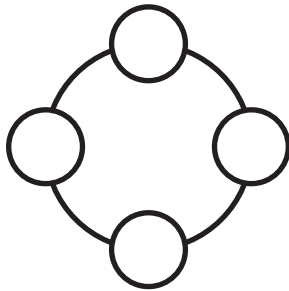


AUTOMATA UNIVERSALIS

If we knew everything could we predict everything?



Bachelorarbeit / Dustin Sherman

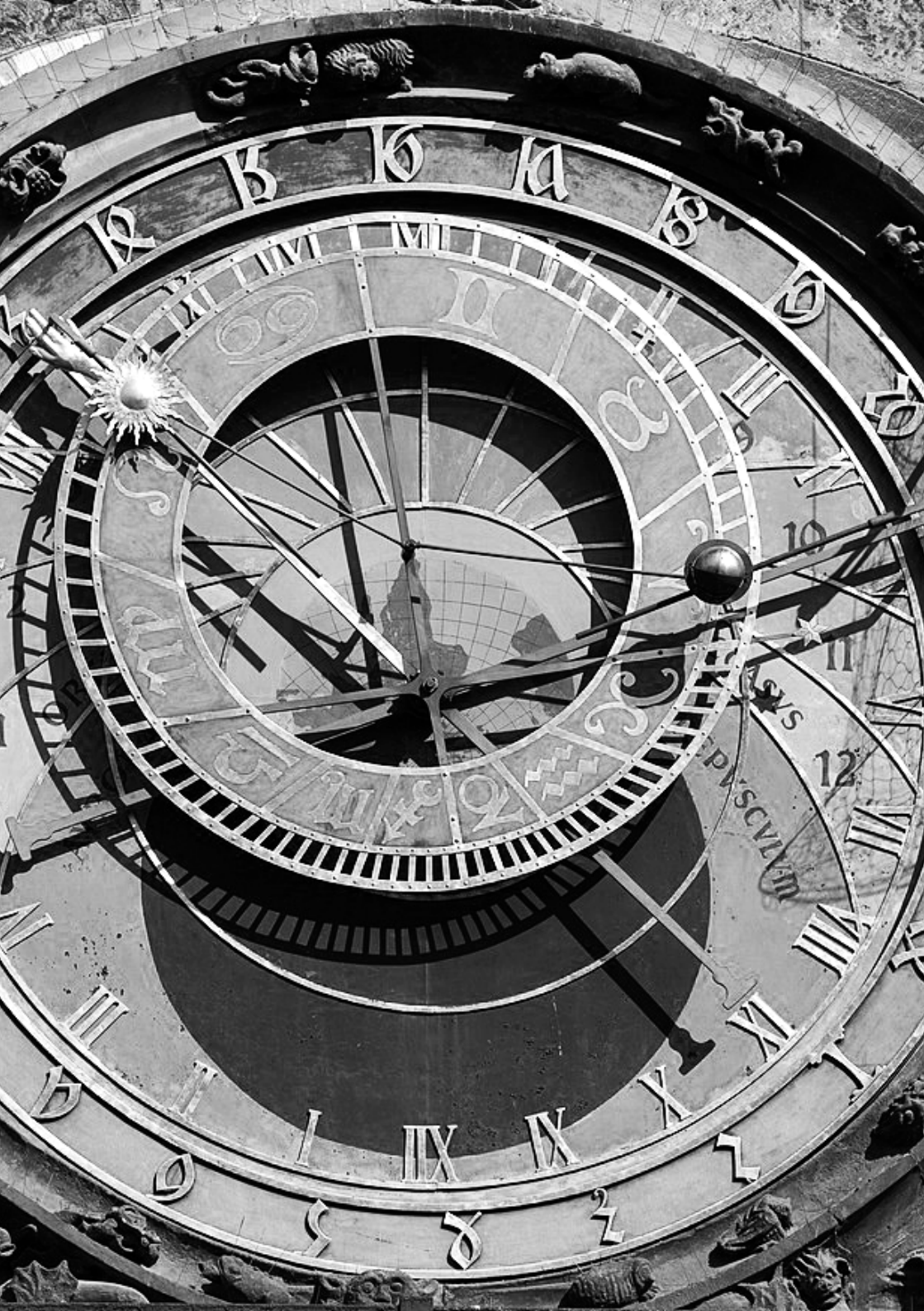
Digitale Medien / HfK Bremen / 2022

Prüfer

Ralf Baecker / Dennis Paul

Inhaltsverzeichnis

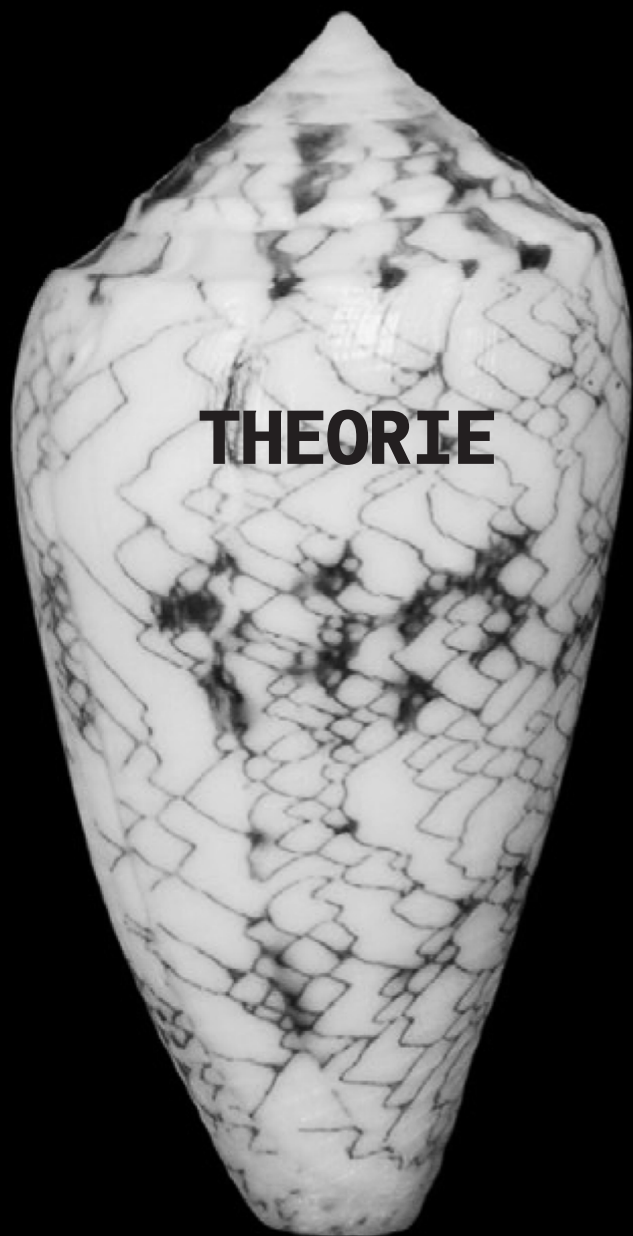
Auszug	3
Theorie	
These	5
Laplacescher Dämon	6
N-Körper-Problem	9
Chaostheorie	13
Zellulärautomaten	17
Digitale Physik	22
Projekt	
Konzept	27
Simulation	29
Programmierung	36
Objekt	38
Technik	40
Schaltplan	42
Quellen	44



Auszug

Automata Universalis ist eine Partikelsimulation, welche sich anhand von zu Beginn festgelegten Bedingungen deterministisch entwickelt. Jeder Nutzer wählt seine persönliche Startkonfiguration und bekommt im Anschluss eine einzigartige Simulation erstellt. Diese besteht aus einem zweidimensionalen Feld, welches an den Kanten verhaftet ist und aus Partikeln, welche Gravitation aufeinander ausüben, einer Fluid-Partikel-Simulation, Zellulärautomaten und Partikelschweifen.

Inspiration sind reale kosmische Ereignisse und Phänomene, Zellulärautomaten wie 'LIFE' oder 'Rule 110' und Partikelsimulationen wie die 'N-Body-Simulation'. Konzeptionell beschäftigt sich die Arbeit mit der Frage ob das Universum deterministisch ist und man alle Ereignisse zu einem beliebigem Zeitpunkt voraussagen bzw. simulieren kann, sofern man die Gegebenheiten zum Zeitpunkt 0 kennt.



