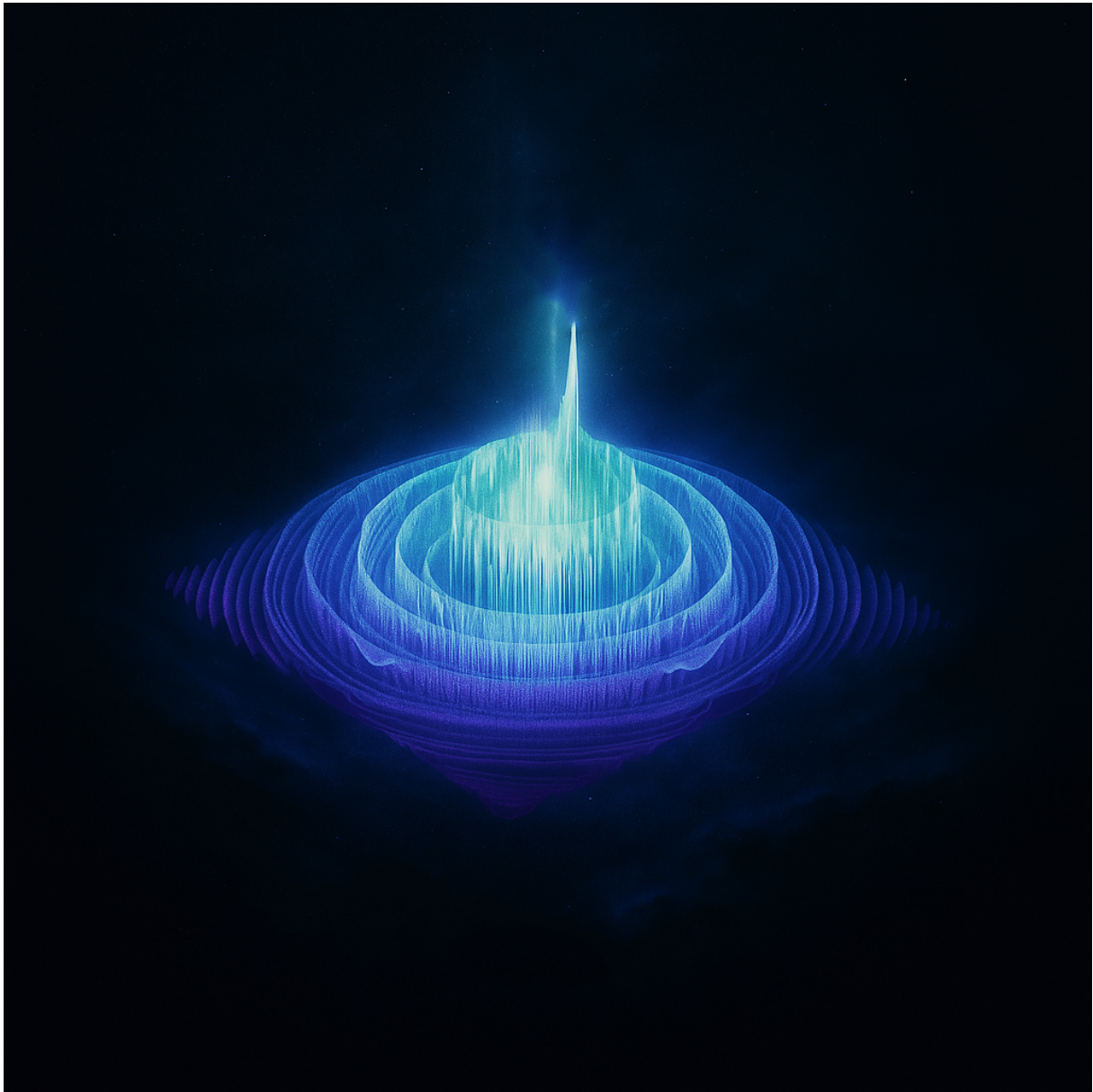


Universität Kassel  
Fachbereich Physik

# Zeit als emergentes Ordnungsmaß in Resonanzsystemen

(Bachelorarbeit)



<b>Verfasser:</b>	Daniel S. M. Möhle	<b>Erstgutachter:</b>	Prof. Dr.
<b>Matrikelnummer:</b>	12345678	<b>Zweitgutachter:</b>	Prof. Dr.
<b>Studiengang:</b>	Physik (B.Sc.)		

