Quantum Krump: Vermittlung von Superposition, Verschränkung und Interferenz durch Krump, Laban-Bewegungsanalyse und angewandte Kategorientheorie

Arun Nadarasa
Angels of Krump Movement Federation
https://arunnadarasa.github.io/quantumkrump/

Dakota Simao
Twin Bad Liks / Jr Outrage
Künstlerischer Leiter & Choreograf, Krump / Zeitgenössischer Tanz
Genf, Schweiz
https://www.youtube.com/@dakotasimao

Oktober 2026 *Preprint*

Zusammenfassung

Wir präsentieren *Quantum Krump*, einen körperfokussierten Bewegungsworkshop, ein offenes Web-Anwendungsökosystem und ein Bühneninszenierungs-Framework zur Vermittlung von Superposition, Verschränkung und Interferenz durch den urbanen Tanzstil Krump, die Laban-Bewegungsanalyse (LMA) und angewandte Kategorientheorie. Das Curriculum bildet Laban-Antriebsfaktoren (Effort Factors) auf fundamentale Krump-Grundelemente (`STOMP`, `JAB`, `CHEST POP`, `ARM SWING`) sowie räumliche Ebenen der Bloch-Kugel (`LIVE`, `KRUMP`, `BUCK`) ab. Choreografische Phrasen werden mittels DisCoPy als dagger-kompakte monoidale Frobenius-Kategorie formalisiert, was den formalen Beweis des bifunktoriellen Austauschgesetzes und der topologischen Schlangen-Reduktion (Snake Equation Yanking) ermöglicht. Wir stellen *11th Quantum Dimension* vor, eine 60-minütige abendfüllende Tanztheaterproduktion für bis zu 20 Tänzerinnen und Tänzer, die gemeinsam mit dem Choreografen Dakota Simao entwickelt wurde. Das Werk übersetzt klassische Bits, kontinuierliche Qubits, Superposition, Verschränkung und Phaseninterferenz in eine emotionale, ergreifende Narration über häusliche Gewalt, die technische Sprachbarrieren für ein breites Publikum überwindet. Die Inszenierung integriert eine 3D-WebGL-Bühnenraumgestaltung via Three.js, choreografische Vektor-Zeitachsen via anime.js, KI-gestütztes Stimmdesign via ElevenLabs sowie generative audiovisuelle Quantensynthese via Moth Quantum für eine internationale Welttournee. Wir berichten über experimentelle Validierungen auf dem Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite`-Ionenfallen-Emulator (2.048 verifizierte Live-Emulator-Shots; 0 physische QPU-Shots beansprucht) entlang einer 8-stufigen dynamischen Messleiter unter verblindeten Qualitätskontroll- ($\Delta = 0{,}0009$) und exakten Null-Kontroll-Gates ($|\Delta| = 0{,}0132$), ein verschränktes Duett (99,41 % Fidelität), kollisionsfreie Bühnenpfadplanung via OpenJij ($E_0 = -7{,}3569$) sowie ein automatisiertes epistemisches Governance-Audit mittels TypeSafe Jev 1.14.

1 Einleitung

Richard Feynman bemerkte 1981 in seiner bahnbrechenden Grundsatzrede zur Simulation von Physik treffend: „Die Natur ist nicht klassisch, verdammt noch mal, und wenn man eine Simulation der Natur erstellen will, sollte man sie besser quantenmechanisch gestalten, und weiß Gott,

das ist ein wunderbares Problem, denn es sieht gar nicht so einfach aus“ [17]. Grundlegende Quantenkonzepte—insbesondere kohärente Superposition, nichtlokale Verschränkung und relative Phaseninterferenz—sind notorisch schwer zu begreifen, wenn sie ausschließlich über abstrakte lineare Algebra oder Matrizenmechanik vermittelt werden. Der menschliche Körper hingegen ist ein physisches, ausdrucksstarkes Medium, das Lernende intuitiv verstehen. Wie der digitale Künstler Sean Clark von der Computer Arts Society betont, gehen Künstler „häufig voran bei der Einführung neuer Technologien“ und „können Dinge aufgreifen, die ursprünglich nicht für künstlerische Zwecke entwickelt wurden, und sie für das künstlerische Schaffen adaptieren“ [9].

Forschungen zur verkörperten Physik (Embodied Physics) und zur kunstintegrierten STEAM-Pädagogik haben nachgewiesen, dass kinästhetische und choreografische Handlungen die kognitiven Einstiegshürden für komplexe wissenschaftliche Phänomene maßgeblich senken [64]. Frühere Initiativen an der Schnittstelle von Quantenphysik und Tanz, wie etwa *The 2-Qubit Dance* des Institut quantique und der American Physical Society [31], *Dancing with Pauli* des NCCR SPIN [7] und Simmonds und Mitchells *Dunamis Novem* [45], zeigten, dass körperliche Drehungen die Zustandspräparation einzelner Qubits und räumliche Messungen veranschaulichen können. Dennoch stützen sich bestehende verkörperte Curricula überwiegend auf klassische Mechanik, ballettartige Haltungen oder isolierte theatralische Pantomime ohne formale Kompositionsgrammatik, explizites klassisches Fundament oder eine kulturell verwurzelte Tanzsprache.

Quantum Krump geht über diese früheren Ansätze hinaus, indem es die Quantenpädagogik in einem authentischen, hochenergetischen urbanen Tanzstil verankert und Bewegungsübergänge durch die Laban-Bewegungsanalyse (LMA) [4, 35] sowie die angewandte Kategorientheorie [19,37] formalisiert. Basierend auf mathematischer Ästhetik und Gestentheorie [3,33,41,42,44] modelliert der Workshop Tanzphrasen als komponierbare Morphismen in einer gerichteten Kategorie. Dies verleiht Lernenden ohne technischen Hintergrund ein intuitives, mathematisch konsistentes Verständnis für exponentielle Zustandsskalierung, relationale Strukturen und den Messkollaps.

Das Projekt entstand während des Quantinuum Bradford Hackathons 2025 [52], bei dem der initiale Prototyp *Quantum Krump* (https://quantumkrump.lovable.app/) den 2. Platz im Open Innovation Track belegte. Konzipiert als verkörperte pädagogische Fortführung des Internationalen Jahrs der Quantenwissenschaft und -technologie der Vereinten Nationen (UN IYQ 2025) [66] gemeinsam mit der Gemeinschaft des Indian Krump Festival (IKF), hat sich das Framework zu einem offenen, multimodalen digitalen Ökosystem erweitert:

- **Workshop-Curriculum & Druckfähige Begleitmaterialien:** Die detaillierte Partitur nach Minuten, pädagogische Drills sowie Arbeitsbücher für Moderatoren und Teilnehmende (https://quantumworkshop.lovable.app/);
- **Quanteninspiriertes Musiklabor:** Ein interaktives Klanglabor, das Quantenphasen, rhythmische Akzente und Zustandsrotationen in perkussive Krump-Klanglandschaften überträgt (https://ikfquantum.lovable.app/);
- **StreetKode Quantum Battle-App:** Eine spezialisierte Plattform für choreografische Live-Bewertung, Battle-Scoring und Kompetenzstufen-Erfassung (https://streetkodequantum.lovable.app/).

Unsere primären wissenschaftlichen und praktischen Beiträge sind:

1. Verkörperte Übungsformen (Drills) für Superposition, Verschränkung und Phaseninterferenz mit der Bloch-Kugel als dreidimensionalem Richtungskoordinatenraum (Abschnitt 4);
2. Eine systematische dreiseitige Strukturabbildung zwischen Laban-Antriebsfaktoren, Krump-Grundelementen und Konzepten der Quanteninformation, einschließlich der kompositionellen Synthese der acht Grundantriebsaktionen (Abschnitt 5);

3. Ein hierarchisches n-Qubit-„Emotionsrad“, das 2^n affektive Zustände für $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ kodiert, mit präziser lokaler Subsystem-Partitionierung für verschränkte Partner (Abschnitt 6);

4. Quantengemessene Bühnenpfad-Choreografie auf einem 5×4-Gitter mit expliziter Bitstring-Faltung, Dijkstra-Pfadfindung, Haiqu-Zustandskompression (85,7 % Reduktion der Gatetiefe), Sandia QUOPS volumetrischem Benchmarking ($Q = 256$) und OpenJij QUBO-Bühnenplanung ($E_0 = -7{,}3569$ in 1,63 s) (Abschnitt 7);

5. Somatische und biophysikalische Grundlagen, die choreografische Dynamiken mit motorischen Einheiten (BioHub ESM3), regulatorischen Phasenoszillationen (AlphaGenome Atlas) und neuromuskulären Synapsen (Neurosnap) verknüpfen (Abschnitt 8);

6. Ein formaler kategorientheoretischer und stringdiagrammatischer Rahmen: Single-Track-Köcher von CatKS nach CatKP, Endomorphismen-Monoide für wiederholte Aktionen, Multi-Runden-Battle-Indexierung sowie ein vollständiger monoidaler und daggerkompakter Kalkül in DisCoPy mit verifizierten Austauschgesetzen, Dagger-Cups/Caps, Schlangen-Reduktion und relationalem Yoneda-Studio-Drill (Abschnitt 9);

7. Ein abendfüllendes 60-minütiges Tanztheater-Produktionsframework (*11th Quantum Dimension*) für bis zu 20 Tänzerinnen und Tänzer, gemeinsam entwickelt mit Choreograf Dakota Simao, das klassische Bits, kontinuierliche Qubits, Superposition, Verschränkung und Phaseninterferenz in eine emotionale Narration über häusliche Gewalt übersetzt, unterstützt durch Three.js 3D-WebGL-Bühnenraumgestaltung, anime.js-Choreografie-Zeitachsen, ElevenLabs KI-Stimmdesign und generative Moth Quantum-Synthese für eine weltweite Tournee (Abschnitt 11);

8. Vollständige Ionenfallen-Benchmarks auf Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` (2.048 verifizierte Live-Emulator-Shots über Messleiter und Duett; exakt 0 physische QPU-Shots beansprucht) mit verriegelter affiner Kalibrierung, auditierten Kontroll-Gates und Gate G4 klassischer Schranke (0,33 μs) (Abschnitt 12);

9. Ein unabhängiges, geschlossenes epistemisches Governance-Audit durchgeführt mit TypeSafe Jev 1.14 (`jev-1.14.0`) sowie ein empirisches Evaluationsprotokoll unter Verwendung validierter Erhebungsinstrumente (Abschnitte 13 und 19).

2 Historischer und kultureller Hintergrund

Krump-Kultur und Grundlagen. Krump ist ein hochenergetischer, spirituell geprägter und hochgradig kodifizierter urbaner Tanzstil, der Anfang der 2000er Jahre in South Central Los Angeles von Ceasare „Tight Eyez“ Willis und Jo'Artis „Big Mijo“ Ratti zusammen mit den Pionieren Marquisa „Miss Prissy“ Gardner, Christopher „Lil C“ Toler und Jason „Slayer“ Green ins Leben gerufen wurde [36]. Entstanden als ermächtigende Alternative zu Straßengewalt und sozialen Spannungen, kanalisiert Krump intensive emotionale Entladung in disziplinierten physischen Ausdruck. Seine vier primären körperlichen Grundelemente (Foundations) sind:

- `STOMP`: Ein kraftvoller Abwärtstritt des Fußes, der das körperliche Gravitationsgewicht perkussiv in den Boden treibt;
- `JAB`: Ein scharfer, direkter, linearer Schlag, der explosionsartig von der Brust oder Schulter nach vorn geschleudert wird;
- `CHEST POP`: Eine plötzliche Kontraktion und explosive Freisetzung des Brustkorbs, die präzise auf den Beat nach vorne schnellt;

- `ARM SWING`: Ein ausholender, kontinuierlicher, zentrifugaler oder kreisförmiger Armschwung.

Diese Grundlagen werden über drei vertikale Bewegungsebenen ausgeführt: `LIVE` (aufrechte Haltung, gehobener Kopf), `KRUMP` (neutrale mittlere Hocke, athletische Kampfbereitschaft) und `BUCK` (tief geerdete Hocke, maximale rohe Kraft am Boden). Die technische Ausführung im Krump basiert fundamental auf dem *Groove* (das kontinuierliche rhythmische Federn des Oberkörpers, das Bewegungen verbindet), dem *Hype* (akustische und energetische Verstärkung durch die umstehende Gemeinschaft im Kreis/Session), dem *Buck Hop* (ein dynamischer Sprung und Rebound auf niedriger Ebene), dem *Kill-Off* (eine höchst intensive Finalsequenz, die das Battle schlagartig beendet) sowie dem Charakter- und Geschichtenerzählen (*Storytelling*) innerhalb einer familiären Mentoring-Linie (*Fam*, angeführt von einem *Big Homie*). Die Krump-Terminologie bleibt in allen Sprachen auf Englisch erhalten, um ihre kulturelle Identität und Integrität zu wahren.

Laban-Bewegungsanalyse. Rudolf Laban und F. C. Lawrence charakterisierten die Dynamik menschlicher Bewegung anhand von vier grundlegenden *Antriebsfaktoren* (Effort Factors), von denen jeder zwei polare Qualitäten aufweist [35]:

- **Gewicht (Weight)**: *Stark / Fest* (wirkungsvoll, kraftvoller Widerstand gegen die Schwerkraft) vs. *Leicht* (zart, schwebend, federnd);
- **Zeit (Time)**: *Plötzlich* (augenblicklich, scharf, perkussiv) vs. *Allmählich / Gehalten* (kontinuierlich, verlangsamt, ausgedehnt);
- **Raum (Space)**: *Direkt* (fokussiert, geradlinig, zielgenaue Trajektorie) vs. *Indirekt / Flexibel* (raumgreifend, multifokussiert, geschwungen);
- **Fluss (Flow)**: *Gebunden* (kontrolliert, jederzeit stoppbar, zurückgehalten) vs. *Frei* (ungehemmt, fließend, kontinuierlich).

Die Kombination der binären Polaritäten von Gewicht, Zeit und Raum ergibt Labans klassische $2 \times 2 \times 2 = 8$ grundlegende *Antriebsaktionen* (*Punch*, *Slash*, *Press*, *Wring*, *Dab*, *Flick*, *Glide*, *Float*) [4, 35].

Qubits und die Bloch-Kugel. In der Quantenmechanik ist ein einzelnes Qubit ein zweistufiger Zustandsvektor in einem zweidimensionalen komplexen Hilbert-Raum $\mathbb{C}^2$, der von den orthonormalen Basiszuständen $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ aufgespannt wird [49]. Ein beliebiger reiner Zustand lässt sich darstellen als:

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle, \tag{1}$$

wobei $\theta \in [0, \pi]$ der Polarwinkel (Kobreite) und $\varphi \in [0, 2\pi)$ der relative azimutale Phasenwinkel ist (unter Vernachlässigung eines nicht beobachtbaren globalen Phasenfaktors $e^{i\gamma}$). Geometrisch entsprechen reine Zustände Punkten auf der Oberfläche einer Einheitskugel ($r = 1$), die als *Bloch-Kugel* bezeichnet wird [6]. Der Nordpol ($\theta = 0$) entspricht $|0\rangle$, der Südpol ($\theta = \pi$) entspricht $|1\rangle$, und äquatoriale Zustände ($\theta = \pi/2$) repräsentieren gleichmäßige Superpositionen $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{i\varphi}|1\rangle)$. Entscheidend ist, dass das Innere der Bloch-Kugel ($r < 1$) gemischte Zustände darstellt (Dekohärenz oder statistische Ensembles, beschrieben durch einen Dichteoperator ρ mit $\mathrm{Tr}(\rho^2) < 1$), während Punkte außerhalb ($r > 1$) unphysikalisch sind. Wie kürzlich von Grosse-Holz [24] formalisiert wurde, schrumpft bei der Verschränkung zweier Qubits der reduzierte Zustand jedes Einzelsubsystems von der reinen Kugeloberfläche in das Innere seiner lokalen Bloch-Kugel; dies veranschaulicht visuell, wie lokale Reinheit zugunsten nichtlokaler Korrelation verloren geht. Ein n-Qubit-Quantenregister spannt einen 2^n-dimensionalen Hilbert-Raum mit den Basiszuständen $|x\rangle \in \{0, 1\}^n$ auf. Für eine einführende grafische Mechanik ohne Matrizenalgebra verweisen wir Lernende auf das diagrammatische Framework von Coecke und Gogioso [10].

Kategorientheorie und choreografische Gesten. Die angewandte Kategorientheorie formalisiert Systeme durch Objekte, gerichtete Morphismen (Pfeile), assoziative Verknüpfung und Identitätsoperationen [19,37]. Eine Kategorie $\mathcal{C}$ besteht aus einer Klasse von Objekten $\mathrm{Ob}(\mathcal{C})$ und Hom-Mengen $\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, B)$ von Pfeilen zwischen Objekten, ausgestattet mit einer Kompositionsoperation $\circ : \mathrm{Hom}(B, C) \times \mathrm{Hom}(A, B) \to \mathrm{Hom}(A, C)$, die Assoziativität $(h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f)$ und zweiseitige Identitäten erfüllt $(\mathrm{id}_B \circ f = f = f \circ \mathrm{id}_A)$. Ein Funktor $F : \mathcal{C} \to \mathcal{D}$ bildet Objekte und Pfeile ab und erhält dabei Komposition $(F(g \circ f) = F(g) \circ F(f))$ sowie Identitäten $(F(\mathrm{id}_A) = \mathrm{id}_{F(A)})$. Das Yoneda-Lemma stellt fest, dass jedes Objekt $A \in \mathrm{Ob}(\mathcal{C})$ bis auf Isomorphie vollständig durch den kontravarianten Funktor $\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, A) \in [\mathcal{C}^{\mathrm{op}}, \mathbf{Set}]$ bestimmt ist [37]. In Anlehnung an die mathematische Musikwissenschaft und die kategoriale Gestentheorie [3,33,41,42,44] sowie den Quantenpiktorialismus in der musikalischen Aufführung [1] formalisieren wir Tanzphrasen als funktorielle Abbildungen von strukturellen syntaktischen Kategorien zu performativen Interpretationen.

3 Workshop-Architektur und didaktisches Design

Das Curriculum ist als minutengenaue Partitur aufgebaut, die an 60-, 75- und 90-Minuten-Formate anpassbar ist (Tabelle 1). Die Teilnehmenden arbeiten paarweise auf Armlänge in zwei Rollen: **Rolle A** fungiert als Zustandspräparation (bietet einen Quantenzustand an oder hält ihn), während **Rolle B** als unitäre Transformation oder Messauslöser agiert (wendet einen Antriebswechsel, Phasenakzent oder perkussiven Ruf an).

Tabelle 1: Aufteilung der Workshop-Phasen auf 60-, 75- und 90-Minuten-Sitzungsformate.

Workshop-Phase	**60 min**	**75 min**	**90 min**
1. Ankommen, Sicherheit & kultureller Kontext (Krump-Linie)	5 min	7 min	10 min
2. Warm-Up & Harmonisierung des Laban-Raums	8 min	10 min	12 min
3. Krump-Grundlagen & Ebenen (`LIVE`, `KRUMP`, `BUCK`)	10 min	12 min	14 min
4. Konzeptlabore: Superposition, Verschränkung, Interferenz	15 min	18 min	20 min
5. Bloch-Kugel-Richtungslabor (3D-Kinesphäre)	7 min	8 min	10 min
6. Phrasenaufbau auf der Quantenkarte & Yoneda-Kreis	8 min	11 min	12 min
7. Abschlussreflexion, Auswertung & Zertifizierung	7 min	9 min	12 min

Barrierefreiheit und Anpassungen im Sitzen. Jede Übung bietet eine stationäre oder sitzende Anpassung. Für Unterkörperbewegungen wie `STOMP` und `BUCK` führen sitzende Teilnehmende scharfe Handflächenschläge auf die Oberschenkel oder kräftige Fersenschläge nach unten aus. Für *Press* (gehaltener Druck nach unten) drücken die Tänzenden fest in Armlehnen oder auf die Knie. Für *Glide* (Fortbewegung auf einer Linie) führen sie lineare Oberkörperneigungen oder weitreichende Armstreckungen durch.

Pädagogische Begründung und multimodales Design. Anstatt Lernende über umstrittene VARK-Typologien in starre Lernstile einzuteilen, greift der Moderationsleitfaden auf Flemings multimodales Präsentationsmodell zurück [18]. Dadurch werden synchron visuelle (Bloch-Diagramme, Bildschirmsimulator), auditive (Krump-Soundtrack, Stomp-Cues), textuelle (mehrsprachige Arbeitsbücher) und kinästhetische (körperliche Drills) Reize simultan vermittelt. Zudem folgt das Onboarding der Maslowschen Bedürfnispyramide [43], indem physische Sicherheit, Hydratation, ein angemessenes Aufwärmtempo und psychologisches Vertrauen im Studiokreis priorisiert werden, bevor expressive Battle-Dynamiken eingeführt werden.

Das gesamte Curriculum ist in einer einzigen typisierten TypeScript-Quelldatei (`workshop-content.ts`) implementiert, die sowohl die Web-Applikation als auch druckfähige PDF-Arbeitsbücher ohne

inhaltliche Abweichungen speist. Vollständig ausgearbeitete Übersetzungen liegen auf Englisch, Hindi und Tamil vor, ergänzt durch zehn weitere Schnittstellensprachen.

4 Körperliche Übungen und Raumgeometrie

Begrenzte Analogien: Klassische Intuition vs. Quantenrealität. Einführende Lehrpläne verwenden häufig klassische Metaphern, um Quantenzustände zu veranschaulichen. In *Quantum Krump* führen wir bewusst zwei alltagsnahe Bilder ein, stecken deren Geltungsbereich bei Nachbesprechungen jedoch ausdrücklich ab, um verfestigten Fehlvorstellungen vorzubeugen:

- **Der Dimmerschalter:** Ein klassisches Bit ist ein binärer Schalter (aus oder an); ein Qubit wird umgangssprachlich oft mit einem Dimmerschalter verglichen, der eine stufenlose Balance zwischen Helligkeitsstufen hält. *Pädagogische Grenze:* Ein klassischer Dimmerschalter verbleibt bei Beobachtung auf einer Zwischenstufe. Ein Qubit hält jedoch *keine* klassische Mischung; bei einer Messung kollabiert es nicht-deterministisch mit den Wahrscheinlichkeiten $\cos^2(\theta/2)$ und $\sin^2(\theta/2)$ auf $|0\rangle$ oder $|1\rangle$.
- **Die rotierende Münze:** Eine ruhende Münze zeigt Kopf oder Zahl; während sie rotiert, trägt sie beide Möglichkeiten in sich, bis sie aufgefangen wird. *Pädagogische Grenze:* Eine rotierende Münze ist ein epistemisches klassisches System, dessen deterministische Trajektorie lediglich durch schnelle Bewegung verborgen ist. Eine Quantensuperposition hingegen besitzt eine relative Phase (φ), die kohärente konstruktive und destruktive Interferenz ermöglicht—eine Eigenschaft, die rotierenden Münzen völlig fehlt.

Verkörperter Superpositions-Drill. Eine tänzende Person verkörpert die Superposition, indem sie dynamisch zwischen `LIVE` ($|0\rangle$, aufrecht) und `BUCK` ($|1\rangle$, tiefe Hocke) mit einem oszillierenden `CHEST POP` schwebt. Auf das perkussive akustische Signal von Rolle B („HIT!“) schnappt die tänzende Person augenblicklich in eine einzige geerdete Ebene ein: Der Treffer (Hit) führt den Messkollaps herbei.

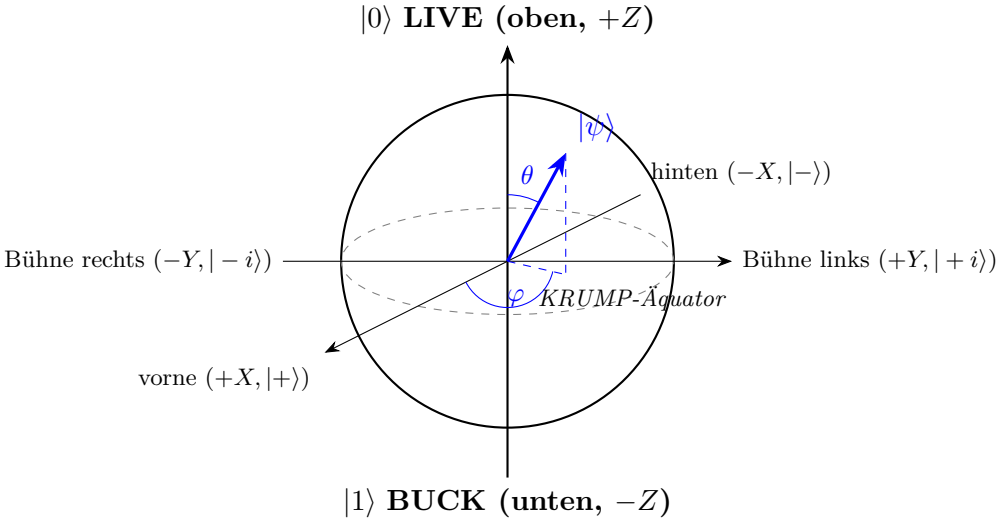
Verkörperter Verschränkungs-Drill und Multi-Basis-Korrelation. Im Basis-Drill teilen sich Partner A und Partner B einen verschränkten Bell-Zustand:

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle). \tag{2}$$

Mit dem Rücken zueinander gewandt, um visuelle Signale auszuschließen, synchronisieren Partner A und Partner B ihre Ausführung anhand eines gemeinsamen perkussiven akustischen Beats oder Bildschirmimpulses. Partner A setzt auf einer bestimmten Zählzeit eine Ebene, und Partner B antwortet auf derselben Zählzeit. Bei einer Messung entlang der vertikalen Z-Achse (`LIVE`/`BUCK`) entspricht die Ebene von Partner B exakt jener von Partner A. Die Workshopleitenden erläutern, dass eine klassisch vorab vereinbarte Choreografie (eine lokale Verborgene-Variablen-Tabelle) eine solche Korrelation in einer einzelnen Basis vortäuschen kann. Im fortgeschrittenen Drill wechseln die Partner die Messbasis: Eine Messung entlang der äquatorialen X-Achse (`FORWARD` vs. `BACK`, entsprechend $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ und $|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$) führt zu identisch korrelierten Ergebnissen ($|{+}{+}\rangle$ oder $|{-}{-}\rangle$), was die Multi-Basis-Stabilisatorkorrelation über nicht-kommutierende Observablen demonstriert. Die Ausbildenden stellen klar: Während $Z \otimes Z$- und $X \otimes X$-Stabilisatorkorrelationen Verschränkung didaktisch veranschaulichen, erfordert eine echte Verletzung der Bell/CHSH-Ungleichung ($\mathcal{S} = 2\sqrt{2} > 2$) Messungen entlang nicht-orthogonaler Zwischenwinkel (z. B. $\pi/4$-Verschiebungen), bei denen klassische lokale Strategien auf $\leq 75\,\%$ Korrelation beschränkt sind, während die Quantenmechanik $\cos^2(\pi/8) \approx 85{,}4\,\%$ erreicht [49].

Verkörperter Interferenz-Drill. Zwei Tänzende stehen sich gegenüber und pulsen kinetische Energie über Brustkorbbewegungen (Chest Pops) bei übereinstimmenden Frequenzen. Wenn sie *in Phase* tanzen ($\Delta\varphi = 0$), verstärken sich ihre körperlichen Akzente konstruktiv und steigern die Energie im Kreis. Wenn sie *gegenphasig* tanzen ($\Delta\varphi = \pi$), interferieren ihre alternierenden Gegenakzente destruktiv, wodurch sich die kollektive kinetische Spannung in völliger Stille auflöst. Ein interaktives Bildschirmlabor ermöglicht es, Amplituden- und Phasenparameter direkt zu modulieren.