These

Kann ich alles voraussagen, wenn ich alles weiß? Mit den Mitteln unserer aktuellen Zeit ist klar, dass diese Frage nicht zu beantworten ist. Betrachtet man den Kosmos diesbezüglich, besagt der aktuelle Stand der Wissenschaft, dass es sich um ein nichtlineares dynamisches System handelt. Dies bedeutet unter anderem, dass seine Gesetze der Chaostheorie unterliegen und somit nicht berechenbar sind. Geht man die Frage allerdings rein theoretisch und spekulativ an, lassen sich interessante Erkenntnisse sowie weitere Fragestellungen ableiten. Wenn das Universum deterministisch ist, ist es dann in seinen Grundzügen digital? Wie sieht eine Rechenmaschine die das Universum kalkuliert aus? Ist sie so groß wie das Universum selbst und ist damit das Universum oder befindet sie sich an einem komplett anderen Ort? Handelt es sich um ein reversibles System, kann ich also vom Ende aus auch alles davor bestimmen? Und wenn wir Teil dieses Systems sind, haben wir dann einen freien Willen?

Laplacescher Dämon

Schon im 17. Jahrhundert glaubte der Chemiker Robert Boyle, dass es sich beim Universum um eine riesige göttliche Uhr handelt. Diese Uhr, einmal aufgebaut und eingestellt, lief dann bis zu ihrem Ende deterministisch ab. Wie ein solches System oder Wesen System aussehen könnte, welches jede Masse und jeden Impuls eines jeden Objekts im Universum vorbestimmt bzw. kennt, beschäftigte auch den französische Mathematiker und Astronom Pierre-Simon Laplace und entwickelte das Konzept des Weltgeistes.

„Wir müssen also den gegenwärtigen Zustand des Universums als Folge eines früheren Zustandes ansehen und als Ursache des Zustandes, der danach kommt. Eine Intelligenz, die in einem gegebenen Augenblick alle Kräfte kennt, mit denen die Welt begabt ist, und die gegenwärtige Lage der Gebilde, die sie zusammensetzen, und die überdies umfassend genug wäre, diese Kenntnisse der Analyse zu unterwerfen, würde in der gleichen Formel die Bewegungen der größten Himmelskörper und die des leichtesten Atoms einbegreifen. Nichts wäre für sie ungewiss, Zukunft und Vergangenheit lägen klar vor ihren Augen.“

1814 schrieb er diese Worte als Vorwort zu seinem Werk 'Philosophischer Essay über die Wahrscheinlichkeit' und beschreibt damit im übertragenen Sinne das Konzept der digitalen Physik.

Nach heutigem Kenntnisstand sprechen gegen das Konzept des Laplaceschen Dämons vier physikalische Erkenntnisse. Die Relativitätstheorie, wonach sich nichts schneller als Licht bewegen kann und somit der Kosmos in seiner Gänze nicht erfasst werden kann, die Unschärferelation auf Quantenebene, laut welcher man zwei komplementäre Eigenschaften eines Teilchens, wie zum Beispiel Ort und Impuls nicht zum gleichen Zeitpunkt bestimmen kann und schließlich das Drei- bzw. N-Körper-Problem und die Chaostheorie auf welche im Folgenden genauer eingegangen wird.

N-Körper-Problem

1889 stellte der schwedische König anlässlich seines 60. Geburtstages einen Preis für die Lösung von vier mathematischen Probleme aus, eines davon war das N-Körper-Problem. Isaac Newton hatte ungefähr 200 Jahre zuvor mit dem Gravitationsgesetz die Grundlage für die Berechnung der Anziehungskraft zwischen zwei Körpern gelegt. Es war jedoch nach wie vor unmöglich die Gravitation zwischen 3 oder mehr Körpern zu berechnen. Wirken zwei Masseobjekte wie zum Beispiel die Erde und die Sonne Gravitation aufeinander aus, so lässt sich ihre weitere Bewegungsbahn einfach berechnen. Bei 3 oder mehr Körpern verursachen die gegenseitigen Wechselwirkungen ein so komplexes Verhalten, dass sich die Entwicklung über lange Zeiträume nicht mehr mathematisch beschreiben lässt. Das System wird chaotisch und unberechenbar. Voraussagen lässt sich die Entwicklung jedoch schon, allerdings muss das System simuliert werden, was wiederum langfristige Voraussagen schwer macht und vor allem eine exakte Simulation erfordert. Doch auch dabei macht die Chaostheorie einen Strich durch die Rechnung und eine exakte Voraussage unmöglich, dazu später mehr.

Auf den Preis des schwedischen Königs bewarb sich schließlich der französische Mathematiker Henri Poincaré und seine eingereichte Lösung wurde anfangs

auch akzeptiert. Im Zuge des Wettbewerbs und Poincarés Einreichung gründet der Schwede Magnus Gösta Mittag-Leffler die Mathematikzeitschrift *Acta Mathematica* und gibt sie inklusive Poincarés Arbeit in den Druck und Versand. Als ein Redakteur allerdings von Poincaré einige Punkte exakter erläutert haben will, stellt dieser fest, dass seine aufgestellten Behauptungen falsch sind. Bestimmt er die Position eines Körpers exakter als in seiner ersten Kalkulation, so ändert sich die Endposition des Körpers komplett. Ohne es zu wissen begründet Poincaré somit die Chaostheorie und schrieb seine Abhandlung so um, dass er vermeintlich bewies, dass es eine Lösung nicht geben kann, was sich jedoch später auch als falsch erwies. Schließlich musste Poincaré für den Rückruf der bereits versendeten Zeitschriften selber finanziell aufkommen. Kosten die das Preisgeld des schwedischen Königs deutlich überstieg.

Im Jahrhundert zuvor hatte sich auch der französische Mathematiker Joseph Louis-Lagrange mit dem Problem befasst, behandelte jedoch das sogenannte eingeschränkte Dreikörperproblem. Hierbei ist die Masse eines der drei Körper so gering, dass seine Anziehungskraft auf die beiden anderen Körper als irrelevant angesehen werden kann. Auch wenn dieser Ansatz Lösung des Dreikörperproblems bietet, ergab sich trotzdem eine praktische Anwendung die bis heute Verwendung hat, die

Lagrange-Punkte. Diese fünf Punkte in einem Zwei-Körper-System liegen so, dass ein massearmer Körper seine Position relativ zu den beiden anderen Körpern für sehr lange Zeit halten kann. Diesen Umstand machte man sich bei der Positionierung des James-Webb-Teleskops 2021 zu Nutze und manövrierte es zum 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernten Lagrange-Punkt L2.

Anfang des 20. Jahrhunderts fand der finnische Mathematiker Karl Sundman eine analytische Lösung für das Dreikörperproblem in Form einer konvergenten Reihe. Dabei ließ er jedoch bewusst das Problem weg, was passiert wenn zwei Himmelskörper kollidieren und auch ansonsten ist Sundmans Lösung für astronomische Voraussagen unbrauchbar. Um eine ansatzweise anwendbare Voraussage zu treffen, müsste man eine unvorstellbare Zahl an Termen berechnen - eine 1 auf die 8 Millionen Nullen folgen.

2021 veröffentlichten der Professor Hagai Perets und der Student Barry Ginat vom Israel Institute of Technology ihre Arbeit zum Dreikörperproblem. Statt eine exakte Lösung zu suchen, kalkulierten sie die Wahrscheinlichkeit für alle Szenarien mithilfe des Wegs des Betrunkenen, einem Modell aus der Wahrscheinlichkeitstheorie.



Chaostheorie

Das Dreikörperproblem zeigt, dass sich dynamische Systeme entweder nur eingeschränkt oder gar nicht mathematisch beschreiben lassen, was bedeutet, dass man nicht im Stande ist, den Zustand eines Systems zu einem beliebigen Zeitpunkt zu bestimmen. Wenn überhaupt lassen sich diese Systeme simulieren um eine grobe Voraussage zu machen, aber selbst dann können Realität und Simulation gänzlich verschieden sein. Dieses Phänomen lässt sich beobachten wenn wir nichtlineare dynamische Systeme betrachten und diese am Computer simulieren. Lineare Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass Ursache und Wirkung proportional zueinander laufen, beispielsweise ein reibungsfreies Pendel. Im Gegensatz dazu folgen nichtlineare dynamische Systeme keinem erkennbaren Muster, verhalten sich dementsprechend meist chaotisch.

