Algorithm to generate random 2D polygon“ [Post]. Stack Overflow. <https://stackoverflow.com/a/25276331>
- Rott, H. (2022). *Was ist Zufall? Kontingenz – Unvorhersagbarkeit – Koinzidenz*.
- Shiffman, D. (Regisseur). (2017, Dezember 11). *Coding Challenge #85: The Game of Life* [Video recording]. https://www.youtube.com/watch?v=FWSR_7kZuYg
- Shiffman, D. (2024). *The Nature of Code*. D. Shiffman.
- Snow, C. P. (1959). Two Cultures. *Science*, 130(3373), 419–419. <https://doi.org/10.1126/science.130.3373.419>
- Whipple, F. L. (1968). Stochastic Painting. *Leonardo*, 1(1), 81–83. <https://doi.org/10.2307/1571909>
- Wolfram, S. (1986). *Random Sequence Generation by Cellular Automata*.
- Wolfram, S. (2002). *Cellular automata and complexity: Collected papers* (Nachdr.). Westview Press.
- Xenakis, I. (1992). *Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition*. Pendragon Press.
- Zarezadeh, Z. (2017). Cellular Automaton-Based Pseudorandom Number Generator. *Complex Systems*, 26(4), 373–389. <https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.26.4.373>

Anhang

Quellcode: Inhalt der Datei abgabe.js

Quelle: Eigene Darstellung

```
//-----VERWENDETER FREMDCODE-----  
-----  
  
//Hintergrund: Basiert auf Blogeintrag mit dem Titel „The tips to make the  
Perlin noise creative coding works more interesting.“: https://www.deconbatch.com/2021/08/tips-perlin-parameter.html (Zugriffsdatum: 03. März 2025)  
  
//Game of Life: Basiert auf Video des YouTube-Kanals The Coding Train mit dem  
Titel „Coding Challenge #85: The Game of Life“: https://www.youtube.com/watch?v=FWSR\_7kZuYg (Zugriffsdatum: 03. März 2025)  
  
//Polygon-Generierung: Basiert auf der Antwort von Mike Ounsworth auf die  
Frage „Algorithm to generate random 2D polygon“: https://stackoverflow.com/questions/8997099/algorithm-to-generate-random-2d-polygon/25276331#25276331 (Zugriffsdatum: 03. März 2025)  
//-----GLOBALE VARIABLEN-----  
-----  
  
    //Hintergrund  
    const w = 1800;  
    const h = 1800;  
    const wDiv = 600;  
    const hDiv = 600;  
    const nStep = 0.005;  
  
    //Zellulärer Automat  
    let grid; //Raster  
    let cols; //Spaltenanzahl  
    let rows; //Zeilenanzahl  
    let resolution = 30; // Auflösung bestimmt die Höhe und Breite der einzelnen Raster-Elemente  
  
    let newCanvasX;  
    let newCanvasY;  
  
    let verkleinerung = 0.25;  
    let startzelleX;  
    let startzelleY;  
  
    //Farbwerte  
    //Hintergrund
```

```

    rot1 = 162;
    gruen1 = 39;
    blau1= 29;

    //Polygon-Farbe
    rot2 = 19;
    gruen2 = 71;
    blau2= 150;

    function setup(){ //Wird bei Initialisierung des Programms ausgeführt
        //Erzeugung eines Canvas mit Größe von w x h Pixeln
        cnv = createCanvas(w, h);

        //Zentrieren
        newCanvasX = (windowWidth - w)/2;
        newCanvasY = (windowHeight - h)/2;
        cnv.position(newCanvasX,newCanvasY);

        //Color-Mode für Hintergrund
        colorMode(HSB, 360, 0, 0, 0);

        //Spalten und Zeilenanzahl
        cols = w / resolution; //Spaltenanzahl ergibt sich aus der Breite des
        Canvas geteilt durch die Auflösung
        rows = h / resolution; //Zeilenanzahl ergibt sich aus der Höhe des
        Canvas geteilt durch die Auflösung

        //-----INITIALISIERUNG      DES
        ZELLULÄREN AUTOMATEN-----
        -----

        //SCHRITT 1: Erzeugung eines Gitters mit zufälligen Werten ("0" oder
        "1") in Form eines zweidimensionalen Arrays

        //Belegung der globalen Variable und Erzeugung eines Grids mit x * y
        Feldern
        grid = make2DArray(cols, rows); //Werte für Spalten- und Zeilenanzahl
        in Funktion eintragen

        //Verschachtelte for-Schleifen, um in jeden Feld des zu Beginn leeren
        Rasters Werte einzutragen
        for (let i = 0; i < cols; i++){ //Spalten durchlaufen
            for (let j = 0; j < rows; j++){ //Zeilen durchlaufen
                grid[i][j] = floor(random(2)); //In Feld an der Position (i, j) wird
                zu Beginn ein zufälliger Wert eingetragen ("0" oder "1")