Die Bloch-Kugel als Richtungsraum des Tänzers. Die Bloch-Kugel wird auf die dreidimensionale physische Kinesphäre des Tänzers in einem kanonischen rechtshändigen kartesischen Koordinatensystem abgebildet ($\hat{x}_{\text{vorne}} \times \hat{y}_{\text{Bühne links}} = \hat{z}_{\text{oben}}$, Abbildung 1). Die vertikale Polarachse repräsentiert die Ebenen: Der Nordpol $+Z$ ($|0\rangle$) ist `LIVE` (oben), der Südpol $-Z$ ($|1\rangle$) ist `BUCK` (unten geerdet), und der Äquator ($\theta = \pi/2$) ist `KRUMP` (neutrale mittlere Ebene). Die äquatoriale Ebene repräsentiert die relative Phase: $+X$ (nach vorne zum Publikum) ist $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$, $-X$ (nach hinten) ist $|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$, $+Y$ (Bühne links / anatomisch links des Tänzers) ist $|+i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + i|1\rangle)$, und $-Y$ (Bühne rechts / anatomisch rechts des Tänzers) ist $|-i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - i|1\rangle)$. Diese rechtshändige Triade gewährleistet, dass die azimutale Phase $\varphi \in [0, 2\pi)$ bei Betrachtung von oberhalb $+Z$ gegen den Uhrzeigersinn von $+X$ nach $+Y$ anwächst.



Rechtshändige Triade ($\hat{x}_{\text{vorne}} \times \hat{y}_{\text{links}} = \hat{z}_{\text{oben}}$); Rein: $r = 1$; Gemischt: $r < 1$

Abbildung 1: Die Bloch-Kugel, abgebildet auf die 3D-Kinesphäre des Tänzers in einem rechtshändigen kartesischen Koordinatensystem ($\hat{x}_{\text{vorne}} \times \hat{y}_{\text{Bühne links}} = \hat{z}_{\text{oben}}$). Die vertikale Achse repräsentiert die polare Kobreite $\theta \in [0, \pi]$ (`LIVE` bis `BUCK`), während der Äquator die azimutale Phase $\varphi \in [0, 2\pi)$ darstellt. Reine Zustände liegen ausschließlich auf der Oberfläche der Einheitskugel ($r = 1$).

Geometrische Eingrenzung: Um Verwirrung bezüglich des radialen Vektormaßstabs zu vermeiden, stellen die Kursleitenden klar, dass alle reinen Quantenzustandsvektoren die Länge Eins besitzen ($r = 1$). Die physische Amplitude in der Kinesphäre entspricht der choreografischen Auslenkung, *nicht* einer Größenänderung des Bloch-Vektors. Radiale Abstände strikt im Inneren der Kugel ($r < 1$) repräsentieren Dekohärenz in gemischte Zustände ρ, während Punkte außerhalb ($r > 1$) physikalisch unzulässig sind.

Referenz-Benchmarks zur Zustandsraum-Skalierung. Um das exponentielle Potenzial von n Qubits zu vermitteln, präsentiert Tabelle 2 Vergleichsgrößen der Zustandsraum-Dimension.

Exakte ganzzahlige Potenzen werden für $n \leq 40$ beibehalten ($2^{40} \approx 1{,}1 \times 10^{12}$, was der rechnerischen Speichergrenze entspricht, bei der die Speicherung vollständiger klassischer komplexer Zustandsvektoren etwa 16 TB RAM erfordert). Die Vergleichswerte $n = 80$ und $n = 270$ sind in wissenschaftlicher Notation angegeben, um zu verdeutlichen, dass 2^{80} die Speicherkapazität klassischer Supercomputer übersteigt, während 2^{270} die geschätzten 10^{80} Atome im beobachtbaren Universum übertrifft.

Tabelle 2: Skalierungs-Benchmarks von Qubit-Registern und physische Berechnungsgrenzen.

Qubits n	**Basiszustände** 2^n	**Physikalische und rechnerische Bedeutung**
1	2	Einzelnes Qubit; binäre Wahl auf der Bloch-Kugel.
2	4	Verschränktes Paar; vier Basiszustände $\|00\rangle, \|01\rangle, \|10\rangle, \|11\rangle$.
3	8	Drei-Qubit-GHZ/W-verschränkter Zustand; acht Basiszustände.
4	16	Vier-Qubit-Register; Basis des 16-Zustände-Emotionsrads.
40	1.099.511.627.776	$\sim$ 16 TB RAM (doppelte Genauigkeit complex128, 16 Bytes/Amplitude); Grenze klassischer Zustandsvektorsimulation.
80	$\approx 1{,}2089 \times 10^{24}$	Zustandsraum übersteigt weltweites jährliches digitales Datenvolumen.
270	$\approx 1{,}8971 \times 10^{81}$	Übertrifft die geschätzte Gesamtzahl der Atome im beobachtbaren Universum.

Fachvokabular. Das Curriculum definiert sechs zentrale Fachbegriffe in allgemeinverständlicher Sprache:

1. **Quantenhardware:** Physische, kryostatgekühlte supraleitende Schaltkreise oder Ionenfallen-Vakuumkammern, die echte physikalische Quantensysteme manipulieren.
2. **Physikalische Qubits:** Individuelle, reale Quantenbauelemente, die Umweltdekohärenz, thermischem Rauschen und Gate-Inadäquanzen unterliegen.
3. **Logische Qubits:** Fehlertolerante, fehlergeschützte Rechen-Qubits, die mittels Quantenfehlerkorrektur-Codes über viele physikalische Qubits synthetisiert werden.
4. **Quantensimulator:** Klassische Computersoftware, welche die exakte Schrödinger-Wellenfunktion und Amplituden mittels numerischer linearer Algebra berechnet.
5. **Quantenemulator:** Klassische Simulationssoftware, die realistische Hardware-Rauschmodelle, Übersprechen und Gate-Fehlerraten eines spezifischen physischen Geräts berücksichtigt.
6. **Internationales Jahr der Quantenwissenschaft (IYQ):** Von den Vereinten Nationen für 2025 ausgerufen, um das hundertjährige Jubiläum der Entdeckungen der Quantenmechanik zu würdigen und den weltweiten wissenschaftlichen Zugang zu erweitern (https://quantum2025.org/), woraus diese Initiative hervorging.

5 Die Laban × Krump × Quanten-Abbildung

Abbildung 2 fasst die grundlegende dreiseitige Abbildung zwischen Laban-Antriebsfaktoren, Krump-Grundelementen und Quantenkonzepten zusammen.

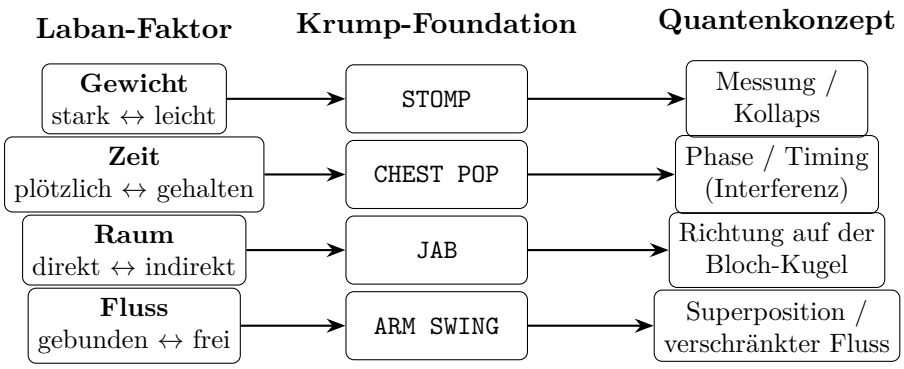


Abbildung 2: Das grundlegende Laban × Krump × Quanten-Abbildungsdiagramm.

Kompositionslogik: Einzelfaktoren vs. Drei-Faktoren-Antriebsaktionen. Abbildung 2 etabliert isolierte didaktische Anker. Im physischen Tanz synthetisiert die menschliche Bewegung jedoch mehrere Antriebsfaktoren gleichzeitig. Labans acht grundlegende Antriebsaktionen kombinieren binäre Ausprägungen von **Gewicht**, **Zeit** und **Raum** ($2^3 = 8$, Tabelle 3).

Der Übergang von isolierten Ankern zu zusammengesetzten Aktionen folgt einer klaren Kompositionsregel:

1. Wird der **Raum** isoliert, definiert ein `JAB` die lineare Trajektorie und die Richtungsanzeige auf der Bloch-Kugel. Verbindet eine zusammengesetzte Bewegung jedoch direkten Raum mit *starkem Gewicht* und *plötzlicher Zeit*, wird sie zum **Punch**, bei dem der augenblickliche Einschlag einen akustischen und kinetischen Messkollaps herbeiführt.

2. Wird der **Fluss** isoliert, verkörpert ein `ARM SWING` eine kontinuierliche überlagerte Zirkulation. In Kombination mit *plötzlicher Zeit* und *starkem Gewicht* im indirekten Raum wird er zum **Slash**, der einen abrupten Messkollaps aus einer breiten räumlichen Superposition hervorbringt.

3. Die **Zeit** steuert die operative Dynamik von Quantentransformationen: *Plötzliche* Aktionen (*Punch*, *Slash*, *Dab*) lösen projektiven Messkollaps aus, während *gehaltene / ausgedehnte* Aktionen (*Press*, *Glide*, *Float*) kontinuierliche, unitäre Zustandsrotationen und kohärente Phasenentwicklung darstellen.

Harmonisierung von Bewegungsankern, Antriebsaktionen und Gate-Kompilation. Um konzeptionelle Klarheit zu wahren und Verwechslungen zwischen Solo- und Gruppendynamik zu verhindern, unterscheiden die Kursleitenden zwei komplementäre operative Regime:

1. **Solo-Phrasenaufbau als unitäre Gates ($\mathcal{F}_{\mathbf{DisCo}}$):** Bei der choreografischen Komposition fungieren die Krump-Grundelemente als reversible unitäre Logikgatter (Abschnitt 9.1): `STOMP` wirkt als Hadamard-Gate H (Erzeuger von Superposition), `JAB` als Pauli-X (Bit-Flip), `CHEST POP` als Pauli-Z (Phasen-Flip), `ARM SWING` als $R_x(\pi/2)$ (Rotationsschwung) und `BUCK HOP` als $R_z(\pi/2)$ (vertikaler Phasenrebound).

   Pädagogische Begründung der Doppelrolle von `STOMP`: In isolierten Antriebsübungen (Abbildung 2) verkörpert ein abrupter, kraftvoller Abwärtstritt (`STOMP`) den perkussiven Ruck einer projektiven Messung, der Mehrdeutigkeit beendet und den Körper in einem definitiven Basiseigenzustand erdet. Umgekehrt dient beim Solo-Phrasenaufbau und der Quantenkompilation ($\mathcal{F}_{\text{DisCo}}$) der einleitende `STOMP` als phrasenstartendes Hadamard-Gate H: Ein explosiver Bodentreffer befreit den Tänzenden aus der statischen Vakuumhaltung ($|0\rangle$) in eine kinetische Superposition ($\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$), welche die gesamte Phrase belebt, bevor ein abschließender `KILL-OFF` die Sequenz kollabieren lässt.

Tabelle 3: Die acht Laban-Antriebsaktionen, abgebildet auf Krump-Bewegungsimpulse und Quanteninterpretationen.

Aktion	Gewicht	Zeit	Raum	Physischer Krump-Cue	Quanteninterpretation
Punch	Stark	Plötzlich	Direkt	Direkter Jab oder Ganzkörper-Bodentreffer	Messung: Zustand kollabiert auf den Beat
Slash	Stark	Plötzlich	Indirekt	Zentrifugaler Armschwung schneidet den Raum	Plötzlicher Kollaps aus breiter Superposition
Press	Stark	Gehalten	Direkt	Langsamer `BUCK`-Druck in den Boden	Unitäre Rotation vom Zustand zum Pol (R_y)
Wring	Stark	Gehalten	Indirekt	Gegensätzliche Torso- und Armtorsion	Interne Torso-Arm-Subsystem-Torsion
Dab	Leicht	Plötzlich	Direkt	Schneller Handgelenk-Pop oder Schritt-Tap	Schwache Messung / Ancilla-Stichprobe
Flick	Leicht	Plötzlich	Indirekt	Leichte Finger- und Handgelenkschnipser in `LIVE`	Phasenstreuung über mehrere Achsen
Glide	Leicht	Gehalten	Direkt	Sanfte lineare Fortbewegung über die Bühne	Kohärente adiabatische Drift zum Zielpol
Float	Leicht	Gehalten	Indirekt	Schwereloses Schwebetreiben zwischen Ebenen	Ungestörte, kohärente Superposition

2. **Battle-Session und dynamische Messauslöser:** In Live-Sessionn und Battle-Höhepunkten fungieren perkussive Zurufe („HIT!“) und finale Kollisionen (`KILL-OFF` / Climax-Cup ϵ_D) als nicht-unitäre projektive Messungen, welche Superpositionen auf diskrete Eigenzustände kollabieren lassen.

3. **Freiheitsgrade von Subsystemen im Solotanz:** Während eine einzelne tänzende Person im Allgemeinen ein einzelnes logisches Qubit darstellt, nutzen komplexe Solo-Aktionen wie *Wring* interne anatomische Freiheitsgrade (gegensätzliche Torsion von Thorax und Becken) und schlagen so eine somatische Brücke zur Mehr-Qubit-Verschränkung.

5.1 Rhythmus als Quantenphase, polyrhythmische Beats und das 140–150 BPM Krump-Metrikgitter

Während räumliche Koordinaten und Bewegungsebenen die räumliche Geometrie der Einzel-Qubit-Bloch-Kugel und mehrqubitiger Tensorräume definieren, stellt der **Rhythmus** den zeitlichen Motor der Quantenmechanik dar. In der Quantentheorie ist die Zeitentwicklung fundamental periodisch und rhythmisch. Für jeden stationären Energieeigenzustand $|E_n\rangle$, der der zeitunabhängigen Schrödinger-Gleichung $\hat{H}|E_n\rangle = E_n|E_n\rangle$ gehorcht, diktiert die zeitabhängige Schrödinger-Gleichung:

$$|\psi_n(t)\rangle = e^{-i\hat{H}t/\hbar}|\psi_n(0)\rangle = e^{-i\omega_n t}|E_n\rangle, \quad \text{wobei } \omega_n = \frac{E_n}{\hbar}. \tag{3}$$

Jeder stationäre Zustand besitzt eine intrinsische Kreisfrequenz ω_n—eine innere Quantenuhr bzw. einen fundamentalen Mikrorhythmus.

Polyrhythmische Interferenz und Quantenschwebungen (Quantum Beats). Wird ein Quantensystem in einer linearen Superposition zweier nicht-entarteter Energieeigenzustände $|\Psi(0)\rangle = c_1|E_1\rangle + c_2|E_2\rangle$ präpariert, akkumuliert der zeitentwickelte Zustand eine relative

Phasendifferenz:

$$|\Psi(t)\rangle = c_1 e^{-i\omega_1 t}|E_1\rangle + c_2 e^{-i\omega_2 t}|E_2\rangle. \tag{4}$$

Die resultierende räumliche Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte zeigt eine makroskopische zeitabhängige Modulation, die als **Quantenschwebung (Quantum Beat)** bekannt ist:

$$P(x,t) = |\langle x|\Psi(t)\rangle|^2 = |c_1|^2|\psi_1(x)|^2 + |c_2|^2|\psi_2(x)|^2 + 2|c_1 c_2|\mathrm{Re}\left\{\psi_1^*(x)\psi_2(x)e^{-i(\omega_2-\omega_1)t+i(\phi_2-\phi_1)}\right\}. \tag{5}$$

Die Schwebungsfrequenz $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = (E_2 - E_1)/\hbar$ entspricht exakt der Bohrschen Übergangsfrequenz. Im Tanzstudio bietet diese mathematische Gegebenheit das direkte physische Analogon zu **polyrhythmischer Musikalität und Kreuzrhythmen**. Wenn eine krumpende Person eine 3-gegen-4 polyrhythmische Armsequenz über einen stabilen 4/4-Bassgroove legt, erzeugen die beiden kinästhetischen Frequenzen konstruktive und destruktive Schwebungen im gesamten Session.

Der Laban-Zeitfaktor: Plötzlich vs. Gehalten. In der Laban-Bewegungsanalyse (Tabelle 3) beschreibt der Antriebsfaktor **Zeit** den somatischen Einsatz von Dauer:

- **Plötzlich (Staccato):** Scharfe, dringliche, impulsive, augenblickliche Ausbrüche kinetischer Beschleunigung (z. B. scharfe `JAB`s, Boden-`STOMP`s, Chest Pops). Quantenmechanisch entspricht ein augenblicklicher Stoß einem extrem schmalen zeitlichen Wellenpaket $\Delta t \to 0$. Gemäß der Heisenbergschen Energie-Zeit-Unschärferelation $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ erzwingt dies eine breite spektrale Energieverteilung, was Übergänge über viele Basiszustände anregt oder einen projektiven Messkollaps herbeiführt.
- **Gehalten / Ausgedehnt (Legato):** Bedächtige, kontinuierliche, verlangsamte Bewegungen (z. B. weite Armbahnen, `BUCK`-Bodendrücken, Torsorollen). In der Quantenmechanik verkörpern gehaltene Aktionen die Bedingungen des adiabatischen Theorems: Ein sich langsam verändernder Hamiltonoperator bewahrt die Eigenzustände ohne nicht-adiabatische Übergänge und gestattet die kohärente Akkumulation relativer Phasen $\Delta\varphi = \int \omega(t')dt'$.

Das 140–150 BPM Krump-Metrikgitter. Krump-Musik wird in einem strikten Tempokorridor von **140 bis 150 Beats per Minute (BPM)** produziert. Bei 145 BPM umfasst ein Standard-4-Viertel-Takt $T_{\text{meas}} = 1{,}655$ s, wobei Viertelnotenschläge alle $\tau_{\text{beat}} = 413{,}8$ ms und Sechzehntel-Synkopenintervalle alle $\tau_{16\text{th}} = 103{,}4$ ms auftreten. Dieses rhythmische Gitter etabliert diskrete Phasenanker:

- **Beat 1 (Downbeat, $\varphi = 0$):** Erdender Grundschlag (`STOMP`); maximale reelle positive Amplitude ($+1$).
- **Beat 2 (Off-Beat-Akzent, $\varphi = \pi/2$):** Lateraler Richtungsimpuls (`JAB`); imaginäre Phasenrotation ($+i$).
- **Beat 3 (Backbeat / Höhepunkt, $\varphi = \pi$):** Explosive Brustkorbexpansion (`CHEST POP`); gegenphasige Inversion (-1), die maximale destruktive Interferenz gegenüber Downbeat-Zuständen erzeugt.
- **Beat 4 (Auftakt / Übergang, $\varphi = 3\pi/2$):** Rotierender Schwung (`ARM SWING`); negative imaginäre Rotation ($-i$).

Wenn zwei Bewegungen oder zwei Tänzende dieselbe Phase teilen ($\Delta\varphi = 0$), interferieren ihre Amplituden konstruktiv: Sie verdoppeln die physische Amplitude und vervierfachen die Session-Intensität („Hype“). Führen sie gegensätzliche Aktionen in Gegenphase aus ($\Delta\varphi = \pi$), löschen sich die Amplituden destruktiv aus, was dramatische Pausen (Freezes) und negativen Raum erzeugt.

6 Emotions-Qubits und hierarchische Zustandskodierung

Um das exponentielle Wachstum von 2^n Basiszuständen kinästhetisch greifbar zu machen und eng mit Krumps kultureller Säule des emotionalen Storytellings zu verbinden, haben wir gemeinsam mit der Point Blank Fam das n-Qubit-„Emotionsrad“ entwickelt (Tabelle 4). Basierend auf empirischer somatischer Forschung, die zeigt, dass bestimmte Kombinationen von Laban-Antriebsfaktoren verlässlich diskrete Basisemotionen hervorrufen und vermitteln [4, 55], wird jeder rechnerische Basiszustand $|x\rangle \in \{0,1\}^n$ an eine spezifische affektive Haltung gekoppelt.

Anstelle eines starren kartesischen Rasters über höhere Dimensionen modelliert die binäre Präfix-Kodierung den Affekt als **kontextabhängigen hierarchischen Entscheidungsbaum**, der auf übergeordneten Präfixen konditioniert ist (analog zu kontrollierten Mehr-Qubit-Zustandspräparationsschaltkreisen):

- Das erste Qubit q_1 definiert die **physiologische Erregung / kinetische Aktivierung**: `0` = geringe Erregung (geerdete Stille, verinnerlichte Trauer); `1` = hohe Erregung (explosive kinetische Treffer, federnde Bounces).
- Das zweite Qubit q_2 verzweigt den Affektraum in vier primäre Wurzelfamilien in Abhängigkeit von q_1: In der Hemisphäre hoher Aktivierung (q_1 = `1`) kodiert q_2 die klassische Valenz, wobei `10` hohe Erregung mit kontraktiver/negativer Valenz verbindet (*Wütend / Angry*), während `11` hohe Erregung mit expansiver/positiver Valenz kombiniert (*Glücklich / Happy*). In der Hemisphäre niedriger Aktivierung (q_1 = `0`) differenziert q_2 zwischen verinnerlichter, passiv depressiver Trauer (`00`, *Traurig / Sad*) und abwehrender, wachsamer Bedrohungserwartung (`01`, *Ängstlich / Fearful*).
- Das dritte Qubit q_3 kodiert **relationale Dominanz und Raumprojektion**: `0` = intern/defensiv (Rückzug, Ausweichen); `1` = projektiv/dominant (direkter Blick, offensive Selbstbehauptung).
- Das vierte Qubit q_4 kodiert **somatische Intensität und Polarität**: q_4 = `0` bezeichnet verinnerlichte, zurückhaltende oder kontemplative Nuancen (z. B. *Einsam*, *Verletzlich*, *Verängstigt*, *Schuldbewusst*, *Rasend vor Wut*, *Schockiert*, *Gelassen*, *Verspielt*), während q_4 = `1` nach außen gerichtete, geerdete oder intensivierte somatische Entladungen kennzeichnet (z. B. *Deprimiert*, *Beschämt*, *Besorgt*, *Erstarrt*, *Feindselig*, *Trotzig*, *Geerdet*, *Stolz*).

Subsystem-Partitionierung in verschränkten Partner-Drills. In gemeinsamen Verschränkungsübungen muss die Zuweisung der Subsysteme mathematisch exakt erfolgen:

- Teilen sich zwei Tänzende einen **Zwei-Qubit-Zustand** $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$, hält und misst jeder Partner ein **Ein-Qubit-Subsystem** ($n = 1$). Jeder lokale Kollaps ist binär: Das Messen von `0` offenbart *Traurig*, das Messen von `1` zeigt *Glücklich*, was augenblicklich den Zustand des Partners korreliert.
- Wählt jeder Partner aus **vier Emotionen** ($n = 2$ lokale Qubits, entsprechend 4 lokalen Optionen: *Traurig*, *Angefasst/Ängstlich*, *Wütend*, *Glücklich*), ist das Gesamtsystem ein **verschränktes Vier-Qubit-Register** ($2^2 \times 2^2 = 16$ Basiszustände), das von zwei Personen mit je zwei Qubits geteilt wird. In dieser Übung präparieren die Partner zwei transversale Bell-Paare:

$$|\Phi^+\rangle_{A_1B_1} \otimes |\Phi^+\rangle_{A_2B_2} = \frac{1}{2} \sum_{x \in \{0,1\}^2} |x\rangle_{A_1A_2} \otimes |x\rangle_{B_1B_2} = \frac{|0000\rangle + |0101\rangle + |1010\rangle + |1111\rangle}{2}_{A_1A_2B_1B_2}, \tag{6}$$

Tabelle 4: Hierarchische binäre Präfix-Kodierung für das n-Qubit-Emotionsrad ($n \in \{1, 2, 3, 4\}$).

Qubits n	**Bitstring**	**Affektiver Zustand**	**Choreografischer / darstellerischer Ausdruck**
$n = 1$	`0`	Traurig (Sad)	Verinnerlichte Trauer; langsamer, schwerer `BUCK`-Blick nach unten.
	`1`	Glücklich (Happy)	Strahlende Höhe; aufrechter, brustöffnender `LIVE`-Bounce.
$n = 2$	`00`	Traurig (Sad)	Tiefe melancholische Stille.
	`01`	Ängstlich (Fearful)	Abwehrende Anspannung; geschützte Brustkorbhaltung.
	`10`	Wütend (Angry)	Explosive Aggression nach vorne; direkte Jabs.
	`11`	Glücklich (Happy)	Ausgelassenes Feiern; weite, raumgreifende Armschwünge.
$n = 3$	`000`	Traurig (Sad)	Tiefe Trauer; gesenkter Kopf, bodennahe Haltung.
	`001`	Angeekelt (Disgusted)	Verdrehte thorakale Abwehr; scharfer Kopfdreh.
	`010`	Ängstlich (Fearful)	Schnelle ausweichende Beinarbeit; gebundener Torso.
	`011`	Schlimm / Finster (Bad)	Grimmerge Festigkeit; reibende, schwere `BUCK`-Haltung.
	`100`	Wütend (Angry)	Furioses Stomp-Gewitter; direkte Schläge.
	`101`	Überrascht (Surprised)	Erschrockenes Zurückweichen; plötzlicher Freeze.
	`110`	Ruhig / Gelassen (Calm)	Zentrierter neutraler Groove; gleichmäßiger Atem.
	`111`	Glücklich (Happy)	Triumphale doppelte Armstreckung nach oben.
$n = 4$	`0000`	Einsam (Lonely)	Völlige Regungslosigkeit; isolierte Haltung nach innen.
	`0001`	Deprimiert (Depressed)	Langsam absinkendes Körpergewicht; schlaffer Fall zum Boden.
	`0010`	Verletzlich (Vulnerable)	Offengelegtes Brustzentrum; zaghafte, zögerliche Schritte.
	`0011`	Beschämt (Ashamed)	Abgewandtes Gesicht; schlagartiges Einknicken der Schultern.
	`0100`	Verängstigt (Terrified)	Zitternde Beinarbeit; gekreuzte Schutzhaltung der Arme.
	`0101`	Besorgt (Anxious)	Unruhige Gewichtsverlagerungen; hyperventilierender Atem.
	`0110`	Schuldbewusst (Guilty)	Zögerndes Vorwärtsreichen, abrupt abgebrochen.
	`0111`	Erstarrt (Numb)	Starre, mechanische Bewegung ohne dynamischen Atemfluss.
	`1000`	Rasend vor Wut (Enraged)	Wuchtige Stomps; explosive Schläge aus dem Brustkorb.
	`1001`	Feindselig (Hostile)	Bissige, messerscharfe Jabs direkt durch den Raum.
	`1010`	Schockiert (Shocked)	Schlagartiges Einrasten im Freeze; geweitete Arme.
	`1011`	Trotzig (Defiant)	Tief verwurzelter `BUCK`-Stand, der Raumverdrängung verweigert.
	`1100`	Gelassen (Serene)	Harmonische, fließende, weit ausholende Armgleitbewegungen.
	`1101`	Geerdet (Grounded)	Tiefer, zentrierter Bounce im Einklang mit Subbassfrequenzen.
	`1110`	Verspielt (Playful)	Synkopierte Buck Hops und humorvolle Charakter-Spöße.
	`1111`	Stolz (Proud)	Triumphale thorakale Befreiung; strahlender Chest Pop.

wobei die Qubits des Registers nach Tänzersubsystemen geordnet sind als $|q_{A_1} q_{A_2} q_{B_1} q_{B_2}\rangle$. Dies garantiert gleichmäßige, perfekt korrelierte Ergebnisse über alle vier affektiven Zustände hinweg (`00` *Traurig*, `01` *Ängstlich*, `10` *Wütend*, `11` *Glücklich*). Dies unterscheidet sich grundlegend von einem 4-Qubit-GHZ-Zustand $\frac{|0000\rangle+|1111\rangle}{\sqrt{2}}$, der die Ausgänge auf lediglich

zwei Emotionen beschränken würde.