Physiker und Mathematiker waren lange Zeit davon überzeugt, dass sich der komplette Kosmos mithilfe von Formeln und Berechnungen erklären und dementsprechend auch voraussagen lassen könnte. Etwaige Fehler oder Diskrepanzen wurden dabei, ob bewusst oder unbewusst, oft als Nebenrauschen abgetan. In diesem Glauben versuchte der Mathematiker und Meteorologe Edward Lorenz mithilfe der damals noch relativ jungen Computertechnik ein einfaches Wettermodell zu simulieren. Als er

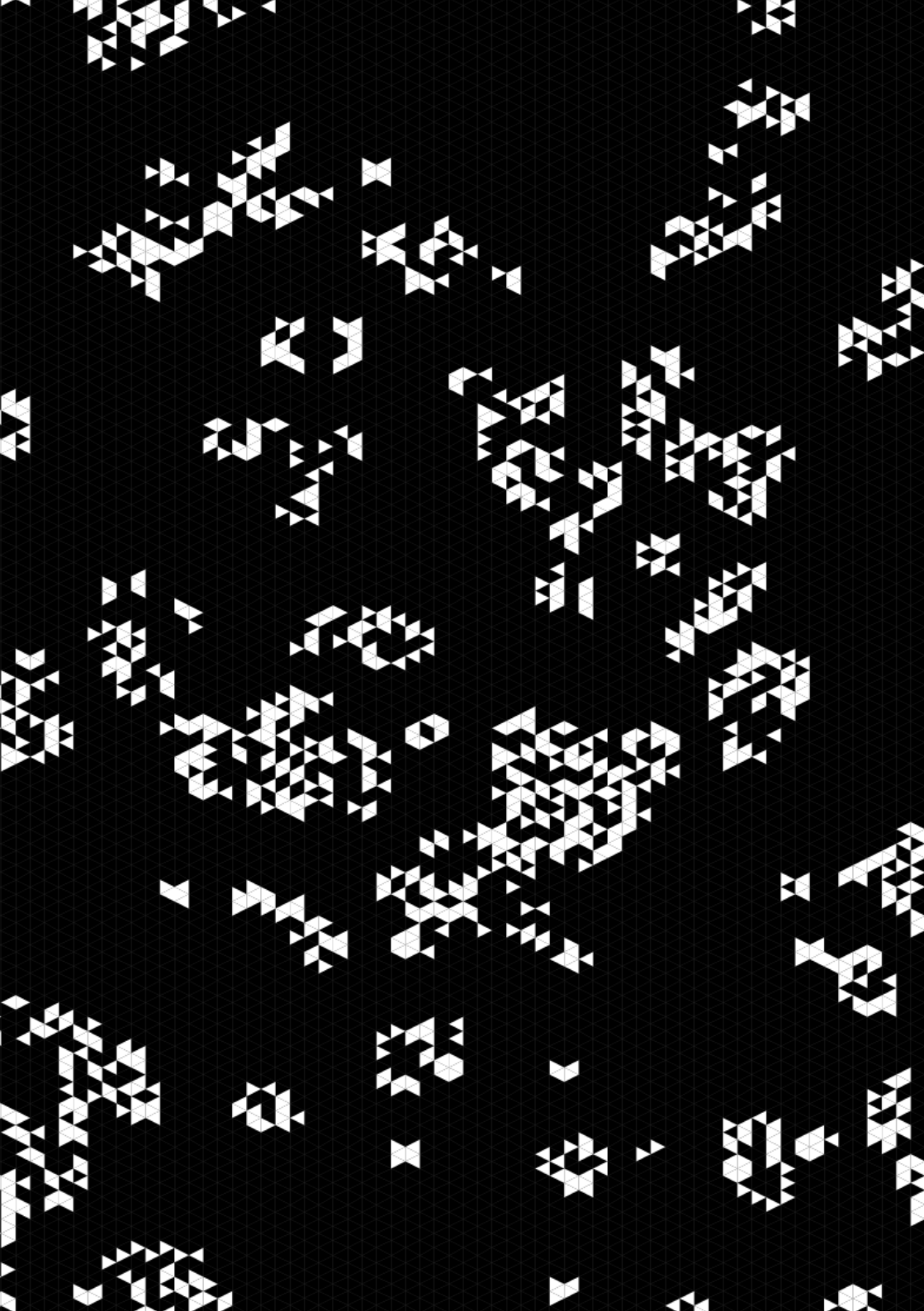
anschließend dieselbe Simulation noch mal startete und dieses mal allerdings um Rechenzeit zu sparen, statt der vom Computer vorgegebenen sechs Nachkommastellen nur drei verwendete, stellte er fest, dass sich die Ergebnisse der Berechnung mit zunehmender Dauer immer stärker voneinander unterschieden bis sie schließlich nichts mehr gemein hatten. Da es sich hierbei nicht um einen Computerfehler oder ein zufälliges Phänomen handelte, untersuchte Lorenz seine Ergebnisse und stellte fest, dass sich bestimmte deterministisch erscheinende Systeme, bei kleinsten Veränderungen komplett unterschiedlich entwickeln. Fasziniert von dem Effekt widmete sich Lorenz der Chaosforschung und etablierte Begriffe wie den Schmetterlingseffekt oder den nach ihm benannten Lorenz-Attraktor. Verschiedene Kosmologen glauben heute dass das Universum komplett anders aussehen könnte, wäre auch nur ein Energiequant des Urknalls, also die kleinste messbare Größe, anders gewesen.

In seinem Buch 'The Essence of Chaos' beschreibt Lorenz die Chaostheorie sehr treffend, indem er die Variationen von nichtlinearen dynamischen Systemen wie zum Beispiel einer Welle im Meer oder einer Gerölllawine, als 'are not random but look random' beschreibt. Die Ambivalenz der Aussage bzw. der Chaostheorie im Allgemeinen zeichnet sich durch die Behauptung aus, dass Ereignisse, die völlig zufällig wirken, durchaus einem Muster folgen,

dieses Muster sich aber nicht mithilfe mathematischer Mittel berechnen bzw. voraussagen lasse. Die Krux liegt dabei im Unterschied zwischen der digitalen und der analogen Welt wie Edward Lorenz auch schon bei seinen Wettersimulationen feststellen musste. Computer rechnen immer mit einer begrenzten Zahl an Nachkommastellen, wodurch Rundungsfehler entstehen. Für alltägliche Berechnungen oder nicht hochpräzise Voraussagen in die nahe Zukunft mag das ausreichen, aber Vorhersagen in empfindlichen Systemen oder über eine hohe Zahl an Iterationen hinweg sind schlichtweg unbrauchbar. Der Chaosphysiker James Crutchfield meinte dazu:

“Da wir nur mit endlicher Genauigkeit messen können, sind die Messungen einfach niemals gut genug. Das Chaos packt sie und wirft sie uns ins Gesicht.”

Diese endliche Genauigkeit, von der Crutchfield spricht, spiegelt den generellen Widerspruch wieder, eine analoge Welt, also eine Welt, deren kleinste Teile wir eventuell gar nicht kennen, mithilfe von digitalen bzw. mathematischen Mitteln voraussagen oder berechnen zu wollen.



Zellulärautomaten

Ein Beispiel für Systeme welche unvorhersehbares oder chaotisches Verhalten produzieren und dabei auf logischen Regeln basieren, sind sogenannte Zellulärautomaten. Grundlegend basiert ein Zellulärautomat auf einem ein- bis mehr-dimensionalem Spielfeld, welches in gleich große und regelmäßig platzierte Zellen aufgeteilt ist. Das Spielfeld bzw. der Zellraum kann dabei klare Grenzen haben, an den Kanten verhaftet (Torus) oder an den Kanten gespiegelt sein. Jede Zelle kann verschieden viele Zustände inne haben, mindestens jedoch zwei, wobei man häufig von lebenden und toten Zellen spricht. Mit jedem Zeitschritt betrachtet jede Zelle eine im Regelwerk festgelegte Nachbarschaft und ändert aufgrund des Zustands der Nachbarzellen ihren eigenen Zustand zum kommenden Zeitschritt. Dieses von seinen Grundzügen sehr simple Prinzip, welches sich auch mit Stift und Papier nachspielen lässt, kann zu höchst komplexen und unerwarteten Entwicklungen führen.