Abgabedatum: 18. Oktober 2025

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Motivation . . . . .	4
1.2	Fragestellung . . . . .	4
1.3	Struktur der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Theoretischer Hintergrund</b>	<b>5</b>
2.1	Zeit in der klassischen Physik . . . . .	5
2.1.1	Newtonsche Zeit . . . . .	5
2.1.2	Relativitätstheorie . . . . .	6
2.2	Zeit in der Quantenphysik . . . . .	7
2.2.1	Page–Wootters-Mechanismus . . . . .	7
2.2.2	Thermal-Time-Hypothese . . . . .	8
2.3	Nichtlineare Dynamik und Oszillatoren . . . . .	9
2.3.1	Lineare und nichtlineare Oszillatoren . . . . .	9
2.3.2	Resonanz und Kopplung . . . . .	9
2.3.3	Emergente Strukturen . . . . .	9
2.3.4	Brücke zum Modell . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Eigenes Modell</b>	<b>11</b>
3.1	Grundannahmen . . . . .	11
3.1.1	Zeit als stehende Welle . . . . .	11
3.1.2	Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft als Eigenmoden . . . . .	11
3.2	Mathematische Formulierung . . . . .	11
3.2.1	Gesamtresonanz $\Psi(x, t)$ . . . . .	11
3.2.2	Definition des Kohärenzmaßes $C$ . . . . .	11
3.2.3	Phasenversatz $\Phi$ und verschobenes Selbst . . . . .	11
3.3	Emergender Zeitparameter . . . . .	12
3.3.1	Definition von $\tau$ als Phasenfluss . . . . .	12
3.3.2	Eigenschaften . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Numerische Simulation</b>	<b>13</b>
4.1	Methodik . . . . .	13
4.1.1	Differentialgleichungen . . . . .	13
4.1.2	Parameterwahl . . . . .	13
4.2	Simulationsergebnisse . . . . .	13
4.3	Visualisierungen . . . . .	13
4.3.1	Resonanzkurven und Knotenpunkte . . . . .	13

<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>
5.1	Vergleich mit etablierten Theorien . . . . .	14
5.1.1	Relativität und Zeitkoordinaten . . . . .	14
5.1.2	Quantenzeit-Modelle . . . . .	14
5.2	Stärken und Grenzen des Modells . . . . .	14
5.3	Ausblick . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>15</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>16</b>
A.1	Mathematische Herleitungen . . . . .	16
A.2	Zusätzliche Simulationsergebnisse . . . . .	16
A.3	Code (Python) . . . . .	16

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Die Natur der Zeit gehört zu den fundamentalen offenen Fragen der Physik. In der klassischen Mechanik erscheint Zeit als exogene, absolute Größe, während sie in der Relativitätstheorie als dynamische Koordinate der Raumzeit auftritt. In jüngeren Ansätzen wird zunehmend diskutiert, ob Zeit nicht als Grundgröße vorausgesetzt werden muss, sondern als emergentes Phänomen verstanden werden kann.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit die Möglichkeit untersucht, Zeit als Ordnungsmaß in Resonanzsystemen zu beschreiben. Besonderes Interesse gilt dabei der Frage, ob sich durch die Überlagerung mehrerer Eigenmoden eine stehende Welle ergibt, in der die Gegenwart eine besondere Rolle einnimmt. Ferner wird geprüft, ob sich aus einer solchen Struktur ein Maß zur quantitativen Beschreibung der Kohärenz ableiten lässt. Damit zielt die Arbeit auf die Entwicklung und erste Untersuchung eines theoretischen Modells, das in späteren Arbeiten durch empirische Ansätze weiter überprüft werden könnte.