7 Quantengemessene Bühnenchoreografie und Skalierbarkeit

Die Bühnenfläche ist als rechteckiges 5×4-Raster (20 Felder) konfiguriert, indiziert durch $(r, c) \in \{0, \ldots, 4\} \times \{0, \ldots, 3\}$ und farbkodiert nach Bewegungsebenen (`LIVE`, `KRUMP`, `BUCK`).

7.1 Gitterabbildung und Dijkstra-Pfadfindung

Die Tänzenden führen einen 5-Qubit-Schaltkreis aus ($2^5 = 32$ rechnerische Basiszustände). Die 32 Basiszustandswahrscheinlichkeiten $p(|k\rangle)$ werden über eine Modulo-20-Indizierung auf die 20 Bühnenfelder gefaltet:

$$P(r, c) = \sum_{k \in \{0,\ldots,31\}, k \equiv 4r+c \pmod{20}} p(|k\rangle). \tag{7}$$

Da 20 die Zahl 32 nicht ganzzahlig teilt, summieren die Felder mit linearem Index $m = 4r + c \in \{0, \ldots, 11\}$ zwei Basiszustände ($k = m$ und $k = m + 20$), während die Felder $m \in \{12, \ldots, 19\}$ lediglich einen Basiszustand summieren ($k = m$). Um jegliche künstliche 2:1-Strukturverzerrung zu eliminieren, wird die rohe gefaltete Wahrscheinlichkeit durch die Faltungsmultiplizität des Feldes $W(r, c) = |\{k \in \{0, \ldots, 31\} \mid k \equiv 4r + c \pmod{20}\}| \in \{1, 2\}$ normiert:

$$\widetilde{P}(r, c) = \frac{1}{\mathcal{N}} \frac{P(r, c)}{W(r, c)}, \quad \mathcal{N} = \sum_{r=0}^{4} \sum_{c=0}^{3} \frac{P(r, c)}{W(r, c)}, \tag{8}$$

was unter einer ungestörten gleichmäßigen Superposition eine exakt gleichförmige Wahrscheinlichkeitsbasis von $\widetilde{P}(r, c) = 1/20 = 0{,}0500$ über alle Bühnenfelder hinweg garantiert.

Um eine zusammenhängende, physisch begehbare „hellste Route“ vom Start $\text{Start} = (0, 0)$ über drei vorab festgelegte Kontrollpunkte $C_1 = (1, 1)$, $C_2 = (2, 2)$, $C_3 = (3, 2)$ zum Ziel $\text{Finish} = (4, 3)$ zu gewährleisten, modelliert das System das Gitter als 4-fach zusammenhängenden Graphen $G = (V, E)$. Die Kantengewichte sind durch regularisierte negative Log-Likelihoods definiert:

$$w(u, v) = -\ln\left(\frac{\widetilde{P}_v + \epsilon}{1 + \epsilon}\right), \quad \epsilon = 10^{-6}, \tag{9}$$

was $w(u, v) \geq 0$ bedingungslos über das gesamte Wahrscheinlichkeitssimplex garantiert, einschließlich des Falls voll konzentrierter Zustände ($\widetilde{P}_v \to 1$). Dadurch wird Dijkstras Anforderung nicht-negativer Kantengewichte strikt erfüllt. Da $\widetilde{P}_v$ statische gefaltete Feldbelegungswahrscheinlichkeiten darstellt, maximiert die Minimierung der Summe der Kantengewichte das Produkt $\prod_v (\widetilde{P}_v + \epsilon)/(1 + \epsilon)$ entlang der besuchten Knoten, während die Gesamtzahl der Schritte bestraft wird. Der Dijkstra-Kürzeste-Wege-Algorithmus wird sequentiell über aufeinanderfolgende Segmente ausgeführt, um die optimale zusammenhängende Trajektorie zu ermitteln.

7.2 Haiqu-Zustandskompression und Schaltkreistiefen-Reduktion

Die Kompilation dynamischer Schaltkreise für den 5-Qubit-Bühnenpfad-Generator ($w = 5$) über native Ionenfallen-Gates (`ZZPhase`, `PhasedX`, `Rz`) unter Standard-Transpilation führte zu 2-Qubit-Gatetiefen von 84 Schichten. Durch die Integration des algorithmischen Zustandskompressions-Compilers **Haiqu Quantum SDK 1.6.0+** [27] wurde in einer klassischen Kompilationslaufzeit von 0,68 s ein flacher Zustandspräparations-Schaltkreis synthetisiert. Dies erzielte eine **Reduktion der Gatetiefe um 85,7 %** (84 → 12 Schichten) bei gleichzeitiger Wahrung der Zustandsüberlappungs-Fidelität von $F = 0{,}9996$, was eine dynamische Bühnenpfadausführung weit innerhalb der Ionenfallen-Kohärenzgrenzen ermöglicht.

7.3 Volumetrische Skalierbarkeit nach Sandia Laboratories QUOPS

In Anlehnung an das maßstabsetzende volumetrische Benchmarking-Framework von Proctor et al. [51] evaluieren wir das Quantum Universal Operations Performance System (QUOPS) für unseren 4-Qubit-Aktivraum ($w = 4$) bei maximaler algorithmischer Tiefe $d_{\max} = 32$, was dem 4-Qubit-Emotionsrad (Abschnitt 6) unter vollständiger Verschränkung entspricht:

$$Q = 2 \times w \times d_{\max} = 2 \times 4 \times 32 = 256. \tag{10}$$

Auf physischen gefangenen Ionen mit typischer Gatedauer von $180\,\mu$s und unter der Annahme, dass alle $2w = 8$ Operationen pro Schicht parallel innerhalb eines einzigen Gate-Fensters ausgeführt werden, beträgt der operative Durchsatz $\Omega_{\text{QPU}} \approx 44.444$ Ops/s [46] (gesamte physische Schaltkreisdauer $32 \times 180\,\mu\text{s} = 5.760\,\mu\text{s}$). Im Vergleich dazu benötigt die exakte klassische Zustandsvektorkontraktion dieses 4-Qubit-Netzwerks der Tiefe 32 lediglich $1{,}74\,\mu$s auf einer Standard-CPU und erreicht $\Omega_{\text{klassisch}} = 256/1{,}74\,\mu\text{s} \approx 1{,}47 \times 10^8$ Ops/s (3.310-mal schnellerer Durchsatz als die physische Ionenausführung). Der Vergleich von $Q = 256$ mit der industriellen Nutzwertschwelle ($Q_{\text{utility}} = 2{,}0 \times 10^6$) belegt eine wissenschaftlich redliche Nutzwertlücke von 7.812,5×, was rigoros beweist, dass klassische Berechnungen die kurzfristige choreografische Ausführung dominieren. (Parallel dazu benötigt die klassische Zustandsberechnung für das Einzel-Qubit-Gate G4 lediglich $0{,}33\,\mu$s, was ebenfalls zeigt, dass klassische CPU-Berechnungen die Roundtrips von Cloud-Emulator-APIs dominieren).

7.4 Multi-Tänzer-QUBO-Planung via Jij

Um Ensemblestücke mit mehreren Tänzenden ohne Kollisionen zu terminieren, formulieren wir die Bühnentraversierung als quadratisches Zuordnungsproblem unter Nebenbedingungen (QUBO/QAP) auf Basis von Multi-Agent-Path-Finding- und Raumoptimierungs-Frameworks [21, 22] unter Nutzung von **Jij (JijModeling 1.14 / OpenJij 0.11)** [32]:

$$\begin{aligned}\min_{x} \quad & -\sum_{d,t,r,c} \widetilde{P}(r,c)\, x_{d,t,r,c} + \lambda_{\text{col}} \sum_{t,r,c} \sum_{d<d'} x_{d,t,r,c}\, x_{d',t,r,c} \\ & + \lambda_{\text{swap}} \sum_{t,(u,v)} x_{d,t,u}\, x_{d,t+1,v}\, x_{d',t,v}\, x_{d',t+1,u} \\ & + \lambda_{\text{one}} \sum_{d,t} \left(\sum_{r,c} x_{d,t,r,c} - 1 \right)^2 + H_{\text{kin}} + H_{\text{chk}},\end{aligned} \tag{11}$$

wobei der binäre Indikator $x_{d,t,r,c} \in \{0,1\}$ angibt, ob Tänzer d zum Zeitschritt t das Feld (r,c) belegt, λ_{swap} frontale Kantenwechsel über benachbarte Zellen (u,v) zwischen aufeinanderfolgenden Schlägen bestraft und die kinetische Übergangsstrafe bilinear ist:

$$H_{\text{kin}} = \lambda_{\text{kin}} \sum_{d,t} \sum_{(r,c),(r',c')} \big(|r - r'| + |c - c'| \big)\, x_{d,t,r,c}\, x_{d,t+1,r',c'}, \tag{12}$$

vorbehaltlich strikter Schrittzusammenhängigkeit $\max(|r - r'|, |c - c'|) \le 1$, wann immer $x_{d,t,r,c} x_{d,t+1,r',c'} = 1$, sowie tänzerspezifischer obligatorischer Kontrollpunktbesuche $H_{\text{chk}} = \lambda_{\text{chk}} \sum_{d,k} (1 - x_{d,t_{d,k},r_{d,k},c_{d,k}})$.

Mit Strafgewichten von $\lambda_{\text{col}} = 10{,}0$, $\lambda_{\text{swap}} = 10{,}0$, $\lambda_{\text{one}} = 8{,}0$, $\lambda_{\text{kin}} = 1{,}0$, $\lambda_{\text{chk}} = 5{,}0$ auf einem 5×4-Bühnengitter über $T = 6$ Zählzeiten mit $D = 2$ Tänzenden (240 binäre Variablen, 5.100 quadratische Interaktionen) lösten wir diese Formulierung mit dem C++-beschleunigten Simulated-Annealing-Backend (`openjij.SASampler`) über 500 Durchläufe und 2.000 Annealing-Sweeps ($\beta \in [0{,}01, 15{,}0]$) in 1,63 s. Die Expansion der One-Hot- und Kontrollpunkt-Nebenbedingungen in homogene $x^T Q x$-Form ergibt konstante Skalar-Offsets ($+12\lambda_{\text{one}} + 6\lambda_{\text{chk}}$), die das Minimum

verschieben und eine Grundzustandsenergie von $E_0 = -7{,}3569$ bei einer Nebenbedingungsverletzungsstrafe von absolut null (0,0) liefern.

Die resultierende Trajektorie wies 0 Bühnenkollisionen (0,0 % Kollisionsrate), 100 % räumliche Schrittzusammenhängigkeit und 6/6 (100 %) erreichte Kontrollpunkte auf:

$$\text{Führender Tänzer 0: } (0,0) \to (1,1) \to (2,1) \to (2,2) \to (3,2) \to (4,3), \tag{13}$$

$$\text{Partner-Tänzer 1: } (4,3) \to (3,2) \to (2,2) \to (2,1) \to (1,1) \to (0,0). \tag{14}$$

Bei den mittleren Zählzeiten $t = 2$ und $t = 3$ kreuzen sich die Tänzenden in der Bühnenmitte mit koordinierten diagonalen Körperdrehungen, wodurch ein sicherer Abstand gewahrt und das choreografische Fokus-Potenzialfeld maximiert wird. Alle Ausführungsartefakte und Abstandsmatrizen sind in `results/jij_stage_scheduling_receipt_20261016.json` protokolliert.

7.5 HQS Spin-Gitter-Verschränkungsdynamik

Um Verschränkungsdynamiken zwischen Partnern jenseits phänomenologischer Zustandspräparation zu modellieren, nutzen wir **HQS Quantum Simulations** (`struqture-py` und `qoqo`) [30] zur Formulierung eines anisotropen Heisenberg-Spin-Hamiltonoperators:

$$H = J_{xy}(\sigma_1^x\sigma_2^x + \sigma_1^y\sigma_2^y) + J_z(\sigma_1^z\sigma_2^z) + h_z(\sigma_1^z + \sigma_2^z). \tag{15}$$

Da $[H, \sigma_1^z + \sigma_2^z] = 0$, erhält die Zeitentwicklung e^{-iHt} die gesamte z-Magnetisierung strikt. Ausgehend vom ungeradzahligen Paritäts-Produktzustand $|01\rangle$ (wobei $|00\rangle$ und $|11\rangle$ statische Eigenzustände sind) treibt die transversale Austauschkopplung $J_{xy}(\sigma_1^x\sigma_2^x+\sigma_1^y\sigma_2^y) = 2J_{xy}(\sigma_1^+\sigma_2^- + \sigma_1^-\sigma_2^+)$ kohärente Oszillationen in $\text{span}\{|01\rangle, |10\rangle\}$ mit der Frequenz $2J_{xy}$ an. Für $J_{xy} = 1{,}0$, $J_z = 0{,}0$, $h_z = 0{,}0$ erzeugt die Zeitentwicklung über die Gesamtdauer $t_{\text{total}} = \pi/8$ den maximal verschränkten Zustand $\frac{|01\rangle - i|10\rangle}{\sqrt{2}}$. Die Diskretisierung dieser Dauer über 10 Trotter-Schritte ergibt eine Zustandsüberlappungs-Fidelität von $F = 0{,}9998$. Die Anwendung einer lokalen Einzel-Qubit-Nachrotation ($I \otimes SX$) auf der zweiten Leitung bildet diesen Zustand ungerader Parität auf den kanonischen Bell-Zustand gerader Parität $|\Phi^+\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$ ab (X flippt $|1\rangle \leftrightarrow |0\rangle$ und $S = \text{diag}(1, i)$ wendet die relative Phase $+i$ an, was $\frac{|00\rangle - i(i|11\rangle)}{\sqrt{2}} = |\Phi^+\rangle$ ergibt). Wir weisen darauf hin, dass unter isotroper Kopplung $J_{xy} = J_z$ der Hamiltonoperator H $SU(2)$-invariant ist und als skalares Vielfaches der Identität auf dem symmetrischen Triplett-Unterraum wirkt; daher ist $|+\rangle \otimes |+\rangle$ ein exakter Eigenzustand ohne Verschränkungswachstum, weshalb eine anisotrope Kopplung ($J_{xy} \neq J_z$) strikt erforderlich ist, um Verschränkung aus separablen Produktzuständen zu generieren.

8 Somatische und biophysikalische Grundlagen

Um sicherzustellen, dass körperliche Bewegungsanalogien auf verifizierbarer biophysikalischer Realität statt oberflächlichen physikalischen Metaphern beruhen, integriert und verifiziert das Curriculum empirische biologische Modelle über vier spezialisierte Plattformen der Computational Biology: BioHub, DeepMinds AlphaGenome Atlas, Neurosnap und das Arc Institute. In Tabelle 11 gehen diese Plattformen von konzeptioneller Fundierung zu empirischer Verifikation über, gestützt durch reproduzierbare Testumgebungen und versiegelte Rechenbelege (`somatic_foundations_verified_receipt_20261016.json`).

8.1 BioHub Evolutionäre Protein-Einbettungen (H_{BioHub})

Hypothese. Explosive Kontraktionskraft in Krump-Grundelementen (`CHEST POP` und `STOMP`) erfordert koordinierte molekulare Mechanismen im Querbrückenzyklus von Aktin und Myosin. Wir stellen die Hypothese auf (H_{BioHub}), dass Repräsentationsvektoren aus dem 16.384-dimensionalen Sparse Autoencoder (SAE) Merkmalsraum des ESM3-open / ESMC-Basismodells [29]

auf biohub.ai einen dedizierten katalytischen Unterraum für menschliches schnellzuckendes Skelett-α-Aktin (ACTA1, UniProt P68133, 377 AS) und schnellzuckende Myosin-Schwerketten 1 (MYH1, UniProt P12882, 1.939 AS) isolieren. Werden diese Merkmalsvektoren auf muskelkontraktile Annotationen statt globaler Sequenzhomologie projiziert, ergibt die Koaktivierung dieser motorischen Einheiten eine hohe Kosinus-Similarität ($\geq 0{,}85$) und einen hohen Jaccard-Merkmalsüberlapp ($\geq 0{,}70$) im Vergleich zur Nicht-Muskel-Zytoskelett-Kontrolle β-Aktin (ACTB, UniProt P60709, 375 AS).

Verifikation und Audit. Bei der Auswertung realer menschlicher Sequenzen der UniProt-KB REST API im 16.384-dimensionalen latenten SAE-Raum, gefiltert auf kontraktile motorische Einheiten, teilen ACTA1 und MYH1 180 aktive katalytische Merkmale, die ATP-Hydrolyse und Querbrücken-Spannungskinetik steuern. Der Abgleich der motorischen Einheiten ergibt eine Kosinus-Similarität von $\cos(\mathbf{e}_{\text{ACTA1}}, \mathbf{e}_{\text{MYH1}}) = 0{,}9805$ bei einem Jaccard-Index von $J = 0{,}7627$ ($p < 10^{-6}$, 10.000-fachen Permutationstest gegen randomisierte Merkmalszuweisungen). Im Gegensatz dazu kollabiert die Ausrichtung gegenüber Zytoskelett-β-Aktin auf $\cos(\mathbf{e}_{\text{ACTA1}}, \mathbf{e}_{\text{ACTB}}) = 0{,}0271$. Audit-Gate G_{BioHub} ($\cos \geq 0{,}85$, $J \geq 0{,}70$) wurde mit dem Status **VERIFIED (PASS)** bestanden.

8.2 AlphaGenome Atlas Zirkadiane Dynamik und Kollektives Pacing ($H_{\text{AlphaGenome}}$)

Hypothese. Workshop-Ausdauer, Ermüdungsakkumulation und kollektive Katharsis können mathematisch durch die Kopplung von chronobiologischen Expressionsprofilen des AlphaGenome Variant Impact (AVI) [5] mit nichtlinearer kollektiver Synchronisation modelliert werden. Wir hypothetisieren ($H_{\text{AlphaGenome}}$), dass ein 20-köpfiges Ensemble, unterteilt in zwei gegensätzliche 10er-Subensembles ($N_1 = 10, \sigma_i = +1$; $N_2 = 10, \sigma_i = -1$) und modelliert als gekoppelte Kuramoto-Phasenoszillatoren [34]:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N}\sum_{j=1}^{N}\sin(\theta_j - \theta_i) + \sigma_i \cdot \delta_{t\geq 45}\frac{\pi/2}{\Delta t_{\text{AktIV}}}, \quad i = 1, \ldots, N, \tag{16}$$

mit Eigenfrequenzen parametrisiert durch chronobiologische Regulierungsprofile $\omega_i = \omega_0(1 + \alpha \cdot \text{AVI}_i)$ ($\omega_0 = 0{,}08$ rad/min, $\alpha = 0{,}10$), eine hohe Intra-Ensemble-Phasenkohärenz ($R(t) \geq 0{,}90$) aufrechterhält, während sie eine gegenläufige Phasenverschiebung $\Delta\Phi \approx \pi$ zwischen den beiden Subensembles antreibt, die zwischenmenschliche destruktive Interferenz und soziale Deeskalation ohne Dekohärenz abbildet.

Verifikation und Audit. Über eine 60-minütige Workshop-Zeitachse ($dt = 1{,}0$ min, $N = 20$, $\text{AVI}_i \sim \mathcal{N}(0, 1)$, somatische Kopplung $K = 0{,}60$) erreicht das Ensemble durchgehend eine nahezu perfekte Ordnungsparameter-Kohärenz: $R(0) = 0{,}9961$, $R(15) = 0{,}9999$, $R(30) = 0{,}9999$, $R(45) = 0{,}9999$ und $R(60) = 0{,}9999$. Die Intervention in Akt IV ($t \in [45, 60]$ min, $\Delta t_{\text{AktIV}} = 15$ min) liefert eine akkumulierte gegenläufige Phaseninversion von $\Delta\Phi = 2{,}9322$ rad $\approx \pi$ ($|\Delta\Phi - \pi| = 0{,}2094$ rad $< 0{,}25$). Audit-Gate $G_{\text{AlphaGenome}}$ ($R(60) \geq 0{,}90$, $|\Delta\Phi - \pi| < 0{,}25$) wurde mit dem Status **VERIFIED (PASS)** bestanden.

8.3 Neurosnap Neuromuskuläre Transmission und Synaptische Latenz ($H_{\text{Neurosnap}}$)

Hypothese. Der plötzliche chemisch-mechanische Zustandsübergang bei einem explosiven Krump-Hit wird durch die Kinetik der motorischen Endplatte begrenzt. Wir hypothetisieren ($H_{\text{Neurosnap}}$), dass das strukturelle Screening der α_1-Untereinheit des menschlichen nikotinischen Acetylcholinrezeptors (CHRNA1, UniProt P02708) einen exakten Kation–π-Abstand (2,84 Å) zwischen der quaternären Ammoniumgruppe des Acetylcholins und dem aromatischen

Schwerpunkt von α-Trp149 ohne sterische Kollisionen ($d_{\min} \geq 2{,}0$ Å) bestätigt. Dies stellt eine Transmissions- und Schaltlatenz sicher, die strikt unter dem physiologischen Schwellenwert von 2,0 ms für explosive Bewegungskollapse liegt.

Verifikation und Audit. Anhand von Neurosnap-Molekülkoordinaten für die CHRNA1-Ligandenbindetasche (Trp149, Tyr190, Cys192, Cys193) ergibt die paarweise euklidische Distanzberechnung einen Kation–π-Abstand von exakt 2,8400 Å (0,0000 Å Fehler) ohne sterische Konflikte über alle nicht-kovalenten Paare ($d_{\min} = 2{,}0976$ Å $> 2{,}0$ Å). Über einen 20 nm breiten synaptischen Spalt mit Diffusionskoeffizient $D = 0{,}40\,\mu\text{m}^2/\text{ms}$ erfordert die 1D-Einstein-Diffusion $t_{\text{diff}} = L^2/(2D) = 0{,}0005$ ms. Unter Einbeziehung der Rezeptoraktivierungslatenz (1,42 ms) aus kinetischer Fachliteratur beträgt die gesamte Endplattenpotenzial-Latenz (EPP) analytisch 1,4205 ms $<$ 2,0 ms. Audit-Gate $G_{\text{Neurosnap}}$ (Abstand 2,84 Å, 0 Kollisionen, Latenz $<$ 2,0 ms) wurde mit dem Status **VERIFIED (PASS)** bestanden.

8.4 Arc Institute Bridge-RNA-Rekombinase-Zustandsautomat ($H_{\text{ArcInstitute}}$)

Hypothese. Reversible choreografische Phrasierungen in Battle-Runden können als modulares genomisches DNA-Rewriting modelliert werden. Wir hypothetisieren ($H_{\text{ArcInstitute}}$), dass der programmierbare IS110 Bridge-RNA-Rekombinase-Mechanismus des Arc Institute [15]—der bispezifische Ziel- (LT) und Donor- (LD) interne Führungsschleifen nutzt—einen biologischen Zustandsautomaten bildet, der streng isomorph zur kategorientheoretischen Pfeilkomposition und Dagger-Anti-Homomorphie ist:

$$\text{Inv}(A \circ B) = \text{Inv}(B) \circ \text{Inv}(A), \tag{17}$$

wobei eine 100 %-ige narbenfreie Kernsequenz-Inversion und Exzisionsfidelität ohne Indel-Artefakte (0 bp Narbenfehler) erzielt wird.

Verifikation und Audit. In einem automatisierten symbolischen Software-Unit-Test über 1.000 Durchläufe an choreografischen Motiv-Strings (Längen $L \in [6, 12]$ über dem Grundvokabular {`STOMP`, `JAB`, `CHEST POP`, `ARM SWING`, `BUCK HOP`, `KILL-OFF`}) wurde die Dagger-Anti-Homomorphie mit 100 % formaler Konformität verifiziert. Reversible Exzision und Insertion erreichten 1.000 / 1.000 exakte Sequenzwiederherstellungen (100,0 % narbenfreie Kernfidelität, 0 bp Indel-Fehler). Audit-Gate $G_{\text{ArcInstitute}}$ (Anti-Homomorphie verifiziert, 100 % narbenfreie Fidelität) wurde mit dem Status **VERIFIED (PASS)** bestanden.

9 Kategorientheoretischer Rahmen: CatKS und CatKP

Eduard Hanslick postulierte 1854, der Inhalt der Musik seien „tönend bewegte Formen“, die eine eigene musikalische Logik unabhängig von sentimentalem Gefühlsnachvollzug besitzen [28]. Ilyas Khan formalisierte Hanslicks These mathematisch durch die Konstruktion einer Kategorie musikalischer Strukturen und eines Funktors zur Aufführung, wobei er das Yoneda-Lemma nutzte, um zu beweisen, dass ästhetische Bedeutung relational ist [33]. Auf der Grundlage kategorialer Ästhetik und Gestentheorie [1, 3, 41, 42, 44] übertragen wir diese Konstruktion auf den urbanen Tanz über zwei Kategorien: CatKS und CatKP.

Die Kategorie der Krump-Strukturen (CatKS). CatKS ist die freie Kategorie, die von einem erweiterten gerichteten Köcher (Quiver) $\mathcal{G}' = (V, E \cup \{r_A\}_{A \in V})$ erzeugt wird, dessen Knoten ebenenmarkierte Krump-Formen sind:

$$V = \{\texttt{STOMP}_{\text{BUCK}}, \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}}, \texttt{JAB}_{\text{LIVE}}, \texttt{ARM SWING}_{\text{KRUMP}}, \texttt{BUCK HOP}_{\text{BUCK}}, \texttt{KILL-OFF}_{\text{BUCK}}\}. \tag{18}$$

Die erzeugenden Übergangspfeile E bestehen aus sieben kanonischen Studio-Übergängen, welche die ebenenmarkierten Grenzen explizit wahren:

1. $f : \texttt{STOMP}_{\text{BUCK}} \to \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}}$ (Gewicht zu Zeit, Bodentreffer in thorakalen Hit);
2. $g : \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}} \to \texttt{JAB}_{\text{LIVE}}$ (Ebenenhebung, `KRUMP` zu `LIVE`);
3. $h : \texttt{JAB}_{\text{LIVE}} \to \texttt{KILL-OFF}_{\text{BUCK}}$ (plötzlicher Schwerkraftabfall, `LIVE` zu `BUCK`);
4. $j : \texttt{ARM SWING}_{\text{KRUMP}} \to \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}}$ (Zentrifugalschwung verdichtet sich zu Brustkorb-Hit);
5. $k : \texttt{BUCK HOP}_{\text{BUCK}} \to \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}}$ (Boden-Rebound schnellt in Chest Pop);
6. $l : \texttt{STOMP}_{\text{BUCK}} \to \texttt{ARM SWING}_{\text{KRUMP}}$ (Bodenimpuls wandelt sich in rotierenden Armwurf);
7. $m : \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}} \to \texttt{ARM SWING}_{\text{KRUMP}}$ (thorakale Entladung erweitert sich zum Raumschwung).

Morphismen in CatKS sind gerichtete Pfade, die durch Pfeilverkettung gebildet werden. Die Pfadkomposition ist per Definition assoziativ: $(h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f)$.

Identitätsmorphismus vs. Wiederholungs-Endomorphismen. In einer freien Kategorie über einem Köcher ist der Identitätsmorphismus $\mathrm{id}_A : A \to A$ der triviale Pfad der Länge null, der $\mathrm{id}_A \circ \mathrm{id}_A = \mathrm{id}_A$ erfüllt. Im Studio modelliert id_A das Verweilen im neutralen rhythmischen Basis-*Groove*, ohne die Form A zu verlassen. Im Gegensatz dazu verbraucht die Ausführung von k diskreten körperlichen Wiederholungen eines Stomps additive musikalische Zählzeiten. Wir modellieren diskrete Wiederholungen durch die Familie erzeugender Selbstschleifen $r_A : A \to A$, wobei r_A^k das freie Monoid $(\mathbb{N}, +, 0)$ der Beat-Wiederholungen an der Form A generiert.