Einer der schon früh die faszinierende Natur dieser Automaten erkannte war der Mathematiker John von Neumann. Von Neumann war davon überzeugt, dass der Aufbau unserer Welt auf logischen Prinzipien und Regeln basieren und insbesondere auch Entstehung und Verhalten von Leben diesen Regeln folgen müsse. Jeder Organismus betrachtet dabei seine Umgebung, sammelt Informationen und entwickelt sich und handelt

im nächsten Schritt dementsprechend. Anhand dieser Annahme entwickelte er zusammen mit dem Mathematiker Stanislaw Ulam einen Zellulären Automaten welcher zur maschinellen Selbstreplikation fähig ist. Ungefähr zwanzig Jahre nach von Neumanns Tod schreibt der Physiker Freeman Dyson in seinem Buch "The Disturbing Universe":

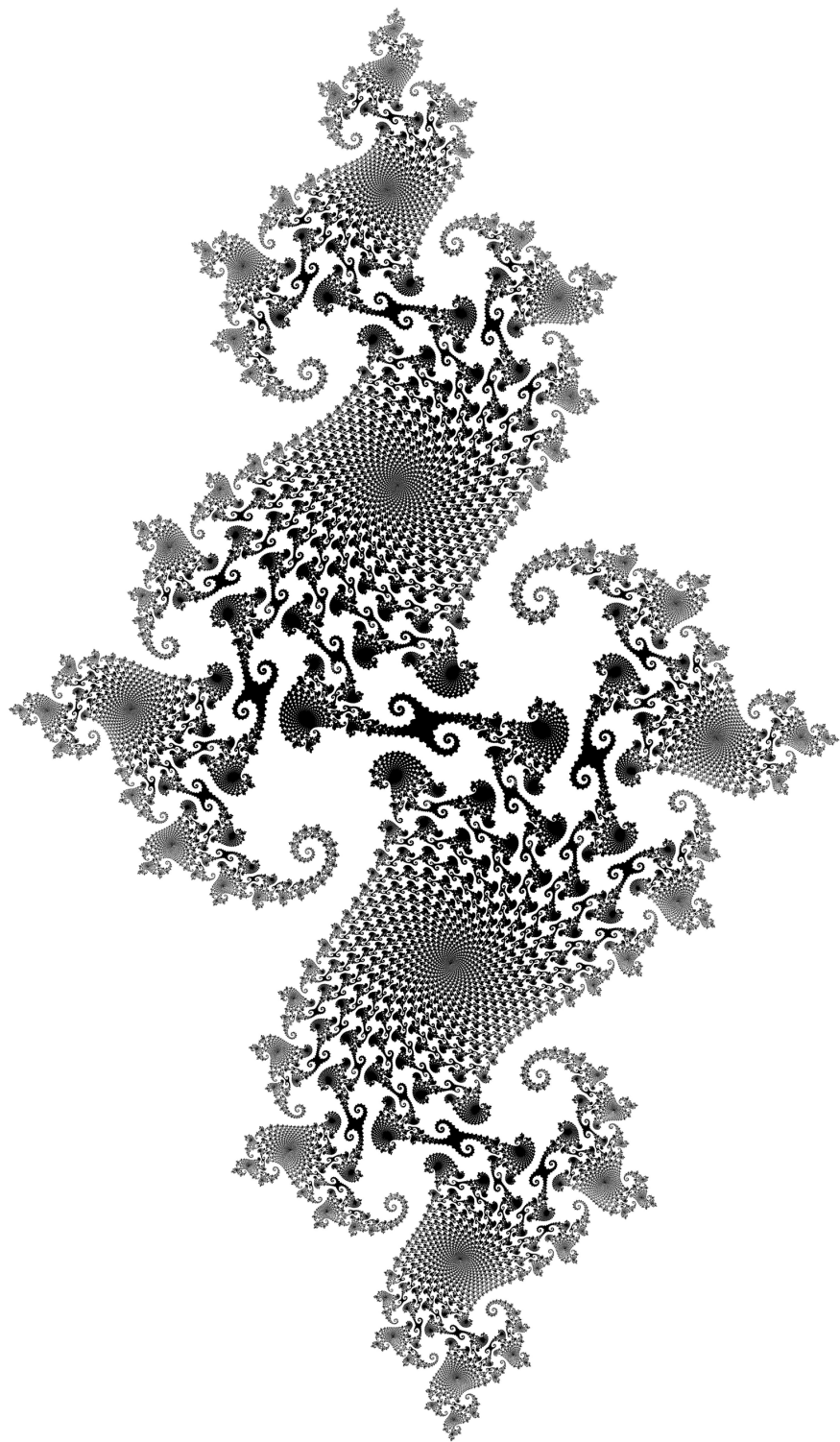
"Soweit wir wissen, ist der elementare Aufbau von Mikroorganismen, die größer als ein Virus sind, exakt so, wie in von Neumanns Vorstellungen."

Aufbauend auf von Neumanns Theorien entwickelte der Mathematiker John Conway 1970 den wahrscheinlich bis heute bekanntesten Zellulärautomaten 'LIFE'. In diesem zweidimensionalen Automaten kann eine Zelle entweder lebendig oder tot sein und betrachtet alle acht umgebenden Zellen, um ihren neuen Zustand zu bestimmen. Leben eine oder keine Zellen in der Nachbarschaft, stirbt die Zelle an Vereinsamung. Leben vier oder mehr Zellen stirbt die Zelle an Überbevölkerung. Sind genau drei Zellen am Leben, wird eine tote Zelle lebendig und leben zwei Zellen in der Nachbarschaft bleibt der Zustand der Zelle unverändert. Diese grundsätzlich sehr einfachen Regeln erzeugen ein höchst komplexes Verhalten und LIFE löste nach seiner Veröffentlichung eine regelrechte Euphorie unter Mathematikern aus, nach Mustern und Kombinationen zu suchen. Diese

Begeisterung ging soweit, dass zwischen 1971 und 1973 vierteljährlich die Zeitschrift 'Lifeline' erschien, welche ihre Leser über jegliche Neuigkeiten von 'LIFE' informierte. Über die Jahre wurden verschiedenste Konstellationen entdeckt, bis hin zu einer Simulation eines funktionierenden Computers, der mithilfe der sogenannten Gleiterkanone bitbasierte Nachrichten versenden kann. 'LIFE' gilt bis heute hin als unberechenbar und der Endzustand bzw. Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt lässt sich nur durch Simulieren ermitteln.

Auch in der Neuzeit gab und gibt es Wissenschaftler die in Zellulärautomaten die Lösung vieler Probleme und Parallelen zwischen realen Phänomenen und Zellulärautomaten sehen. Einer der ohne Frage die Macht von Zellulärautomaten anpreist ist der Brite Stephen Wolfram. Laut seinem Buch 'A New Kind of Science' sieht er Überschneidungen zur Mathematik, Physik, Biologie, Sozialwissenschaft, Computerwissenschaft, Philosophie, Kunst, Technologie, Künstlicher Intelligenz, Künstlichem Leben, Katastrophentheorie, Chaostheorie, Komplexitätstheorie, dynamische Systemen, Evolution, experimenteller Mathematik, Fraktalgeometrie, Systemtheorie, Nanotechnologie, nichtlinearer Dynamik, selbstorganisierende Systeme und statistischer Mechanik. Ob Zellulärautomaten wirklich die Heilsbringer in all diesen Themengebieten sein werden, bleibt abzuwarten, jedoch kann man durchaus viele Parallelen zwischen physikalischen,

chemischen, biologischen und soziologischen Vorgängen und Automaten ausmachen. So lassen sich mit dem HPP-Gas-Modell Gase und Flüssigkeiten simulieren, mit der Misch-Masch-Maschine oszillierende Reaktionen nachbauen oder mit dem Planet WATOR Automat ein Jäger-Beute-Schema durchspielen. Ob, wie der Informatiker Edward Fredkin vermutet, das komplette Universum ein einziger Zellulärautomat ist. Parallelen zwischen Zellulärautomaten und wirklichen Phänomenen sind jedoch nicht von der Hand zu weisen.



Digitale Physik

Der Begriff der digitalen Physik existiert seit Beginn der 1970er und besagt, dass das Universum deterministisch und durch Information beschreibbar ist. Einer der ersten die sich mit dieser Theorie auseinander setzten, war Konrad Zuse, der seine Ideen zu einer digitalen Physik in seinem Buch 'Rechnender Raum' niederschrieb. Dass er mit seinen Theorien 1969 größtenteils für verrückt erklärt wurde, zeigt sich schon in der Einleitung seines Buches in welcher Zuse schreibt, wie schwer es gelungen sei, einen Verleger für sein Buch zu finden. 'Rechnender Raum' befasst sich unter anderem mit Zellulärautomaten als Basis der Physik und führt den Begriff des Digitalteilchens ein. Dieses hypothetische Partikel bewegt sich durch den Raum und erzeugt nach einer Kollision mit einem weiteren Digitalteilchen ein neues Digitalteilchen, ein Aspekt der diese Arbeit inspirierte. Dass viele der im Buch verfassten Theorien eben nur Theorien sind und im Widerspruch zum aktuellen Stand der Wissenschaft stehen ist Zuse dabei bewusst. So schreibt er zum Beispiel, dass ein Zellulärautomat als Basis des Kosmos nicht vereinbar mit der aktuellen Physik sei, da Gitterstrukturen gegen das Prinzip der Isotropie, also der Unabhängigkeit der Richtung und der gekrümmten Räume sprächen.