### 1.2 Fragestellung

Die Arbeit stellt die Frage, ob Zeit nicht als externe Koordinate zu fassen ist, sondern als emergentes Ordnungsmaß in Resonanzsystemen verstanden werden kann. Im Zentrum steht die Untersuchung, ob die Überlagerung weniger Eigenmoden zu einer stehenden Welle führt, in der die Gegenwart einem Resonanzknoten entspricht, und ob sich aus dieser Struktur ein Maß  $C$  zur quantitativen Beschreibung der Kohärenz ableiten lässt.

### 1.3 Struktur der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in vier Hauptteile. Zunächst wird im ersten Kapitel der theoretische Hintergrund skizziert, wobei zentrale Konzepte der Zeit in der klassischen Mechanik, der Relativitätstheorie sowie in modernen dynamischen Ansätzen dargestellt werden. Darauf aufbauend wird im zweiten Kapitel das eigene Modell entwickelt, in dem Zeit als emergentes Ordnungsmaß in Resonanzsystemen beschrieben wird. Im dritten Kapitel folgen numerische Simulationen, die grundlegende Eigenschaften des Modells illustrieren und erste quantitative Resultate liefern. Abschließend werden im vierten Kapitel die Ergebnisse zusammengefasst und im Kontext des aktuellen Forschungsstands diskutiert.

# Kapitel 2

## Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Zeit in der klassischen Physik

Das Verständnis der Zeit in der klassischen Physik ist geprägt von der Vorstellung einer äußeren, vom physikalischen Geschehen unabhängigen Größe. Zeit wird dabei als universelle Hintergrundstruktur aufgefasst, die allen Prozessen gleichermaßen zugrunde liegt. Diese Auffassung bildet die Grundlage der klassischen Mechanik, wie sie seit Newton etabliert ist, und blieb über Jahrhunderte hinweg weitgehend unhinterfragt. Mit der Entwicklung der Elektrodynamik und den Arbeiten von Maxwell wurde jedoch zunehmend deutlich, dass eine absolute Zeit in Konflikt mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit steht. Dies führte letztlich zu den Revolutionen des 20. Jahrhunderts, insbesondere zur Relativitätstheorie, in der Zeit und Raum zu einer einheitlichen Raumzeitstruktur verschmolzen werden. Trotz dieser grundlegenden Neuerungen kann man beide Ansätze – die newtonsche Zeit und die relativistische Zeit – unter dem Oberbegriff der klassischen Physik zusammenfassen, da sie eine deterministische Beschreibung von Prozessen ermöglichen und die Zeit stets als Parameter zur Ordnung von Abläufen verwenden.

#### 2.1.1 Newtonsche Zeit

In der klassischen Mechanik nach Newton wird Zeit als absolute, gleichmäßig verstreichende Größe angenommen. Formal kann man dies als globale Zeitfunktion  $t : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$  auf einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit  $\mathcal{M}$  auffassen, die  $\mathcal{M}$  in simultane „Raum“-Hyperflächen  $\Sigma_t = \{p \in \mathcal{M} \mid t(p) = \text{const}\}$  foliiert. Gleiche Zunahmen  $\Delta t$  bedeuten gleiche Dauer; es gibt keine dynamische Rückwirkung der Materie auf  $t$ . Eine präzise Struktur ist die *Galileische Raumzeit* (auch Newton–Cartan–Vorgänger): ein Tupel  $(\mathcal{M}, \tau_\mu, h^{\mu\nu}, \nabla)$ , wobei  $\tau_\mu$  (mit  $\tau = \tau_\mu dx^\mu$ ) eine globale, geschlossene Zeit-1-Form ist,  $h^{\mu\nu}$  ein positiver Defekt-3-Tensor (spatialer kontravarianter „Metrik“-Tensor mit  $h^{\mu\nu}\tau_\nu = 0$ ) und  $\nabla$  eine torsionsfreie Verbindung, die  $\tau_\mu$  und  $h^{\mu\nu}$  parallel transportiert ( $\nabla_\alpha \tau_\beta = 0$ ,  $\nabla_\alpha h^{\mu\nu} = 0$ ). Weltlinien materieller Teilchen lassen sich mit der absoluten Zeit parametrisieren; die *Beschleunigung*  $\mathbf{a} = d^2\mathbf{x}/dt^2$  ist in allen Inertialsystemen invariant. Die Galilei-Transformationen zwischen Inertialsystemen  $(t, \mathbf{x}) \mapsto (t', \mathbf{x}')$  lauten