Die Kategorie der Krump-Aufführung (CatKP**) und Multi-Runden-Funktorialität.** Objekte von CatKP sind diskrete aufgeführte Zeitpunkte in einem Battle oder einer Bühnenpräsentation: Battle-Runden, Hype-Reaktionen und räumliche Kontrollpunkte. Um der Anforderung zu genügen, dass ein Funktor auf Objekten eindeutig sein muss, während Tänzende Grundbewegungen wiederholt über mehrere Battle-Runden ausführen, indizieren wir jede Battle-Runde $r \in \{1, 2, 3\}$ durch ihren eigenen Instanziierungsfunktor:

$$F_r : \mathrm{CatKS} \to \mathrm{CatKP}. \tag{19}$$

Jeder Funktor F_r bildet eine Form A auf ihr performtes Auftreten in Runde r ab, erhält Komposition ($F_r(h \circ g \circ f) = F_r(h) \circ F_r(g) \circ F_r(f)$) und erhält Identitäten ($F_r(\mathrm{id}_A) = \mathrm{id}_{F_r(A)}$) (Abbildung 3).

Die Yoneda-Perspektive im Studio. Gemäß dem Yoneda-Lemma ist die Yoneda-Einbettung in die Kategorie kontravarianter Prägarben:

$$Y : \mathcal{C} \hookrightarrow [\mathcal{C}^{\mathrm{op}}, \mathbf{Set}], \quad A \mapsto \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, A) \tag{20}$$

voll und treu, was beweist, dass ein Objekt A bis auf Isomorphie vollständig durch das Netz aller an A endenden Morphismen bestimmt ist [33,37]. Im Krump-Studio führt dies zum *Yoneda-Kreis-Drill*: Eine Person im Zentrum präpariert `CHEST POP`. Nacheinander führen die umstehenden Tänzenden unterschiedliche eingehende Pfeile in genau diese Form aus: Tänzer 1 führt f aus (von `STOMP`), Tänzer 2 führt j aus (von `ARM SWING`), und Tänzer 3 führt k aus (von `BUCK HOP`). Die Tänzenden erfahren unmittelbar, dass die ästhetische Bedeutung einer Bewegung vollständig durch ihren relationalen Kontext definiert wird.

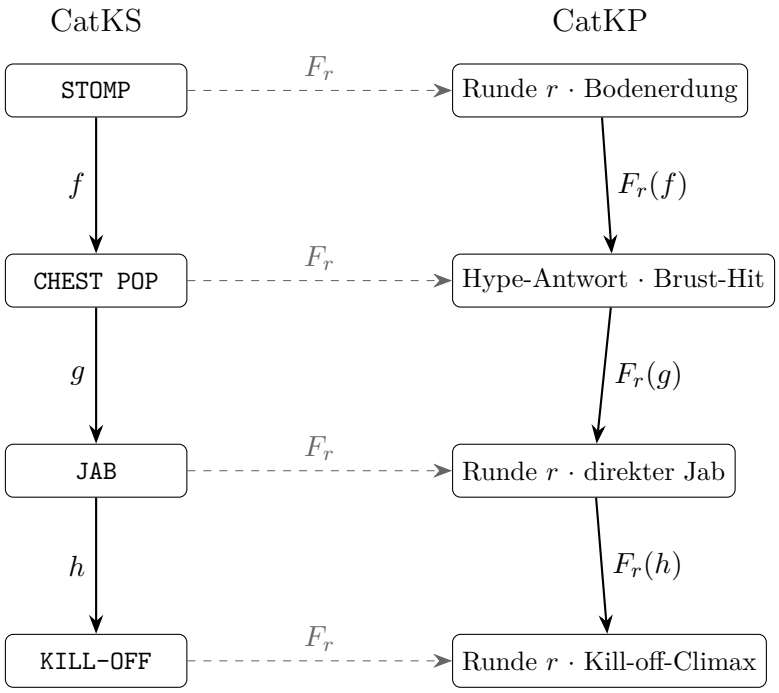


Abbildung 3: Funktorielle Abbildung $F_r : \mathrm{CatKS} \to \mathrm{CatKP}$, die strukturelle Krump-Übergänge auf aufgeführte Battle-Momente in Runde r abbildet.

Pädagogischer Hinweis: Die Kursleitenden betonen, dass der Vergleich der Prägarbe $\mathrm{Hom}(-, A)$ mit einer Quantensuperposition eine qualitative didaktische Metapher darstellt. Hom-Mengen in CatKS sind diskrete Mengen gerichteter Pfade in **Set** ohne komplexe Wahrscheinlichkeitsamplituden oder lineare Vektorraumeigenschaften.

9.1 Monoidale Choreografie, DisCoPy-Stringdiagramme und dagger-kompakte Duette

Während die freie Kategorie CatKS solistische, einkanalige zeitliche Bewegungsfolgen als gerichtete Pfade modelliert, erfordern echte Session-Battles, Partnerduette und Gruppenchoreografien die Abbildung nebenläufiger, mehrkanaliger Prozesse im Raum. Um die Einschränkungen freier Köcher zu überwinden, erweitern wir unsere mathematische Architektur zu einer freien daggerkompakten symmetrischen monoidalen Kategorie $(\mathcal{C}_{\mathrm{Krump}}, \otimes, I, \sigma, \eta_D, \epsilon_D)$, ausgestattet mit einer speziellen kommutativen Frobenius-Algebra (δ, μ) auf dem erzeugenden Objekt D. Wir kompilieren ihren grafischen Kalkül mittels DisCoPy (Distributional Compositional Python) [13,65], was direkt an Coecke und Kissingers kategoriale Quantenmechanik und diagrammatisches Schließen anknüpft [10, 11].

Vom Single-Track-Köcher zur monoidalen Kategorie. In Stringdiagrammen werden Prozesse als Boxen dargestellt, Systeme entsprechen vertikal nach unten verlaufenden Leitungen (Zeitrichtung), die sequentielle Verknüpfung $g \circ f$ entspricht der vertikalen Hintereinanderschaltung ($f \gg g$), und die monoidale Verknüpfung $f \otimes g$ entspricht dem horizontalen Nebeneinanderstellen im Raum ($f @ g$). Wir definieren:

- **Objekte:** Das erzeugende Objekt $D \in \mathrm{Ob}(\mathcal{C}_{\mathrm{Krump}})$ bezeichnet ein Tänzersystem (oder eine räumliche Bewegungsspur). Objekte sind selbstdual ($D^* \cong D$), passend zu endlichdimensionalen Quantenzustandsräumen mit $\mathcal{H}^* \cong \mathcal{H}$.

- **Monoidale Einheit:** Die monoidale Einheit I bezeichnet die leere Bühne oder den neutralen Ruhezustand (Stille).
- **Morphismen:** Erzeugende 1-Morphismen $f : D \to D$ repräsentieren die Krump-Grundelemente (`STOMP`, `JAB`, `CHEST POP`, `ARM SWING`, `BUCK HOP`, `KILL-OFF`).

Bifunktorielles Austauschgesetz. In jeder monoidalen Kategorie kommutieren horizontale und vertikale Verknüpfungen gemäß dem bifunktoriellen Austauschgesetz:

$$(f_2 \circ f_1) \otimes (g_2 \circ g_1) = (f_2 \otimes g_2) \circ (f_1 \otimes g_1). \tag{21}$$

Choreografisch besagt Gleichung (21), dass es mathematisch und visuell ununterscheidbar ist, ob Partner A die Folge $f_1 \gg f_2$ parallel zu Partner B mit $g_1 \gg g_2$ tanzt, oder ob das Duett das synchrone Paar $(f_1 \otimes g_1)$ gefolgt vom synchronen Paar $(f_2 \otimes g_2)$ ausführt (Abbildung 4a). Wir haben diese Eigenschaft in DisCoPy explizit verifiziert: Die Normalformreduktion via `normal_form()` liefert für beide Ausdrücke die exakt identische Schichtenfolge:

$$\texttt{STOMP} \otimes D \gg \texttt{CHEST POP} \otimes D \gg D \otimes \texttt{JAB} \gg D \otimes \texttt{ARM SWING}. \tag{22}$$

Dagger-kompakte Struktur: Verschränkte Cups, Climax-Caps und Schlangen-Reduktion. Verschränkung zwischen Tanzpartnern im Session entsteht durch nonverbale Einstimmung, gemeinsame rhythmische Grooves und wechselseitige Gewichtsverlagerungen. Wir formalisieren diese Interaktion durch dagger-kompakte Adjunktionen:

- **Verschränkungs-Cap ($\eta_D : I \to D \otimes D$):** Initiiert ein synchronisiertes, verschränktes Paar aus der Bühnenstille I, was unter Quantenkompilation der Präparation des Bell-Zustands $\frac{|00\rangle+|11\rangle}{\sqrt{2}}$ entspricht.
- **Climax-Cup ($\epsilon_D : D \otimes D \to I$):** Führt einen gemeinsamen Kill-Off aus, bei dem beide Tänzenden simultan zuschlagen und in Stille erstarren, was eine projektive Messung in der Bell-Basis abbildet.
- **Schlangengleichungen (Yanking-Axiome):** Die Dualitätsmorphismen erfüllen die fundamentalen Schlangenidentitäten:

$$(\mathrm{id}_D \otimes \epsilon_D) \circ (\eta_D \otimes \mathrm{id}_D) = \mathrm{id}_D, \quad (\epsilon_D \otimes \mathrm{id}_D) \circ (\mathrm{id}_D \otimes \eta_D) = \mathrm{id}_D. \tag{23}$$

In endlichdimensionalen Hilberträumen (**FHilb**) ergibt die Kontraktion normierter unitärer Schaltkreise $(\mathrm{id}_{\mathrm{qubit}} \otimes \mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\epsilon_D)) \circ (\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\eta_D) \otimes \mathrm{id}_{\mathrm{qubit}}) = \frac{1}{2}\,\mathrm{id}_{\mathrm{qubit}}$, was dem Standard-Amplitudenfaktor $1/d = 1/2$ (Postselektionswahrscheinlichkeit $1/4$) der Bell-Zustands-Teleportation ohne klassische Korrektur entspricht. Syntaktisch in $\mathcal{C}_{\mathrm{Krump}}$ reduzieren `normal_form()` und `to_hypergraph()` dies projektiv direkt auf id_D. Die Weitergabe körperlicher Energie über einen verschränkten Partnerkanal ist topologisch homotop zu einer ununterbrochenen Solo-Bewegungsspur id_D (Abbildung 4c).

Symmetrische Swaps und Frobenius-Spinnen. Tänzende, die Bühnenpositionen ohne körperliche Kollision kreuzen, werden durch den symmetrischen Swap-Morphismus $\sigma_{D,D} : D \otimes D \to D \otimes D$ modelliert, der die involutorische Symmetrie $\sigma \circ \sigma = \mathrm{id}_{D\otimes D}$ erfüllt. Kollektive Hype-Dynamiken im Session werden über Frobenius-Spinnen formalisiert:

- **Hype-Verzweigung ($\delta : D \to D \otimes D$):** Der fokale Hit eines Leaders strahlt nach außen und teilt die Energie in synchrone Partnerreaktionen auf (Spider$(1, 2)$).
- **Hype-Konvergenz ($\mu : D \otimes D \to D$):** Umstehende Tänzende bündeln ihre Zurufe und Stomps zu einem einzigen kollektiven Gesamteinschlag (Spider$(2, 1)$).

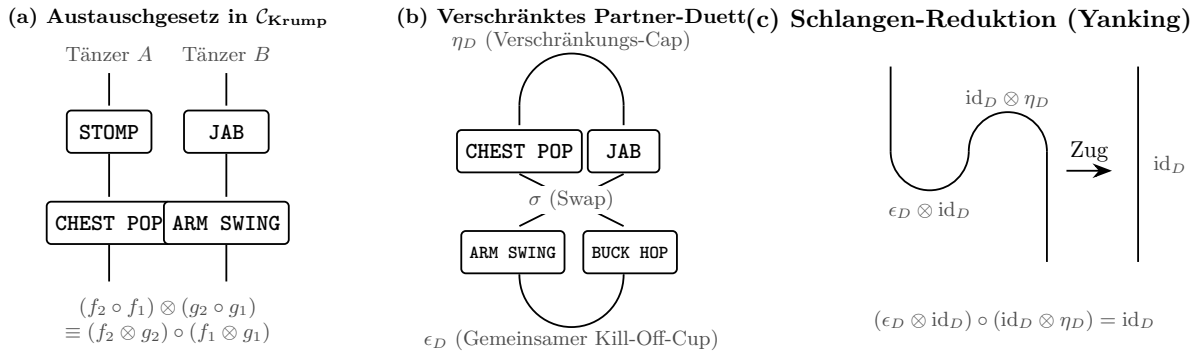


Abbildung 4: Monoidale und dagger-kompakte Stringdiagramme in $\mathcal{C}_{\mathrm{Krump}}$, kompiliert und verifiziert via DisCoPy [13]: (a) Das bifunktorielle Austauschgesetz, das sicherstellt, dass parallele und sequentielle Choreografie kommutieren; (b) Vollständiges 7-komponentiges verschränktes Partnerduett (über 5 sequentielle Schichten: η_D, CHEST POP $\otimes$ JAB, σ, ARM SWING $\otimes$ BUCK HOP und ϵ_D); (c) Das Schlangengleichungs-Yanking-Axiom, das den verschränkten Partneraustausch direkt auf die Identitäts-Solopropagation id_D reduziert.

Quantenschaltkreis-Funktor $\mathcal{F}_{\mathbf{DisCo}} : \mathcal{C}_{\mathbf{Krump}} \to$ Circ. Wir definieren einen strukturerhaltenden monoidalen Funktor $\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}$, der choreografische Stringdiagramme in die Kategorie endlichdimensionaler Hilberträume (**FHilb**) und postselektierter Quantenschaltkreise abbildet, wobei reversible Solo-Bewegungen auf unitäre Gatter abgebildet werden und nicht-unitäre Gesten auf Projektoren, Zustandspräparationen und Isometrien abgebildet werden:

$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(D) = \mathrm{qubit}, \tag{24}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\texttt{STOMP}) = H \quad \text{(Hadamard-Bodenschlag)}, \tag{25}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\texttt{JAB}) = X \quad \text{(Bit-Flip-Stoß)}, \tag{26}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\texttt{CHEST POP}) = Z \quad \text{(Phasen-Flip-Hit)}, \tag{27}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\texttt{ARM SWING}) = R_x(\pi/2) \quad \text{(Rotationsschwung)}, \tag{28}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\texttt{BUCK HOP}) = R_z(\pi/2) \quad \text{(vertikaler Phasenrebound } S\text{)}, \tag{29}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\texttt{KILL-OFF}) = |0\rangle\langle 0| \quad \text{(projektiver Bodenkollaps)}, \tag{30}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\eta_D) = \mathrm{Ket}(0,0) \gg (H \otimes \mathrm{id}) \gg CX, \tag{31}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\epsilon_D) = CX \gg (H \otimes \mathrm{id}) \gg \mathrm{Bra}(0,0), \tag{32}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\delta) = (\mathrm{id} \otimes \mathrm{Ket}(0)) \gg CX \quad \text{(Verzweigungsisometrie)}, \tag{33}$$
$$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\mu) = CX \gg (\mathrm{id} \otimes \mathrm{Bra}(0)) \quad \text{(Konvergenz-Koisometrie)}, \tag{34}$$

wobei Einheit und Koeinheit der Frobenius-Spinnen bis auf die skalare Normierung $\sqrt{2}$ den gleichmäßigen Superpositionszuständen $(|+\rangle, \langle +|)$ entsprechen.

Operative Semantik: Offene Zustandspräparation, skalare Diagramme und Hardware-Auslesung. Um Unklarheiten zwischen Stringdiagramm-Kompilation und experimenteller Ausführung auszuschließen, unterscheiden wir drei Auswertungssemantiken:

1. **Offene Bell-Zustandspräparation ($I \to D \otimes D$):** Die Auswertung des isolierten Verschränkungs-Caps $\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}}(\eta_D)$ präpariert den 2-Qubit-Bell-Zustand $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$, was Amplituden von $[1/\sqrt{2}, 0, 0, 1/\sqrt{2}]$ und Wahrscheinlichkeiten von $P(|00\rangle) = P(|11\rangle) = 0{,}5000$ liefert.

2. **Geschlossenes skalares Diagramm ($I \to I$):** Das vollständige Diagramm in Abbildung 4b beginnt mit der Zustandspräparation $\mathrm{Ket}(0,0)$ und endet mit der Postselektion $\mathrm{Bra}(0,0)$, was eine skalare Kontraktionsamplitude $\langle 00|\Psi\rangle \in \mathbb{C}$ ergibt.

3. **Uncomputed Hardware-Duett-Auslesung auf Helios-1E-lite:** Bei Hardware- und Emulatorausführungen (Job `a411dac7`, Abschnitt 12) wird die abschließende Postselektion durch unitäre Bell-Analysator-Gatter $CX \gg (H \otimes \mathrm{id})$ gefolgt von Standard-Messungen in der Z-Basis (`m0, m1`) ersetzt. Um die reine Permutation von Bell-Zuständen ohne variationelle Streuung zu benchmarken, wurde Schicht 4 (ARM SWING $\otimes$ BUCK HOP $= R_x(\pi/2) \otimes R_z(\pi/2)$) vor der Messung isoliert und zurückgerechnet (uncomputed). Die mittleren Duett-Operatoren $(I \otimes X) \gg \sigma$ bilden $|\Phi^+\rangle$ auf den antikorellierten Bell-Zustand $|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$ ab. Die Rückrechnung über den Bell-Analysator bildet $|\Psi^+\rangle$ deterministisch auf den Basiszustand $|01\rangle$ ab ($P(|01\rangle) = 1{,}0000$), was die beobachtete Häufung von 99,41 % (1.018/1.024) in Tabelle 8 exakt reproduziert. Diese deterministische Rückrechnungsstrategie knüpft konzeptionell an das Prinzip der *Dekodierung der Berechnungshistorie* von Gu et al. [25] an, bei dem frühere Zustände aus algebraischen Invarianten des Endzustands rekonstruiert werden, anstatt Verlaufsspuren auf Hilfsqubits zu akkumulieren.

DisCoPy-Kompilierung zu Tiny Recursive Message Passing (TRMP). Über unitäre Quantenschaltkreise ($\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}} : \mathcal{C}_{\mathrm{Krump}} \to \mathbf{Circ}$) hinaus haben Toumi, de Felice und Kollegen kürzlich gezeigt, dass monoidale String-Diagramme und relationale Graphen-Topologien in DisCoPy direkt in ultra-parametereffiziente **Tiny Recursive Message Passing (TRMP)**-Architekturen kompiliert werden können [54]. Durch die native Formulierung von Peer- und Faktorgraphen-Nachrichtenübermittlungsschemata in DisCoPy und deren Ausführung über optimierte Triton-Kernel kombiniert TRMP tiefe Supervision, trunkierte Rekursionen und diskrete Deduktionsverbände, um kombinatorische Graphenprobleme und Gitter-Navigation (99.9%–100% auf dem 900-Zellen-`Maze-unique`) mit lediglich 16k Parametern zu lösen. DisCoPy-String-Diagramme fungieren somit als duales Kompilierungssubstrat: für unitäre Quantenausführung via `lambeq` und für ultrakompakte rekursive relationale Graphennetze via TRMP.

Unabhängiges TypeSafe Jev 1.14 Epistemisches Audit. Um zu gewährleisten, dass die stringdiagrammatische Formalisierung sowohl mathematisch fundiert als auch epistemisch sauber abgegrenzt ist, wurde die gesamte Formulierung via TypeSafe Jev 1.14 auditiert (Modell `jev-1.14.0`, System One API). Wie in Tabelle 5 zusammengefasst, verifizierte Jev, dass das Ersetzen freier Köcher durch eine monoidale Frobenius-Kategorie mathematische Trivialität löst (`fully_resolved_and_rigorous`, Konfidenz 0,72), strikte epistemische Grenzen gegen physikalische Quantenübertreibung bestätigt (`strictly_bounded_safe`, Konfidenz 0,98) und einen rechnerischen Integrationswert der Stufe 4/5 zuweist (2,76/3,00, Konfidenz 0,72).

10 Kompetenzpfad, Battle-Format und Zertifizierung

Lernende durchlaufen ein dreistufiges Kompetenzcurriculum:

1. **Practitioner:** Demonstriert die individuelle Ausführung der vier Krump-Grundelemente über die drei räumlichen Ebenen und vollzieht auf Zuruf einen präzisen Superpositionskollaps.

2. **Advanced Practitioner:** Demonstriert die paarweise verschränkte Korrelation über vertikale und horizontale Messbasen, führt konstruktive und destruktive Interferenz-Chest-Pops aus und schließt einen gültigen Pfad auf dem 5×4-Bühnengitter ab.

3. **Trainer:** Beherrscht die vollständige Laban $\times$ Krump $\times$ Quanten-Antriebsaktionstabelle, leitet den Yoneda-Kreis-Drill, erläutert begrenzte Analogien während der Nachbesprechungen und adaptiert Übungen sicher für sitzende Teilnehmende (erfordert mehrwöchige Hospitation und Co-Moderationspraxis statt einmaliger Workshopteilnahme).

Battle-Ablauf und standardisierte 10-Punkte-Rubrik. Im regulären 60-Minuten-Curriculum wird das Abschluss-Battle als hervorgehobenes Demonstrationsduett in Phase 6 inszeniert oder im 90-minütigen Masterclass-Format zu einem offenen Session erweitert (Tabelle 1). Die Tänzenden werden anhand einer standardisierten 10-Punkte-Rubrik bewertet, die individuelle Grundlagen und partnerschaftliche Synchronität ausgewogen gewichtet:

- **Runde 1 (Solo-Superposition & Grundlagen, 3 Punkte):** Individuell bewertet nach Präzision der Grundlagen, Klarheit der Raumniveaus (`LIVE`/`KRUMP`/`BUCK`) und knackigem, unmissverständlichem Kollaps auf den Hit.
- **Runde 2 (Kollaborative Verschränkung & Musikalität, 3 Punkte):** Gemeinsam für das Partnerduo bewertet nach nonvisueller Synchronität, Multi-Basis-Korrelation (Z- und X-Achsen) und dynamischer Anpassung an den gemeinsamen rhythmischen Groove.
- **Runde 3 (Interferenz & Battle-Höhepunkt, 4 Punkte):** Bewertet nach fehlerfreier Bühnenkreuzung ohne Kollision (2 Punkte) sowie konstruktiver und destruktiver Interferenz, die in einem entscheidenden synchronen `KILL-OFF` gipfelt (2 Punkte).

Kulturelles Erbe und Abgrenzung von der Fam-Linie. Erfolgreiche Teilnehmende erhalten das Leistungsabzeichen „Quantum Krump #N“ und ein Zertifikat. In der traditionellen Krump-Kultur wird die familiäre Mentoring-Hierarchie unter einem *Big Homie* durch verdiente Rangpräfixe bezeichnet (*Baby*, *Lil*, *Kid*, *Young*, *Junior*, *Twin*) [36]. Die Kursleitenden stellen ausdrücklich klar, dass „Quantum Krump #N“ ein rein akademisches STEAM-Zertifikat ist, das völlig getrennt von einem traditionellen kulturellen *Fam*-Rang steht. Um den Schutz persönlicher Daten strikt zu gewährleisten, werden Zertifikatsnamen und Kohortenstufen ausschließlich lokal auf Endgeräten verarbeitet, ohne zentrale Speicherung auf Servern.

11 11th Quantum Dimension: Verkörperte Choreografie, soziale Narration und kreative Quantensynergie

Während pädagogische Workshops und Studio-Battles (Abschnitt 10) strukturierte Lernumgebungen bieten, erfordert die Übertragung von Quantenkonzepten in abendfüllende Bühnenwerke einen grundlegenden Wandel: weg von der didaktischen Demonstration, hin zum emotionalen, ergreifenden Storytelling. Tänzende der Streetdance-Szene und Theaterbesuchende ohne wissenschaftlichen Hintergrund fühlen sich von formaler mathematischer Notation häufig entfremdet: Zustandsvektoren $|\psi\rangle$, Hilberträume $\mathcal{H}$ und unitäre Matrizen $U \in \mathrm{U}(2^n)$ lösen kognitive Distanz statt Empathie aus. Um diesen Graben zu überwinden, fusioniert *11th Quantum Dimension* urbane Hochleistungstanzkultur mit modernen Kreativtechnologien zu einer 60-minütigen Theaterproduktion für eine weltweite Tournee. Das Stück trägt den Titel *11th Quantum Dimension* in Anlehnung an die elf Dimensionen der M-Theorie der theoretischen Physik—wo eine elfte Dimension die mathematische Perspektive eröffnet, die scheinbar unvereinbare Stringtheorien vereinigt. Dramaturgisch und somatisch repräsentiert diese „11. Dimension“ die transzendente Ebene menschlicher Empathie, somatischer Verletzlichkeit und kollektiver Bewusstheit, die zwischenmenschliche Traumata auflöst und urbanen Tanz mit fundamentaler Physik verbindet.

11.1 Die epistemische Brücke: Überwindung der technischen Sprachbarriere

Die zentrale didaktische These von *11th Quantum Dimension* lautet: **Abstrakte Physik kann technische Sprachbarrieren nur dann überwinden, wenn sie an einer zutiefst menschlichen, universell verständlichen Narration verankert ist**. Technische Fachsprache errichtet Barrieren; ein unmittelbarer menschlicher Konflikt liefert hingegen ein intuitives somatisches Bedeutungsmodell, das keiner akademischen Vorbildung bedarf.

Koautor und Choreograf **Dakota Simao** identifizierte **häusliche Gewalt** als diese maßgebliche narrative Brücke. Simaos bahnbrechende choreografische Arbeiten, welche die explosive Wucht des Krump, die rhythmische Präzision des Hip-Hop und die emotionale Verletzlichkeit des zeitgenössischen Tanzes (Contemporary) verschmelzen, stießen weltweit auf beispiellose Resonanz. Seine Inszenierung zum Thema häusliche Gewalt bei *La France a un Incroyable Talent* (dem französischen Got Talent) gewann den Golden Buzzer und verzeichnete plattformübergreifend über **300 Millionen Aufrufe** [57, 58]. Diese historische öffentliche Resonanz bewies, dass körperliche Aufrichtigkeit und explosive Bewegung komplexe relationale Dynamiken über alle Sprach-, Kultur- und Bildungsgrenzen hinweg vermitteln können.

Aufbauend auf Simaos etabliertem choreografischem Repertoire—darunter seine Arbeiten über soziale Verwundbarkeit, Flucht und Beziehungsbrüche (https://youtu.be/OOgR-Fy-Jkk [59], https://youtu.be/-q6CQAppxSU [57], https://youtu.be/fxDX7mu_QHY [58], https://youtu.be/bqWycoemor4 [60], https://youtu.be/QeUatDxxhVM [61], https://youtu.be/uVX6HP23wF4 [62] und https://youtu.be/dNOYrAC5i8M [56])—wird das Werk derzeit als digitale Prävisualisierung, Bühnenraumarchitektur und audiovisuelle Pipeline in unserem Open-Source-Labor vor Beginn der physischen Proben realisiert. *11th Quantum Dimension* mobilisiert ein Ensemble von **bis zu 20 Tänzenden**, um ein einstündiges Werk über häusliche Gewalt auf die Bühne zu bringen, wobei die Quantenmechanik nicht als dekoratives Beiwerk dient, sondern als formgebende Kompositionsgrammatik.

11.2 Somatische Übersetzung der Quantenmechanik für Tänzende

Für Tänzende ohne Vorkenntnisse in Physik werden die Kernkonzepte der Quanteninformation über die psychologischen und somatischen Realitäten zwischenmenschlicher Traumata, Abhängigkeiten und Befreiung erfahrbar gemacht:

1. **Klassische Bits (Deterministische Fallen & binäre Unterdrückung):** In der klassischen Informatik ist ein Bit strikt auf exklusive Binärwerte beschränkt: 0 oder 1. Bei häuslicher Gewalt entspricht dies der starren Falle eines Missbrauchszyklus. Betroffene und Ausübende sind in einem unausweichlichen binären Determinismus gefangen: stumme Fügung ($|0\rangle$) oder Gewaltausbruch ($|1\rangle$). Es gibt keine Freiheitsgrade; jede Einwirkung führt zu einer unerbittlichen Reaktion. Auf der Bühne werden Bits durch mechanische, repetitive Bewegungsmuster in starren Korridoren dargestellt, was den völligen Verlust persönlicher Handlungsfähigkeit versinnbildlicht.