Nachdem der 'Rechnende Raum' lange keine Beachtung fand, griff Edward Fredkin um 1980 Zuses Theorien wieder auf und lud ihn zu einer Diskussion ins MIT ein. Fredkin arbeitet unter anderem an reversibler Computertechnik und ist heutzutage, neben seinen Beiträgen zur digitalen Physik bzw. digitalen Philosophie, vor allem für das Fredkin-Gate bekannt. Dass sich unsere analoge Umwelt nur bedingt mithilfe von digitalen Mitteln beschreiben lässt haben wir bereits mit der Chaostheorie bewiesen. Ob unsere Umwelt dabei komplett analog ist, scheint spätestens seit Entdeckung der Quantenmechanik die eigentlich Frage zu sein. So sind dynamische Variablen wie zum Beispiel die Energie eines Elektrons in Stufen aufgeteilt bzw. gequantelt, dementsprechend digital und nicht kontinuierlich. Die Quantenmechanik bewegt sich folglich zwischen der analogen und digitalen Welt und ist nach heutigem Kenntnisstand hybrid. Auch die Tatsache, dass wir in der Natur keine minimalste Einteilung erkennen können, könnte auch einfach bedeuten, dass wir diese mit unseren aktuellen Mitteln einfach noch nicht gefunden haben. Schließlich wirken moderne Displays dank immer höheren Auflösungen und Frameraten für das bloße Auge auch wie ein kontinuierlicher Prozess. Auch wenn das Konzept der digitalen Physik nach wie vor im Widerspruch mit verschiedenen Postulaten der Quantenphysik stehen, scheinen immer mehr Wissenschaftler wie Seth Lloyd, der oben bereits genannte Stephen Wolfram und der Nobelpreisträger Gerard 't Hooft wenigstens überzeugt oder angetan von dem Konzept der digitalen Physik.

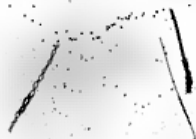
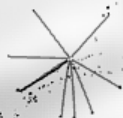
Oder in Edward Fredkin Worten:

“In the days that I would call ‘BM’, before the Matrix [...] no one would listen to me and my ideas, but since computers, cellphones, iPads and the matrix, this idea comes away from the lunatic phrase.”



Kimo See
68

PROJEKT



Konzept

Das Projekt soll die Thesen des Laplacschen Dämons und der digitalen Physik aufgreifen und entsprechend visualisieren. So entstand die Idee einer Partikelsimulation die streng deterministisch, also bei gleicher Startbedingung das immer gleiche Ende produziert, was bedeutet dass die Verwendung von Zufallswerten ausgeschlossen werden musste. Um zu verdeutlichen, dass unterschiedliche Startbedingungen unterschiedliche Ergebnisse produzieren, kann jeder Benutzer eigene Startbedingungen wählen und somit sein "eigenes" Universum bekommen. Zudem soll der Benutzer ein haptisches Erlebnis haben, weshalb zur digitalen Simulation ein physisches Objekt gestaltet wurde. Der Nutzer soll dabei selber Hand anlegen und die Startbedingungen auf einer Karte selber per Stift festlegen, diese Karte anschließend in einem entsprechenden Lesegerät einlesen und zum Schluss einen Ausdruck auf welchem eine URL zur persönlichen Simulation abgedruckt ist erhalten. Entstanden sind auf Grundlage dieser Überlegungen Karten, auf denen 28 Kreisen sind, welche je nach Wahl des Benutzers weiß bleiben oder schwarz ausgefüllt werden. Ein weißer Kreis repräsentiert ein positives Partikel und ein schwarzer Kreis entsprechend ein negatives Partikel. Die Zahl 28 ergab sich durch die symmetrische Anordnung der Kreise und ergibt $2 \text{ hoch } 28$ also 268.435.456 unterschiedliche Möglichkeiten die Startbedingungen zu wählen und entsprechend genauso viele unterschiedliche

Universen. Um diese Universen zu simulieren und für den Nutzer betrachtbar zu machen, wurde die Software zum Simulieren und Darstellen über eine Website realisiert. Eine Herausforderung dabei war es die Simulationen einerseits in ihrer Komplexität aus Performance-Gründen begrenzt zu halten, aber auch zu schauen, dass sie nicht zu schlicht werden und andererseits dafür zu sorgen, dass sich die einzelnen Universen sichtbar voneinander unterscheiden.

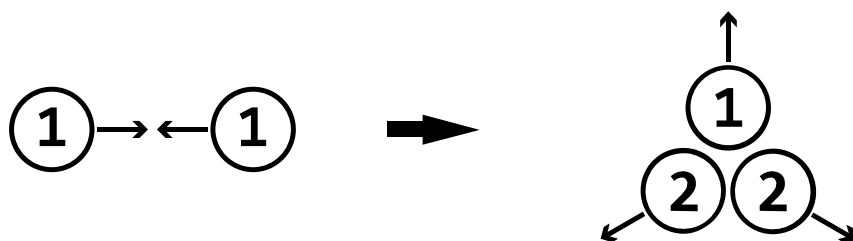
Simulation

Die Simulation ist rein digitaler Natur und wird mit einem Computerprogramm auf einem Rechner berechnet. Grundlage ist ein zwei-dimensionales Spielfeld bei welchem die Außenkanten jeweils miteinander verhaftet sind, wodurch eine "unendliche" Fläche entsteht. Die Basis der Simulation besteht aus Partikeln, welche wiederum zwei-dimensionale Zellulärautomaten erzeugen, ein fluides Teilchensystem beeinflussen und Partikelspuren auslösen. Das fluide Teilchensystem wiederum beeinflusst die Farbigkeit des Hintergrundes, sowie Parameter für die Zellularautomaten.

Partikel

Jede Simulation beginnt mit 28 Partikeln die je nach Nutzerentscheidung den Status 1 oder -1 haben. Diese Partikel haben eine Masse und üben entsprechend dieser aufeinander Gravitation aus. Gleiche Partikel verbinden sich, was wiederum bis zu einem Grenzwert ihre Masse erhöht, woraufhin die Partikel reagieren und neue Partikel entstehen. Nach einer Reaktion erhöht jedes zweite Partikel seinen Status und erzeugt dabei ein weiteres Partikel mit demselben Status, alle restlichen Partikel behalten ihren Status. Zwei Partikel mit dem Status -1 reagieren entsprechend zu einem Partikel mit dem Status -1 und zwei Partikeln mit dem Status -2. Der maximale Status ist 12 bzw. -12, Partikel mit diesem Status können nicht mehr miteinander reagieren.

Neben ihrem Status besitzen Partikel zwei weitere Parameter, Verwandtschaftsgrad und Polarität. Der Verwandtschaftsgrad bestimmt wie weit entfernt das aktuelle Partikel zu einem Ursprungspartikel ist. Folglich haben alle Startpartikel den Verwandtschaftsgrad 0. Jedes aus einer Reaktion neu erzeugte Partikel bekommt den Verwandtschaftsgrad seines vorigen Partikels + 1. Die Polarität ist entsprechend des Anfangsstatus entgegengesetzt des Startstatus und kann entweder 1 oder -1 sein. Zum Beispiel hat ein Partikel mit dem Status -1 die Polarität 1. Nach jeder Reaktion wird die Polarität jedes Reaktionspartikel neu bestimmt. Wenn der Status der Reaktion positiv ist, hat das erste Partikel die Polarität -1, das zweite Teilchen 1 und entsprechend abwechselnd so weiter. Neue Partikel, die bei dieser Reaktion entstehen, haben die entgegengesetzte Polarität ihres Status.



Partikelreaktionen lösen entsprechend ihres Status und Verwandtschaftsgrad Ereignisse aus die das fluide Teilchensystem beeinflussen, Zellulärautomate erzeugen oder Partikelspuren auslösen.