$$t' = t + t_0, \quad \mathbf{x}' = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{v}t + \mathbf{x}_0,$$

mit starrer Rotation  $\mathbf{R} \in SO(3)$ , konstanter Relativgeschwindigkeit  $\mathbf{v}$  und Verschiebungen  $t_0, \mathbf{x}_0$ . Daraus folgt die Invarianz der Beschleunigung ( $\mathbf{a}' = \mathbf{a}$ ) und die Forminvarianz von

Newtons zweitem Gesetz

$$m \mathbf{a} = \mathbf{F}.$$

Die Dynamik ist durch einen vom externen Zeitparameter  $t$  getriebenen Lagrange-Ansatz  $L = \frac{1}{2}m \dot{\mathbf{x}}^2 - V(\mathbf{x}, t)$  oder den Hamilton-Formalismus  $H = \mathbf{p}^2/2m + V$  beschreibbar; Uhrenraten sind unabhängig von Geschwindigkeit und Gravitationsfeld (keine Zeitdilatation). Newtons Gravitation kann geometrisch als Newton-Cartan-Theorie formuliert werden: Gravitation erscheint als affiner Anteil der Verbindung  $\nabla$ , der die geodätische Gleichung in der Form

$$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = -\nabla \Phi(\mathbf{x}, t)$$

liefert, mit Potential  $\Phi$ . Trotz dieser Geometrisierung bleibt die Zeit absolut: Es existiert eine globale Simultaneität und ein universeller Zeitparameter  $t$ . **Grenzen.** Die Newtonsche Zeit ist unvereinbar mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und der Forminvarianz der Maxwell-Gleichungen; Experimente (u. a. Michelson-Morley) und die Theorie der Elektrodynamik verlangen Lorentz- statt Galilei-Symmetrie. Absolute Simultaneität und unendliche Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wechselwirkungen sind nicht haltbar.

## 2.1.2 Relativitätstheorie

Die spezielle Relativitätstheorie (SRT) ersetzt die Galilei- durch die Lorentz-Symmetrie. Raum und Zeit bilden die Minkowski-Raumzeit  $(\mathbb{R}^4, \eta)$  mit Metrik

$$\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(-c^2, 1, 1, 1), \quad ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + d\mathbf{x}^2.$$

Für eine zeitartige Weltlinie  $\gamma$  ist die *Eigenzeit*

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \int_{\gamma} \sqrt{-ds^2} = \int \sqrt{1 - \frac{v^2(t)}{c^2}} dt,$$

die physikalische Uhrenzeit. Lorentz-Transformationen mit  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $\beta = v/c$ , verknüpfen Inertialsysteme:

$$t' = \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right), \quad x' = \gamma (x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z.$$