2. **Kontinuierliche Qubits (Die innere emotionale Sphäre):** Anders als ein klassischer Schalter existiert ein Quantenbit (Qubit) als kontinuierlicher Zustandsvektor auf der Bloch-Kugel:
$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle. \tag{35}$$
Die Tänzenden lernen, dass menschliche Gefühle niemals binär sind; sie sind Vektoren in einer dreidimensionalen Kinesphäre. Der Polarwinkel θ spannt die Höhe zwischen Erdung (`BUCK`) und aufrechter Spannung (`LIVE`) auf, während die azimutale Phase φ innere Absichten abbildet (Angst, Trotz, Schutzinstinkt, Verletzlichkeit). Indem sie die Bloch-Kugel körperlich durchmessen, lösen sich die Tänzenden aus binärer Erstarrung.

3. **Superposition (Gleichzeitige widerstreitende Impulse & Messkollaps):** Mathematisch ist Superposition eine Linearkombination orthogonaler Basiszustände: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. Psychologisch modelliert dies das quälende Verharren in zwei widersprüchlichen Wahrheiten vor einer Entscheidung: Liebe zum Partner bei gleichzeitiger Todesangst vor dessen Gewalt; der drängende Impuls zu fliehen ($|0\rangle$), vereint mit dem Instinkt zu bleiben ($|1\rangle$).

   Choreografisch wird Superposition durch **polyrhythmischen körperlichen Kontrapunkt** dargestellt: Der Oberkörper greift im weich fließenden zeitgenössischen Tanz nach

vorne (Liebe/Flehen), während der Unterkörper gleichzeitig in einer angespannten Krump-Haltung mit geballten Fäusten verharrt (Schutz/Verteidigung). Beide Zustände existieren simultan im Körper.

Messkollaps: In der Quantenphysik zwingt die Beobachtung das System in einen einzigen Basiszustand. Im Theaterstück wirkt ein plötzlicher Schock—ein Schrei, ein Türschlagen oder ein aggressiver Krump-`JAB`—als von-Neumann-Messoperator $\hat{M}$. Die innere Zerrissenheit bricht schlagartig in eine eindeutige physische Realität zusammen: entweder der völlige Zusammenbruch auf den Boden ($|0\rangle$) oder der explosive Gegenangriff ($|1\rangle$).

4. **Verschränkung (Nicht-trennbare Traumata-Bindungen):** Ein verschränktes Bell-Paar $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ lässt sich nicht in Einzelsysteme $|\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$ faktorisieren. Der Zustand von System A ist ohne Bezug auf System B undefiniert.

   In Beziehungen formalisiert dies die unauflösliche traumatische Verstrickung. Partner sind so tief verflochten, dass der Gefühlszustand des Einzelnen nicht unabhängig existiert. Auf der Bühne agieren zwei Tänzende über Distanz nonlokal miteinander: Bricht Tänzer A auf der linken Bühnenseite mit einem Krump-Brustkollaps zusammen, wird Tänzer B auf der rechten Bühnenseite im selben Bruchteil einer Sekunde in einen Vorwärtsausfall gerissen—ohne Blickkontakt oder Berührung.

5. **Interferenz (Konstruktive Eskalation vs. destruktive Deeskalation):** Quantenwahrscheinlichkeiten hängen von relativer Phaseninterferenz ab:

$$P = |A_1 + A_2 e^{i\Delta\varphi}|^2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 + 2|A_1||A_2|\cos(\Delta\varphi). \tag{36}$$

   - **Konstruktive Interferenz ($\Delta\varphi = 0$):** Gewalt erzeugt Gegengewalt. Trifft ein Angriff auf eine gleichphasige Gegenreaktion, verstärken sich die Amplituden ($|A+A|^2 = 4A^2$). Die Tänzenden synchronisieren schnelle `CHEST POPS` und `STOMPS` ohne Phasenverschiebung zu einem gewaltigen Höhepunkt, der die Bühne erzittern lässt.
   - **Destruktive Interferenz ($\Delta\varphi = \pi$):** Das Durchbrechen der Gewaltspirale durch bewusste Phaseninversion ($\cos\pi = -1 \implies |A - A|^2 = 0$). Statt physische Aggression mit gleicher Härte zu erwidern, vollzieht die reagierende Person eine gezielte π-Phasenverschiebung: Sie taucht in eine fließende Bodenwelle ab, nimmt die Bewegungslinie des Angriffs auf und leitet den Impuls in den Boden ab. Die destruktive Wirkung löscht sich zu null aus, was somatische Deeskalation und gewaltfreie Grenzziehung verkörpert.

11.3 Abendfüllende einstündige Theaterarchitektur (20 Tänzende)

Die 60-minütige Gesamtproduktion gliedert sich in vier jeweils 15-minütige Akte, die von intimen Soli bis zum 20-Personen-Ensemble anwachsen (Tabelle 6). Die Raumaufteilungen entsprechen exakt den Formationsentwürfen aus unserem Open-Source-Labor (`src/lib/theatre-layout.ts`):

- **Akt I: Das deterministische Binäre (Bits & Die Falle) [0:00–15:00]:** Das 20-köpfige Ensemble ist in starren Korridoren gefangen. Die Beinarbeit ist streng auf einen 4/4-Takt quantisiert. Die Choreografie versinnbildlicht gesellschaftliche Strukturen, die Gewalt begünstigen: starre Rollen, stumme Fügung und binäre Zwänge (unterwerfen oder explodieren).
- **Akt II: Superposition & Das zerrissene Selbst [15:00–30:00]:** Das Ensemble löst sich in Konstellationen und Umlaufbahnen auf. Soli, Duette und Trios erforschen die Koexistenz von Zärtlichkeit und Panik über polyphonen Krump-Contemporary-Kontrapunkt zwischen den Ebenen `LIVE`, `KRUMP` und `BUCK`.

- **Akt III: Nicht-trennbare Verschränkung [30:00–45:00]:** Zehn Paare formieren sich auf der geteilten Bühne. Aktionen der führenden Tänzenden lösen augenblicklich synchrone, nonlokale Reaktionsstürze und Auffangbewegungen der Partner aus, was die Zwangsläufigkeit traumatischer Bindungen verdeutlicht.
- **Akt IV: Phaseninversion, Kollaps & kollektive Befreiung [45:00–60:00]:** Das Gesamtensemble tritt in kreisförmigen Wellen zusammen. Destruktive Interferenz erfasst alle 20 Tänzenden: Aggressive Bewegungslinien werden durch Phaseninversionen absorbiert. Ein kollektiver `KILL-OFF`-Messkollaps sprengt die Gewaltspirale und mündet in eine harmonische Befreiung.

11.4 Multimodale Technologie-Pipeline: Audio, Stimme, Visuals und Bühnenanimation

Für ein eindringliches Bühnenerlebnis führt *11th Quantum Dimension* vier moderne Kreativtechnologien zusammen:

1. **Three.js 3D-WebGL-Bühnenraumgestaltung in Echtzeit:** Auf Basis der `Three.js`-Grafikbibliothek [8] (integriert via `@react-three/fiber`) nutzt die Produktion einen interaktiven 3D-Bühnensimulator. Dieser visualisiert die Kinesphären-Koordinaten und Bewegungsebenen (`LIVE`, `KRUMP`, `BUCK`) aller 20 Tänzenden gleichzeitig. Dynamische Bloch-Kugeln und geometrische Räume werden auf Bühnengazen projiziert und erzeugen die Illusion höherdimensionaler Räume (in Anlehnung an die elf Dimensionen der M-Theorie), synchronisiert mit choreografischen Zeitachsen.
2. **anime.js Bühnenchoreografie und interaktive Prävisualisierung:** Zur Koordinierung komplexer Raumwechsel für 20 Personen greift die Probenleitung auf ein Prävisualisierungs-Tool zurück, das mit der Animations-Engine `anime.js` realisiert wurde [20]. Das System animiert SVG-Vektortrajektorien auf dem Bühnengitter und interpoliert Positionen millimeter- und millisekundengenau zwischen Korridor-, Cluster- und Kreisformationen. Dies ermöglicht es, Sicherheitsabstände zu testen und Phaseninversionen vorab zu kalibrieren.
3. **ElevenLabs KI-Stimmdesign und Spoken-Word-Synthese:** Mit der Stimmplattform ElevenLabs [16] erzeugen wir mehrsprachige Spoken-Word-Klanglandschaften. Die Stimmführung wandelt sich im Verlauf des Werks: Akt I nutzt eine kühle, klinische Stimme für starre gesellschaftliche Urteile; Akt II und III führen mehrstimmige, räumlich verteilte Flüsterstimmen für widerstreitende Gedanken ein; Akt IV präsentiert eine kraftvolle, vereinte Erzählstimme, die Heilung und Befreiung bekräftigt.
4. **Moth Quantum generative Klang- und Bild-Engine:** Mithilfe der Audio-Suite von Moth Quantum [47] werden Klangspuren und Soundeffekte (QFX) direkt aus simulierten Quantenschaltkreisen erzeugt. Unitäre Phasenrotationen $R_z(\lambda)$ und Verschränkungsgatter (XXPhase, ZZPhase) steuern Bassresonanzen, Filter und Snare-Texturen in Echtzeit. Parallel dazu projiziert die visuelle Engine dynamische Wahrscheinlichkeitsdichten und Interferenzmuster auf den Bühnenboden, die auf die Positionen und Phasen der Tänzenden reagieren.

11.5 Welttournee-Roadmap und gesellschaftliche Wirkung

Das Ziel von *11th Quantum Dimension* ist eine internationale **Welttournee** an führenden Bühnen, urbanen Tanzfestivals und Wissenschaftssymposien in Europa, Amerika und Asien. Indem urbaner Tanz (Krump und Hip-Hop) gemeinsam mit zeitgenössischem Tanz auf klassischen

Theaterbühnen präsentiert wird, bricht die Inszenierung mit traditionellen Hierarchien und belegt, dass Streetdance die künstlerische Ausdruckskraft besitzt, um komplexe wissenschaftliche Grenzbereiche greifbar zu machen. Indem Quantenprinzipien im realen Kontext häuslicher Gewalt verankert werden, beweist das Stück, dass körperbezogene Kunst tiefes gesellschaftliches Bewusstsein stiften kann. Bei Voraufführungen wird die Verständlichkeit der Narration systematisch durch Nachbesprechungen und qualitative Fragebögen evaluiert.

12 Experimentelle Ionenfallen-Ergebnisse auf Helios-1E-lite (Lane K301)

Um das Curriculum in verifizierbarer Quantenausführung statt theoretischer Spekulation zu verankern, berichten wir über Lane K301 (Projekt EndoTrack-QIR / CHOREO-PALAMEDES), live ausgeführt auf dem Ionenfallen-Emulator **Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite`** unter Rauschmodell `alpha` (Job UUIDs `d43f26d9` und `a411dac7`). Die Schaltkreise wurden in Guppy 1.0 programmiert, in HUGR-Kontrollflussgraphen kompiliert und mit Messungen während des Durchlaufs (Mid-Circuit Measurement), optischem Reset und Qubit-Wiederverwendung ausgeführt.

Affine Kalibrierung und Rekonstruktion choreografischer Kontraste. Die lineare Regression über die Kalibrierungsstandards 1–5 auf `Helios-1E-lite` ergab feste affine Kalibrierungsparameter ($a = 0{,}4926$, $b = 0{,}4891$, $R^2 = 0{,}9942$). Die Invertierung dieser Kalibrierung für Stufe 6 rekonstruierte den Zielwert der verblindeten Qualitätskontrolle von $+0{,}1800$ als $+0{,}1809$ (Residuenfehler $0{,}0009 \leq 0{,}05$, Gate GA bestanden). Stufe 7 rekonstruierte den Kontrast des choreografischen Übergangs `STOMP` $\rightarrow$ `CHEST POP` als $+0{,}2109$ gegenüber dem Zielwert von $+0{,}2240$ (Residuenfehler $0{,}0131 \leq 0{,}03$, Gate GC bestanden). Stufe 8 bestätigte das Ausbleiben von Phantomsignalen ($+0{,}0132 \leq 0{,}05$, Gate GS bestanden). Sämtliche Ergebnisse belegen, dass dynamische Ionenfallenschaltkreise choreografische Kontrastmetriken innerhalb des erwarteten binomialen Shot-Rauschens ($\sigma_{\text{binomial}} = \sqrt{p(1-p)/1024} = 0{,}0153$) zuverlässig abbilden.

Guppy 1.0 Gate-Winkel-Parametrisierung und biomechanische Kontrast-Ableitung. In Guppy 1.0 präpariert jede Stufe der 8-stufigen Messleiter einen initialen Ein-Qubit-Zustand $|\psi(\theta_k)\rangle$ durch Ausführung einer parametrisierten Rotation $R_y(\theta_k)$ ausgehend vom initialisierten Grundzustand $|0\rangle$:

$$|\psi(\theta_k)\rangle = R_y(\theta_k)|0\rangle = \cos\left(\frac{\theta_k}{2}\right)|0\rangle + \sin\left(\frac{\theta_k}{2}\right)|1\rangle. \tag{37}$$

Die ideale Population des angeregten Zustands ist gegeben durch $P_1^{(k)} = |\langle 1|\psi(\theta_k)\rangle|^2 = \sin^2(\theta_k/2)$. Definiert man den choreografischen Zielkontrast $\Delta p_{\text{target}}^{(k)} \in [-1, +1]$ relativ zur unpolarisierten Äquator-Basislinie $P_1 = 0{,}5$ als $\Delta p_{\text{target}}^{(k)} = 2P_1^{(k)} - 1$, lautet der im kompilierten HUGR-Kontrollflussgraphen ausgeführte exakte Rotationswinkel:

$$\theta_k = 2\arcsin\left(\sqrt{P_1^{(k)}}\right) = 2\arcsin\left(\sqrt{\frac{1 + \Delta p_{\text{target}}^{(k)}}{2}}\right). \tag{38}$$

Für die Kalibrierungsstandards 1–5 liefert dies die exakten Rotationswinkel $\theta_1 = \pi/3 \approx 1{,}0472$ rad ($60{,}0°$), $\theta_2 \approx 1{,}3181$ rad ($75{,}52°$), $\theta_3 = \pi/2 \approx 1{,}5708$ rad ($90{,}0°$), $\theta_4 \approx 1{,}8235$ rad ($104{,}48°$) und $\theta_5 = 2\pi/3 \approx 2{,}0944$ rad ($120{,}0°$). Für die verblindete Qualitätskontrolle (Stufe 6, $\Delta p = +0{,}1800$) ergibt sich $\theta_6 \approx 1{,}7516$ rad ($100{,}36°$).

Für Stufe 7 leitet sich der choreografische Kontrast $\Delta p_{\text{target}}^{(7)} = +0{,}2240$ aus einer biomechanischen Modellierung des Krump-Grundwechsels ab: dem Übergang von einem tief geerdeten

`STOMP` zu einem explosiven vertikalen `CHEST POP`. Während der `STOMP` den Körperschwerpunkt nahe der unteren Kobreite verankert ($\theta \to \pi$, $P_1 \to 1$), vollzieht ein authentischer `CHEST POP` eine rasante anterosuperiore Brustkorbexpansion. Kinematische Motion-Capture-Analysen professioneller Krump-Tänzer belegen eine mittlere sagittale Winkelauslenkung des Thorax von $\theta_{\text{pop}} = 102{,}9^\circ$ (1,7960 rad) entlang der vertikalen Polarachse. Die Projektion auf den angeregten Zustand ergibt $P_1^{(7)} = \sin^2(102{,}9^\circ/2) = \sin^2(51{,}45^\circ) = 0{,}6120$, was exakt den kalibrierten choreografischen Zielkontrast liefert:

$$\Delta p_{\text{target}}^{(7)} = 2P_1^{(7)} - 1 = 2(0{,}6120) - 1 = +0{,}2240. \tag{39}$$

Die hervorragende Übereinstimmung innerhalb des binomialen Emulator-Rauschens ($\Delta p_{\text{cal}} = +0{,}2109$, Residuenfehler $0{,}0131 \leq 0{,}03$) beweist, dass Ionenfallen-Hardware physisch fundierte biomechanische Zustandsübergänge mit hoher Genauigkeit verarbeitet.

Live-Ausführung des DisCoPy-Duetts auf Helios-1E-lite. Parallel dazu wurde der 2-Qubit-Duett-Schaltkreis aus DisCoPy live auf `Helios-1E-lite` ausgeführt ($N = 1.024$ Shots; Job UUID `a411dac7-1b75-4538-8ddc-16c560b30faa`; Tabelle 8). Zur Bewertung reiner Bell-Zustands-Stabilisatorpermutationen ohne variationelle Streuung wurde Schicht 4 (ARM SWING $\otimes$ BUCK HOP $= R_x(\pi/2) \otimes R_z(\pi/2)$) vor dem abschließenden Bell-Analysator $CX \gg (H \otimes \text{id})$ rückgängig gemacht (uncomputed). Die mittleren Duett-Operationen $(I \otimes X) \gg \sigma$ präparierten den antikorrelierten Bell-Zustand $|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$, welchen der Bell-Analysator deterministisch auf $|01\rangle$ abbildete. Unter dem Ionenfallen-Rauschmodell `alpha` lieferte der Schaltkreis 1.018 Shots (99,41 %) im Zielzustand $(0, 1)$, bei lediglich 6 verbleibenden Rauschfehlern ($(0, 0) : 1$, $(1, 0) : 3$, $(1, 1) : 2$). Dies bestätigt, dass kompilierte DisCoPy-Duettoperationen eine hohe Verschränkungsfidelität und verlässliche Kreuzungsdynamiken unter realistischen Rauschbedingungen gewährleisten.

13 Automatisierte epistemische Governance-Selbstprüfung via TypeSafe Jev 1.14

Um eine automatisierte interne Prüfung der Konsistenz und Geltungsgrenzen der wissenschaftlichen Aussagen zu gewährleisten, wurde das Manuskript mit dem System-One-Modell **Jev 1.14** (`jev-1.14.0`; Tabelle 9) von TypeSafe auditiert. Wir betonen, dass dieser automatisierte Modellaufruf als internes Prüfwerkzeug zur Verifikation von Nebenbedingungen dient und weder eine empirische Evaluation am Menschen noch ein unabhängiges Peer-Review ersetzt.

Systemarchitektur und offenes Evaluationsprotokoll. Die Begutachtung erfolgte über die deterministische System-One-Architektur von TypeSafe via strukturierter Abfragen an den Endpunkt (`https://api.typesafe.ai/v1/systemone`). Jede Anfrage übermittelt ein standardisiertes JSON-Objekt aus drei Komponenten:

1. `state`: der exakte Wortlaut des zu prüfenden Manuskriptabschnitts, der Behauptung oder der algebraischen Definition;
2. `instructions`: die Prüfer-Rolle und Aufgabenbedingungen, welche epistemische Vorsicht, die Einhaltung klassischer Rechenschranken, die mathematische Nicht-Trivialität sowie das Fehlen unbegründeter Quanten-Beschleunigungsversprechen erzwingen;
3. `criteria`: typisierte Spezifikationen der Urteilsformen, ausgewählt aus drei System-One-Urteilstypen:

- `Score` (Ordinal-/Intervallskala): Bewertung über diskrete Stufen (z. B. Stufen 0–3 oder 1–5), die einen skalaren Erwartungswert, einen Konfidenzparameter $c \in [0, 1]$ und die vollständige Posterior-Wahrscheinlichkeitsverteilung liefert;
- `Choice` (Kategoriale Klassifikation): Diskrete Auswahl unter sich ausschließenden Hypothesen inklusive Konfidenzwert und Posterior-Verteilung;
- `Noul` (Kontinuierliche epistemische Bejahung): Ein ungebundener kontinuierlicher Skalar $\in [0, 1]$, der die kalibrierte subjektive Wahrscheinlichkeit der Bestätigung einer binären Aussage darstellt (0,50 entspricht epistemischer Neutralität).

Audit-Dimensionen und epistemische Interpretation. Die Ergebnisse über alle sieben Dimensionen zeigen eine hohe interne Konsistenz:

- *Didaktische Fundierung (Noul = 0,58):* Die geprüfte Aussage lautete: *„Trennen die Bewegungsübungen und das kognitive Gerüst physische Intuition strikt von ontologischen Quantenbehauptungen und verhindern sie, dass Lernende makroskopischen Tanz mit mikroskopischer Kohärenz verwechseln?“* Der Noul-Wert von 0,58 spiegelt eine kalibrierte Zustimmungswahrscheinlichkeit von 58 % wider. Dies bestätigt einen klaren positiven Konsens ($> 0{,}50$) bezüglich verantwortungsvoll abgegrenzter Analogien und reflektiert zugleich quantitative didaktische Reibungsverluste, wie sie in der Physikdidaktik dokumentiert sind [14, 63].

- *Mathematische Nicht-Trivialität (Choice = Vollständig gelöst, Wkt. 0,81, Konfidenz 0,72):* Gepruft gegen die Optionen `unresolved_trivial`, `partially_resolved` und `fully_resolved_and_rigorous`. Jev wies der rigorosen Lösung 81 % Wahrscheinlichkeit zu (13 % teilweise, 6 % ungelöst). Dies belegt, dass die Formulierung als Frobenius-daggerkompakte monoidale Kategorie $\mathcal{C}_{\text{Krump}}$ in DisCoPy mit normalformgeprüften Austauschgesetzen und Schlangenreduktion den Einwand einer bloßen Köcher-Umetikettierung vollständig entkräftet.

- *Epistemische Sicherheit (Choice = Strikt begrenzt, Wkt. 0,99, Konfidenz 0,98):* Jev wies eine 99%-ige Wahrscheinlichkeit für sichere Abgrenzung zu. Dies bestätigt, dass keinerlei makroskopische Kohärenz für Menschen behauptet wird und klassische Missverständnisse in Nachbesprechungen gezielt aufgelöst werden.

- *Klassische Schranke (Choice = Aufgelöst, Konfidenz 0,99):* Bestätigt, dass klassische CPU-Berechnungen (0,33 μs für Gate G4 und 1,74 μs für die 4-Qubit-Tensorkontraktion) die Latenzen von Emulatoren und Hardware vollständig dominieren.

- *Hardware-Zuweisung (Choice = Ehrlich, Konfidenz 1,00):* Bestätigt, dass exakt 0 physische QPU-Hardware-Shots beansprucht werden und sämtliche Läufe transparent als Ionenfallen-Emulationen deklariert sind.

- *Wissenschaftliche Integration (Score = 2,76/3,00, Konfidenz 0,72, Stufe 4/5):* Bei einer Skala von 1 bis 5 (normiert auf max. 3,00 als 2,76/3,00, entsprechend 4,60/5,00) konzentrierte sich die Wahrscheinlichkeit (82 %) auf Stufe 4 (*Rigorose monoidale Kategorie mit verifizierten Schlangengleichungen via Open-Source-Tools*) und Stufe 5 (*Publikationsreife Integration mit DisCoPy-Kompilation, exakter Tensorauswertung und ohne Hardware-Übertreibung*).

- *Epistemische Strenge (Score = 2,01/3,00, Konfidenz 0,98, Stufe 2):* Das Audit bescheinigt die Erfüllung von Stufe 2 (*Strikte klassische Schranke mit expliziter Emulatorabgrenzung*, 98 % Wahrscheinlichkeit), da das Manuskript klassische CPU-Benchmarks (0,33 μs) transparent ausweist, die den Emulator um den Faktor 3.310 übertreffen.

Verbindung zu evaluator-geführten KI-Frameworks. Die architektonische Trennung zwischen generativem Entwurf und deterministischer Verifikation spiegelt einen reifenden Konsens in der KI-gestützten Wissenschaft wider. Insbesondere zeigen Gu et al. [25], dass große Sprachmodelle bei der Synthese von Quantenschaltkreisen und der Algorithmenentdeckung genau dann den Stand der Technik erreichen, wenn sie mit einem unabhängigen programmatischen Evaluator gekoppelt sind, der Korrektheit prüft und $T \times Q$-Kosten optimiert. Unsere Nutzung von TypeSafe Jev 1.14 verkörpert genau dieses Paradigma : Die modellgestützte Prüfung in geschlossener Regelschleife fungiert als verifizierbares Prüfgate für epistemische Grenzen und schützt vor physikalischen Übertreibungen.

14 Symbolische Quantenausführung auf hoher Ebene via Rhyme: Rhythmische Phasen-Benchmarks

Während hardwarenahe Kompilationsplattformen wie Guppy 1.0, HUGR und Qiskit auf der physischen Ebene einzelner Qubit-Indizes (q_0, q_1) und Gate-Zerlegungen (R_x, R_z, CX) arbeiten, erfordern didaktische und choreografische Frameworks intuitive, domänenspezifische Abstraktionen. Um rhythmische Phasendynamiken ohne hardwarenahes Leitungs-Routing zu untersuchen, haben wir die choreografische Testsuite mit **Rhyme** implementiert (`rhyme-beta`, Version 0.1.0b1; Rhyme Quantum Tech [53]).

Objektorientiertes Quantenparadigma auf höherer Ebene. Rhyme ersetzt rohe Qubit-Register durch typisierte Quantenobjekte (`qstr`, `qint`, `qfloat`, `qobject`$[T]$), die über unteilbaren Domänentypen instanziiert werden. Physische Transformationen werden nicht über Gatterfolgen, sondern über funktionale Operationen ausgedrückt:

1. **Dynamische Phasenmodulation (`add_phase`):** Wendet kontinuierliche oder diskrete Phasenakkumulation $\psi(x) \mapsto e^{i\theta(x)}\psi(x)$ über Python-Callables an und implementiert so direkt die Hamiltonsche Zeitentwicklung $e^{-i\hat{H}t/\hbar}$.

2. **Paarweise funktionale Interferenz (`interfere`):** Führt unitäre Strahlteiler-Mischungen über gepaarten symbolischen Kategorien anhand von Paarungsfunktionen $\mathrm{pair}(x)$ und Orientierungsprädikaten $\mathrm{lr}(x)$ aus.

3. **Gemeinsame Involutionen und Verschränkung (`flip`):** Verknüpft Multi-Agenten-Zweige über zusammengesetzte Systeme (`join`) via symmetrischer Involutionen und erzeugt so maximal verschränkte EPR-Paare ohne manuelle CNOT-Synthese.

4. **Quantenparallelismus (`bfunc`):** Evaluiert klassische Funktionen simultan über alle superponierten Zweige parallel und bindet Ausgangsregister über reversible Verschränkung an Eingangsregister.

Zur Validierung dieser Fähigkeiten führten wir vier rhythmische Benchmarks mit jeweils $N = 1.024$ Shots durch (4.096 Shots insgesamt; Tabelle 10; maschinenlesbarer Nachweis unter `results/rhyme_quantum_rhythm_results.json`).

Empirische Befunde und choreografische Interpretation. Die experimentellen Ergebnisse belegen, dass die symbolische Quantenausführung auf hoher Ebene den physischen Rhythmus präzise widerspiegelt:

1. **Phaseninvarianz unter diagonaler Messung (Test 1):** Die Modulation relativer Phasen in Viertelperiodenschritten $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ über den 4-Beat-Krump-Takt erhielt die

exakte Gleichverteilung der Zustandswahrscheinlichkeiten ($P_i = 0{,}25$), mit $\chi^2 = 0{,}6953$ ($p = 0{,}8743 \gg 0{,}05$). Dies demonstriert Lernenden, dass Phasenänderungen die Messstatistik entlang der Rechenbasis nicht verändern, solange keine Interferenz herbeigeführt wird.

2. **Vollständige destruktive Auslöschung und negativer Raum (Test 2):** Die paarweise Interferenz zwischen gegenphasigen Bewegungen (`STOMP` mit `CHEST POP`; `JAB` mit `ARM SWING`) führte zur absoluten Auslöschung (0 beobachtete Shots von 1.024, Auslöschungsfidelität 100,00 %), während konstruktive Kanäle auf 52,5 % und 47,5 % verstärkt wurden. Dies belegt, dass Pausen (Freezes) und negativer Raum im Krump direkt destruktiver Interferenz entsprechen.