Partikelreaktionen

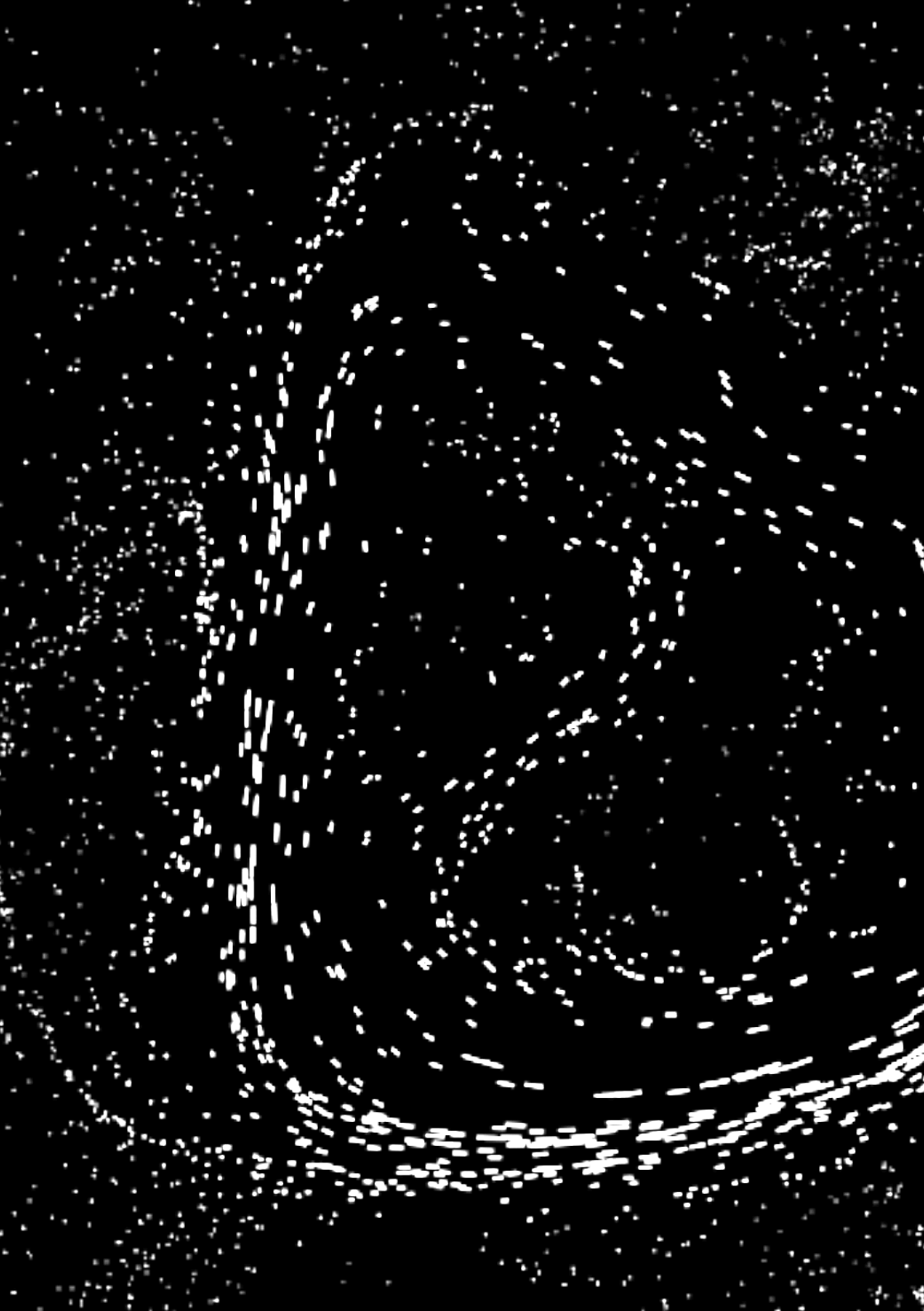
Status der Reaktion	1	-1	2	-2	3	-3	4	-4	5	-5	6	-6	7	-7	8	-8	9	-9	10	-10	11	-11
0	fm	fm	fm	fm	fm	fm	fe	fe	ca	lt	fm	fm	fe	fe	fe	fe	ca	lt			fe	fe
1			fm	fm	fm	fm	fm	fm	ca	lt			ca	lt	ca	lt	ca	lt	fe	fe	ca	lt
2					fm	fm	fm	fm	ca	lt							ca	lt	ca	lt	ca	lt
3							fm	fm	ca	lt							fm	fm	ca	lt	ca	lt
4									fm	fm	fm	fm							ca	lt		
5									fe	fe	ca	lt	ca	lt	ca	lt	fm	fm				
6													fe	fe	ca	lt	ca	lt	ca	lt		
7																	ca	lt	ca	lt	ca	lt
8																	ca	lt	fe	fe	ca	lt
9																					fe	fe

fm - Fluid Movement
 fe - Fluid Explosion
 ca - Cellular Automata
 lt - Line Trails

Fluide Teilchensimulation

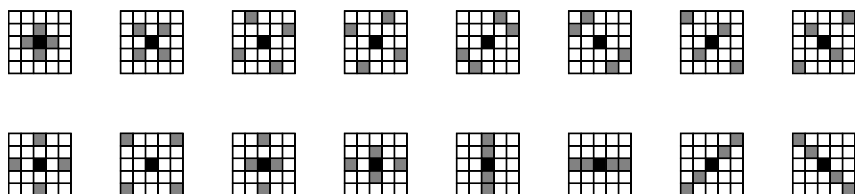
Als Grundlage für die fluide Teilchensimulation dient eine Abwandlung einer Simulation von Jeff Thomas. Diese arbeitet mit einzelnen Zellen welche einen Beschleunigungsvektor und eine Druckvariable haben. Jedes Teilchen holt sich entsprechend seiner Position diese Werte und bewegt sich. Die Teilchen sind zu Anfang gleichmäßig verteilt und transparent. Erst durch Bewegungsrichtung werden sie langsam sichtbar, wobei die Transparenz über die zurückgelegte Distanz des Teilchens bestimmt wird. Die Bewegung der Teilchen wird über Partikelreaktionen beeinflusst. Dabei kann zum einen eine neue Beschleunigung in einem gewissen Radius erzeugt werden (FM) oder eine Druckwelle alle Teilchen ausgehend von einem Zentrum nach außen bewegen (FE).

Die Anzahl der Teilchen bestimmt außerdem im Hintergrund die Farbigkeit einzelner Kacheln. Die Anzahl der in der Nähe der Kachel liegenden Teilchen lässt die Kacheln am Anfang schwarz erscheinen, erst wenn die Anzahl der in der Nähe vorhandenen Teilchen sinkt oder steigt verändert die Kachel entsprechend ihre Farbe. Die einzelnen Zellen werden mit einem Weichzeichner unscharf gemacht um harte Kanten zwischen den Zellen zu vermeiden und das Aussehen natürlicher wirken zu lassen.



Zellulärautomaten

Über die gesamte Größe des Feldes liegt außerdem ein zwei-dimensionalen Zellulärautomat, dessen Zellen zu Anfang alle inaktiv sind. Bestimmte Partikelreaktionen setzen in einem bestimmten Radius um ihr Zentrum herum eine neue Regel, die Zell-Nachbarschaft und aktivieren in einem kleineren Radius alle Zellen. Jede Zelle kann zwei verschiedene Stati einnehmen, die im folgenden “lebendig” bzw. “tot” genannt werden. Es gibt 16 zu prüfende Nachbarschaften, welche alle entweder punkt- oder achsensymmetrisch um das Zentrum angeordnet sind. Die Zelle in der Mitte prüft dementsprechend nur die Zellen welche durch die Nachbarschaft bestimmt sind.



Die Regel bestimmt ob die Zelle im nächsten Zeitabschnitt “lebendig” oder “tot” sein wird. Um zu verhindern, dass Regeln gewählt werden welche alle Zellen im nächsten Zeitabschnitt sterben bzw. leben lassen,

wurden entsprechende Regeln vorher ausgeschlossen. So ergibt sich eine Gesamtzahl von 111 Regeln und mit 16 verschiedenen Nachbarschaften eine Gesamtzahl von 1.776 verschiedenen Startbedingungen für Zellulärautomaten. Dadurch, dass Zellulärautomaten sich auch überschneiden oder gemeinsame Grenzen haben können steigt die Anzahl der Möglichkeiten noch weiter.

Partikelspuren

Partikelspuren werden über Partikelreaktionen erzeugt und erzeugen über einen bestimmten Zeitraum für alle Partikel in einen gewissen Bereich Linien die den Partikeln folgen. Diese Spuren werden anfangs länger bis zu einer maximalen Länge, woraufhin sie wieder kürzer werden, bis sie schließlich verschwinden.

Programmierung

Das Programm welches die Simulationen kalkuliert läuft auf einem Server welcher mit Node.js betrieben wird. Verwendet wurden die Bibliotheken ‘express’ zum generellen Server-Management und für das Frontend, ‘fork’ um parallele Prozesse zu starten, ‘fs’ um Dateien zu speichern und auszulesen und ‘math’ um auf diverse mathematischen Funktionen zugreifen zu können. Für die visuelle Darstellung wird mit PIXI.js aktuell eine JavaScript-Bibliothek verwendet welche den Ansprüchen an Performance gerecht wird und auf Systemen mit ausreichender Leistung flüssig läuft. Ältere Rechner kommen bei einer Vielzahl an Objekten auf dem Feld trotzdem ab und zu an ihre Grenzen.