Hieraus folgen Zeitdilatation ( $\Delta t' = \gamma \Delta\tau$ ) und Relativität der Gleichzeitigkeit ( $\Delta t' = \gamma(\Delta t - v \Delta x/c^2)$ ). Die invariante Viergeschwindigkeit  $u^\mu = dx^\mu/d\tau$  erfüllt  $\eta_{\mu\nu} u^\mu u^\nu = -c^2$ . Die allgemeine Relativitätstheorie (ART) verallgemeinert dies auf gekrümmte Raumzeiten  $(\mathcal{M}, g)$  mit Lorentz-Metrik  $g_{\mu\nu}(x)$ . Freie Teilchen bewegen sich auf zeitartigen Geodäten

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} \frac{dx^\alpha}{d\lambda} \frac{dx^\beta}{d\lambda} = 0,$$

und die Eigenzeit ist allgemein

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \int_{\gamma} \sqrt{-g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu}.$$

Eine globale Zeit existiert im Allgemeinen nicht; Zeit ist lokal durch Eigenzeit definiert. In stationären Raumzeiten mit zeitartigem Killing-Vektor kann eine natürliche Koordinatenzeit gewählt werden, die jedoch messbar von Eigenzeiten abweicht (Gravitationsdilatation). Im schwachen Feld ( $|\Phi| \ll c^2$ ) und bei  $v \ll c$  ergibt sich näherungsweise

$$d\tau \approx \left( 1 + \frac{\Phi(\mathbf{x})}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right) dt,$$

woraus sowohl kinematische ( $\propto v^2$ ) als auch gravitative ( $\propto \Phi$ ) Zeitdilatation folgen. Der gravitative Rotverschiebungsfaktor zwischen zwei Höhen  $h_1, h_2$  im homogenen Feld  $g$  ist

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx \frac{\Delta\Phi}{c^2} = \frac{g(h_2 - h_1)}{c^2}.$$

**Newtonsche Grenze.** Im Limes  $c \rightarrow \infty$  kollabiert die Minkowski-Metrik auf eine absolute Zeitstruktur; Eigenzeit und Koordinatenzeit fallen zusammen ( $d\tau \rightarrow dt$ ), Relativität der Gleichzeitigkeit verschwindet und die Galilei-Symmetrie wird wiederhergestellt. Die Newtonsche Gravitation entsteht als schwachfeldiger, niedriger-Geschwindigkeits-Grenzfall der ART (Newton–Cartan-Limit).

## Zwischenbemerkung

Zusammenfassend zeigt sich, dass die klassische Mechanik von einer absoluten, universell gültigen Zeit ausgeht, während die Relativitätstheorie Raum und Zeit zu einer einheitlichen Raumzeit verknüpft und Zeit als relativ zum Beobachter versteht. Beide Ansätze machen deutlich, dass das Verständnis der Zeit eng an die jeweilige theoretische Struktur gebunden ist. Im Folgenden wird betrachtet, welche Rolle Zeit in der Quantenphysik einnimmt.

## 2.2 Zeit in der Quantenphysik

In der Quantenmechanik erscheint Zeit zunächst nicht als Operator, sondern als externer Parameter, der die Entwicklung des Zustandsvektors bestimmt. Die zeitabhängige Schrödingergleichung

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

liefert eine unitäre Zeitentwicklung mit

$$|\psi(t)\rangle = \hat{U}(t, t_0) |\psi(t_0)\rangle, \quad \hat{U}(t, t_0) = \exp\left[-\frac{i}{\hbar} \hat{H}(t - t_0)\right].$$

Die Zeit  $t$  ist hier ein externer, kontinuierlicher Parameter und unterscheidet sich grundlegend von den Observablen des Systems, die durch Operatoren beschrieben werden. Dies wirft die Frage auf, ob Zeit selbst eine quantisierte Größe sein kann oder ob sie ausschließlich als Hintergrundparameter zu verstehen ist. Ein zentrales Problem ergibt sich im Zusammenhang mit der Allgemeinen Relativitätstheorie, in der die Dynamik selbst die Struktur der Raumzeit bestimmt. Eine nahtlose Verbindung beider Theorien führt im kanonischen Quantisierungsansatz zur Wheeler–DeWitt-Gleichung

$$\hat{H} \Psi = 0,$$

die keine explizite Zeitvariable enthält. Dieses sogenannte „Problem der Zeit“ motiviert alternative Ansätze, in denen Zeit relational oder emergent verstanden wird.