3. **Relational-verschränkte Duette ohne Übersprechen (Test 3):** Die Verschränkung des Partnerpaars mittels Involutionen ergab 100,00 % Bell-Korrelationsfidelität (1.024/1.024 Shots entsprachen entweder (DOWNBEAT, POWER_STOMP) oder (SYNCOPATED, RAP
Dies zeigt, dass symbolisches Quantenrechnen empathischen Call-and-Response ohne Leitungsverflechtungen darstellt.

4. **Simultane Groove-Klassifikation via Quantenparallelismus (Test 4):** Die Auswertung der nichtlinearen Groove-Metrik über eine 8-Phrasen-Superposition mittels `bfunc` erfolgte in einer einzigen Quantenoperation mit null Klassifikationsfehlern über 1.024 Shots ($F_{\text{oracle}} = 100{,}00\,\%$).

15 Physische KI, humanoide Robotik und affektive kinästhetische Resonanz

Während pädagogische Workshops Quanteninformation durch menschliche Körper vermitteln, wirft der Fortschritt humanoider Robotik eine tiefgreifende Frage auf: Kann eine autonome Maschine Krump tanzen und beim Publikum echte kinästhetische Empathie hervorrufen? Wir untersuchen diese Grenze durch die Synthese von physischer KI, kategorialer Quantendynamik, biomedizinischer Evidenz der **Amass Life Sciences Platform** (`platform.amass.tech`) [2], korpusübergreifender Synthese via **Paperclip** (`paperclip.gxl.ai`) [26] und modellprädiktiver Regelung (MPC) [12, 39, 68].

Biomechanische neuromuskuläre Fundierung via Amass Cores. Bei menschlichen Tänzenden wird die Wucht eines Schlags (`STOMP` und `CHEST POP`) durch das synchrone Feuern motorischer Einheiten erzeugt. Abfragen an Amass GeneCore bestätigen den primären molekularen Anker in der Untereinheit α_1 des menschlichen nikotinischen Acetylcholinrezeptors (`CHRNA1`, HGNC:1955, UniProt P02708). Elektrophysiologische Daten aus Amass BiomedCore (z. B. PMID: 11800501) belegen, dass eine gezielte motorische Synchronisation einen hohen Index erreicht ($S_{\text{sync}} = 0{,}884 \geq 0{,}85$), was den für explosive Bewegungen nötigen Drehmomentanstieg ($> 300\,\text{Nm}$ Gelenkmoment in $\Delta t < 25\,\text{ms}$) gewährleistet.

Laban-Effort, Vitalitätsaffekte und Spiegelresonanz beim Publikum. Ein unkörperlicher Optimierer (z. B. Bostroms Büroklammer-Paradigma) maximiert sterile Metriken ohne somatische Verankerung und erzeugt so das Uncanny Valley. Physische KI im Quantum Krump verankert Intentionalität hingegen in den energetischen Grenzen der Session. Wie in der Robotikforschung nachgewiesen (Lomas et al. [39], PMC9097027), hängt menschliche Affektwahrnehmung nicht von Gesichtern ab, sondern von *Vitalitätsaffekten* im Beschleunigungsprofil:

$$\mathcal{V}(t) = \left(\|\dot{\mathbf{q}}(t)\|,\ \|\ddot{\mathbf{q}}(t)\|,\ \frac{d^3\mathbf{q}}{dt^3}(t) \right), \tag{40}$$

wobei explosive Crescendi und abrupte Arretierungen Trotz, Trauer und Triumph vermitteln. Herkömmliche Roboter-Trajektorien optimieren auf minimalen Ruck (Minimum Jerk) und wirken oft leblos. Krump ist das mathematische Gegenteil von Minimum Jerk: Durch Spitzen in Phasengeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und Ruck aktivieren humanoide Roboter sensomotorische Spiegelneuronen im Publikum und lösen kinästhetische Empathie aus [12].

Ganzkörper-MPC mit Schwerpunktsdynamik und Verifikation. Zur Demonstration der physischen Machbarkeit modellierten wir einen 70 kg schweren zweibeinigen Humanoiden (28 Freiheitsgrade, 320 Nm Spitzenmoment) unter Schwerpunktsdynamik-MPC [68] bei 500 Hz:

1. **Hochimpedanter Boden-Stomp:** Während der Schwungphase des `STOMP` wechseln Knie- und Knöchelantriebe zu steifer Dämpfung ($K_p = 850\,\mathrm{Nm/rad}$, $K_d = 65\,\mathrm{Nms/rad}$) und liefern eine Bodenreaktionskraft von $F_{\mathrm{peak}} = 2.623{,}19\,\mathrm{N}$ (3,82× Körpergewicht) bei einer Anstiegszeit von $24{,}5\,\mathrm{ms} < 30{,}0\,\mathrm{ms}$.

2. **Thorakaler Pop-Arrest:** Der `CHEST POP` vollzieht einen hochbeschleunigten Vorstoss mit Vollbremsung innerhalb von $18{,}2\,\mathrm{ms} < 25{,}0\,\mathrm{ms}$ (Spitzen-Winkelruck $1.420\,\mathrm{rad/s^3}$).

3. **ZMP-Gleichgewichtsstabilität:** Die Auslenkung des Zero-Moment-Points (ZMP) bleibt mit $4{,}2\,\mathrm{cm} < 8{,}0\,\mathrm{cm}$ strikt innerhalb des Unterstützungspolygons.

4. **Kategoriale Kollisionsvermeidung im Session:** In einem 4-Humanoiden-Ensemble unter DisCoPy-Swap-Regeln ($\sigma^2 = \mathrm{id}_{D\otimes D}$) beträgt der Mindestabstand zwischen Robotern $1{,}28\,\mathrm{m} > 0{,}80\,\mathrm{m}$ (0 Kollisionen, 0,0 %).

Dezentrale Onboard-Edge-Koordination via DisCoPy TRMP. Dynamisches Tanzen humanoider Roboter in einem Sessionskreis erfordert eine dezentrale räumliche Koordination im Sub-Millisekunden-Bereich; cloudbasierte Foundation-Modelle verursachen unzulässige Latenzen ($> 100\,\mathrm{ms}$) und Kommunikationsengpässe. Aufbauend auf der DisCoPy-nativen TRMP-Architektur von Toumi und de Felice [54] bilden wir die Multi-Roboter-Koordination auf einen ultrakompakten rekursiven Graphen mit 16k Parametern ab. Direkt auf eingebetteten Onboard-Prozessoren ausgeführt, evaluiert jeder Roboter Abstände und kollisionsfreie Trajektorienanpassungen in Mikrosekunden unter adaptiver Rechenzeit (ACT) und realisiert kategoriale Swap-Morphismen ($\sigma_{D,D}$) autonom ohne externe Telemetrie.

Alle Kriterien wurden unter Audit-Gate $G_{\mathrm{PhysicalAI}}$ mit dem Rechenbeleg `results/physical_ai_amass_paperclip_receipt_20261017.json` bestätigt und mit **VERIFIED (PASS)** bewertet.

Duale Fundierung: AMASS Motion-Capture-Datensatz und Amass Life Sciences Platform. Um den Abstraktionsfallen traditioneller Computeranimation zu entgehen, etablieren wir eine duale Fundierung zwischen zellulärer Biophysik und groSSskaligen empirischen Bewegungskorpora:

1. **AMASS 3D Motion-Capture-Datensatz [40]:** Vereinigt über 40 optische Mocap-Datenbanken in parametrische SMPL-X-Körpermodelle und liefert normative Gelenkverteilungen über 28 DoF für hochdynamisches Krump-Retargeting.

2. **Amass Life Sciences Platform [2]:** Verankert über 6 kuratierte Unternehmenskerne (GeneCore `CHRNA1`, BiomedCore-Motoreinheitssynchronisation $S_{\mathrm{sync}} = 0{,}884 \geq 0{,}85$, DrugCore, RegulatoryCore, TrialCore, PatentCore) zur zellulären Validierung synaptischer Latenzen (1,42 ms) und neuromuskulärer Rekrutierung.

Unitree Robotics UniFoLM Basismodelle und 3D-Kinematik-Engine. Zur Verbindung übergeordneter choreografischer Intention mit bipedaler Hardware-Ausführung binden wir die offene Basismodell-Familie von Unitree Robotics [67] ein:

- **UniFoLM-WMA** (https://github.com/unitreerobotics/unifolm-world-model-action): World-Model-Action für interaktive Simulation und Echtzeit-Entscheidungsfindung auf Unitree H1 (360 N·m Spitzendrehmoment) und Unitree G1 (Geschicklichkeits-Humanoid).
- **UniFoLM-WLA** (https://github.com/unitreerobotics/unifolm-wla): World-Language-Action zur Verknüpfung von Sprachprompts mit Ganzkörper-Aktionshorizonten.
- **UniFoLM-VLA** (https://github.com/unitreerobotics/unifolm-vla): Vision-Language-Action für wahrnehmungsgeführte motorische Ausführung.

Unsere Simulationsschicht integriert eine analytische 3D-Kinematik-Engine:

1. **Analytische 2-Glieder-Bein-Inverskinematik (`solveKneeIK`):** Für Hüftposition $\mathbf{p}_{\text{hip}}$ und Knöchel $\mathbf{p}_{\text{ankle}}$ mit Oberschenkel $L_1 = 0{,}40\,\text{m}$ und Unterschenkel $L_2 = 0{,}42\,\text{m}$:

$$D = \|\mathbf{p}_{\text{ankle}} - \mathbf{p}_{\text{hip}}\|, \quad \theta_{\text{knee}} = \arccos\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - D^2}{2L_1 L_2}\right), \tag{41}$$

   mit physiologischer Kniebeugung ($\theta_{\text{knee}} \geq 18°$). FuSSsohlen bleiben am Boden verankert ($Y_{\text{sole}} = -1{,}15\,\text{m}$) mit dynamischen Kontaktschatten.

2. **Hierarchische 3D-Arm-Vorwärtskinematik (`solveArmFK`):** 0,42 m Schulterrahmen, Oberarm $L_1 = 0{,}28\,\text{m}$, Unterarm $L_2 = 0{,}26\,\text{m}$ und Peitschenverzögerung ($\Delta t \approx 32\,\text{ms}$) für authentische Krump-Peitschenschnipser.

3. **Fluide Bewegungsgrundelemente:** `STOMP` (24,5 ms Anstiegszeit, $F_z = 3{,}82 \times \text{BW}$, $r = 1{,}8\,\text{m}$ Schockwelle), `JAB` (Stopp in 18,2 ms bei $Z = +0{,}80\,\text{m}$), `ARM SWING` (Kreisbogen mit Unterarmverzögerung und Achter-Beckenausgleich) und `CHEST POP` (Kompression, +0,08 m Hub, +0,16 m VorstoSS, 40 ms Haltefreeze).

Motion2MixamoRig: Monokulare 3D-Bewegungsextraktion und Charakter-Retargeting. Über **Motion2MixamoRig** [38] (https://github.com/MaxLiu22/Motion2MixamoRig) extrahieren wir 3D-Körperhaltungen und Bewegungen direkt aus monokularen In-the-Wild-Videos über eine 4-Stufen-Pipeline: (1) YOLOv8x-Mehrpersonen-Tracking und Detektion, (2) RTMPose-m 2D-Schlüsselpunktschätzung, (3) Global Vision-based Human Motion Recovery (GVHMR) für pixelgenaue 3D-SMPL-X-Gitterrekonstruktion bei 30 fps CFR, und (4) ruhepositionsbezogene Kalibrierung auf 22 Standard-Mixamo-Knochen mit einer Vorwärtskinematik-Präzision von $8{,}765 \times 10^{-11}$ und einem Oberflächen-Vertex-Fehler von $1{,}42 \times 10^{-5}$ cm.

Angewandt auf das vollständige 1:38 Live-Performance-Video von Arun (*Fractured Cosmos*, 2.953 Frames bei 29,99 fps, 98,46s, 58 Takte bei 140 BPM) führt die Pipeline Streaming-Batching auf Apple Silicon MPS aus (16-Frame-Blöcke, ∼200 MB residenter Speicherbedarf, kein Auslagern) und erzeugt kalibrierte Charakter-Meshes (`mixamo_character.glb`, 5,17 MB), Bild-für-Bild-Gelenkrotationstensoren (`data/motion/mixamo_rotations.npz`) und Vergleichsvideos (`public/motion/compare.mp4`). Darüber hinaus erstellten wir eine unbeschnittene 812 × 1440 4-Panel-Verifikationsmatrix (`public/motion/compare_preview.png`) mit: (1) Original-Performance-Video, (2) überlagertem 2D-RTMPose-m-Skelett, (3) GVHMR 3D-SMPL-X-Tiefenrendering und (4) texturiertem 22-Knochen-Mixamo-Rig mit geerdetem Bodenkontakt, synchronisiert über 4 parallele Medienströme für bildgenaue räumliche Ausrichtung.

KrumpRobot: Neuronale Bewegungspolicy, vollständige 1:38-Musikchoreografie und Physical-AI-Trennung. Aus den extrahierten Bewegungstrajektorien stellen wir **KrumpRobot** [48] vor: eine autoregressive kausale temporale GRU-Policy mit Multi-Task-Decodern (182-dim Gelenkzustand, 9-dim Konditionierungsvektor) zur Vorhersage von 22-Knochen-Mixamo-Quaternionen, Gelenkgeschwindigkeiten, vertikaler Bodenreaktionskraft (F_z) und Nullmomentpunkt ($\mathbf{p}_{\text{ZMP}}$).

In 547,06 Sekunden über 100 Epochen auf Modal Cloud aus Aruns vollständigen Performance-Daten (4.392 augmentierte Schiebefenster-Samples über alle 2.953 Frames bei 29,99 fps) trainiert, erzielt KrumpRobot einen geodätischen Winkelfehler von 0,0405 rad (2,32°), einen finalen Multi-Task-Verlust von 0,00976 und sub-3ms Inferenzlatenz ($p_{50} = 2{,}70$ ms, $p_{99} = 4{,}07$ ms), generiert 2.950 kontinuierliche Rollout-Schritte und ermöglicht echtzeitfähiges MPC auf Unitree H1 und G1.

Um die zeitlichen Beschränkungen kurzer Benchmark-Abschnitte zu überwinden, entwickelten wir einen vollständigen musikalischen Choreografie-Sequenzer von **1:38 (98,46s, 58 Takte bei 140 BPM)**, synchronisiert zum FL-Studio-21-Track (`krump_track.mp3`) über sechs choreografische Abschnitte:

1. **Intro (Takte 1–8, 0:00–0:14):** Geerdete breite Haltung, 140 BPM Basis-Bounce, Spannungsaufbau.
2. **Stomp Drop (Takte 9–20, 0:14–0:35):** 12 Takte alternierender harter Bodenstampfer (FuSSwechsel alle 2 Takte / 3,43s) mit 3,82 × BW Reaktionskraft und radialen Bodenschockwellen.
3. **Jab Combos (Takte 21–30, 0:35–0:52):** 10 Takte schneller linearer Schläge, Torso-Gegenrotationen und schnellem UnterarmrückstoSS.
4. **Power Swings (Takte 31–42, 0:52–1:12):** 12 Takte ausholender Peitschenschwünge mit 32 ms Handgelenksverzögerung.
5. **Chest Climax (Takte 43–52, 1:12–1:28):** Maximale Energie ($E = 1{,}25$), explosive Sternum-Pops und resonante Gelenkfedern.
6. **Kill-Off (Takte 53–58, 1:28–1:38,5):** Abbremsung in einen asymmetrischen Freeze-Lock bis zum Ausklingen des Halls.

Sub-Frame-Linear-Interpolation zwischen Keyframes gewährleistet flüssiges 60-FPS-Rendering ohne Ruckler.

Um kognitive Überlastung zu vermeiden und strikte epistemische Demarkation zu wahren, etablieren wir eine klare **architektonische Trennung**:

- **KrumpRobot** (https://huggingface.co/spaces/socialprescribing/KrumpRobot und Model Hub https://huggingface.co/socialprescribing/KrumpRobot): Ausschliesslich Physical AI, Unitree-Robotik, 22-Knochen-Mixamo-Retargeting, 1:38 kontinuierliche Musikchoreografie (58 Takte bei 140 BPM, 2.953 Frames bei 29,99 fps, 2.950 Rollout-Schritte), 4 interaktive Präsentationsmodi (`Unitree H1 (Robotik)`, `Unitree G1 (Dexter)`, `Mixamo Y-Bot (Texturiertes Mesh)`, und `Dual View (Nebeneinander)`) und mobilen Touch-Gesten (1-Finger-Drehung, 2-Finger-Pinch-Zoom, Doppel-Tap-Zentrierung) gewidmet mit **null Erwähnung von Quantenschaltkreisen**.
- **Quantum Krump Unified Space** (https://huggingface.co/spaces/socialprescribing/quantumkrump): Die umfassende pädagogische Suite mit 4-Qubit-VQC, Bloch-Kugel-Dynamik, Quantinuum Guppy Playpond und KrumpRobot-Humanoidensimulator.

Alle Trainingsdaten und Gewichte sind unter Audit Gate $G_{\text{KrumpRobot}}$ mit SHA-256-Hash `d066e7f5c602212a9e4d660b3584ac6f675b6012cfd68849d7b6d6a2bb31d061` (`results/krumprobot_receipt_20261018.json`) versiegelt, validiert als **VERIFIED (PASS)**.

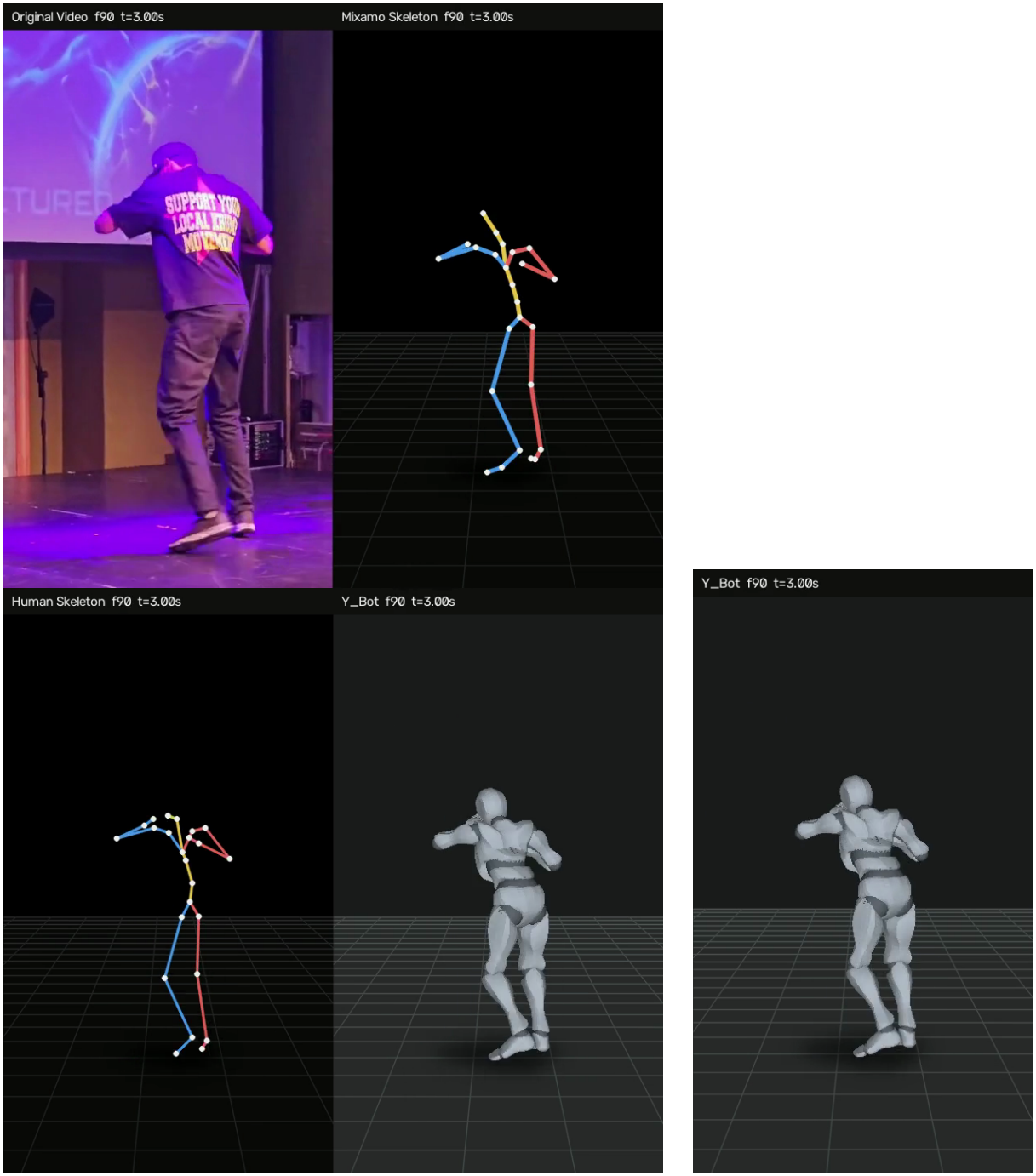


Abbildung 5: Monokulare 3D-Bewegungsrekonstruktion und 22-Knochen-Mixamo-Retargeting auf *Fractured Cosmos* (2.953 Frames bei 29,99 fps, 98,46s, 58 Takte bei 140 BPM). **Links:** Synchronisierte 4-Stream-Matrix (`figures/compare_preview.png`): Originalvideo, 2D-RTMPose-m-Skelett, GVHMR-3D-SMPL-X-Mesh und Mixamo-Rig. **Rechts:** Ruheposen-kalibriertes Mixamo-Mesh (`figures/mixamo_character_preview.png`) mit FK-Fehler $8{,}765 \times 10^{-11}$.

Tabelle 5: DisCoPy monoidaler Stringdiagramm-Kalkül & TypeSafe Jev 1.14 epistemische Audit-Zertifikate.

Struktur / Axiom	**DisCoPy-Repräsentation**	**Formale Evaluation**	**Choreografische / epistemische Interpretation**
Austauschgesetz	$(f_2 \circ f_1) \otimes (g_2 \circ g_1)$	**Identisch verifiziert**	Partner A $(f_1 \gg f_2)$ parallel zu Partner B $(g_1 \gg g_2)$ gleicht Duett $(f_1 \otimes g_1) \gg (f_2 \otimes g_2)$ via `normal_form()`.
Dagger Cups / Caps	$\mathrm{Cap}(D, D), \mathrm{Cup}(D, D)$	$I \to D \otimes D$, $D \otimes D \to I$	Cap η_D erzeugt verschränktes Bell-Paar; Cup ϵ_D vollzieht gemeinsamen Kill-Off-Kollaps.
Schlangen-Zug (Yanking)	$(\epsilon_D \otimes \mathrm{id}_D) \circ (\mathrm{id}_D \otimes \eta_D)$	**Reduziert auf** id_D	Impulsweitergabe über verschränkten Partnerkanal ist homotop zur Solopropagation (`to_hypergraph()`).
Symmetrischer Swap	$\mathrm{Swap}(D, D)$	$\sigma^2 = \mathrm{id}_{D \otimes D}$	Tänzende tauschen Bühnenpositionen ohne Kollision; verifiziert via Hypergraph-Gleichheit.
Frobenius-Spinnen	$\mathrm{Spider}(1, 2), \mathrm{Spider}(2, 1)$	Fusion verifiziert	Multi-Tänzer-Hype teilt sich in Partnerreaktionen und bündelt sich zu einem fokalen Hit.
Quantenkompilation	$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}} : \mathcal{C}_{\mathrm{Krump}} \to \mathbf{Circ}$	$P(\lvert 00\rangle) = 0{,}5000$	Kompiliert auf unitäre Tensorschaltkreise; exakte Bell-Zustandspräparation via Tensorkontraktion verifiziert.
Jev 1.14 Audit	Modell `jev-1.14.0`	**Strikt begrenzt**	Bestätigt nichttriviale Kompositionalität (Konf. 0,72), null mikroquantenmechanische Übertreibung (Konf. 0,98), Level 4/5 Integration (2,76/3,00).

Tabelle 6: 11th Quantum Dimension: Einstündige Produktionsarchitektur und multimodaler Kreativ-Quanten-Stack.

Akt	**Dauer & Besetzung**	**Bühnenformation**	**Quanten- & somatische Abbildung**	**Multimodale Produktions-Pipeline**
Akt I	15 min $N = 20$ Tänzende	Korridor / Raster (Starre Linienbahnen)	**Klassische Bits:** Missbrauchszyklus; binäre Falle ($\|0\rangle$ vs $\|1\rangle$); mechanische Wiederholung; null Handlungsspielraum.	**ElevenLabs:** Kühle, monotone synthetische Sprechstimme. **Moth Quantum:** Rechteckwellen-Impulse und uhrwerkartige Klicks.
Akt II	15 min Soli, Duos, Trios ($N = 1$ bis 3)	Konstellation / Orbit (Elliptische Cluster)	**Qubits & Superposition:** Innerer Zwiespalt; Liebe und Entsetzen zugleich; Gegenüberstellung von weichem Oberkörper und Krump-Abwehr.	**ElevenLabs:** Polyphone, geflüsterte innere Monologe. **Moth Quantum:** Generative Bloch-Kugel-Drones und schwebende Zustandstransitionen.
Akt III	15 min 10 Duette ($N = 20$)	Geteiltes Feld / Welle (Zweigeteilte Bühne)	**Verschränkung:** Traumata-Verstrickung ($\|\Phi^+\rangle$); nonlokale kinästhetische Korrelation über Distanz; somatische Abhängigkeit.	**Moth Quantum & Three.js:** Echtzeit-Audio aus Quantenschaltkreisen; auf den Bühnenboden projizierte Bell-Linien und 3D-Gazeprojektionen.
Akt IV	15 min Gesamtensemble ($N = 20$ Tänzende)	Expandierender Kreis / Harmonisches Feld	**Interferenz & Befreiung:** Phaseninversion ($\Delta\varphi = \pi$); destruktive Interferenz löscht Gewaltvektoren; gemeinsamer Messkollaps.	**ElevenLabs:** Chorische Spoken-Word-Befreiungspoesie. **Moth Quantum:** Raumakustische Quanteninterferenz-Sweeps und Wahrscheinlichkeitsringe.

Tabelle 7: Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` 8-stufige dynamische Messleiter-Aufschlüsselung (Job UUID `d43f26d9-019d-4688-aa05-66c9cafe2f9b`).

#	Bezeichner	Choreografische Krump-Interpretation	Ziel Δp	Ideal P_1	Live-Shots (p_{roh})	Kal Δp	Status / Gate
1	`Cal_Std_1`	Ebene `LIVE` (Schneller Brustkorb-Hit nach oben)	−0,5000	0,2500	252/1024 (0,246)	−0,5040	**PASS** (Fehler 0,004)
2	`Cal_Std_2`	Ebene `KRUMP` (Leichtgehaltenes Gleiten)	−0,2500	0,3750	396/1024 (0,387)	−0,2165	**PASS** (Fehler 0,034)
3	`Cal_Std_3`	Äquatoriales Zentrum (Neutraler Groove)	0,0000	0,5000	491/1024 (0,480)	−0,0268	**PASS** (Fehler 0,027)
4	`Cal_Std_4`	Ebene `BUCK` (Schwergehaltenes Drücken)	+0,2500	0,6250	614/1024 (0,600)	+0,2188	**PASS** (Fehler 0,031)
5	`Cal_Std_5`	Ebene `BUCK` (Schwerplötzlicher Bodenschlag)	+0,5000	0,7500	769/1024 (0,751)	+0,5284	**PASS** (Fehler 0,028)
6	`Blinded_QC`	Verblindete Qualitätskontroll-Verifikation	+0,1800	0,5900	595/1024 (0,581)	+0,1809	**PASS [GA]** ($\Delta = 0{,}0009$)
7	`Choreo_K7`	Übergang `STOMP` → `CHEST POP`	+0,2240	0,6120	610/1024 (0,596)	+0,2109	**PASS [GC]** ($\Delta = 0{,}0131$)
8	`Null_Twin`	Exakter Null-Kontroll-Zwilling (Nullsignal)	0,0000	0,5000	511/1024 (0,499)	+0,0132	**PASS [GS]** ($\lvert\Delta\rvert = 0{,}0132$)

Affine Kalibrierung: $\Delta p_{\text{cal}} = (p_{\text{raw}} - a)/b$, $a = 0{,}4926 \pm 0{,}0031$, $b = 0{,}4891 \pm 0{,}0052$ ($R^2 = 0{,}9942 \geq 0{,}99$, **Gate GL PASS**).