Interface

Um den Eindruck des simulierten “Universums” zu verdeutlichen, war es wichtig dem Nutzer beim Betrachten einige Werkzeuge zum Erforschen an die Hand zu geben. So gibt es die Möglichkeit zum Vor- und Zurück-Spulen, die Abspielgeschwindigkeit anzupassen und jederzeit zu pausieren. Dadurch ist es möglich einzelne Ereignisse genau zu betrachten und deren Auswirkungen und Effekte zu sehen. Die Abspielgeschwindigkeit beträgt standardgemäß 18 Bilder, resultierend aus diversen Performancetests, und kann auf minimal die

Hälfte reduziert oder maximal auf das Doppelte erhöht werden. Um auch kleine Ereignisse auszumachen und zu untersuchen gibt es zusätzlich die Möglichkeit in das Geschehnisse hineinzuzoomen. Über das Scrollrad bzw. die Zoom-Geste am Handy lässt sich die Simulation bis zu 4-fach vergrößern. Das Verhalten und die Interaktion orientiert sich dabei an klassischen Kartenprogrammen wie Google Maps oder Open Street Map.

Da die Simulation visueller Natur ist und vor allem davon lebt das komplette Bild im Ganzen und auf großen Wiedergabegeräten zu betrachten, bieten sich Mobilgeräte entsprechend wenig an um sein Universum anzuschauen. Die Website funktioniert auf Mobilgeräten und ist auch entsprechend für diese optimiert, jedoch wird beim Aufrufen einer Simulation dem Nutzer eine Warnung angezeigt, dass Automata Universalis für große Bildschirme konzipiert ist und die Erfahrung auf Mobilgeräten stark beeinträchtigt ist.

Objekt

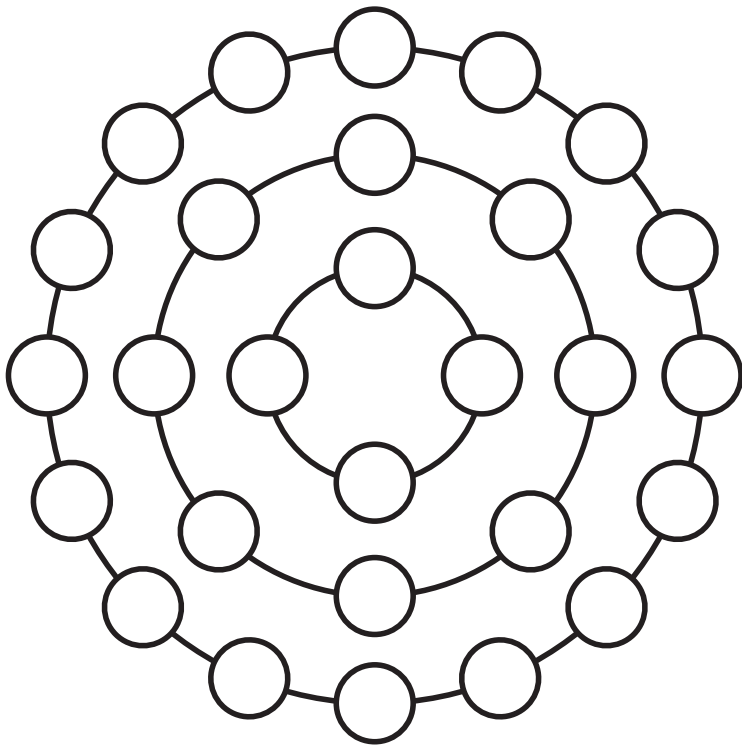
Das Lesegerät ist ein aus weißem Acryl gefertigter Quader mit abgerundeten Ecken und einer leichten Neigung. Die ausgefüllte Karte kann vorne eingelegt werden. Eine Lichtschranke erkennt dann, ob die Karte vollständig eingeführt wurde und 28 Infrarotsensoren lesen die Kreise aus. Auf der Oberfläche indizieren LEDs anschließend welche Kreise ausgefüllt und welche weiß gelassen wurden. Die Daten werden über ein lokales Netzwerk per WiFi an den Server übertragen, welcher anschließend beginnt die Simulation mit den empfangenen Startbedingungen zu berechnen. Damit der Nutzer weiß wann seine Simulation ungefähr fertig ist und unter welcher URL diese zu finden ist, wird nach erfolgreichem Auslesen der Karte und Übertragung der Daten an den Server mithilfe eines Thermodruckers ein Beleg ausgedruckt, auf welchem alle relevanten Infos enthalten sind. Die Gestaltung ist bewusst in Weiß bzw. hellen Tönen gehalten und steht im Kontrast zur hauptsächlich schwarzen Website.

Die Karten für das Lesegerät sind in der Größe 105mm auf 205mm angelegt. Eingeleitet wird die Karte mit einer kurzen Anleitung die erklärt wie die Kreise auszufüllen sind. Die Gestaltung ist schlicht gehalten und ist in Anlehnung an das Lesegerät größtenteils weiß.

Automata Universalis

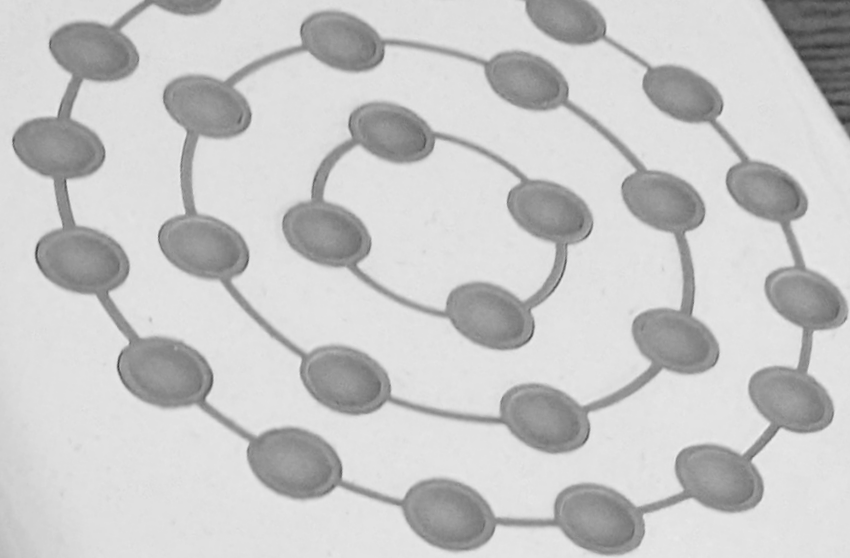
Please fill, according to your own judgment, none to all circles on this card black or leave them blank. After inserting this card, your own universe will then be simulated and can be viewed after the calculations are completed. On the printed receipt you can find the internet address to your personal universe.

Please note that calculating a universe takes time and each universe is simulated one after the other. You can see the remaining time on the internet page.