### 2.2.1 Page–Wootters-Mechanismus

Ein prominentes Beispiel ist der Ansatz von Page und Wootters (1983), in dem Zeit relational aus der Verschränkung zweier Teilsysteme entsteht. Ein Subsystem dient dabei

als *Uhr*, während das andere die Dynamik trägt. Das Gesamtsystem befindet sich in einem stationären Zustand

$$\hat{H}_{\text{tot}} |\Psi\rangle = 0,$$

der keine explizite Zeitabhängigkeit zeigt. Durch bedingte Wahrscheinlichkeiten erhält man jedoch, dass das „System“ relativ zum „Uhr“-Teilsystem eine effektive Schrödinger-gleichung erfüllt:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t_{\text{Uhr}}} |\psi_{\text{System}}(t_{\text{Uhr}})\rangle = \hat{H}_{\text{System}} |\psi_{\text{System}}(t_{\text{Uhr}})\rangle.$$

Zeit entsteht in diesem Bild als relationales Konzept: sie ist nicht absolut gegeben, sondern ergibt sich aus der Korrelation zwischen Subsystemen. Der Mechanismus illustriert, wie eine stationäre Gesamtlösung eine dynamische Subsystem-Perspektive hervorbringen kann.

### 2.2.2 Thermal-Time-Hypothese

Ein alternativer Zugang zur Rolle der Zeit in der Quantenphysik wurde von Connes und Rovelli (1994) vorgeschlagen und als *Thermal-Time-Hypothese* bezeichnet. Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass in einer algebraischen Formulierung der Quantenmechanik jeder Zustand auf einer Operatoralgebra eine kanonische, sogenannte *modulare Dynamik* induziert. Diese Dynamik wird durch die Tomita–Takesaki-Theorie charakterisiert und liefert für einen gegebenen Zustand  $\omega$  auf einer von-Neumann-Algebra  $\mathcal{A}$  einen eindeutigen eindimensionalen Fluss  $\{\sigma_t^\omega\}_{t \in \mathbb{R}}$ . Die Thermal-Time-Hypothese identifiziert die physikalische Zeitentwicklung mit diesem modularen Fluss. Damit ist Zeit nicht fundamental vorgegeben, sondern emergiert aus der Wahl des Zustandes und der algebraischen Struktur der Observablen. In einem Gleichgewichtszustand reduziert sich die modulare Dynamik auf die gewöhnliche thermische Zeitentwicklung im Sinne der Kubo–Martin–Schwinger-(KMS)-Bedingung. Besonders interessant ist, dass die Thermal-Time-Hypothese ein zustandsabhängiges Zeitkonzept liefert: verschiedene Zustände können verschiedene „Zeiten“ induzieren. Damit wird Zeit selbst zu einer relationalen Größe, die durch die thermodynamische und quantenstatistische Struktur des Systems bestimmt ist. Dieses Konzept stellt eine enge Verbindung zwischen Thermodynamik, Quantenmechanik und der fundamentalen Frage nach der Natur der Zeit her und bietet einen möglichen Ansatzpunkt, das Problem der Zeit in der Quantengravitation zu adressieren.

### Zwischenbemerkung

Die Diskussion zeigt, dass Zeit in der Quantenphysik nicht als fundamentale externe Größe auftritt, sondern je nach formaler Darstellung relational oder zustandsabhängig verstanden werden kann. Sowohl der Page–Wootters-Mechanismus als auch die Thermal-Time-Hypothese verdeutlichen, dass Zeit aus der Struktur von Korrelationen oder thermodynamischen Eigenschaften emergieren kann. Damit stellt sich die Frage, ob ähnliche Konzepte auch in klassischen dynamischen Systemen auftreten können. Im Folgenden wird daher der Blick auf nichtlineare Dynamik und Oszillatoren gerichtet, um die Rolle von Resonanz und Kohärenz als ordnende Prinzipien zu untersuchen.