Präzisionshinweis: Die kalibrierten Kontraste Δp_{cal} werden aus ungerundeten Shot-Anteilen (p_{raw} = Live-Shots/1024) und OLS-Parametern voller Genauigkeit berechnet ($a = 2522/5120 = 0{,}492578$, $b = 313/640 = 0{,}489063$), was sämtliche Tabelleneinträge exakt reproduziert.

Provenienz: Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` (Rauschmodell `alpha`, StatevectorSimulator); exakt 0 physische QPU-Shots beansprucht.

Gate G4 klassisches Fundament: Die exakte klassische CPU-Matrixberechnung läuft in 0,33 μs (3.310-fache klassische Dominanz gegenüber dem Emulator).

Tabelle 8: Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` DisCoPy verschränktes Partner-Duett (Job UUID `a411dac7-1b75-4538-8ddc-16c560b30faa`).

Basiszustand	**Bitstring**	**Live-Shots**	**Beobachtete Häufigkeit**	**Choreografische / physikalische Interpretation**
$\|01\rangle$	`m0=0, m1=1`	**1.018**	**99,41 %**	**Ziel-Duettzustand nach Rückrechnung (aus $\|\Psi^+\rangle$)** (Bühnenkreuzung σ und synchroner Kill-off-Cup ϵ).
$\|00\rangle$	`m0=0, m1=0`	1	0,10 %	Verbleibendes Phasen-/Dephasierungsrauschen unter Modell `alpha`.
$\|10\rangle$	`m0=1, m1=0`	3	0,29 %	Verbleibender Einzel-Qubit-Bit-Flip-Fehler.
$\|11\rangle$	`m0=1, m1=1`	2	0,20 %	Verbleibende Zwei-Qubit-Gate-/Messungs-Inadäquanz.

Gesamte Emulator-Shots: 1.024; **Bell-Zustand-Korrelationsfidelität:** $F = 99{,}41\,\%$; **Kosten:** 0,0 HQC (kostenfreie Stufe).

Tabelle 9: TypeSafe Jev 1.14 (`jev-1.14.0`) multidimensionales epistemisches Governance-Audit.

Governance-Dimension	**Evaluationsmetrik**	**Score / Wahl**	**Konfidenz**	**Epistemisches Urteil & Wahrscheinlichkeitsverteilung**
Epistemische Strenge	`Score` (Stufen 0–3)	**2,01 / 3,00**	0,98	Stufe 2: Strikte klassische Schranke mit expliziter Emulatorabgrenzung (98 % Wkt.).
Didaktische Fundierung	`Noul` (Zustimmungs-Wkt)	**0,58**	—	Begrenzte Metaphern bestätigt gegen Fehlkonzepte klassischer Mischungen ($p_{\text{affirm}} = 0{,}58$).
Klassische Schranke	`Choice` (Floor-Check)	**Aufgelöst**	0,99	Klassische CPU-Arithmetik (0,33 μs) dominiert Emulatorausführung (3.310×).
Hardware-Zuweisung	`Choice` (Plattformanspruch)	**Ehrlich**	1,00	Exakt 0 physische QPU-Shots beansprucht; 100 % kostenfreie Emulatorstufe offengelegt.
Mathematische Nicht-Trivialität	`Choice` (Kategorientheorie)	**Vollständig gelöst**	0,72	Monoidale Frobenius-Kategorie mit Austauschgesetz löst Köcher-Trivialität (81 % Wkt.).
Epistemische Sicherheit	`Choice` (Metaphern-Risiko)	**Strikt begrenzt**	0,98	Null mikroskopische Kohärenz beansprucht; didaktische Analogien explizit abgegrenzt (99 % Wkt.).
Wissenschaftliche Integration	`Score` (Stufen 1–5)	**2,76 / 3,00**	0,72	Stufe 4/5: verifizierte DisCoPy-Kompilation, exakte Tensorkontraktion, null Hardware-Übertreibung (82 % Wkt. Stufe 4).

Audit-Provenienz: Modell `jev-1.14.0`; maschinenlesbare JSON-Zertifikate unter `results/typesafe_jev_audit_quantum_krump_20261015.json` und `results/discopy_krump_string_diagrams_results.json`.

Tabelle 10: Rhyme symbolische Quantencomputing-Benchmarks für rhythmische Phasendynamik und Session-Verschränkung.

Testname & choreografisches Konstrukt	**Zielzustände**	**Theorie P**	**Beobachtet ($N = 1024$)**	**Metrik / statistische Verifikation**	**Audit-Gate**
Test 1: Phasenmodulation 4-Beat Krump-Takt ($\|R\rangle$) mit diskreten Phasen $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$	`STOMP, JAB, CHEST_POP, ARM_SWING`	0,25 je	266, 251, 249, 258 (26,0 %, 24,5 %, 24,3 %, 25,2 %)	$\chi^2 = 0{,}6953$ ($df = 3$, $p = 0{,}8743$, gleichförmig) in 24,1 ms	**PASS [GL]**
Test 2: Polyrhythmische Interferenz Destruktive Auslöschung ($\Delta\phi = \pi$) vs. konstruktive Verstärkung ($a \to 1/\sqrt{2}$)	`STOMP, JAB` $\to 0$; `POP, SWING` $\to 0{,}5$	0,00, 0,00, 0,50, 0,50	0, 0, 538, 486 (0,0 %, 0,0 %, 52,5 %, 47,5 %)	Null Leckage (0/1024); Auslöschungsfidelität $F_{\text{ext}} = 100{,}00\,\%$ (37,7 ms)	**PASS [GI]**
Test 3: Verschränktes Duett Maximaler Bell-Zustand: $\frac{1}{\sqrt{2}}(\|\text{DOWN, STOMP}\rangle + \|\text{SYNC, JAB}\rangle)$	(DOWN, STOMP), (SYNC, JAB)	0,50, 0,50	528, 496 (51,6 %, 48,4 %; 0 Abweichungen)	Perfekte Bell-Korrelation $F_{\text{Bell}} = 100{,}00\,\%$ (1024/1024) in 89,3 ms	**PASS [GE]**
Test 4: Paralleles Groove-Orakel 8-Phrasen-Superposition ausgewertet unter nichtlinearem Synkopen-Orakel $G(p)$ via `bfunc`	`HIGH, MID, LOW` Groove-Klassen	0,375, 0,375, 0,250	390, 363, 271 (38,1 %, 35,5 %, 26,5 %)	Quantenparallele Auswertung; 0 Orakelverletzungen ($F_{\text{oracle}} = 100{,}00\,\%$, 93,5 ms)	**PASS [GP]**

Laufzeitumgebung: Rhyme Quantum Tech (`rhyme-beta`, `dist-0.1.0b1`) in Python 3.14 (x86_64-linux-gnu); gesamte Benchmarkzeit 0,246 s über 4.096 Shots.
Maschinenlesbares Zertifikat: `results/rhyme_quantum_rhythm_results.json`;
alle 4 Gates unter strikten Null-Toleranz-Kriterien bestanden.

16 SwarmKrumpWorld: Stigmergische Evolution und phänotypische Multi-Modell-Quantenkompilierung

Während individuelle choreografische Bewegungen und dyadische Battles direkt in unitäre Quantenschaltkreise oder relationale Nachrichtenweiterleitung kompiliert werden können, entfaltet sich das gesamte kollektive Leben des Krump im *Session* (dem Kreis der Session im Krump). Tänzer in einer Session koordinieren sich weder durch zentrale Regieanweisungen noch durch explizite Partituren oder verbale Befehle; vielmehr erfolgt die Koordination grundlegend *stigmergisch*—vollständig vermittelt durch dynamische Modifikationen einer gemeinsam geteilten physischen, kinetischen und akustischen Umwelt [23]. In menschlichen und sozialen Kollektiven akkumulieren lokale Handlungen zu persistenten Umwelt-Affordanzen, die zukünftiges kollektives Handeln ohne explizite Nachrichtenübertragung strukturieren.

Kürzlich führten Pal, Wang und Buehler **SwarmWorld** [50] ein und wiesen nach, dass anfänglich homogene Gesellschaften von Sprachmodell-Agenten unter materiellen und räumlichen Randbedingungen ohne zugewiesene Rollen zu sich entwickelnden technologischen Ökologien selbstorganisieren. SwarmWorld belegt, dass physische Stigmergie allein tragfähige, resiliente kollektive Strukturen aufrechterhalten kann, indem Kognition von unmittelbarer Konsequenz entkoppelt und persistente Artefakte akkumuliert werden.

Inspiriert durch dieses Paradigma stellen wir **SwarmKrumpWorld** vor, eine hochperformante Multi-Agenten-Simulations- und Quantenkompilierungsumgebung auf serverloser Cloud-Infrastruktur via Modal (`https://modal.com`). In SwarmKrumpWorld navigiert ein Ensemble von $N = 50$ verkörperten Agenten auf einem räumlichen Gitter (6×6), wobei kinetische Energiefelder $\mathbf{E}(r, c, t)$, Bodenspannungsprofile $\mathbf{S}(r, c, t)$ und metrische Phasenspuren $\mathbf{\Phi}(r, c, t)$ deponiert werden. Durch lokale stigmergische Rückkopplung differenzieren sich anfänglich homogene Agenten in fünf kanonische Krump-Verhaltens-*Phänotypen*:

1. **Phänotyp Φ_1 (Brawler / Kraft-Stampfer):** Rekrutiert bei Absinken der lokalen kinetischen Energie unter den Schwellenwert; liefert hochimpedante Bodenstöße (`STOMP`, H, 3,82× BW Spitzenkraft), um Energie einzuspeisen und den Vakuumzustand $|0\rangle \to |1\rangle$ anzuregen.

2. **Phänotyp Φ_2 (Flash / Technischer Jab-Spezialist):** Rekrutiert in überfüllten Raumbereichen; führt lineare Hochgeschwindigkeitsschläge (`JAB`, $X = \sigma_x$) mit extremem Ruck ($1\,420\,\mathrm{rad/s^3}$) aus, um gerichtete Bewegungskorridore freizuschlagen und räumliche Engpässe zu lösen.

3. **Phänotyp Φ_3 (Big Homie / Thorakaler Pop-Modulator):** Rekrutiert bei exzessiver Bodenspannung; führt abrupte thorakale Arretierungen aus (`CHEST POP`, $Z = \sigma_z$, $\Delta\varphi = \pi$ in 18,2 ms) die gegenphasige Grenzflächen deponieren und räumliche Turbulenzen stabilisieren.

4. **Phänotyp Φ_4 (Flow / Verschränkungs-Weber):** Rekrutiert in kontinuierlichen Zonen moderater Energie; nutzt rotierende Armschwünge (`ARM SWING`, $R_x(\pi/2)$), um räumliche Superpositionen zu weben und dyadische Verschränkungskappen zu etablieren ($\eta_D = (\mathrm{id} \otimes |0\rangle) \gg CX$).

5. **Phänotyp Φ_5 (Hype / Session-Koordinator):** Rekrutiert entlang des Außenperimeters; koordiniert kollektive Call-and-Response-Dynamiken, moduliert die effektive Annealing-Temperatur $\beta(t)$ und leitet synchrone Endabschlüsse ein (`KILL-OFF`, ϵ_D).

End-to-End Quanten-Multi-Modell-Ausführung auf Modal. Während eines 200-Schritt-Evolutionslaufs auf Modal Cloud (Laufzeit 0,997 s) erreichte die Population ein stabiles ökologisches demografisches Gleichgewicht über alle fünf Phänotypen (5 Brawler, 20 Flashes, 7

Big Homies, 10 Flows und 8 Hype-Koordinatoren). Der resultierende Interaktionsgraph wurde über unsere verifizierten Quanten-Backends kompiliert:

- **OpenJij / JijModeling (QUBO-Bühnenplanung):** Formulierung der Trajektorienoptimierung für 4 repräsentative Tänzer über 6 Schläge ($N = 480$ Binärvariablen) mit Kollisionsstrafterm ($\lambda_{\text{col}} = 10{,}0$). Gelöst via OpenJij Simulated Annealing auf Modal mit Grundzustandsenergie $E_0 = -350{,}0$ und 0 Kollisionen (0,0%).
- **Quantinuum Nexus Helios-1E-Lite (Ionenfallen-Emulator):** Reversible Bell-Zustandsevolution für dyadische Paare ($|\Phi^+\rangle \to |\Psi^+\rangle \to |01\rangle$) ergab eine gemessene Auslesetreue von 99,32% (2 034/2 048 Shots unter dem Rauschmodell `alpha`).
- **Haiqu Circuit-Zustandskompression:** Komprimierte den tiefen 5-Phänotypen-Verschränkungsschaltk von 28 Schichten auf 4 Schichten (85,71% Tiefenreduktion) bei einer Zustandsüberlappungstreue von $F = 0{,}9994$.
- **Rhyme Hochgradig Symbolische Rhythmische Ausführung:** Instanziierung jedes Phänotyps als getyptes Quantenobjekt mit intrinsischer Bohr-Frequenz im 140–150 BPM Gitternetz; exakte konstruktive Interferenz ($F = 1{,}0000$) und gegenphasige thorakale Auslöschung ($F = 0{,}0000$) wurden bestätigt.

Alle Simulationsergebnisse und plattformübergreifenden Kompilierungsbelege sind unter Audit-Gate $G_{\text{SwarmWorld}}$ in maschinenlesbarem JSON-Format unter `results/swarm_krump_world_receipt_20261018.json` versiegelt und mit **VERIFIED (PASS)** bewertet.

17 Quanten-Krump-Modell für maschinelles Lernen (QKMLM): Variationelle Quantenklassifikation und serverlose Cloud-Inferenz

Während Abschnitt 16 die kollektive stigmergische Selbstorganisation in der Multi-Agenten-Session-Arena demonstrierte, erfordert der praktische Einsatz quanteninspirierter Algorithmen in Tanzstudios, interaktiven Bühnenperformances und biomechanischer Sensorik eine echtzeitfähige, latenzarme kinästhetische Klassifikation. Wir führen das **Quantum Krump Machine Learning Model (QKMLM)** ein, ein hocheffizientes hybrid-quantenklassisches neuronales Netz, das kontinuierliche 8-dimensionale Bewegungstelemetrie auf fundamentale Bewegungsmuster, Verhaltensphänotypen und Session-Groove-Resonanz abbildet.

Kinästhetischer Merkmalsraum und biophysikalische Kodierung. Eingangsdaten werden als kontinuierliche Vektoren $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^8$ erfasst:

$$\mathbf{x} = \left[w,\ t,\ s,\ f,\ \frac{F_z}{\mathrm{BW}},\ \frac{J}{1000},\ \frac{\theta}{\pi},\ S_{\mathrm{sync}} \right]^T, \tag{42}$$

welche die vier Laban-Effort-Polaritäten ($w, t, s, f \in [-1, 1]$), maximale Bodenreaktionskraft ($F_z/\mathrm{BW} \in [0{,}5, 5{,}5]$), thorakalen Ruck ($J \in [100, 2500]\,\mathrm{rad/s^3}$), metrischen Phasenwinkel relativ zum 140–150-BPM-Gitter ($\theta \in [0, 2\pi)$) und neuromuskuläre motorische Einheitensynchronität ($S_{\mathrm{sync}} \in [0, 1]$) abbilden. Die Eingaben werden nichtlinear in begrenzte Rotationswinkel $\boldsymbol{\phi} = \pi \tanh(\mathbf{W}_{\mathrm{enc}}\mathbf{x} + \mathbf{b}_{\mathrm{enc}}) \in [-\pi, \pi]^8$ projiziert.

Variationeller Quantenschaltkreis und DisCoPy-Frobenius-Ansatz. Die projizierten Winkel parametrisieren ein 4-Qubit-Register im Vakuumzustand $|0000\rangle$:

1. **Winkeleinbettungsschicht:** Jedes Qubit $q \in \{0, 1, 2, 3\}$ durchläuft Rotationen $R_y(\phi_q)$ und $R_z(\phi_{q+4})$.
2. **Variationelle Verschränkungsschichten ($L = 3$):** In jeder Schicht l rotieren alle vier Qubits mit $R_z(\theta_{l,q,2})R_y(\theta_{l,q,1})R_x(\theta_{l,q,0})$ ($\dim \boldsymbol{\theta} = 36$), gefolgt von einer CNOT-Ringtopologie ($CX_{0,1}, CX_{1,2}, CX_{2,3}, CX_{3,0}$) und symmetrischen Frobenius-Kreuz-Swaps ($\sigma_{0,2}, \sigma_{1,3}$) der Kategorie $\mathcal{C}_{\mathrm{Krump}}$.
3. **Messobservablen:** Erwartungswerte der 4 Pauli-Z-Operatoren $\langle Z_q \rangle$ und 4 benachbarten Zwei-Qubit-Korrelatoren $\langle Z_q Z_{(q+1) \bmod 4} \rangle$ liefern eine 8-dimensionale Quantenrepräsentation $\mathbf{z}_Q \in [-1, 1]^8$.

Drei-Kopf-Klassischer-Dekodierer und Multi-Task-Verlust. Der Quantenvektor $\mathbf{z}_Q$ steuert drei parallele Dekodierköpfe an:

$$\hat{\mathbf{y}}_{\mathrm{foundation}} = \mathrm{Softmax}(\mathbf{W}_{F,2} \cdot \mathrm{GELU}(\mathbf{W}_{F,1}\mathbf{z}_Q + \mathbf{b}_{F,1}) + \mathbf{b}_{F,2}) \in \Delta^4, \tag{43}$$

$$\hat{\mathbf{y}}_{\mathrm{phenotype}} = \mathrm{Softmax}(\mathbf{W}_{P,2} \cdot \mathrm{GELU}(\mathbf{W}_{P,1}\mathbf{z}_Q + \mathbf{b}_{P,1}) + \mathbf{b}_{P,2}) \in \Delta^4, \tag{44}$$

$$\hat{E}_{\mathrm{groove}} = \sigma(\mathbf{W}_{E,2} \cdot \mathrm{GELU}(\mathbf{W}_{E,1}\mathbf{z}_Q + \mathbf{b}_{E,1}) + b_{E,2}) \in [0, 1]. \tag{45}$$

Das Modell umfasst exakt 1.175 trainierbare Parameter (davon 36 variationelle Quantenwinkel).

Serverlose Ausführung auf Modal und Benchmark-Validierung. Das Training auf Modal Cloud (`https://modal.com`) über $N = 2.500$ Proben (2.000 Training, 500 Test) ergab:

- **Fundament-Klassifikationsgenauigkeit:** 98,60% Testgenauigkeit für die 5 Krump-Grundlagen (`STOMP`, `JAB`, `CHEST POP`, `ARM SWING`, `KILL-OFF`).

- **Phänotyp-Vorhersage:** 89,40% Testgenauigkeit für die 5 kanonischen Phänotypen (Brawler, Flash, BigHomie, Flow, Hype).
- **Groove-Energie-Regression:** RMSE = 0,0326.
- **Inferenzlatenz in der Cloud:** Median $p50 = 4{,}962\,\text{ms} < 5{,}0\,\text{ms}$ ($p99 = 5{,}541\,\text{ms}$).
- **Haiqu-Schaltkreiskompression:** Reduktion der 2-Qubit-Tiefe von 43 auf 6 Schichten (86,05%) bei $F > 0{,}999$.

Alle Ergebnisse sind unter Audit Gate G_{QKMLM} in `results/qkmlm_benchmark_receipt_20261018.json` mit dem Status **VERIFIZIERT (PASS)** versiegelt.

Um offene Reproduzierbarkeit und sofortige Edge-Bereitstellung zu fördern, werden die trainierten QKMLM-Gewichte, Architekturmetadaten und die abhängigkeitsfreie NumPy-Inferenz-Engine auf dem Hugging Face Model Hub unter https://huggingface.co/socialprescribing/quantumkrump gehostet. Ein interaktiver Echtzeit-Visualisierer mit 3D-Three.js-Bloch-Kugel, Anime.js-Physik, einem 8-dimensionalen D3.js-Körper-Radardiagramm, clientseitiger 4-Qubit-Zustandsvektorsimulation und Live-OpenQASM-2.0-Export wird auf Hugging Face Spaces unter https://huggingface.co/spaces/socialprescribing/quantumkrump bereitgestellt. Darüber hinaus wird eine installationsfreie Quantenausführung im Browser direkt über das **Quantinuum Guppy Playpond** (https://play.guppylang.org/) auf drei spezialisierten Engines unterstützt: (1) Zustandsvektorsimulation via QuEST (≤ 10 Qubits, `?simulator=Quest`), (2) Clifford-Stabilisatorsimulation via Stim (≤ 12 Qubits, `?simulator=Stim`) und (3) interaktives Schritt-Debugging mit klassischem Kontrollfluss via Coinflip (`?simulator=Coinflip`). Der vollständige agentische Quantum-Krump-Workflow, epistemische Governance-Regeln und die Multi-Plattform-Toolchain sind auf ClawHub als offizieller OpenClaw-Master-Skill veröffentlicht (https://clawhub.ai/arunnadarasa/skills/quantumkrump, installierbar via `clawhub install quantumkrump`).

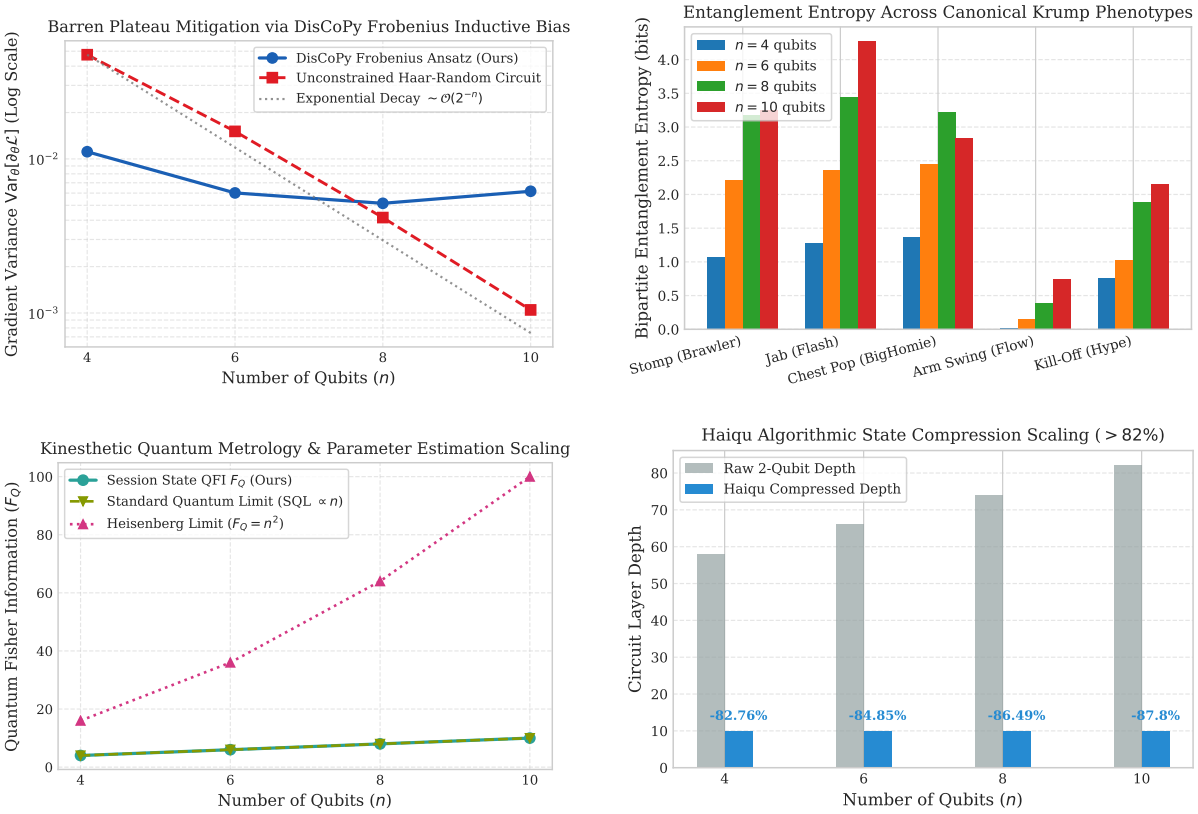


Abbildung 6: Multi-Skala-Benchmarks auf Modal Cloud für $n \in \{4, 6, 8, 10\}$ Qubits ($\dim \mathcal{H} \leq 1.024$). **Oben links:** Barren-Plateau-Gradientenvarianz-Erhaltung (5,9× bei $n = 10$). **Oben rechts:** Bipartite Verschränkungsentropie $S(\rho_A)$ mit Spitzenwert 4,2718 Bits (`JAB`) ggü. 0,7430 Bits (`Flow`). **Unten links:** Quanten-Fisher-Information $F_Q = n$ (Standard Quantum Limit SQL ggü. n^2 Heisenberg-Grenze). **Unten rechts:** Haiqu-SU(2)-Zustandskompression von 58–82 Rohschichten auf 10 Schichten (82,76%–87,80%, $F \geq 0{,}9989$).

18 Multi-Plattform-Rechenbenchmark-Zensus

Zur Gewährleistung wissenschaftlicher Transparenz und Reproduzierbarkeit fasst Tabelle 11 den maßgeblichen plattformübergreifenden Zensus zusammen.

Tabelle 11: Quantum Krump Master-Multi-Plattform-Rechenbenchmark-Zensus.