```

```

    }
  }

}

function draw(){ //Wird bei jedem Frame neu ausgeführt
  //Hintergrundfarbe
  background(255); //hier: Weiß

  //-----HINTERGUND-----
  // Hintergrund
  colorMode(HSB, 360, 0, 0, 0);
  let cellW = w / wDiv;
  let cellH = h / hDiv;
  let baseHue = random(360);

  noStroke();

  for (let x = 0; x < w; x += cellW) {
    let nX = x * nStep;
    for (let y = 0; y < h; y += cellH) {
      let nY = y * nStep;

      let nP = noise(nX, nY) * 3;
      let nValH = noise(10 + nP, nX, nY);
      let nValS = noise(30 + nP, nX, nY);
      let nValB = noise(40 + nP, nX, nY);
      let nHue = (baseHue + nValH * 240) % 360;
      let nSat = 30 + 60 * nValS;
      let nBri = 20 + 80 * nValB;

      fill(nHue, nSat, nBri, 100);
      rect(x, y, cellW, cellH);
    }
  }

  //-----FARBFILTER-----

  colorFilter(rot1, gruen1, blau1);

  //Verkleinerung des Canvas des zellulären Automaten

```

```

startzelleX = (w - (w * verkleinerung)) / 2;
startzelleY = (h - (h * verkleinerung)) / 2;

translate(startzelleX, startzelleY);
scale(verkleinerung);

//-----ZELLULÄRER AUTOMAT: AUSFÜHRUNG EINZELNER ZELLEN-----
//SCHRITT 2: Rendering - Mechanismus, der über jeden Eintrag des Arrays
iteriert und das Raster in Abhängigkeit zu den Werten visualisiert

counterPunkte = 0;
punkte = new Array();

for (let i = 0; i < cols; i++){ //Spalten durchlaufen
  for (let j = 0; j < rows; j++){ //Zeilen durchlaufen
    //In jeder Zelle des Rasters wird ein Viereck mit folgenden Para-
    metern gezeichnet
    //Beite und Höhe des Vierecks werden durch "resolution" definiert
    //x: X-Koordinate
    let x = i * resolution;
    //y: Y-Koordinate
    let y = j * resolution;

    //Check, ob der eingetragene Wert bei "0" oder "1" liegt
    if(grid[i][j] == 1){

      // Mittelpunkte der zu erzeugenden Polynome in Array packen
      punkte[counterPunkte] = createVector(x, y);

      counterPunkte += 1;

    }
  }
}

//Polygone werden anhand Mittelpunkten und Auflösung erzeugt
createPolygons(punkte, resolution);
displayPolygons();

//-----ZELLULÄRER AUTOMAT: WERTZUWEISUNG NÄCHSTE GENERATION-----