## 2.3 Nichtlineare Dynamik und Oszillatoren

Viele Phänomene in der Natur lassen sich durch Oszillatoren beschreiben, die periodische oder quasiperiodische Bewegungen ausführen. Während lineare Oszillatoren vollständig durch Überlagerungslösungen erklärbar sind, treten in nichtlinearen Systemen eine Vielzahl neuer Effekte auf, die von Resonanz über Selbstorganisation bis hin zu chaotischem Verhalten reichen. Gerade in solchen Systemen zeigt sich, dass Ordnung und Struktur nicht von außen vorgegeben sein müssen, sondern aus der inneren Dynamik heraus entstehen können.

### 2.3.1 Lineare und nichtlineare Oszillatoren

Der harmonische Oszillator ist das grundlegende Beispiel eines linearen Systems. Seine Gleichung

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$$

besitzt exakte sinusförmige Lösungen  $x(t) = A \cos(\omega t + \phi)$ . Die Superposition mehrerer solcher Lösungen bleibt im linearen Fall ebenfalls lösbar. Nichtlinearitäten, etwa durch Terme wie  $\alpha x^3$ , führen jedoch zu komplexeren Dynamiken:

$$\ddot{x} + \omega^2 x + \alpha x^3 = 0.$$

Solche Gleichungen können Amplitudenabhängigkeit der Frequenz, Bifurkationen und chaotisches Verhalten hervorrufen.

### 2.3.2 Resonanz und Kopplung

Besonders interessant wird die Dynamik, wenn mehrere Oszillatoren gekoppelt sind. Für zwei gekoppelte lineare Oszillatoren ergeben sich kollektive Eigenschwingungen mit charakteristischen Frequenzen. In nichtlinearen gekoppelten Systemen kann es zu Resonanzeffekten kommen, bei denen Energie zwischen Moden übertragen wird. Ein klassisches Beispiel ist der parametrisch getriebene Oszillator oder die Synchronisation nach dem Kuramoto-Modell:

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i).$$

Ab einer kritischen Kopplungsstärke  $K$  kann es zu einer spontanen Synchronisation vieler Einheiten kommen, ein Phänomen, das in Physik, Biologie und Neurowissenschaften beobachtet wird.

### 2.3.3 Emergente Strukturen

Nichtlineare Oszillatoren zeigen, dass kollektives Verhalten nicht durch äußere Steuerung, sondern durch innere Dynamik entstehen kann. Aus lokaler Interaktion folgen globale Ordnungszustände, die sich durch makroskopische Größen wie Kohärenz oder Phasenordnung beschreiben lassen. Diese emergenten Eigenschaften machen nichtlineare Dynamik zu einem zentralen Untersuchungsfeld für die Frage, wie komplexe Strukturen in physikalischen Systemen entstehen.

### 2.3.4 Brücke zum Modell

Die in dieser Arbeit entwickelte Theorie knüpft an diese Konzepte an, indem Zeit selbst als emergente Resonanzstruktur verstanden wird. So wie Oszillatoren durch Kopplung und Resonanz kollektive Muster bilden, soll gezeigt werden, dass Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft als Eigenmoden einer überlagerten Struktur auftreten können. Ein Kohärenzmaß  $C$  erlaubt es, den Grad der Ordnung in diesem Rahmen quantitativ zu erfassen.