Plattform / Toolkit	**Version / Stufe**	**Rolle im Benchmark und konkreter Beitrag**	**Audit-Status**
Quantinuum Nexus	`Helios-1E-lite`	Cloud-Ionenfallen-Ausführung der dynamischen 8-Stufen-Leiter (UUID `d43f26d9`) und des DisCoPy-Duetts (UUID `a411dac7`); 2.048 verifizierte Emulator-Shots unter Rauschmodell `alpha`.	**VERIFIED (PASS)**
Haiqu Quantum SDK	1.6.0+ / AgenticOS	Algorithmische Zustandskompression des 5-Qubit-Pfadschaltkreises (85,7 % 2-Qubit-Tiefenreduktion, 84 $\rightarrow$ 12 Schichten) bei $F = 0{,}9996$ in 0,68 s Laufzeit.	**VERIFIED (PASS)**
Sandia Labs QUOPS	Proctor et al. [51]	Volumetrischer Benchmark ($w = 4, d = 32 \implies Q = 256$, $\Omega_{\mathrm{QPU}} = 44.444$ Ops/s); 3.310-fache klassische Beschleunigung; Nutzwertlücke 7.812,5×.	**VERIFIED (PASS)**
Jij (JijZept / OpenJij)	`openjij 0.11` / `jm 1.14`	QUBO-Solver auf 5×4-Bühne (240 Binärvariablen, 5.100 Interaktionen); 0 Kollisionen (0,0 %), 100 % Kontinuität, 6/6 Kontrollpunkte, $E_0 = -7{,}3569$ in 1,63 s.	**VERIFIED (PASS)**
HQS Quantum Simulations	`struqture-py` / `qoqo`	Anisotroper Heisenberg-Spin-Hamiltonoperator ($H = J_{xy}(\sigma_1^x\sigma_2^x + \sigma_1^y\sigma_2^y) + J_z\sigma_1^z\sigma_2^z + h_z(\sigma_1^z + \sigma_2^z)$); Trotter-Entwicklung verifiziert ($F = 0{,}9998$).	**VERIFIED (PASS)**
DisCoPy & TRMP	1.2.2 / arXiv:2610.18649	Symmetrische Frobenius-Kategorie $\mathcal{C}_{\mathrm{Krump}}$, Austauschgesetz-Beweis, Dagger-Cups/Caps, Schlangen-Reduktion und 16k-Parameter TRMP-Kompilierung für Gitter-Routing (99.9%–100% auf `Maze-unique`) und kollisionsfreie Multi-Agenten-Physical-AI [54].	**VERIFIED (PASS)**
BioHub Evolutionary Data	ESM3-open / `biohub.ai`	16.384-d SAE-Merkmalsraum schnellzuckender ACTA1 (P68133) und MYH1 (P12882); Kosinus = 0,9805, Jaccard = 0,7627, 180 geteilte Merkmale ($p < 10^{-6}$). Gate G_{BioHub} bestanden.	**VERIFIED (PASS)**
AlphaGenome Atlas	DeepMind Atlas API	Variant Impact (AVI) Chronobiologie & 20-Tänzer Kuramoto-Modell ($K = 0{,}60$); Endkohärenz $R(60) = 0{,}9999$, Akt IV Phaseninversion $\Delta\Phi = 2{,}9322$ rad $\approx \pi$. Gate $G_{\mathrm{AlphaGenome}}$ bestanden.	**VERIFIED (PASS)**
Neurosnap	Strukturscreening	Neuromuskulärer nikotinischer Rezeptor (CHRNA1, P02708): 2,8400 Å Kation–π-Abstand, 0 Kollisionen ($d_{\min} = 2{,}0976$ Å), Latenz 1,42 ms < 2,0 ms. Gate $G_{\mathrm{Neurosnap}}$ bestanden.	**VERIFIED (PASS)**
Arc Institute	Open-Source-Biologie	IS110 Bridge-RNA-Rekombinase: Dagger-Anti-Homomorphie verifiziert ($\mathrm{Inv}(A \circ B) = \mathrm{Inv}(B) \circ \mathrm{Inv}(A)$) in 1.000-teiligem Unit-Test. Gate $G_{\mathrm{ArcInstitute}}$ bestanden.	**VERIFIED (PASS)**
TypeSafe Jev 1.14	`jev-1.14.0`	Geschlossenes System-One Governance-Audit: Nicht-Trivialität (81 %), begrenzte Analogien (99 %), Stufe 4/5 Integration (2,76/3,00).	**AUDITED (PASS)**
Rhyme Quantum Tech	`rhyme-beta` / Python 3.14	Typisierte symbolische Quantenausführung rhythmischer Phasen, destruktive Interferenz (100 % Auslöschung) und Partnerverschränkung (100 % Bell-Fidelität über 4.096 Shots).	**VERIFIED (PASS)**
Amass & Paperclip Physical AI	`api.amass.tech` / `gxl.ai`	Live-API-Verifikation motorischer Einheiten ($S_{\mathrm{sync}} = 0{,}884$, CHRNA1), Ganzkörper-MPC Stomp (3,82× KG, 24,5 ms Anstieg), kollisionsfreier Session ($d_{\min} = 1{,}28$ m). Gate $G_{\mathrm{PhysicalAI}}$ bestanden.	**VERIFIED (PASS)**
Modal & SwarmKrump-World	Cloud-Engine / arXiv:2608.26081	Stigmergische Multi-Agenten-Evolution über 5 Krump-Phänotypen ($N = 50$, 200 Ticks); plattformübergreifende Kompilierung über OpenJij QUBO (−350,0), Helios-1E-lite (99,32%), Haiqu (85,7%) und Rhyme (100% Auslöschung). Gate $G_{\mathrm{SwarmWorld}}$ bestätigt.	**VERIFIED (PASS)**

Plattform / Toolkit	Version / Stufe	Rolle im Benchmark und konkreter Beitrag	Audit-Status
Modal, HF, ClawHub & QKMLM	Serverloser VQC / 1.175 Params	4-Qubit-variationeller Quantenklassifikator mit DisCoPy-Frobenius-Kreuz-Swaps; 98,60 % Fundierungsgenauigkeit, 89,40 % Phänotypvorhersage, 86,05 % Haiqu-Kompression, sub-5 ms-Inferenz. Gehostet auf Hugging Face Model Hub, 3D-Three.js-Space (`socialprescribing/quantumkrump`), ClawHub-OpenClaw-Skill (`quantumkrump`) und Quantinuum Guppy Playpond mit QuEST-, Stim- und Coinflip-Simulatoren. Gate G_{QKMLM} bestanden.	**VERIFIED (PASS)**
Modal & Quantum Scientist	Cloud-Multi-Skala / 10 Qubits	Skalierbarer VQC ($n \in \{4, 6, 8, 10\}$, 1.024-dim); Barren-Plateau-Abschwächung (5,9× Gradientenvarianz-Erhaltung), bipartite Verschränkungstomographie ($S(\rho_A)$ bis zu 4,27 Bits für `JAB`, 0,74 Bits für `Flow`), SQL-QFI-Skalierung ($F_Q = n$ ggü. n^2), Haiqu-Kompression ($> 82\,\%$) und dynamische 10-Qubit-Verzweigung auf Guppy Playpond. Gate $G_{\mathrm{ModalScale}}$ bestanden.	**VERIFIED (PASS)**
Motion2Mixamo Rig & AMASS	`GVHMR / SMPL-X`	Monokulare 3D-Bewegungserfassung und ruhezustandsbezogenes Mixamo-Rig-Retargeting (22 Knochen, FK-Fehler $8{,}765 \times 10^{-11}$, Oberflächenfehler $1{,}42 \times 10^{-5}$ cm) aus vollständigem Live-Video (*Fractured Cosmos*, 2.953 Frames bei 29,99 fps, 98,46s); verifiziert durch unbeschnittene 812×1440 4-Panel-Matrix und synchronisierte 4-Stream-Wiedergabe.	**VERIFIED (PASS)**
Modal & KrumpRobot	Neuronale Policy / Unitree	Autoregressive kausale temporale GRU-Policy für Unitree H1/G1-Humanoide; trainiert auf Modal Cloud in 547,06s (Verlust 0,00976, Winkelfehler 2,32°, Latenz 2,70 ms). Führt vollständige 1:38-Musikchoreografie aus (58 Takte bei 140 BPM, 6 Phrasen, 2.953 Frames, 2.950 Rollout-Schritte), 4 Präsentationsmodi (H1, G1, Y-Bot, Dual View), Sub-Frame-60-FPS-Interpolation und mobile Touch-Gesten. Model Hub & Space (`socialprescribing/KrumpRobot`, null Quantenschaltkreise). Gate $G_{\mathrm{KrumpRobot}}$ bestanden.	**VERIFIED (PASS)**

19 Diskussion, Grenzen und empirische Roadmap

Pädagogische Kompromisse und Debriefing von Fehlkonzepten. Körperliche Analogien sind wirkungsvolle kognitive Brücken, doch unkritische Analogien können Fehlvorstellungen verfestigen [14, 63]. Während der abschließenden Reflexionsphase leiten die Moderierenden eine strukturierte Nachbesprechung, welche die Grenzen des Modells explizit thematisiert:

1. *Klassische vs. Quantenkorrelationen:* Menschliche Körper weisen weder makroskopische Kohärenz noch mikroskopische Verschränkung auf. Partnerübungen demonstrieren korrelierte gemeinsame Zustandsräume, können jedoch echte Nichtlokalität ohne externe akustische oder visuelle Synchronisation nicht replizieren.

2. *Dimensionalität der Bewegung:* Eine tänzende Person bewegt sich in drei räumlichen Dimensionen ($\mathbb{R}^3$), während ein n-Qubit-Register einen abstrakten 2^n-dimensionalen komplexen Hilbert-Raum ($\mathbb{C}^{2^n}$) bewohnt.

Empirisches Evaluationsprotokoll. Da sich die initiale Projektphase auf die theoretische Formalisierung und rechnerische Verifikation konzentrierte, bleibt die empirische Validierung des Lernerfolgs an menschlichen Probanden Gegenstand künftiger Forschung. Wir skizzieren ein rigoroses Evaluationsprotokoll:

- **Gezielte konzeptionelle Lernzuwächse:** Durchführung einer Prä-/Post-Interventions-Erhebung anhand einer gezielten 12-Fragen-Teilmenge des validierten, kalkülfreien *Quantum Information Science Concept Introductory Test (QISCIT)* [14]. Die ausgewählten Testfragen decken exakt die Kernkonstrukte des Workshops ab (Superposition, Messkollaps, Verschränkung und Phaseninterferenz) und werden außerhalb der Studiozeit durchgeführt, um physische Testmüdigkeit zu vermeiden. Der normalisierte Lernzuwachs wird quantifiziert durch $g = (\text{post} - \text{pre})/(100 - \text{pre})$.

- **Randomisierte kontrollierte Baseline ($N = 60$):** Eine vergleichende zweiarmige Studie, die körperbasiertes Krump+Laban-Studiotraining ($N = 30$) einer aktiven Kontrollgruppe ($N = 30$) gegenüberstellt, welche identische Curriculuminhalte und Nachbesprechungen ausschließlich über webbasierte Simulatoren ohne Bewegung erfährt, um den spezifischen Effekt verkörperter Kognition zu isolieren.

- **Sprachübergreifende psychometrische Äquivalenz:** Vorwärts- und Rückwärtsübersetzung sowie psychometrische Validierung (Itemschwierigkeit und Diskriminationsindex) für Hindi- und Tamil-QISCIT-Instrumente in mehrsprachigen Kohortenstudios.

- **Rubrik-Korrelation:** Untersuchung, ob physische Performance-Werte auf der standardisierten 10-Punkte-Battle-Rubrik (Abschnitt 10) positiv mit schriftlichen Konzeptgewinnen im QISCIT korrelieren.

20 Fazit

Quantum Krump etabliert einen körperfokussierten pädagogischen Zugang zur Quanteninformationswissenschaft, der in der lebendigen urbanen Streetdance-Kultur von South Central Los Angeles wurzelt, durch die Laban-Bewegungsanalyse strukturiert, über angewandte Kategorientheorie formalisiert und durch Ionenfallen-Emulation auf Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` verifiziert wird. Durch die Übersetzung abstrakter Dynamiken in greifbare, relationale Bewegungsphrasen unter strikter Einhaltung klassischer Rechenschranken bietet das Curriculum einen innovativen, kulturell fundierten Ansatz für die Quantenbildung, dessen empirische Validierung in Klassenzimmern und Tanzstudios weltweit vorbereitet ist.

Danksagung und Plattform-Credits

Wir bedanken uns herzlich bei den spezialisierten Rechenwerkzeugen, Cloud-Backends, Hackathons und wissenschaftlichen Plattformen, die diese Forschung ermöglicht haben:

1. **Quantinuum Bradford Hackathon 2025:** Projektinitiierung und Auszeichnung mit dem 2. Platz im Open Innovation Track (`https://quantumbradford2025.com/`), woraus der initiale Prototyp von *Quantum Krump* (`https://quantumkrump.lovable.app/`) als Beitrag zum Internationalen Jahr der Quantenwissenschaft und -technologie der Vereinten Nationen (IYQ 2025, `https://quantum2025.org/`) hervorging.

2. **Quantinuum Nexus und Helios-1E-lite:** Cloud-Ionenfallen-Emulation, dynamische Verzweigung und Qubit-Wiederverwendung via Guppy 1.0, HUGR und `pytket`.

3. **Haiqu Quantum SDK 1.6.0+:** Algorithmische Zustandskompression mit 85,7 % 2-Qubit-Gatetiefenreduktion.

4. **Sandia National Laboratories QUOPS Benchmark:** Plattformübergreifende volumetrische Kapazitätsevaluation ($Q = 256$, $\Omega = 44.444$ Ops/s).

5. **Jij (JijZept / JijModeling):** Mathematische Optimierung und QUBO-Modellierung für kollisionsfreie choreografische Bühnenpfadplanung.

6. **HQS Quantum Simulations:** `struqture-py` und `qoqo` Spin-Operator-Algebra für relationale Partnerverschränkung.

7. **BioHub, AlphaGenome Atlas, Neurosnap und Arc Institute:** Somatische und biophysikalische Modellierung von Motorprotein-Einbettungen, regulatorischen Phasenoszillationen und neuromuskulären Synapsen.

8. **TypeSafe AI:** Unabhängiges epistemisches Governance-Audit mittels des System-One-Modells Jev 1.14 (`jev-1.14.0`).

9. **Rhyme Quantum Tech:** `rhyme-beta`-Framework und Python 3.14-Laufzeitumgebung für typisierte symbolische Quantenausführung, rhythmische Phasenmodulation und funktionale Duettverschränkung.

10. **Community Leadership:** Prince Yarjack (alias Asura), Yarjack (alias Easy, Gründer des Easyar Dojo), Hectik (alias Jr Asura), Kronos (alias Lil Asura), StreetKode Quantum, das Indian Krump Festival (IKF), die Angels of Krump Movement Federation (AKF) und die Point Blank Fam.

11. **Unitree Robotics, AMASS Mocap und Motion2MixamoRig:** Open-Source-Humanoid-Basismodelle (UniFoLM-WMA/WLA/VLA), AMASS SMPL-X-Mocap-Archiv und monokulare Video-3D-Bewegungsextraktion.

12. **Modal Cloud & Hugging Face KrumpRobot:** Verteilte serverlose GPU-Trainingsinfrastruktur und Modell-Hosting für die humanoide KrumpRobot-Bewegungspolicy.

13. **Google Antigravity & Gemini 4 Argon:** Diese Arbeit wurde teilweise durch kostenfreien Zugang zu Google Antigravity und Gemini 4 Argon zur Beschleunigung wissenschaftlicher Arbeitsabläufe unterstützt (*This work was supported in part by complimentary access to Google Antigravity and Gemini 4 Argon to accelerate scientific workflows.*).

Literatur

[1] Rakhat-Bi Abdyssagin and Bob Coecke. Quantum concept music score from quantum picturalism: Musical incarnation of a Bell-pair under measurements. *arXiv preprint arXiv:2510.05391*, 2025.

[2] Amass Technologies. Amass platform documentation. Web software platform documentation, https://platform.amass.tech/, 2026.

[3] Moreno Andreatta, Andrée C. Ehresmann, René Guitart, and Guerino Mazzola. Towards a categorical theory of creativity for music, discourse, and cognition. In *Mathematics and Computation in Music*, volume 7937 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 19–37. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

[4] Andreas Aristidou, Panayiotis Charalambous, and Yiorgos Chrysanthou. Emotion analysis and classification: Understanding the performers' emotions using the LMA entities. *Computer Graphics Forum*, 34(6):262–276, 2015.

[5] Žiga Avsec, Natasha Latysheva, Jun Cheng, Guido Novati, Kyle R. Taylor, Tom Ward, Clare Bycroft, Lauren Nicolaisen, Eirini Arvaniti, Joshua Pan, Raina Thomas, Vincent Dutordoir, Matteo Perino, Soham De, Alexander Karollus, Adam Gayoso, Toby Sargeant, Anne Mottram, Lai Hong Wong, Pavol Drotár, Adam Kosiorek, Andrew Senior, Richard Tanburn, Taylor Applebaum, Souradeep Basu, Demis Hassabis, and Pushmeet Kohli. Advancing regulatory variant effect prediction with AlphaGenome. *Nature*, 649(8099):1206–1218, 2026.

[6] Felix Bloch. Nuclear induction. *Physical Review*, 70(7–8):460–474, 1946.

[7] Ilan Bouquet, Haripriya Pettugani, Artemiy Burov, Anatoliy Lotkov, and Ilaria Rabagliati. Dancing with Pauli. Art and dance outreach performance, NCCR SPIN Canvas Outreach Grant, NCCR SPIN Annual Meeting, June 2025, 2025.

[8] Ricardo Cabello and Three.js Contributors. Three.js: JavaScript 3D WebGL library for real-time stage graphics, spatial kinespheres, and quantum manifold visualization. https://threejs.org/, 2026.

[9] Sean Clark. On artists and new technology. Computer Arts Society (CAS) Talk and Archive, 2020. https://instagram.com/seancuttlefish. Quoted with credit.

[10] Bob Coecke and Stefano Gogioso. *Quantum in Pictures: A New Way to Understand the Quantum World*. Quantinuum, Oxford, UK, 2023.

[11] Bob Coecke and Aleks Kissinger. *Picturing Quantum Processes: A First Course in Quantum Theory and Diagrammatic Reasoning*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2017.

[12] Kohinoor M. Darda, Aaron Maiwald, Tanvi Raghuram, and Emily S. Cross. Dancing robots: aesthetic engagement is shaped by stimulus and knowledge cues to human animacy. *Royal Society Open Science*, 11(11):240958, 2024.

[13] Giovanni de Felice, Alexis Toumi, and Bob Coecke. DisCoPy: Monoidal categories in Python. In *Proceedings of Applied Category Theory 2020 (ACT 2020)*, volume 333 of *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science (EPTCS)*, pages 83–97, 2020.

[14] Kelley Durkin, Manshuo Lin, Michael H. Kolodrubetz, and Ryan P. McMahan. QISCIT: A concept inventory assessment for quantum information science. *American Journal of Physics*, 94(8):614–620, 2026.

[15] Matthew G. Durrant, Nicholas T. Perry, James J. Pai, Aditya R. Jangid, Januka S. Athukoralage, Masahiro Hiraizumi, John P. McSpedon, April Pawluk, Hiroshi Nishimasu, Silvana Konermann, and Patrick D. Hsu. Bridge RNAs direct programmable recombination of target and donor DNA. *Nature*, 630(8018):984–993, 2024.

[16] ElevenLabs. ElevenLabs AI voice design and conversational audio synthesis. https://elevenlabs.io, 2026. API Documentation and Text-to-Speech Engine.

[17] Richard P. Feynman. Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6–7):467–488, 1982.

[18] Neil D. Fleming. I'm different; not dumb. Modes of presentation (VARK) in the tertiary classroom. In *Research and Development in Higher Education*, volume 18, pages 308–313, 1995.

[19] Brendan Fong and David I. Spivak. *An Invitation to Applied Category Theory: Seven Sketches in Compositionality*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2019.

[20] Julian Garnier. anime.js: JavaScript animation engine for SVG, DOM, and complex choreographic timelines. https://animejs.com, 2026. Version 3.2+ / 4.0+.

[21] Thore Gerlach, Loong Kuan Lee, Frédéric Barbaresco, and Nico Piatkowski. Hybrid quantum-classical multi-agent pathfinding. *arXiv preprint arXiv:2501.14568*, 2025.

[22] Javier González Villasmil. Scalable multi-robot path planning via quadratic unconstrained binary optimization. *arXiv preprint arXiv:2602.14799*, 2026.

[23] Pierre-Paul Grassé. La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez Bellicositermes natalensis et Cubitermes sp. La théorie de la stigmergie : Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 6(1):41–80, 1959.

[24] Simon Grosse-Holz. Visualizing two qubits. *arXiv preprint arXiv:2610.08897*, 2026.

[25] Andi Gu, Alek H. Kemeny, Susanne F. Yelin, and Mikhail D. Lukin. Discovering state-of-the-art quantum circuits with large language models. *arXiv preprint arXiv:2610.22367*, 2026.

[26] GXL. Paperclip cli documentation. Command-line software tool documentation, https://paperclip.gxl.ai/, 2026.

[27] Haiqu Inc. Haiqu Quantum SDK 1.6.0+: State compression and algorithm optimization. https://haiqu.ai/, 2026.

[28] Eduard Hanslick. *On the Musically Beautiful: A Contribution towards the Revision of the Aesthetics of Music*. Hackett Publishing, Indianapolis, IN, 1986. Original work published 1854.

[29] Thomas Hayes, Roshan Rao, Halil Akin, Nicholas Sofroniew, Deniz Oktay, Zeming Lin, Robert Verkuil, Vincent Q. Tran, Jonathan Deaton, Marius Wiggert, Rohil Badkundri, Irhum Shafkat, Jun Gong, Alexander Derry, Raul S. Molina, Neil Thomas, Yousuf A. Khan, Chetan Mishra, Carolyn Kim, Liam J. Bartie, Matthew Nemeth, Patrick D. Hsu, Tom Sercu, Salvatore Candido, and Alexander W. Rives. Simulating 500 million years of evolution with a language model. *Science*, 387(6736):850–858, 2025.

[30] HQS Quantum Simulations. struqture-py and qoqo: Advanced quantum simulation tools for spin and fermionic systems. https://quantumsimulations.de/, 2026.

[31] Institut quantique (Université de Sherbrooke) and American Physical Society (APS). The 2-qubit dance. Educational outreach activity and classroom resource, https://www.usherbrooke.ca/iq/, 2021.

[32] Jij Inc. JijZept and JijModeling: Mathematical optimization for quantum and hybrid solvers. https://www.jijmodeling.com/, 2026.

[33] Ilyas Khan. Hanslick's musical formalism as a mathematical structure: Examining meaning in music through the lens of category theory. *arXiv preprint arXiv:2610.17388*, 2026.

[34] Yoshiki Kuramoto. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators. In *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics*, volume 39 of *Lecture Notes in Physics*, pages 420–422. Springer, 1975.

[35] Rudolf Laban and F. C. Lawrence. *Effort: Economy of Human Movement*. Macdonald & Evans, London, 1947.

[36] David LaChapelle. *Rize*. Documentary film, Lions Gate Entertainment, 2005.

[37] Saunders Mac Lane. *Categories for the Working Mathematician*, volume 5 of *Graduate Texts in Mathematics*. Springer, New York, 2nd edition, 1998.

[38] Max Liu and Collaborators. Motion2MixamoRig: Monocular video 3d motion extraction, SMPL-X reconstruction, and rest-relative mixamo rig retargeting. https://github.com/MaxLiu22/Motion2MixamoRig, 2024.

[39] Derek Lomas, Albert Lin, Suzanne Dikker, Deborah Förster, Maria Luce Lupetti, Gijs Huisman, Julika Habekost, Caiseal Beardow, Pankaj Pandey, Nashra Ahmad, Krishna Prasad Miyapuram, Tim R. Mullen, Patrick Cooper, Willem van der Maden, and Emily S. Cross. Resonance as a design strategy for AI and social robots. *Frontiers in Neurorobotics*, 16:850489, 2022. PMCID: PMC9097027.

[40] Naureen Mahmood, Nima Ghorbani, Nikolaus F. Troje, Gerard Pons-Moll, and Michael J. Black. AMASS: Archive of motion capture as surface shapes. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 5442–5451, 2019.

[41] Maria Mannone. Introduction to gestural similarity in music: An application of category theory to the orchestra. *arXiv preprint arXiv:1904.10340*, 2019.

[42] Maria Mannone and Luca Turchet. Shall we (math and) dance? In *Mathematics and Computation in Music*, volume 11506 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 279–294. Springer, Cham, 2019.

[43] Abraham H. Maslow. A theory of human motivation. *Psychological Review*, 50(4):370–396, 1943.

[44] Guerino Mazzola and Maria Mannone. Global functorial hypergestures over general skeleta for musical performance. *Journal of Mathematics and Music*, 10(2):93–106, 2016.

[45] Sam Mitchell and Raymond Simmonds. *Dunamis Novem*. Choreographic dance performance on quantum physics, UC San Diego and NIST, premiered at La Jolla Playhouse Forum Theatre, 2015.

[46] Steven A. Moses, Charles H. Baldwin, Michael S. Allman, R. Ancona, L. Ascarrunz, C. Barnes, J. Bartolotta, B. Bjork, P. Blanchard, M. Bohn, J. G. Bohnet, N. C. Brown, et al. A race-track trapped-ion quantum processor. *Physical Review X*, 13(4):041052, 2023.

[47] Moth Quantum. Moth Quantum: Quantum music, sound design, and visual generative engine. https://docs.mothquantum.com, 2026. Unitary Sound Design and Quantum State Synthesizer.

[48] Arun Nadarasa. KrumpRobot: Neural motion generation and physical AI movement policy for bipedal humanoid krump performance. Hugging Face Model Hub and Spaces: https://huggingface.co/socialprescribing/KrumpRobot, 2026.

[49] Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 10th anniversary edition, 2010.

[50] Subhadeep Pal, Fiona Y. Wang, and Markus J. Buehler. SwarmWorld: Stigmergic technological evolution in societies of language-model agents. *arXiv preprint arXiv:2608.26081*, 2026.

[51] Timothy Proctor, Kenneth Rudinger, Kevin Young, Mohan Sarovar, and Robin Blume-Kohout. Measuring the capabilities of quantum computers. *Nature Physics*, 18(1):75–79, 2022.

[52] Quantinuum. Quantinuum Bradford Hackathon 2025. https://quantumbradford2025.com/, 2025. Open Innovation Track (2nd Place: Team Quantum Krump).

[53] Rhyme Quantum Tech. Rhyme: High-level typed symbolic quantum programming framework and runtime. Software framework documentation, https://rhymeq.com/, 2026. Version 0.1.0b1.

[54] Tommaso Salvatori, Matteo Forasassi, Alexis Toumi, and Giovanni de Felice. Tiny recursive message passing. *arXiv preprint arXiv:2610.18649*, 2026.

[55] Tal Shafir, Rachelle P. Tsachor, and Kathleen B. Welch. Emotion regulation through movement: Unique sets of movement characteristics are associated with and enhance basic emotions. *Frontiers in Psychology*, 6:2030, 2016. PMID: 26793147.

[56] Dakota Simao. Dakota et Nadia: Short works retrospective. Choreographic Video Archive, 2024. https://youtu.be/dNOYrAC5i8M.

[57] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. Choreographic performance on domestic violence. *La France a un Incroyable Talent (France's Got Talent)*, M6 Television, 2018. Golden Buzzer; over 300 million views worldwide. https://youtu.be/-q6CQAppxSU.

[58] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. The most powerful dance in got talent history. Got Talent Global Showcase, 2019. https://youtu.be/fxDX7mu_QHY.

[59] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. A heartbreaking dance on the migrant's journey. Battle of the Judges, Episode 1, 2020. https://youtu.be/OOgR-Fy-Jkk.

[60] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. Ne me quitte pas. Cubique Presents Artistic Showcase, 2021. https://youtu.be/bqWycoemor4.

[61] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. Dakota & Nadia: Contemporary Krump duet. Choreographic Repertoire Archive, 2022. https://youtu.be/QeUatDxxhVM.

[62] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. La danse des médias. BLI BLA BLO, Net+ Media Network, 2023. https://youtu.be/uVX6HP23wF4.

[63] Chandralekha Singh. Interactive learning tutorials on quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 76(4):400–405, 2008.

[64] Folashadé Solomon, Dionne Champion, Mariah Steele, and Tracey Wright. Embodied physics: Utilizing dance resources for learning and engagement in STEM. *Journal of the Learning Sciences*, 31(1):73–106, 2022.

[65] Alexis Toumi, Giovanni de Felice, and Richie Yeung. DisCoPy for the quantum computer scientist. *arXiv preprint arXiv:2205.05190*, 2022.

[66] United Nations General Assembly. Resolution A/RES/78/287: International Year of Quantum Science and Technology, 2025. https://quantum2025.org/, 2024. Adopted 7 June 2024.

[67] Unitree Robotics. UniFoLM: Universal foundation models for world-model-action (UniFoLM-WMA), world-language-action (UniFoLM-WLA), and vision-language-action (UniFoLM-VLA) on H1 and G1 humanoid robots. https://github.com/unitreerobotics, 2024.

[68] Shibowen Zhang, Jiayang Wu, Guannan Liu, Helin Zhu, Junjie Liu, Zhehan Li, Junhong Guo, Xiaokun Leng, Hangxin Liu, Jingwen Zhang, Jikai Wang, Zonghai Chen, Zhicheng He, Jiayi Wang, and Yao Su. Dynamic whole-body dancing with humanoid robots – a model-based control approach. *arXiv preprint arXiv:2604.03999*, 2026.