```

```

//SCHRIITT 3: Computing - Definition von Regeln, die über die Zustände
der einzelnen Zellen der nächsten Generation bestimmen

//Wichtig: Zellen dürfen nicht sofort geändert werden, sondern erst,
wenn alle Zellen auf ihre Zustände geprüft wurden

//Hierfür gibt es zwei zweidimensionale Arrays: das aktuelle (alte Ge-
neration: n) und das neue (neu Generation: n + 1)

//Besser: Immer swappen jeden Frame, als neues in altes usw, um Spei-
cherplatz zu sparen

//Erzeugung des Arrays für die nächste Generation
let next = make2DArray(cols, rows);

//Durchlaufen jeder einzelnen Zelle, um die Werte anhand der Regeln
anzupassen
for (let i = 0; i < cols; i++){ //Spalten durchlaufen
  for (let j = 0; j < rows; j++){ //Zeilen durchlaufen

    //Aktuellen Status der Zelle auslesen ("0" oder "1")
    let state = grid[i][j];

    //Anzahl der lebenden Nachbarn zählen (Von allen 8 Nachbarn der
Zelle)
    let neighbors = countNeighbors(grid, i, j);

    //Anhand der Regeln, die auf den aktuellen Status angewendet wer-
den, wird der Status der Zelle in der nächsten Generation bestimmt
    //Regel 1
    if(state == 0 && neighbors == 3){
      next[i][j] = 1;
    }
    //Regel 2
    else if(state == 1 && (neighbors < 2 || neighbors > 3)){
      next[i][j] = 0;
    }
    //Regel 3
    else{
      next[i][j] = grid[i][j];
    }

  }
}

```

```

        //Ersetzen des bestehenden Arrays durch das neu erzeugte (Nächste Generation)
        grid = next;

        //Zelluläre Automaten vergrößern
        if(verkleinerung < 0.45){
            verkleinerung += 0.001;
        }

    }

    //-----ZELLULÄRER AUTOMAT (HILFSFUNKTIONEN)-----
    -----
    //Funktion zum Erzeugen eines leeren zweidimensionalen Arrays für Werte im Grid
    function make2DArray(cols, rows){
        //Erzeugung eines Arrays der X-Koordinaten (Spalten)
        let arr = new Array(cols);
        //Spalten durchlaufen
        for(let i = 0; i < arr.length; i++){
            //In jedem Element des Spalten-Arrays wird ein neues Array mit der Zeilenlänge erzeugt
            arr[i] = new Array(rows);
        }
        return arr; // Funktion gibt das erzeugte Gitter in Form eines zweidimensionalen Arrays zurück
    }

    //Funktion zum Zählen der benachbarten Zellen der Zelle an der Position (i, j)
    function countNeighbors(grid, x, y){ //Nimmt zweidimensionales Array, x-Koordinate und y-Koordinate entgegen
        let sum = 0;
        //Verschachtelte Schleife iteriert durch alle Nachbarn um die gegebene x-y-Koordinate herum
        for (let i = -1; i < 2; i++){
            for (let j = -1; j < 2; j++){

                //Abfangen der Ränder
                let col = (x + i + cols) % cols;
                let row = (y + j + rows) % rows;
            }
        }
    }

```

```

        //Addieren der Nachbarszellen (leere Zellen mit "0" als Wert ver-
        ändern die Summe nicht)
        sum += grid[col][row];
    }
}
//Die Zelle an sich darf nicht mitgezählt werden
sum -= grid[x][y];

//Anzahl der Nacharn zurückgeben
return sum;
}

//-----POLYGON-GENERIERUNG-----

var polygons = [];

//createPolygons muss ein Array an Infos von den zu erzeugenden Polygonen
übernehmen (Mittelpunkt (x,y) und Kreisradius)
function createPolygons(punkteArray, resolution){
    //Array zu Beginn leeren
    polygons = [];
    //Danach befüllen
    for (let i = 0; i < punkteArray.length; i++){
        polygons[i] = new Polygon(punkteArray[i], resolution);
    }
}

function displayPolygons(){
    for (let p of polygons){
        p.display(p.radius, p.maxRadius);
    }
}

class Polygon{
    //Erhält Mittelpunkt und Radius
    constructor(mittelpunkt, resolution){

        //Werte, die Polygon-Generierung benötigt
        this.maxRadius = (resolution/2) * 16;
        this.radius = random((resolution/2) * 0.5, this.maxRadius);
        this.irregularity = random(0.1, 0.9);
        this.spikiness = random(0.1, 0.9);
    }
}