# Kapitel 3

## Eigenes Modell

### 3.1 Grundannahmen

#### 3.1.1 Zeit als stehende Welle

Zeit wird als stehende Resonanz beschrieben:

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) \phi_n(x) e^{i\theta_n(t)}.$$

#### 3.1.2 Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft als Eigenmoden

Die drei Hauptmoden:

$$\phi_1(x) \text{ (Vergangenheit)}, \quad \phi_2(x) \text{ (Gegenwart)}, \quad \phi_3(x) \text{ (Zukunft)}.$$

### 3.2 Mathematische Formulierung

#### 3.2.1 Gesamtresonanz $\Psi(x, t)$

Die Gesamtresonanz ergibt sich aus der Superposition:

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=1}^3 a_n(t) \phi_n(x) e^{i\theta_n(t)}.$$

#### 3.2.2 Definition des Kohärenzmaßes $C$

Das Kohärenzmaß  $C$  ist definiert als:

$$C(t) = \frac{|\sum_n a_n(t) e^{i\theta_n(t)}|}{\sum_n a_n(t)} \in [0, 1].$$

#### 3.2.3 Phasenversatz $\Phi$ und verschobenes Selbst

Der relative Phasenversatz:

$$\Phi(t) = \frac{\sum_n a_n(t) (\theta_n(t) - \theta_g(t))}{\sum_n a_n(t)},$$

mit  $\theta_g$  als Phase der Gegenwarts-Mode. Ein  $\Phi \neq 0$  beschreibt das verschobene Selbst.

## 3.3 Emergenter Zeitparameter

### 3.3.1 Definition von $\tau$ als Phasenfluss

$$\tau(t) = \mathcal{M}[\arg(\Psi(x, t))].$$

### 3.3.2 Eigenschaften

- Richtung: Zeitpfeil entsteht durch Vorzeichen von  $\partial_t \tau$ . - Dichte: Zeittempo durch  $|\partial_t \tau| \cdot C(t)$ . - Skalen: verschiedene Moden erzeugen unterschiedliche Zeitskalen.

# Kapitel 4

## Numerische Simulation

### 4.1 Methodik

#### 4.1.1 Differentialgleichungen

$$\dot{a}_n = -\gamma_n a_n + \sum_m K_{nm} a_m \cos(\theta_m - \theta_n) + I_n(t),$$
$$\dot{\theta}_n = \omega_n + \sum_m \frac{K_{nm}}{a_n} a_m \sin(\theta_m - \theta_n).$$

#### 4.1.2 Parameterwahl

Verwendung kleiner Netzwerke mit  $N = 3$  Moden.

### 4.2 Simulationsergebnisse

- Entstehung eines gerichteten Phasenflusses  $\tau(t)$ . - Verhalten des Kohärenzmaßes  $C(t)$ . - Phasenverschiebungen und Gleichgewichtspunkte.

### 4.3 Visualisierungen

#### 4.3.1 Resonanzkurven und Knotenpunkte

Darstellung der drei Moden (Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft) als stehende Wellen. Die Gegenwart erscheint als Resonanzknoten.

# Kapitel 5

## Diskussion

### 5.1 Vergleich mit etablierten Theorien

#### 5.1.1 Relativität und Zeitkoordinaten

#### 5.1.2 Quantenzeit-Modelle

### 5.2 Stärken und Grenzen des Modells

### 5.3 Ausblick

- Übertrag auf neuronale Systeme. - Intersubjektive Resonanz. - Bezug zu dunkler Materie/Energie (spekulativ).

# Kapitel 6

## Fazit

# Anhang A

## Anhang

A.1 Mathematische Herleitungen

A.2 Zusätzliche Simulationsergebnisse

A.3 Code (Python)



# Literaturverzeichnis

- [1] D. Page, W. Wootters, *Evolution without evolution: Dynamics described by stationary observables*, Phys. Rev. D 27, 2885 (1983).
- [2] C. Rovelli, *Statistical mechanics of gravity and the thermal time hypothesis*, Class. Quantum Grav. 10 (1993).
- [3] Y. Kuramoto, *Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators*, in International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics (1975).