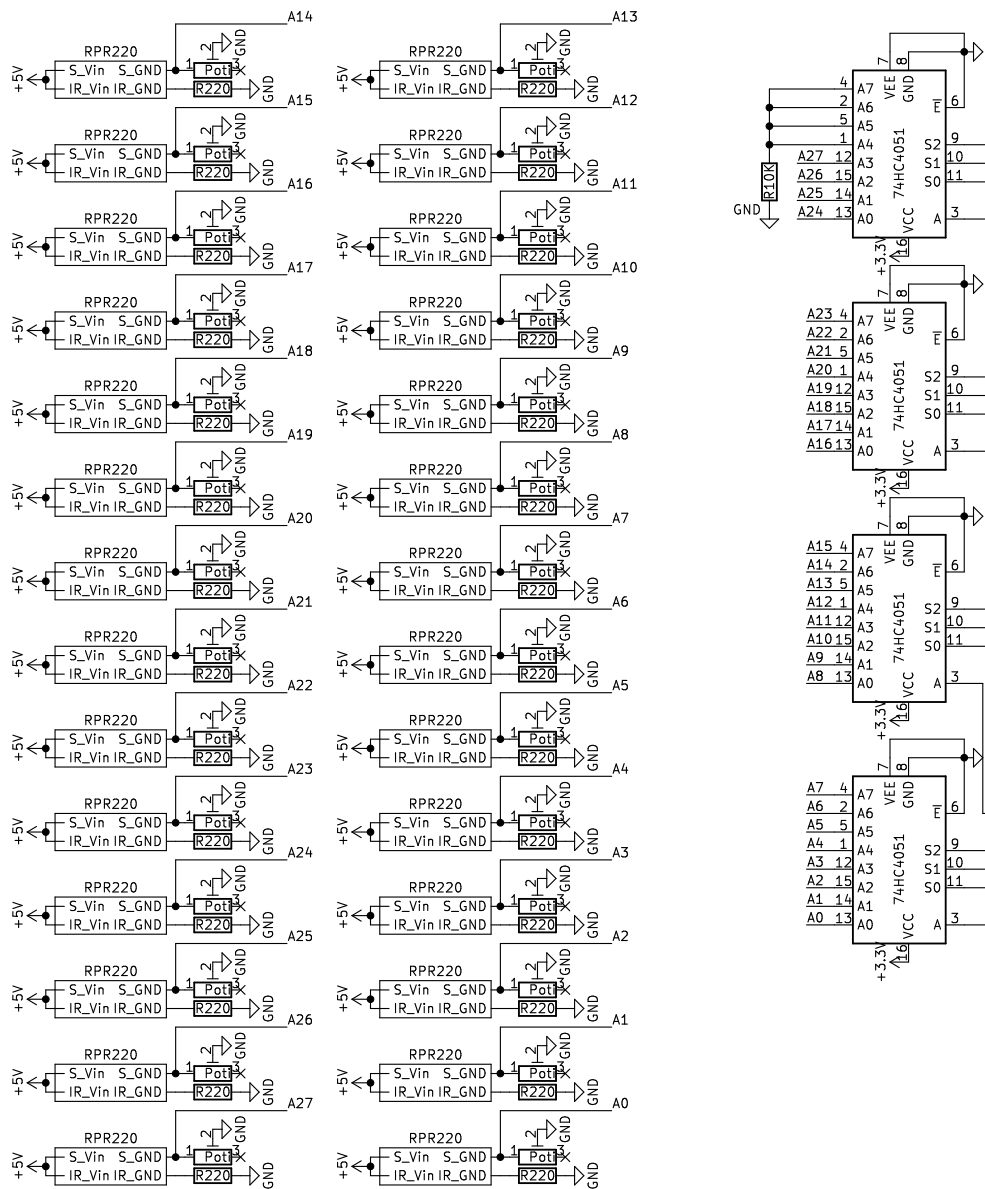


Technik

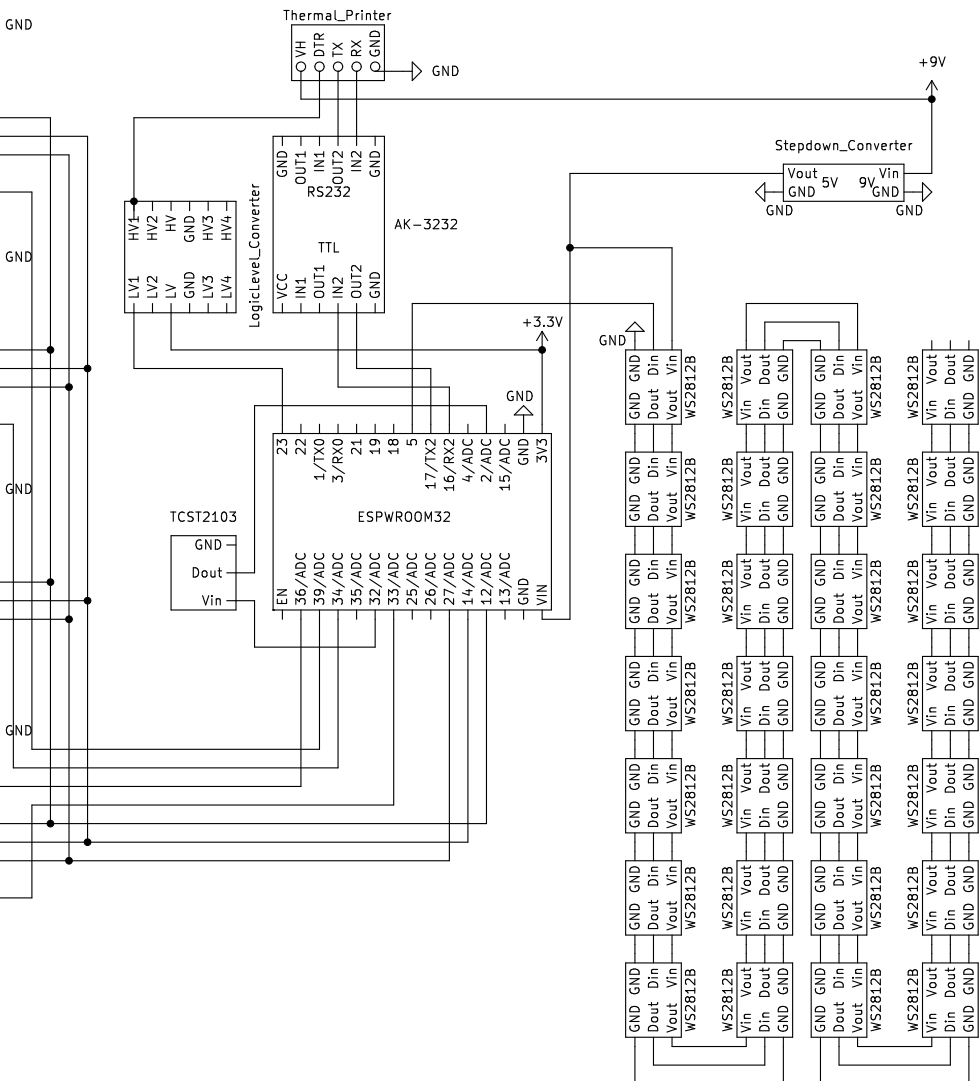
Als Microcontroller fungiert ein ESP32 welcher bereits über eine eingebaute WiFi-Antenne verfügt. 28 RPR-220-Infrarotsensoren, welche mithilfe von Multiplexern ausgelesen werden, ermitteln ob ein Kreis schwarz oder weiß ist und geben die Daten weiter an den Microcontroller, welcher wiederum die LEDs vom Typ WS2812B entsprechend schaltet. Um den Beleg auszudrucken wird ein Thermodrucker verwendet welcher mithilfe von Hitze Thermopapier bedruckt. Das hat den Vorteil dass man nur Papier nachfüllen muss und Druckertinte keine Rolle spielt. Um den Drucker über serielle Kommunikation anzusteuern war ein IC, welcher die Signale von TTL zu RS232 umwandelt und ein weiterer IC, welcher die Spannung des Logic-Levels entsprechend anhebt, notwendig. Da der Drucker zudem mit einer Spannung von 9V betrieben wird, alle anderen Komponenten aber mit 5V arbeiten reguliert ein Step-Down-Converter die Eingangsspannung runter. Die Stromversorgung läuft über ein 9V Netzteil mit 3.11 Ampere.



Schaltplan



GND



Quellen

- *Sternengeschichten Folge 205: Laplacscher Dämon*
Podcastfolge von Florian Freistetter. 10/2016
- *Laplacscher Dämon*. Wikipedia
- *Heisenbergsche Unschärferelation*. Wikipedia
- *Die schönsten Fehler: Der Irrtum des Henri Poincaré*. Vortrag von Rudolf Taschner. 2014
- *Die Lösung des n -Körper-Problems*. Artikel von Dr. Christoph Pöppe aus Spektrum der Wissenschaft. 1/1997
- *Unlösbar und faszinierend: Das Dreikörperproblem*. Blogartikel von Florian Freistetter in Astrodictum simplex - scienceBlogs. 6/2015
- *The Essence of Chaos*. Edward Lorenz. 1993
- *Die Entdeckung des Chaos*. John Briggs, F. David Peat. 1989
- *Edward Lorenz, stiller Revolutionär*. Peter Richter, ZEIT Online. 2009
- *Als der Schmetterlingseffekt ein Chaos anrichtete*. BR. 2017
- *Das digitale Universum Zelluläre Automaten als Modelle der Natur*. Martin Gerhardt, Heike Schuster. 1995
- *A new kind of science*. Stephen Wolfram. 2002
- *Die physikalische Welt - ein Automat*. Herbert W. Franke. Naturwissenschaftlichen Rundschau 9/1996

- *Rechnender Raum*. Konrad Zuse. 1969
- *Rebooting the cosmos: Is the universe the ultimate computer?* Panel discussion from the World Science Festival. 2011
- *Das Universum als zellulärer Automat*. Interview mit Gerardus 't Hooft. Spektrum 47/2018
- *Digitale Physik*. Wikipedia

Bilder

- Astronomisches Zifferblatt am Rathausturm Prag. Andrew Shiva / Wikipedia. 2013
- *C. gloriamaris* and some other species. mdpi.com
- An icon of chaos theory - the Lorenz attractor. Wikimol, Dschwen. 2006
- An N-body simulation of the cosmological formation of a cluster of galaxies in an expanding universe. Michael L. Umbricht. 2011
- Eine Julia-Menge. Prokofiev. 2009
- Lot 988. Konrad Zuse. 1910