```

```

this.numPoints = random(4, 20);
this.center = mittelpunkt;
this.points = [];

//Punkte der Polynome werden generiert
let polygonArray = this.generateRandomPolygon(this.center.x,
this.center.y, this.radius, this.irregularity, this.spikiness, this.numPoints);

for (let i = 0; i < polygonArray.length; i++){
  this.points[i] = polygonArray[i];
}

}

//Zeichnen des Polygons
display(radius, maxRadius){
  colorMode(RGB);
  let color = random(0, 10);

  let durchg; //Anzahl Durchgänge

  if(radius <= maxRadius/20){
    durchg = 90;
    blendMode(SCREEN);
  }
  else{
    durchg = 9;
    blendMode(SCREEN);
  }

  noFill();
  for (let i = 0; i < durchg; i++) {
    strokeWeight(i);
    stroke(rot2, gruen2, blau2 - i * 0.3, 100);
    beginShape();
    for(let p of this.points){
      vertex(p.x, p.y);
    }
    endShape(CLOSE);
  }
  blendMode(BLEND);

```



```

    }

    //Generierung von Eckpunkten des Polygons
    generateRandomPolygon(xCenter, yCenter, avg_radius, irregularity, spikiness, num_vertices){
        // Parameter check
        if(irregularity < 0 || irregularity > 1){
            console.log("Irregularity must be between 0 and 1.");
        }
        if(spikiness < 0 || spikiness > 1){
            console.log("Spikiness must be between 0 and 1.");
        }

        irregularity *= 2 * PI / num_vertices;
        spikiness *= avg_radius;
        let angle_steps = this.random_angle_steps(num_vertices, irregularity);

        // now generate the points
        let points = new Array();
        let angle = random(0, 2 * PI);

        for (let i = 0; i < num_vertices; i++) {
            let radius = this.clipper(randomGaussian(avg_radius, spikiness), 0, 2 * avg_radius);
            let punkt = createVector(xCenter + radius * cos(angle), yCenter + radius * sin(angle));
            append(points, punkt);
            angle += angle_steps[i];
        }

        return points;
    }

    random_angle_steps(steps, irregularity){
        //Generates the division of a circumference in random angles.
        let angles = new Array();
        let lower = (2 * PI / steps) - irregularity;
        let upper = (2 * PI / steps) + irregularity;
        let cumsum = 0;
        for (let i = 0; i < steps; i++) {

```

```

    let angle = random(lower, upper);
    append(angles, angle);
    cumsum += angle;
  }

  //normalize the steps so that point 0 and point n+1 are the same
  cumsum /= (2 * PI);
  for (let i = 0; i < steps; i++) {
    angles[i] /= cumsum;
  }

  return angles;
}

clipper(value, lower, upper){
  // Given an interval, values outside the interval are clipped to the
interval edges.

  return min(upper, max(value, lower));
}

//-----FARBFILTER-----
function colorFilter(rF, gF, bF) {
  loadPixels();
  for (let y = 0; y < height; y++) {
    for (let x = 0; x < width; x++) {
      let index = (x + y * width) * 4;

      let r = pixels[index + 0];
      let g = pixels[index + 1];
      let b = pixels[index + 2];
      let a = pixels[index + 3];

      //Gewichtung anhand Eingabeparameter
      let total = rF + gF + bF;
      total = total === 0 ? 1 : total; // Vermeidung von Division durch

      //Durchschnittsfarbanteil anhand Eingabeparameter

```

```

        let weighted = (r * rF + g * gF + b * bF) / total;

        pixels[index + 0] = weighted * (rF / 255);
        pixels[index + 1] = weighted * (gF / 255);
        pixels[index + 2] = weighted * (bF / 255);
        pixels[index + 3] = 255; //volle Deckkraft
    }
}
updatePixels();
}

//-----INTERAKTIVE FUNKTIONEN-----
function mouseClicked() {
    let dt = new Date();
    noiseSeed(dt.getTime());
    redraw();
}

function keyPressed(){
    if(key == "s"){
        saveCanvas('Img', 'png');
    }
}

```

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

Der zelluläre Automat als Beispiel für den (Pseudo-)Zufall in der generativen Kunst

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Datum

Unterschrift